

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних і самостійних занять
із тягових розрахунків з дисципліни
«ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ»

(для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання
за напрямом підготовки 6.050702 – «Електромеханіка»
та слухачів другої вищої освіти за спеціальностями
«Електричний транспорт» і «Електричні системи і комплекси
транспортних засобів»)

Харків
ХНУМГ
2013

Методичні вказівки до практичних і самостійних занять із тягових розрахунків з дисципліни «Основи електричної тяги» (для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050702 – «Електромеханіка» та слухачів другої вищої освіти за спеціальностями «Електричний транспорт» і «Електричні системи і комплекси транспортних засобів») / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: Ю. В. Мінеєва – Х. : ХНУМГ, 2013 - 62 с.

Укладач: Ю. В. Мінеєва

Рецензент: к. т. н., доц. В. П. Андрійченко

Затверджено на засіданні кафедри ЕТ, протокол № 1 від 27.08.2013 р.

ВСТУП

Навчальною програмою дисципліни «Основи електричної тяги» передбачене проведення зі студентами практичних і самостійних занять. Ці методичні вказівки написані з метою надання допомоги студентам самостійно навчитися застосовуванню теоретичних положень основ електричної тяги і до рішення завдань з тягових розрахунків, а також виконанню контрольних завдань.

Матеріал цих вказівок відповідає тематиці курсової роботи й практичних занять з тягових розрахунків і складається з основних теоретичних положень, прикладів і завдань за кожною темою.

1. ВИПРЯМЛЕННЯ ПРОФІЛЮ ДІЛЯНКИ ШЛЯХУ

Для скорочення окремих елементів профілю й спрощення тягових розрахунків поздовжній профіль піддають обробці (випрямленню), що складається з двох операцій: випрямлення профілю та випрямлення кривих. Отриманий у результаті цих операцій профіль, що має менше число елементів і переломів у порівнянні з дійсним профілем колії, називають випрямленим.

Випрямлення профілю колії виконують у такій послідовності:

1. З дійсного профілю колії (рис.1) вибирають і групують суміжні елементи, що підлягають випрямленню. У випрямлену групу включають поруч лежачі елементи одного знака. Горизонтальні елементи відносять або до спусків, або до підйомів, як буде зручніше для розрахунку.

2. Визначають ухили i'_c , %, кожної випрямленої ділянки за формулою:

$$i'_c = \frac{\sum_{j=1}^m i_j \ell_j}{\sum_{j=1}^m \ell_j}, \quad (1)$$

де i_j й ℓ_j - відповідно ухили й довжини елементів профілю, які включені у випрямлену ділянку з m елементів.

Розрахунок заснований на принципі рівності робіт, затрачених на подолання опору від ухилу i'_c й на подолання опору від ухилів i_j на групі з m поєднаних елементів дійсного профілю.

При обробці профілю не можна включати у випрямлену групу елементи, що мають різкі відмінності у величині ухилів і довгі елементи. Це обумовлено необхідністю забезпечення рівноцінності ухилів по роботі (врахування витрати енергії на підгальмовуванням на шкідливих спусках, тобто на елементах шляху, у яких $w_i > w_0$) і максимального наближення кривої руху $V(l)$ на випрямленій ділянці до такої ж кривої руху на дійсному профілі (на великому ухилі як під час спуску, так і під час підйому швидкість руху буде менше, ніж на випрямленій ділянці з малим ухилом).

Тому довжина ℓ_j, m , кожного із випрямлених елементів з ухилом i_j повинна задовольняти емпіричній нерівності

$$\ell_j \leq 2000 / \Delta i, \quad (2)$$

де $\Delta i = |i_j - i_c'|$ – абсолютна різниця ухилу елемента, що перевіряється, і фіктивного ухилу випрямленої ділянки профілю, ‰.

Перевіряють звичайно всі елементи групи. Якщо при перевірці довжина елемента профілю не задовольняє умові (2), його в одну групу з іншими не поєднують.

3. Криві, що зустрічаються на випрямлених ділянках, замінюють фіктивними підйомами з ухилами i_c'' , ‰, обумовленими з умови рівності робіт, затрачуваних на подолання опору від кривих і фіктивного підйому, за формулою:

$$i_c'' = \frac{450}{\ell_c} \sum_{i=1}^n \frac{\ell_{kp.i}}{R_{kp.i}}, \quad (3)$$

де $\ell_c = \sum_{j=1}^m \ell_j$ – довжина випрямленої ділянки, м, що складає з **m** елементів профілю;

$\ell_{kp.i}$ и $R_{kp.i}$ – відповідно довжина й радіус *i*-ої кривої, м;

n - число кривих на випрямленій ділянці.

4. Результуючі випрямлені ухили i_c , ‰, випрямлених ділянок визначають за формулами:

при русі убік підйому
$$i_c = i_c' + i_c'',$$

при русі убік спуска
$$i_c = -i_c' + i_c''.$$

Знак i_c'' завжди позитивний, а знак i_c' залежить від напрямку руху: «+» - убік підйому, «-» - убік спуску.

Приклад. Спрямити профіль колії, наведений на рис.1.

№ елемента	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{i, \text{‰}}{\ell, \text{м}}$	$\frac{0}{100}$	200 \ 2	400 \ 3	5/300	10/500	6/ 200	$\frac{0}{300}$	400 \ 10
$\frac{R_{kp, \text{м}}}{\ell_{kp, \text{м}}}$	$\frac{150}{80}$	$\frac{300}{100}$	—	$\frac{100}{50}$	—	$\frac{150}{50}$	$\frac{200}{100}$	—

Рис.1 - Профіль ділянки шляху, що підлягає випрямленню

1. Вибираємо три випрямлені ділянки: в 1-й ділянці входять елементи 1, 2, 3; в 2-гу ділянку входять елементи 4, 5, 6; в 3-тю ділянку входять елементи 7 і 8.

2. Визначаємо ухили випрямлених ділянок

1	2	3
700 \ 2,3	7,7 / 1000	700 \ 5,7

$$i'_{c1} = \frac{0 \cdot 100 + 2 \cdot 200 + 3 \cdot 400}{100 + 200 + 400} = 2,3\text{‰};$$

$$i'_{c2} = \frac{5 \cdot 300 + 10 \cdot 500 + 6 \cdot 200}{300 + 500 + 200} = 7,7\text{‰};$$

$$i'_{c3} = \frac{0 \cdot 300 + 10 \cdot 400}{300 + 400} = 5,7\text{‰}.$$

При русі ліворуч, праворуч (у прямому напрямку)

$$i'_{c1} = -2,3\text{‰}; \quad i'_{c2} = +7,7\text{‰}; \quad i'_{c3} = -5,7\text{‰}.$$

При русі праворуч, ліворуч (у зворотному напрямку)

$$i'_{c1} = +2,3\text{‰}; \quad i'_{c2} = -7,7\text{‰}; \quad i'_{c3} = +5,7\text{‰}.$$

3. Перевіряємо задоволення довжин елементів реального профілю колії емпіричній нерівності (2) (рух ліворуч праворуч).

$$\ell_1 = 100 \leq \frac{2000}{|0 + 2,3|} = 870 ;$$

$$\ell_2 = 200 \leq \frac{2000}{|-2 + 2,3|} = 6660 ;$$

$$\ell_3 = 400 \leq \frac{2000}{|-3 + 2,3|} = 2860 ;$$

$$\ell_4 = 300 \leq \frac{2000}{|5 - 7,7|} = 740 ;$$

$$\ell_5 = 500 \leq \frac{2000}{|10 - 7,7|} = 870 ;$$

$$\ell_6 = 200 \leq \frac{2000}{|6 - 7,7|} = 1175 ;$$

$$\ell_7 = 300 \leq \frac{2000}{|0 + 5,7|} = 350 ;$$

$$\ell_8 = 400 \leq \frac{2000}{|-10 + 5,7|} = 465.$$

Висновок: довжини всіх елементів профілю ділянки шляху задовольняють нерівності (2) і обране угруповання елементів профілю у випрямлені ділянки 1, 2, 3 припустима.

4. Визначаємо фіктивні підйоми із крутістю i''_c :

$$i''_{c1} = \frac{450}{700} \left(\frac{80}{150} + \frac{100}{300} \right) = 0,57\text{‰};$$

$$i''_{c2} = \frac{450}{1000} \left(\frac{50}{100} + \frac{50}{150} \right) = 0,37\text{‰};$$

$$i''_{c3} = \frac{450}{700} \left(\frac{100}{200} \right) = 0,32\text{‰}.$$

5. Визначаємо результуючі ухили i_c випрямлених ділянок:

при русі ліворуч праворуч (у прямому напрямку)

$$i_{c1} = -i'_{c1} + i''_{c1} = -2,3 + 0,57 = -1,73\text{‰};$$

$$i_{c2} = i'_{c2} + i''_{c2} = 7,7 + 0,37 = 8,07\text{‰};$$

$$i_3 = -i'_{c3} + i''_{c3} = -5,7 + 0,32 = -5,38\text{‰};$$

(бажано округлити з точністю до десятих часток).

при русі праворуч ліворуч (у зворотному напрямку)

$$i_{c1} = i'_{c1} + i''_{c1} = 2,3 + 0,57 = 2,87\text{‰};$$

$$i_{c2} = -i'_{c2} + i''_{c2} = -7,7 + 0,37 = -7,33\text{‰};$$

$$i_3 = i'_{c3} + i''_{c3} = 5,7 + 0,32 = 6,02\text{‰};$$

(бажано округлити з точністю до десятих часток).

Випрямлений профіль колії наведений на рис. 2.

напрямок руху	ліворуч, праворуч (пряме)		
№ випрямленої ділянки	1	2	3
$\frac{i_{c,\text{‰}}}{\ell_{c,\text{м}}}$	700 \ 1,73	8,07 / 1000	700 \ 5,38
напрямок руху	праворуч, ліворуч (зворотне)		
№ випрямленої ділянки	1	2	3
$\frac{i_{c,\text{‰}}}{\ell_{c,\text{м}}}$	700 \ 2,87	7,33 / 1000	700 \ 6,02

Рис.2 - Випрямлений профіль колії при русі в прямому й зворотному напрямках

2. РОЗРАХУНОК ЕКВІВАЛЕНТНОГО, ЗА ВИТРАТОЮ ЕНЕРГІЇ, УХИЛУ ДІЛЯНКИ ШЛЯХУ

Еквівалентним, за витратою енергії, ухилом називають такий незмінний уздовж усього перегону (ділянки) ухил, на подолання якого затрачається енергія, рівна сумі витрат енергії на подолання ухилів (зміна потенційної енергії ЕРС) і кривих, втрат енергії в гальмах при підгальмовуванні на шкідливих спусках при русі по реальному профілю перегону:

$$i_3 = i_{cp} + \frac{\sum(i_{\sigma} - w_{o.cp})l_{\sigma} + \sum w_{кр} l_{кр}}{l_{пер}}, \quad (4)$$

або
$$i_3 = \frac{1}{\ell_{пер}} (\sum i_{нд} \ell_{нд} + \sum w_{кр} \ell_{кр} - \sum i_{\sigma} \ell_{\sigma} - w_{o.cp} \sum \ell_{\sigma}) , \quad (5)$$

де i_{cp} - середній ухил реального профілю перегону, знаходиться за виразом:

$$i_{cp} = \frac{1}{\ell_{nep}} (\sum i_{nd} \ell_{nd} - \sum i_{\sigma} \ell_{\sigma} - \sum i_B \ell_B) = \frac{1000 (h_k - h_n)}{\ell_{nep}}. \quad (6)$$

Тут i_{nd} і ℓ_{nd} , i_{σ} і ℓ_{σ} , i_B і ℓ_B – відповідно ухили й довжини підйомів, нешкідливих і шкідливих спусків; h_k і h_n – висоти кінцевого й початкового пунктів перегону (ділянки), м.

З формули (4) видно, що значення i_{σ} завжди більше значення i_{cp} , що визначає зміну потенційної енергії ЕРС, на величину, що відповідає втратам енергії в гальмах при підгальмовуванні на шкідливих спусках і в кривих на подолання додаткового опору $W_{кр}$.

Середнє за всіма перегонами значення питомого основного опору руху $W_{o,cr}$, Н/кН, визначають по кривих $w_{ox}(V)$ для їзди без струму (на вибігу) при швидкості V , на 10...15...15% перевищуючої середню (ходову) швидкість руху ЕРС на перегоні: $V_x = \ell_{nep} / t_x$.

Спуски називають шкідливими, на яких $|w_i| > (w_0)_{\max}$, де $(w_0)_{\max}$ – питомий основний опір руху при максимально припустимій на даному спуску швидкості V_{\max} . Тому що на таких спусках $(w_0)_{\max} - |w_i| < 0$, то при виключених двигунах рух поїзда буде прискорюватися і якщо його не підгальмовувати, поїзд може досягти швидкості, не припустимої за умовами безпеки руху. Тому доводиться застосовувати гальмування, що викликає додаткові втрати енергії в гальмах.

Дане визначення шкідливого спуска справедливо лише для спусків такої довжини, на яких поїзд встигає розігнатися до гранично припустимої швидкості. Нешкідливими називають спуски, для яких $|w_i| \leq (w_0)_{\max}$. На таких спусках при виключених двигунах поїзд буде сповільнювати свій рух або рухатися з рівномірною швидкістю, меншої за значенням максимально припустимої на даному спуску швидкості. На рис.3 показані криві залежностей $w_{ox}(V)$ для трамвая (крива 1) і тролейбуса (крива 2), для побудови яких використані відповідно вираження: $w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V^2$ і $w_{ox} = 16 + 0,004 \cdot V^2$. Розрахункові дані для побудови кривих $w_{ox}(V)$ наведені в табл.1.

Таблиця 1 – розрахункові дані для побудови кривих $w_{ox}(V)$

V, км/год	0	10	20	30	40	50	60	70
т р а м в а й								
w_{ox} , Н/кН	9	9,5	11	13,5	17	21,5	27	33,5
т р о л е й б у с								
w_{ox} , Н/кН	16	16,4	17,6	19,6	22,4	26	30,4	35,6

Залежності гранично припустимої швидкості руху на спусках $V_{\max}(i)$ представлені для трамвая й тролейбуса відповідно лініями 3 і 4. Ці залежності побудовані за даними обмеження швидкості на спусках, певним ПТЕ й наведеним у табл. 2. При виконанні тягових розрахунків залежності $V_{\max}(i)$ розраховують виходячи із заданого розрахункового гальмового шляху ℓ_{mp} й заданої характеристики питомої гальмової сили поїзда $w(V)$.

На рис. 3 криві $W_{ox}(V)$ перетинають лінії $V_{\max}(i)$ в крапках d і e, абсциси яких визначають найбільші спуски i_d для трамвая й i_e для тролейбуса, що допускають рух по них без підгальмовування при максимальних припустимих швидкостях $V_{\max d}$ і $V_{\max e}$. Спуски із крутістю $i > i_d$ для трамвая й $i > i_e$ для тролейбуса варто вважати шкідливими. Взагалі можна вважати шкідливими спуски, крутість яких перевищує для трамвая 10‰, а для тролейбуса 20‰.

Таблиця 2 – Обмеження швидкості в кривих і на спусках

Трамвай				
$V_{\max}, \text{км/ч}$	30	25	20	15
$i, \text{‰}$	-	$30 \leq i \leq 50$	$50 < i \leq 70$	$70 < i \leq 90$
$R_{kp}, \text{м}$	$R_{kp} > 100$	$75 < R_{kp} \leq 100$	$50 < R_{kp} \leq 75$	$R_{kp} \leq 50$
Тролейбус				
$V_{\max}, \text{км/год}$	40	35	30	-
$i, \text{‰}$	$40 \leq i \leq 50$	$50 < i \leq 70$	$70 < i \leq 90$	-

На рис.3 показано, що на спуску із крутістю $i_B = 30\text{‰}$ трамвай і тролейбус на вибігу без підгальмовування розігналися б відповідно до сталих швидкостей V_{VL} і V_{VK} , істотно перевищуючі припустимі значення $V_{\max a}$ и $V_{\max b}$, обумовлені ординатами крапок а й б перетинання вертикалі $i_B = 30\text{‰}$ і ліній $V_{\max}(i)$ для трамвая і тролейбуса. Для підтримки припустимих швидкостей руху на даному спуску трамвай і тролейбус необхідно підгальмовувати і в гальмах буде губитися питома енергія $(w_{iB} - w_{oxa})\ell_B$ в трамваї й $(w_{iB} - w_{oxb})\ell_B$ у тролейбусі, де $w_{iB} - w_{ox}$ - питома прискорювальна сила, ℓ_B - довжина шкідливого спуска. При тягових розрахунках використовують середнє по всіх перегонах значення питомого основного опору руху w_{oxcp} , що розраховується для певного типу ЕРС.

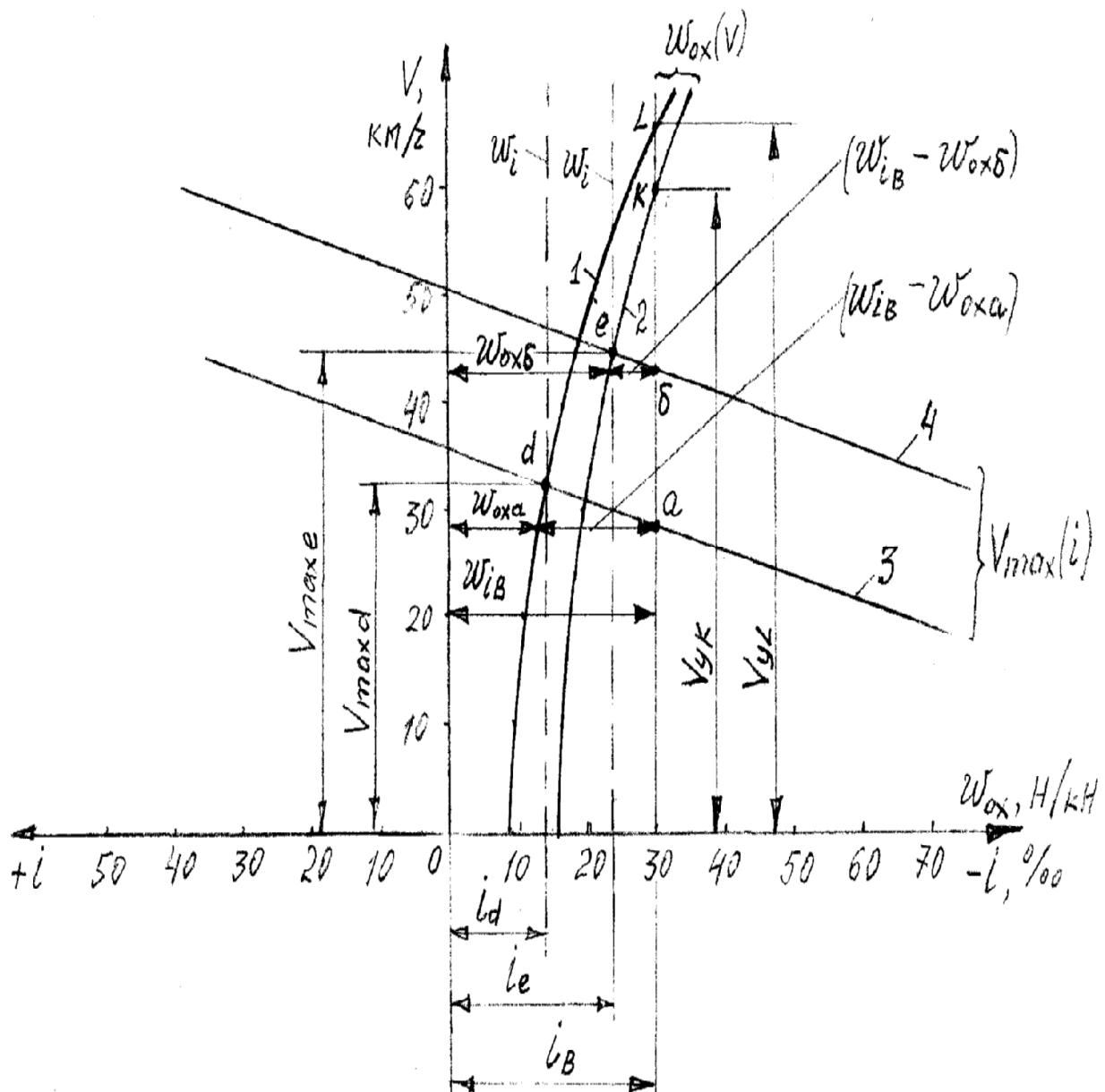


Рис.3 – Характеристики залежностей $w_{ox}(V)$ і $V_{max}(i)$ відповідно для трамвая (1 і 3) і тролейбуса (2 і 4)

Приклад. Визначити величину еквівалентного ухилу для дійсного профілю ділянки шляхи довжиною $\ell_{пер} = 475 м$.

№ елемента	1	2	3	4	5	6
$\frac{i, ‰}{\ell, м}$	4/50	40/125	$\frac{0}{100}$	50/25	50/8	100/50
$\frac{R_{кр, м}}{\ell_{кр, м}}$	$\frac{120}{40}$	—	—	—	$\frac{150}{30}$	—

$$\ell_{пер} = 475 м$$

Рис. 4 – Дійсний профіль ділянки шляху, для якого варто визначити $i_э$ при русі по ньому трамвая й тролейбуса в прямому й зворотному напрямках

При русі трамвая й тролейбуса по заданій ділянці шляху ліворуч, праворуч маємо: підйоми (елементи 1 і 2), горизонталь (елемент 3), нешкідливий спуск (елемент 5), шкідливі спуски (елементи 4 і 6), криві елементи 1 і 5.

Визначимо питомий опір руху трамвая в кривих елементах:

$$w_{кр.1} = 450 / R_{кр.1} = 450 / 120 = 3,75H / \kappa H;$$

$$w_{кр.5} = 450 / R_{кр.5} = 450 / 150 = 3,0H / \kappa H.$$

Знаходимо середнє по всій ділянці шляху значення питомого основного опору, прийнявши $V_x = 25 \text{ км/ч}$:

для трамвая $w_{o.ср} = 9 + 0,005(1,1V_x)^2 = 9 + 0,005(1,1 \cdot 25)^2 = 12,78H / \kappa H;$

для тролейбуса $w_{o.ср} = 16 + 0,004(1,1V_x)^2 = 16 + 0,004(1,1 \cdot 25)^2 = 19,025H / \kappa H.$

Еквівалентний ухил (ф-ла 5) для трамвая:

$$i_9 = \frac{1}{\ell_{неп}} (\sum i_{нд} \ell_{нд} + \sum w_{кр} \ell_{кр} - \sum i_{\sigma} \ell_{\sigma} - w_{o.ср} \sum \ell_B) =$$

$$\frac{1}{475} [(4 \cdot 50 + 40 \cdot 125) + (3,75 \cdot 40 + 3 \cdot 30) - 8 \cdot 50 - 12,78(50 + 100)] =$$

$$= \frac{1}{475} (5200 + 240 - 400 - 1917) = 6,57 \text{ ‰}.$$

Для тролейбуса додатковий опір руху в кривих можна не враховувати, тому для нього еквівалентний ухил визначають за виразом:

$$i_9 = \frac{1}{\ell_{неп}} (\sum i_{нд} \ell_{нд} - \sum i_{\sigma} \ell_{\sigma} - w_{o.ср} \sum \ell_B) =$$

$$\frac{1}{475} [(4 \cdot 50 + 40 \cdot 125) - 8 \cdot 50 - 19,025(50 + 100)] =$$

$$\frac{1}{475} [5200 - 400 - 2854] = 4,1 \text{ ‰}.$$

При русі трамвая і тролейбуса по заданій ділянці шляху праворуч, ліворуч маємо: підйоми (елементи 4, 5, 6), горизонталь (елемент 3), нешкідливий спуск (елемент 1), шкідливий спуск (елемент 2), криві елементи 1 і 5.

Еквівалентний ухил для трамвая

$$i_9 = \frac{1}{475} [(50 \cdot 100 + 8 \cdot 50 + 25 \cdot 50) + (3,75 \cdot 40 + 3 \cdot 30) - 4 \cdot 50 - 12,78 \cdot 125] =$$

$$= \frac{1}{475} [6650 + 240 - 200 - 1598] = 10,72 \text{ ‰}.$$

Еквівалентний ухил для тролейбуса

$$i_9 = \frac{1}{475} [(50 \cdot 100 + 8 \cdot 50 + 25 \cdot 50) - 4 \cdot 50 - 19,025 \cdot 125] =$$

$$= \frac{1}{475} [6650 - 200 - 2378] = 8,57 \text{ ‰}.$$

Для обох напрямків руху по ділянці шляху (перегону) значення еквівалентного ухилу знаходять як середнє арифметичне із двох напрямків:

$$\text{для трамвая} \quad i_{\Sigma} = \frac{i_{\Sigma.лр} + i_{\Sigma.обр}}{2} = \frac{6,57 + 10,72}{2} = 8,645\text{‰};$$

$$\text{для тролейбуса} \quad i_{\Sigma} = \frac{i_{\Sigma.лр} + i_{\Sigma.обр}}{2} = \frac{4,1 + 8,57}{2} = 6,335\text{‰}.$$

Висновок: значення еквівалентних ухилів для трамвая більше, ніж у тролейбуса, тому що середній основний питомий опір у трамвая менше, ніж у тролейбуса, і на шкідливих спусках у гальмах трамвая буде втрачатися більше енергії, чим у гальмах тролейбуса, крім цього, в трамваї мають місце додаткові втрати енергії при проходженні кривих елементів шляху.

3. РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА ТЯГОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЇЗДА

Тяговою називають характеристику, що встановлює залежність сили тяги двигуна F_k або поїзда F від швидкості V , тобто $F_k(V)$ або $F(V)$ при постійній напрузі $U = \text{const}$ і незмінних схемах електричних кіл двигунів і опорах їхніх елементів. При числі z_M тягових двигунів у поїзді й силі тяги F_k кожного маємо

$$F = z_M F_k. \quad (7)$$

Силу тяги F , а отже прискорення й швидкість поїзда регулюють за допомогою перемикачів у ланцюгах для зміни напруги на тягових двигунах і впливу на їхнє збудження.

Для побудови тягової характеристики необхідно мати електромеханічні характеристики двигунів, що віднесені до обода рушійних коліс, $V(I)$ и $F_k(I)$ при повному й ослабленому полі. Робоча частина тягової характеристики обмежена умовами зчеплення рушійних коліс із рейками або дорогою, надійною роботою двигунів по комутації й механічній міцності. При малих швидкостях найбільша сила тяги F_{\max} визначається або максимально допустимим струмом I_{\max} (обмеження за умовою стійкої комутації), або умовами зчеплення залежно від того, яке із цих умов дає менше значення сили тяги. Обмеження по зчепленню показане на рис. 5 лінією 2, а по струму I_{\max} - лінією 1.

Відповідно до ДЕРЖСТАНДАРТ 2582-81 «Машини електричні обертові тягові. Загальні технічні умови» тягові двигуни мають бути розраховані на найбільший допустимий струм, що дорівнює подвійному часовому струму ($I_{\max} = 2I_{\text{ч}}$), якщо в технічній документації, затвердженої у встановленому порядку, не встановлена інша кратність найбільшого струму, що допускається.

Для рейкового транспорту F_{\max} визначається обмеженням по зчепленню (рис.5, точка А), а для безрейкового – обмеженням по комутації, тобто найбільшим допустимим струмом, I_{\max} (тому що в цьому випадку $F_{\max.ком} < F_{\max.ц}$). Точка А тягової характеристики визначає максимальну потужність, що

розвивається тяговим двигуном. Лінія 3 відповідає обмеженню за максимально припустимою швидкістю V_{\max} , що дорівнює конструкційній швидкості $V_{\text{констр}}$ цього типу рухомого складу.

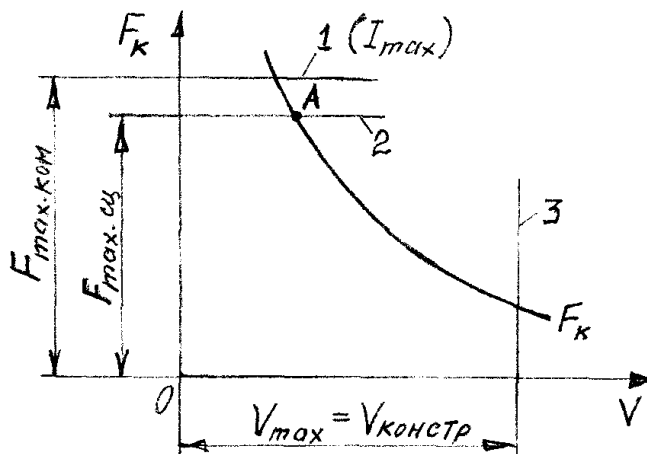


Рис. 5 - Обмеження тягової характеристики двигуна

Пуск поїзда бажано здійснювати з найбільшим припустимим пусковим струмом, $I_{n.\max}$. У цьому випадку збільшується пускова сила тяги й пускове прискорення, підвищується середня швидкість руху РС на перегоні й зменшуються втрати в пускових реостатах. Бажано підтримувати пусковий струм незмінним до виходу на характеристику $V(I)$ з максимальним ослабленням поля. При цьому до виходу на характеристику $V(I)$, що відповідає повному збудженню двигунів, залишаються практично незмінними пускова сила тяги F_n , пускове прискорення a_n і швидкість руху зростає в часі за лінійним законом $V = a_n t$.

Вибір пускових параметрів можна здійснити, виходячи із заданого значення середнього пускового прискорення a_n , а отже із середньої пускової сили тяги поїзда $F_n = m_{np} a_n + W_{o.c.p.}$, і подальшою їхньою перевіркою за умовам зчеплення та максимально допустимого струму I_{\max} або виходячи з максимальної пускової сили тяги, обумовленої за умовами зчеплення $F_{n.\max} = 1000 \psi G_{cц.пор}$, де $G_{cц.пор}$ - зчіпна вага порожнього РС, і подальшою перевіркою виконання обмежень $I_{n.\max} \leq 2I_{\text{ч}}$, $a_{n.\max} \leq a_{n.don} = 1,5 \dots 1,8 \text{ м/с}^2$.

Приклад. Розрахувати й побудувати тягову характеристику трамвайного моторного вагона типу КТМ-5М с власною вагою (вагою тари) $G_c = 185 \text{ кН}$ і тяговими двигунами змішаного збудження типу ДК-259Г-3.

Основні технічні дані тягового двигуна ДК-259Г-3: напруга, на яку виконана ізоляція, $U_c = 550 \text{ В}$; напруга на колекторі (затискачах двигуна) $U_d = 275 \text{ В}$; потужність на валу (корисна потужність) $P_{\text{ч}} = 45 \text{ кВт}$; частота обертання $n_{\text{ч}} / n_{\max} = 1220 / 4100 \text{ об/хв}$; струм годинного режиму $I_{\text{ч}} = 190 \text{ А}$.

Електромеханічні характеристики двигуна задані у вигляді табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристики двигуна ДК-259Г-3, які віднесені до обода колеса, при $U_d = 275\text{В}$, $D_k = 700\text{ мм}$, $\mu = 7,17$

I, А	$\alpha = 100\%$,	$I_{III} = 2A$	$\alpha = 50\%$,	$I_{III} = 0$
	V, км/год	F_k , Н	V, км/год	F_k , Н
0	48	-	-	-
50	27	1666	-	98
75	23	2940	67	880
100	21	3920	52,5	1770
150	19	6760	37	3430
200	17	9610	30	5684
250	15	12940	26	7840
300	14	16470	23	10290

На рис. 6 представлені характеристики $V(I)$, і $F_k(I)$ двигуна при повному й ослабленому полі, побудовані за даними табл. 3. Як правило, в умовах експлуатації використовують характеристики з максимальним ослабленням поля. Тому тягову характеристику вагона варто будувати по верхній швидкісній характеристиці $V_{on}(I)$ та по нижній характеристиці сили тяги $F_{k.on}(I)$.

Тягова характеристика будується, починаючи з моменту рушання з місця вагона ($V=0$), до швидкості $V_{max} = V_{констр}$. Для побудови частини тягової характеристики вагона при русі на реостатних позиціях (період пуску) треба визначити значення середньої пускової сили тяги вагона F_n , що підтримується постійним до швидкості V_n виходу на автоматичну характеристику $V_{mn}(I)$ при повному полі (т.В на рис.6). На позиціях ослабленого поля, як правило, підтримується приблизно такий же середній пусковий струм двигунів I_n , як і при пуску із включеними пусковими реостатами, а сила тяги двигунів при цьому зменшується від значення F_{kn} (т. В' на характеристиці $F_{knp}(I)$) до значення F'_{kn} (т. С' на характеристиці $F_{kop}(I)$).

Задамося значеннями середнього пускового прискорення вагона $a_n = 1,2\text{ м/с}^2$ і вагою вагона з пасажирями $G = 200\text{кН}$. Коефіцієнт інерції обертових частин вагона прийемо рівним $\kappa_u = (1 + \gamma) = 1,12$.

На горизонтальній і прямолінійній ділянці шляху діє тільки сила основного опору руху вагона, що визначаємо як середнє значення за період пуску під реостатами для середньої швидкості $V_{cp} = 15\text{ км/год}$:

$$W_{ocp} = Gw_{ocp} = G(5 + 0,005 \cdot V_{cp}^2) = 200(5 + 0,005 \cdot 15^2) = 1225\text{ Н}.$$

Середня пускова сила тяги вагона

$$F_n = m(1 + \gamma)a_n + W_{ocp} = 102 G(1 + \gamma)a_n + W_{ocp} =$$

$$102 \cdot 200 \cdot 1,12 \cdot 1,2 + 1225 = 28640\text{ Н} = 28,64\text{ кН}.$$

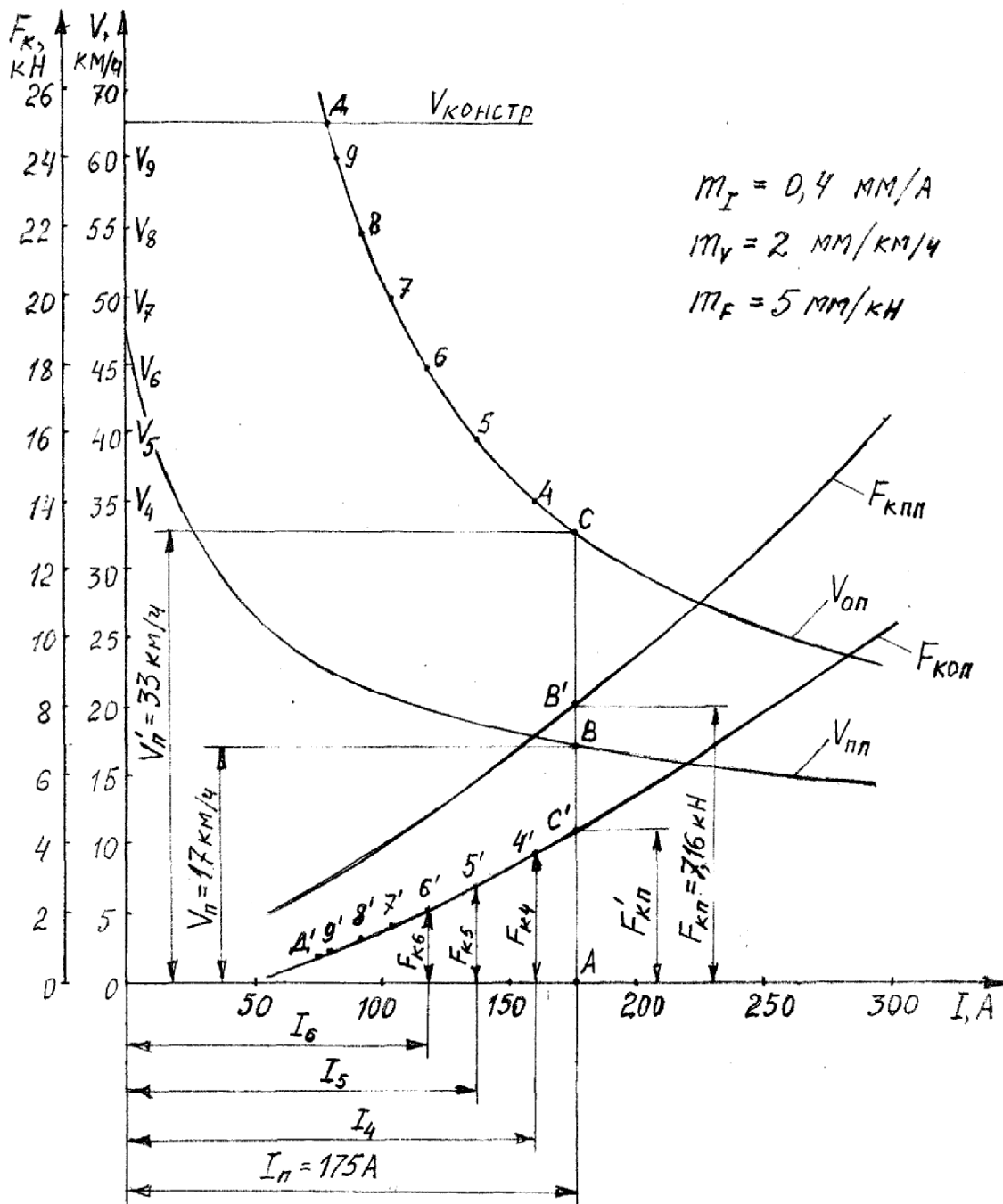


Рис.6 – Характеристики $V(I)$, $F_k(I)$ тягового двигуна ДК-259Г-3 при $U_d = 275\text{В}$, $D_k = 0,7\text{м}$, $\mu = 7,17$ з нанесенням режиму пуску

Середня пускова сила тяги одного двигуна

$$F_{кп} = F_n / z_m = 28,64 / 4 = 7,16 \text{ кН}.$$

За характеристикою $F_{кпн}(I)$ знаходимо середній пусковий струм двигуна $I_n = 175\text{А}$.

Перевіряємо пускову силу тяги за умовами зчеплення і по максимальному струмі, що допускається, I_{\max} двигуна. Максимальна пускова сила тяги вагона $F_{n \max}$ не повинна перевищувати максимальну силу зчеплення

$$F_{n \max} = F_n (1 + \kappa_F) \leq 10^3 G_{cy} \psi, \quad (8)$$

де κ_F - коефіцієнт нерівномірності пуску по силі тяги. Для автоматичної багатоступінчастої системи реостатного пуску можна прийняти $\kappa_F = 0,1$. G_{cy} – зчіпна вага вагона, що в моторного трамвайного вагона дорівнює повній вазі, тобто $G_{cy} = 200$ кН. Розрахунковий коефіцієнт зчеплення вагона ψ приймемо рівним 0,16. Після підстановки у вираження (8) прийнятих значень κ_F , G_{cy} і ψ , одержуємо:

$$F_{n \max} = 28640 \cdot 1,1 = 31500 < 10^3 \cdot 200 \cdot 0,16 = 32000, \text{ Н.}$$

Обмеження максимальної пускової сили тяги по зчепленню коліс вагона з рейками виконується. Для перевірки пускової сили тяги за максимальним струмом двигунів визначаємо максимальну пускову силу тяги одного двигуна

$$F_{kn \max} = F_{n \max} / 4 = 31500 / 4 = 7875 \text{ Н.}$$

За характеристикою F_{knp} (I) (див. рис.6) знаходимо $I_{II \max} = 180 \text{ А}$, тобто менше максимального струму якоря двигуна, що допускається

$$I_{\max} = 2I_{\psi} = 2 \cdot 190 = 380 \text{ А.}$$

Відповідно до рис.6 після виводу пускових реостатів вагон розганяється до пускової швидкості $V_n = 17 \text{ км/год}$ і при подальшому розгоні за рахунок ослаблення поля досягає швидкості $V_n' = 33 \text{ км/год}$ (точка С на характеристиці V_{on} (I)). При цьому сила тяги двигуна зменшується до значення $F_{kn}' = 4,4 \text{ кН}$ (точка С' на характеристиці F_{kon} (I)). Далі в діапазоні зміни швидкості від V_n' до $V_{\max} = V_{\text{констр}}$ (точка D на характеристиці V_{on} (I)) для різних значень струму знаходимо відповідні значення швидкості вагона і сили тяги двигуна та заносимо їх у графі 1,2,3 табл. 4. Відповідні значення сили тяги вагона $F = 4F_k$ заносимо в графу 4. Питомі значення сили тяги вагона визначаємо за формулою $f = F/G = F/200$, Н/кН. Результати обчислень заносимо в графу 5. Відкладаючи по осі ординат (рис. 7) значення f , а по осі абсцис відповідні їм значення V (графа 2), одержимо точки А(1), В(2), З(3), 4, ..., 9, D... Провівши через них криву, одержуємо тягову характеристику $f(V)$. Для значень швидкості, зазначених у графі 2 табл.4, за формулою $w_0 = 5 + 0,005 \cdot V^2$ розраховуємо значення питомого основного опору і заносимо в графу 6 табл. 4.

Таблиця 4 – Дані для побудови характеристики питомої сили тяги $f(V)$ і характеристики прискорюючої сили $f_o(V)$

№	I, А	V км/год	F_K , Н	F, Н	f , Н/кН	w_0 , Н/кН	f_o , Н/кН
	1	2	3	4	5	6	7
A(1)	175	0	7160	28640	143	5	138
B(2)	175	17	7160	28640	143	6,4	136,6
3(3)	175	33	4400	17600	88	10,4	77,6
4	160	35	3800	15200	76	11,1	64,9
5	136	40	2800	11200	56	13	43
6	119	45	2200	8800	44	15,1	28,9
7	104	50	1600	6400	32	17,5	14,5
8	92	55	1200	4800	24	20,1	3,9
9	80	60	900	3600	18	23	-5
D	75	65	700	2800	14	26,1	-12,1

При побудові кривих руху використовують характеристику питомої прискорюючої сили $f_o(V)$. Величина цієї сили дорівнює різниці питомої сили тяги вагона f і питомого основного опору W_0 , що випробовує вагон у режимі тяги на прямій і горизонтальній ділянці шляху. Значення сили f_o заносять у графу 7 табл. 4 і за цими значеннями будують криву $f_o(V)$ на рис. 7. Точка Е цієї кривої відповідає $f_o=0$ і $V=V_y$. Стала швидкість V_y є найбільшою швидкістю, що може розвинути вагон у режимі тяги на прямій і горизонтальній ділянці шляху.

Пускові параметри вагона можна визначити іншим способом. Знайдемо верхню межу коливання струму $I_{n \max}$ за умовами зчеплення. Приймаючи коефіцієнт зчеплення в питомому виді $\psi' = 10^3 \psi = 10^3 \cdot 0,16 = 160$ Н/кН, знайдемо максимальну силу тяги за умовою зчеплення за формулою:

$F_{n \max} = \psi' G_c = 160 \cdot 185 = 29600$ Н або $f_{n \max} = F_{n \max} / G = 29600 / 200 = 148$ Н/кН, а потім максимальну силу тяги одного двигуна: $F_{kn \max} = F_{n \max} / z_m = 29600 / 4 = 7400$ Н.

Тут G_c і G – відповідно зчіпна вага порожнього вагона й вага вагона з пасажирями.

Відповідно до характеристики $F_{knn}(I)$ (див. рис.6), знайденому значенню $F_{kn \max}$ відповідає струм $I_{n \max} = 177$ А. Отже, верхня межа коливань пускового струму буде дорівнює $I_{n \max} = 177$ А. Прийmemo коливання струму $\pm 5\%$ ($K_I = 0,05$). Тоді середній пусковий струм двигуна $I_n = I_{n \max} / (1 + \text{ДО } I) = 177 / (1 + 0,05) = 168,6$ А, а мінімальний струм $I_{n \min} = I_n (1 - K_I) = 168,6 \cdot 0,95 = 160,2$ А.

Перевіримо знайдене значення струму $I_{n \max}$ за умови $I_{n \max} \leq 2I_{\psi}$:

$177 < 2 \cdot 190 = 380$, тобто припустимо. Відповідно до характеристики $F_{knn}(I)$ (див.

рис.6) току $I_n = 168,6$ А відповідає середня пускова сила тяги $F_{kn} = 6,95$ кН.

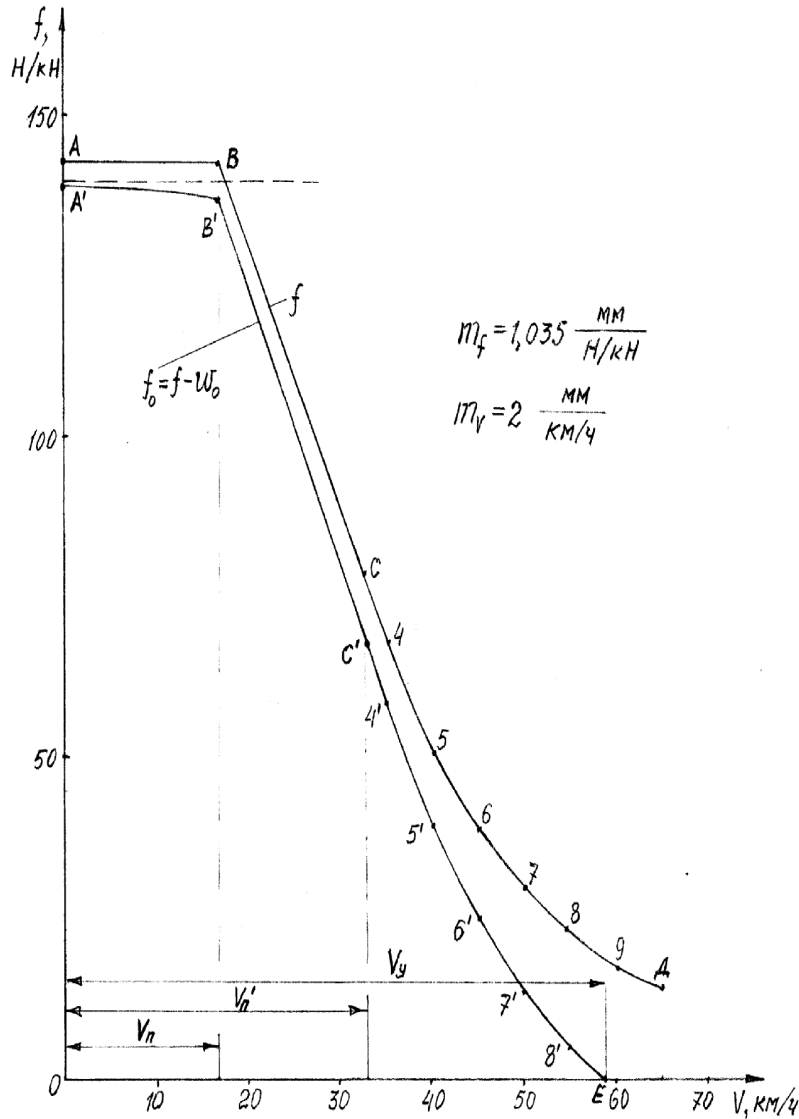


Рис. 7 – Характеристики $f(V)$, $f_o(V)$ трамвайного вагона типу КТМ-5М с тяговими двигунами ДК-259Г-3

Середня пускова сила тяги вагона $F_n = F_{кп} \cdot z_{.м} = 6,95 \cdot 4 = 27,8 \text{ кН}$.

Середня питома пускова сила тяги вагона

$$f_n = F_n / G = 27800 / 200 = 139 \text{ Н / кН}.$$

Відкладемо значення f_n на рис.7 штриховою лінією. Перевіримо знайдені значення максимальної й середньої сили тяги за умови прискорення, що допускається, на прямій горизонтальній ділянці. Питомий основний опір визначимо для середнього значення пускової швидкості $V_{cp} = 15 \text{ км/год}$ за формулою:

$$w_{0cp} = 5 + 0,005 \cdot V_{cp}^2 = 5 + 0,005 \cdot 15^2 = 6,125 \text{ Н/кН}.$$

Максимальне пускове прискорення

$$a_{n \max} = \frac{f_{n \max} - w_{0cp}}{102 \cdot \kappa_u} = \frac{148 - 6,125}{102 \cdot 1,12} = 1,242 \text{ м / с}^2,$$

середнє пускове прискорення

$$a_n = \frac{f_n - w_{ocp}}{102 \cdot \kappa_u} = \frac{139 - 6,125}{102 \cdot 1,12} = 1,163 \text{ м / с}^2,$$

що для одного вагонного поїзда з автоматичною системою керування припустимо. Таким чином, прийняті при розрахунку межі коливань струму і його максимальне значення цілком припустимі за умовами зчеплення, прискорення й співвідношення з годинним струмом.

4. ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА РУХ ПОЇЗДА

Витрата енергії на рух поїзда може бути визначений по кривих споживаного струму або аналітично шляхом розрахунку окремих тридцятимільйонної витрати енергії.

Визначення витрати енергії по кривих споживаного струму

Побудова кривій $I(t)$ споживаного одним двигуном струму на підставі швидкісних характеристик двигуна $V(I)$ при повному і ослабленому полі та кривій руху поїзда на перегоні $V(t)$ показане на рис.8. При реостатному пуску з постійним середнім пусковим струмом двигуна I_n споживаний всіма двигунами поїзда струм $I_{\text{л}} = z_n I$, де z_n – число паралельних вітвей схеми з'єднання двигунів.

Споживання поїздом струму розглядають при постійній напрузі контактної мережі U_k , рівній середньому його значенню, для якого побудовані криві руху поїзда.

Побудова відбувається на точках. Для ряду значень часу $t_1, t_2 \dots$ (рис.8) знаходять по кривій руху $V(t)$ відповідні значення швидкості $V_1 = V_n, V_2 = V_n'$, за час t_I роботи двигунів. При повторному включенні двигунів побудова кривій $I(t)$ виробляється аналогічно. Для значень швидкостей V_1, V_2, \dots по кривій $I(V)$ визначають значення струму $I_1 = I_n, I_2 = I_n, \dots$, споживаного двигуном. Знайдені значення струму I_1, I_2, \dots в обраному масштабі m_I , мм/А, відкладають як ординати точок шуканої кривої струму, абсциси якої рівні відповідно t_1, t_2, \dots . Дані для побудови кривої струму $I(t)$ представлені в табл. 5. У цій же таблиці наведені значення середнього струму двигуна I_{cp} і середнього струму поїзда $I_{лcp}$, споживаного за час Δt при $z_n = 2$, а також значення квадрата середнього струму двигуна I_{cp}^2 , які будуть використані при визначенні середньоквадратичного струму двигуна й перевірці двигуна з нагрівання.

Витрату енергії на рух поїзда W_t год при відсутності рекуперації енергії визначають за вираженням

$$\begin{aligned} A &= U_k (\sum I_{лcp} \cdot \Delta t) / 3600 = \\ &= 550 (400 \cdot 10 + 387,5 \cdot 1,5 + 362,5 \cdot 1,0 + 337,5 \cdot 1,0 + \\ &+ 312,5 \cdot 1,5 + 400 \cdot 3,5 + 360 \cdot 3,5 + 288 \cdot 3,5 + \\ &+ 228 \cdot 4,5) / 3600 = 550 \cdot 10444 / 3600 = 1596 \text{ Вт} \cdot \text{ч}. \end{aligned}$$

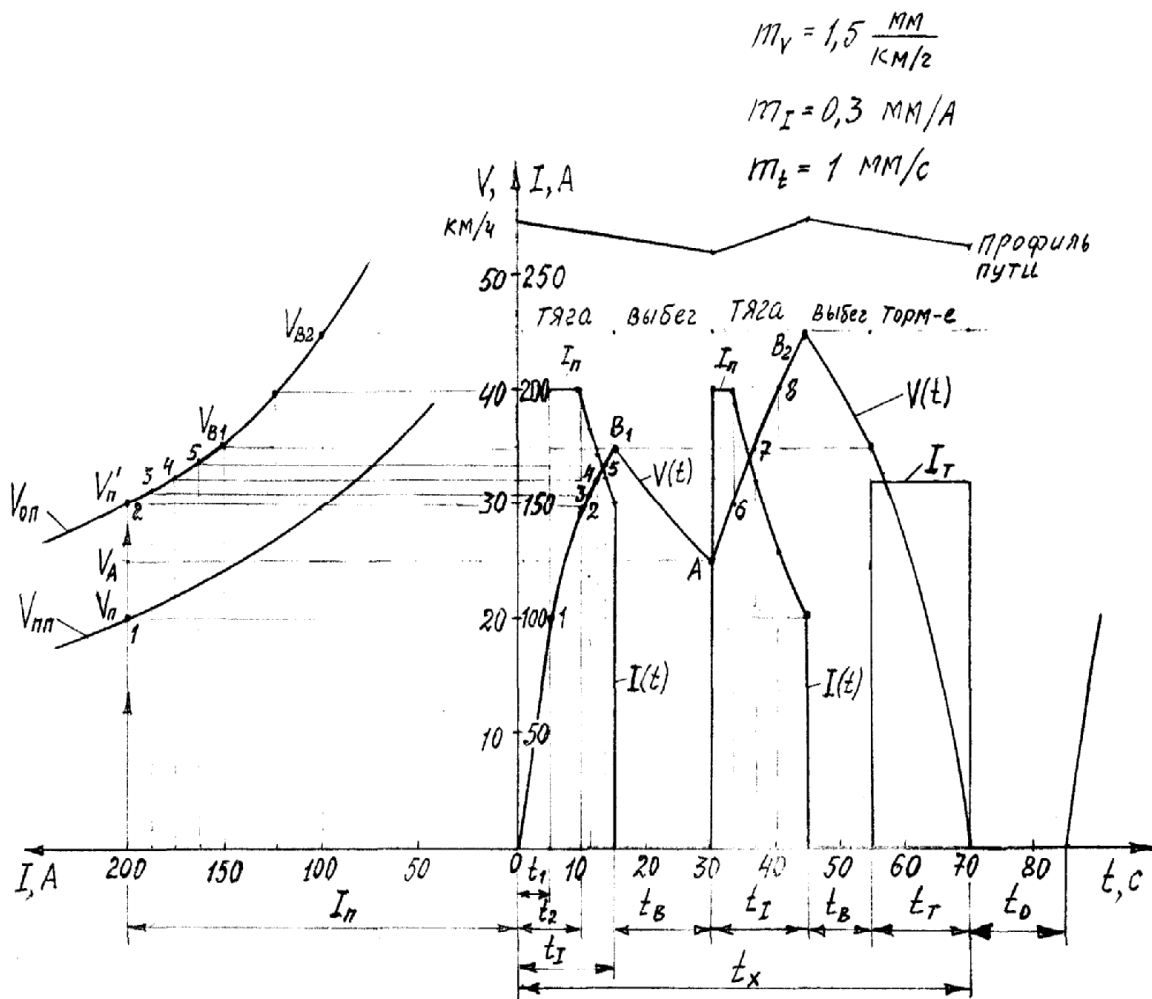


Рис.8 – Побудова кривій $I(t)$ споживаного тяговим двигуном струму

Для визначення повної витрати енергії варто врахувати витрату енергії на власні потреби поїзда і втрати електроенергії в контактній мережі й у перетворювачах тягової підстанції:

$$A_n = (A + A_{\text{сн}}) / (\eta_{\text{ТС}} \cdot \eta_{\text{ПСТ}}),$$

де $\eta_{\text{ст}}$ – середній ККД тягової мережі, дорівнює 0,93; $\eta_{\text{пст}}$ – середній ККД тягової підстанції, рівний 0,95; $A_{\text{сн}}$ – енергію, що витрачається на власні потреби, Вт·год, визначають за вираженням

$$A_{\text{сн}} = P_{\text{сн}} (t_x + t_0) / 3600.$$

Тут $P_{\text{сн}}$ – середня потужність навантаження власних потреб, Вт;

t_x – час ходу поїзда на перегоні, с; t_0 – час стоянки на зупинці, с.

Орієнтовно на одну одиницю рухомого складу різних типів трамвая і тролейбуса $P_{\text{сн}} = 1,5 \dots 3 \dots 3,5 \text{ кВт}$. Якщо прийняти $P_{\text{сн}} = 2000 \text{ Вт}$ і відповідно до рис. 8 $t_x = 70 \text{ с}$, $t_0 = 15 \text{ с}$, то одержуємо:

$$A_{\text{сн}} = 2000(70+15)/3600 = 47,2 \text{ Вт} \cdot \text{год};$$

$$A_n = (1596 + 47,2) / (0,93 \cdot 0,95) = 1860 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Таблиця 5 – Дані для побудови кривої струму $I(t)$

Точки кривій $V(t)$	t, с	Δt , с	V, км/год	I, А	$I_{л}$, А	$I_{л.ср}$, А	$I_{ср}$, А	$I_{ср}^2$, А ²
1	2	3	4	5	8	9	6	7
0	0		0	200	400	-	-	-
1	5	5	20	200	400	400	200	40000
2	10	5	30	200	400	400	200	40000
3	11,5	1,5	31	187,5	375	387,5	193,75	37539
4	12,5	1	32	175	350	362,5	181,25	32852
5	13,5	1	33	162,5	325	337,5	168,75	28477
V_1	15	1,5	35	150	300	312,5	156,25	24414
A	30	-	25	200	400	-	-	-
6	33,5	3,5	30	200	400	400	200	40000
7	37	3,5	35	160	320	360	180	32400
8	40,5	3,5	40	128	256	288	144	20736
V_2	45	4,5	45	100	200	228	114	12996

Для оцінки ефективності роботи рухомого складу вводиться поняття «питомої витрати електроенергії», Вт год/(кН км),

$$A_{n.уд} = A_n / (G \ell_{пер}),$$

де $G = mg$ - вага рухомого складу, кН;

$\ell_{пер}$ - довжина перегону, км.

Якщо прийняти $G = 250$ кН і $\ell_{пер} = 500$ м, тоді одержуємо

$$A_{n.уд} = 1860 / (250 \cdot 0,5) = 14,88 \text{ Вт} \cdot \text{год} / (\text{кН} \cdot \text{км}).$$

Аналітичний розрахунок витрати енергії на рух поїзда

Сутність цього методу полягає в тому, що розраховують окремі складові витрати електроенергії, а саме:

- 1) витрата енергії на подолання повного опору руху поїзда на перегоні A_w ;
- 2) витрата енергії в гальмівних пристроях A_T ;
- 3) витрата енергії в пускових резисторах $A_{n.p}$ (при контакторно-реостатному керуванні ЕРС).

Витрату електроенергії на рух поїзда вагою G , кН, на перегоні довжиною $\ell_{пер}$ м, на якому не роблять додаткове підгальмування і пуски, розраховують по формулі

$$A = A_{мх} / \eta_{ср} + A_{n.p} = (A_w + A_T) / \eta_{ср} + A_{n.p}, \quad (9)$$

де $A_{мх} = A_w + A_T$ - механічна робота, здійснювана тяговими двигунами, рівна сумі роботи сил опору руху і роботи, затраченої на зупинне гальмування; $\eta_{ср}$ - середнє значення КПД двигунів на ободі рушійних коліс. Складові витрат електроенергії, Вт год, розраховують за формулами:

$$A_w = G(w_{ox.cp} + w_{iэ})\ell_{nep} / 3600; \quad (10)$$

$$A_T = G \left[\frac{V_T^2}{2 \cdot 3,6^2} (102 \cdot K_u - \frac{w_T + w_{iT}}{a_T}) \right] / 3600; \quad (11)$$

$$A_{n.p} = K_{II} G \left[\frac{V_n^2}{2 \cdot 3,6^2} (102 \cdot K_u + \frac{w_n + w_{in}}{a_n}) \right] / 3600; \quad (12)$$

де $w_{ox.cp}$ – по всьому перегоні середнє значення питомого основного опору руху без струму, Н/кН;

$w_{iэ} = iэ$ – питомий опір руху від еквівалентного за витратою енергії ухилу $iэ$, ‰, уздовж усього перегону, Н/кН;

V_T – швидкість у момент на початку гальмування, км/год;

$K_{II} = 1 + \gamma$ – коефіцієнт інерції обертових частин поїзда;

w_T – середнє значення питомого основного опору руху під струмом на гальмовому шляху, Н/кН;

w_{iT} – питомий опір руху від ухилу, Н/кН, рівне середньому на гальмовому шляху ухилу i_T , ‰;

a_T – середня з на гальмовому шляху, м/с²;

K_{II} – коефіцієнт пуску (коефіцієнт пускових втрат);

V_n – швидкість наприкінці пуску, км/год;

w_n – середнє значення питомого основного опору руху під струмом за час пуску, Н/кН;

$w_{in} = i_n$ – питомий опір руху, Н/кН, від середнього за період пуску ухилу i_n , ‰;

a_n – середнє прискорення на пусковому шляху, м/с².

Приклад. Розрахувати витрати електроенергії на рух поїзда на заданому перегоні при русі ліворуч, праворуч

$\frac{i, \text{‰}}{\ell, \text{м}}$	100 \ 10	150 \ 35	$\frac{0}{150}$	7/ 200
$\frac{R_{кр, м}}{\ell_{кр, м}}$	_____	_____	$\frac{50}{50}$	_____

Вихідні дані: ЕРС – трамвай, $G=200$ кН, $\ell_{nep}=600$ м, $t_x=90$ с, $V_T=25$ км/год, $V_n=18$ км/год, $a_n=1,5$ м/с², $a_T=1,3$ м/с², $K_{II} = (1 + \gamma) = 1,125$, $\eta_{cp}=0,92$, $K_n=1$.

Визначаємо еквівалентний за витратою енергії ухил

$$i_{\text{э}} = \frac{1}{\ell_{\text{неп}}} (i_{\text{нд}} \ell_{\text{нд}} + w_{\text{кр}} \ell_{\text{кр}} - i_{\text{б}} \ell_{\text{б}} - w_{\text{ox.ср.}} \ell_{\text{Б}}) =$$

$$\frac{1}{600} (7 \cdot 200 + 9 \cdot 50 - 10 \cdot 100 - 12,5 \cdot 150) =$$

$$\frac{1}{600} (1400 + 450 - 1000 - 1875) = -\frac{1025}{600} = -1,7\text{‰}.$$

Тут:

$$w_{\text{ox.ср.}} = 9 + 0,005 \cdot (1,1 \cdot V_x)^2 = 9 + 0,005 \left(1,1 \frac{\ell_{\text{неп}}}{t_x} 3,6\right)^2 =$$

$$= 9 + 0,005 \left(1,1 \frac{600}{90} 3,6\right)^2 = 9 + 0,005 \cdot 700 = 12,5 \text{ Н/кН};$$

$$w_{\text{кр}} = 450 / R_{\text{кр}} = 450 / 50 = 9 \text{ Н/кН}.$$

Витрата енергії на подолання повного опору руху трамвая

$$A_w = G(w_{\text{ox.ср.}} + w_{i\text{э}}) \ell_{\text{неп}} / 3600 = 200(12,5 - 1,7)600 / 3600 =$$

$$= 200 \cdot 10,8 \cdot 600 / 3600 = 360 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Витрата енергії в гальмах при зупинці поїзда

$$A_T = \frac{G}{3600} \cdot \frac{V_T^2}{2 \cdot 3,6^2} \left(102 \cdot K_{\text{II}} - \frac{w_T + w_{iT}}{a_T}\right) =$$

$$= \frac{200}{3600} \cdot \frac{25^2}{2 \cdot 3,6^2} \left(102 \cdot 1,125 - \frac{6,5 + 7}{1,3}\right) = 140 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

$$\text{Тут } w_T = w_{\text{о.ср.}} = 5 + 0,005(0,7 \cdot V_T)^2 = 5 + 0,005(0,7 \cdot 25)^2 = 6,5 \text{ Н/кН};$$

$$w_{iT} = i_T = 7 \text{ Н/кН}, \text{ тому що гальмовий шлях } \ell_T = \frac{V_T^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot a_T} = \frac{25^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot 1,3} = 18,5 \text{ м}$$

перебуває в межах довжини підйому з ухилом $i = 7\text{‰}$.

Витрата енергії в пускових резисторах при пуску поїзда

$$A_{n.p} = \frac{\kappa_n \cdot G}{3600} \cdot \frac{V_n^2}{2 \cdot 3,6^2} \left(102 \cdot K_{\text{II}} + \frac{w_n + w_{in}}{a_n}\right) =$$

$$= \frac{1 \cdot 200}{3600} \cdot \frac{18^2}{2 \cdot 3,6^2} \left(102 \cdot 1,125 + \frac{5,79 - 10}{1,5}\right) = 78 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

$$\text{Тут } w_n = w_{\text{о.ср.}} = 5 + 0,005(0,7 \cdot V_n)^2 = 5 + 0,005(0,7 \cdot 18)^2 = 5,79 \text{ Н/кН};$$

$$w_{in} = i_n = -10 \text{ Н/кН}, \text{ тому що пусковий шлях}$$

$$\ell_n = \frac{V_n^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot a_n} = \frac{18^2}{2 \cdot 12,96 \cdot 1,5} = 8,1 \text{ м} \text{ перебуває в межах довжини}$$

спуска з ухилом $i = -10\text{‰}$.

Витрата енергії на рух поїзда по перегоні:

$$A = \frac{A_w + A_T}{\eta_{\text{ср}}} + A_{np} = \frac{360 + 140}{0,92} + 78 = 621 \text{ Вт} \cdot \text{ч},$$

$$A_{y\partial} = \frac{A}{G\ell_{\text{пер}}} = 621/(200 \cdot 0,6) = 5,67 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{кН} \cdot \text{км}).$$

До витрати енергії на рух поїзда необхідно додати витрату її на власні потреби поїзда, яку можна розрахувати за формулою:

$$A_{\text{сн},y\partial} = \frac{10^3 \div P_{\text{сн}}}{GV_{\text{сн}}} = \frac{10^3 \cdot 2}{200 \cdot 2057} = 0,486 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{кН} \cdot \text{км}).$$

Тут $P_{\text{сн}} = 2 \text{ кВт}$ – потужність навантаження власних потреб;

$G = 200 \text{ кН}$ – вага трамвая;

$V_{\text{сн}}$ – швидкість повідомлення на перегоні:

$$V_{\text{сн}} = \frac{3,6 \cdot \ell_{\text{пер}}}{t_x + t_0} = \frac{3,6 \cdot 600}{90 + 15} = 20,57 \text{ км/год.}$$

Загальна питома витрата енергії $A_{\text{н},y\partial}$, Вт·год/(кН·км), віднесена до первинної сторони тягових підстанцій,

$$A_{\text{н},y\partial} = \frac{K_A}{\eta_{\text{ТС}} \cdot \eta_{\text{ПТС}}} (A_{y\partial} + A_{\text{сн},y\partial}) = \frac{1,1}{0,93 \cdot 0,95} (5,67 + 0,486) = 7,66 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{кН} \cdot \text{км}}.$$

Тут за допомогою коефіцієнта $K_A = 1,1$ врахована витрата енергії на додаткові підгальмовування та пуски, можливі при русі поїзда.

5. РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА КРИВИХ РУХУ

Розрахунок і побудова кривих руху поїзда заснований на інтегруванні рівнянь руху поїзда, що зв'язують між собою змінні V , l і t у диференціальній формі.

Практично інтегрують рівняння руху методом кінцевих збільшень, сутність якого полягає в заміні нескінченно малих збільшень dV , dt , dl кінцевими збільшеннями ΔV , Δt , Δl . Цей метод придатний при будь-якій формі кривої рівнодіючої сили $f_D(V)$ і містить у собі графоаналітичні способи й графічні, що відрізняються один від одного прийомами визначення Δt і Δl . При графоаналітичних способах для кожного інтервалу ΔV обчислюють Δt і Δl й по них вичерчують криві рухи. Графічні способи відрізняються тим, що Δt і Δl не обчислюють, а знаходять геометричними побудовами у вигляді відрізків ліній у певних масштабах. Ці способи мають багато різновидів. Під графоаналітичним способом звичайно мають на увазі ту його модифікацію, при якій дійсну криву $f_D(V)$ заміняють східчастою лінією при допущенні, що рівнодіюча сила залишається постійною й рівної її середньому значенню $f_{\text{Дср}}$ в кожному розглянутому інтервалі швидкості ΔV . Розрахунок Δt і Δl при вимірі швидкості V у км/год роблять за формулами:

$$\Delta t_n = \frac{28,3(1 + \gamma)\Delta V_n}{f_{\text{Д.ср.н}}}, \text{ с}; \quad (13)$$

$$\Delta \ell_n = V_{cp.n} \cdot \Delta t_n / 3,6, \text{ м}, \quad (14)$$

де $f_{д.ср.н}$ - значення питомої рівнодіючої сили, Н/кН, для будь-якого монотонно, що змінюються ділянки, кривій $f_d(V)$, що відповідає середньої швидкості $V_{ср.н}$ в n-ом інтервалі ΔV_n для послідовного ряду інтервалів швидкості ΔV .

Інтервали ΔV вибирають більшими для пологих ділянок кривій $f_d(V)$ і істотно меншими для крутих її частин. Абсциси точок перелому кривих $f_d(V)$, варто приймати як границі суміжних інтервалів ΔV , що збільшує точність розрахунку. Криві руху при цьому способі будують по точках.

Приклад. Розрахувати й побудувати графоаналітичним способом криві руху $V(l)$ і $t(l)$ на перегоні з постійним ухилом.

Вихідні дані: тип ЕРС – трамвайний моторний вагон КТМ – 5М з тяговими двигунами ДК-259Г-3, вага $G=200$ кН, середнє пускове прискорення $a_n=1,2$ м/с², коефіцієнт інерції обертових частин вагона $\kappa_u = (1 + \gamma) = 1,12$, ухил $i=5\%$, довжина перегону $\ell_{пер} = 400$ м, характеристики прискорюючої сили $f_0(V)$, що сповільнює сили $b_0(V)$ й сили опору руху $w_{0x}(V)$ представлені на рис. 9. Характеристика $f_0(V)$ побудована на підставі даних графі 7 табл.4 у масштабах $m_f = 0,92$ мм/(Н/кН) і $m_v = 2$ мм/(км/год). У тих же масштабах побудовані характеристики $b_0(V)$ й $w_{0x}(V)$ за даними табл.6.

Таблица 6 - Дані для побудови характеристик $b_0(V)$ і $w_{0x}(V)$

V, км/год	0	10	20	30	40	50	60	70
$w_{0x} = 9 + 0,005V^2$, Н/кН	9	9,5	11	13,5	17	21,5	27	33,5
$w_o = 5 + 0,005V^2$, Н/кН	5	5,5	7	9,5	13	17,5	23	29,5
$b = 0,8f_n$, Н/кН	114,4	114,4	114,4	114,4	114,4	114,4	114,4	114,4
$b_o = b + w_o$, Н/кН	119,4	119,9	121,4	123,9	127,4	131,9	137,4	143,9

Для обліку профілю переносимо початок координат на рис. 9 нагору на відрізок $OO_1 = i m_f = 5 \cdot 0,92 = 4,6$ мм і проводимо горизонтальну лінію $O_1O'_1$, від якої повинні відлічуватися значення рівнодіючої сили $f_{д.ср.}$. Максимальна швидкість руху V_{max} рівняється сталої швидкості руху V_y і становить 55 км/год. Ця швидкість визначається абсцисою точки А перетинання кривої $f_0(V)$ із прямий $O_1O'_1$. Розрахунок і побудова кривих руху починають з моменту

рушення поїзда при $V=0$. Результати розрахунків записані в табл.7, за якими на рис.10 побудовані криві руху $V(l)$ і $t(l)$ на перегоні довжиною 400 м.

Спочатку були розраховані координати точок кривих $V(l)$ і $t(l)$ для режиму тяги від $V=0$ до $V=V_y=55$ км/год з використанням кривої $f_0(V)$ на рис. 9. Перший інтервал швидкості ΔV_1 був узятий рівним значенню пускової швидкості $V_{п}=17$ км/год, тому що на цьому інтервалі діюча сила $f_d = f_0 - w_i$ змінюється незначно. Далі ΔV приймалися рівними 6, 5, 4 і 3 км/год, а при наближенні до швидкості $V_y - 2$ км/год. Потім були розраховані координати точок кривих руху для режиму гальмування від значення $V=0$ до $V_T = 30$ км/год з використанням кривої $b_0(V)$ й далі в тім же зворотному порядку розраховані координати точок кривих руху на вибігу від швидкості $V_T=30$ км/год до $V=45$ км/год з використанням кривій $w_{ox}(V)$. Для більшої швидкості вести розрахунок недоцільно, тому що при $V=45$ км/год сумарна довжина шляху

$$\ell_I + (\ell_T + \ell_B) = 1530 + 265,43 = 418,43 > \ell_{пер} = 400 \text{ м.}$$

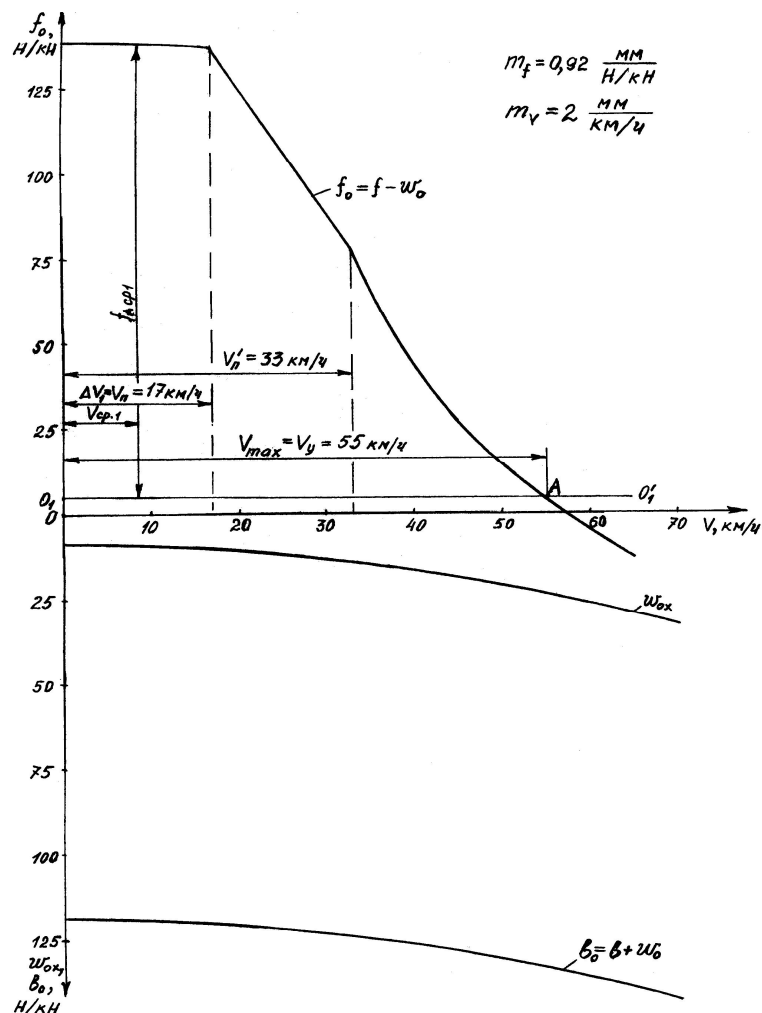


Рис. 9 – Характеристики $f_0(V)$, $b_0(V)$, $w_{ox}(V)$ трамвайного вагона КТМ-5М із ТЕД ДК-259Г-3

Таблиця 7 – Результати графоаналітичного розрахунку кривих руху поїзда $V(\ell)$ і $t(\ell)$

Режим руху	№п/п	V, км/год	ΔV , км/год	V_{cp} , км/год	$f_{o,cp}$, Н/кН	Δt , с	t, с	Δl , м	l , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тяга	0	0	-	-	-	-	0	-	0
	1	17	17	8,5	132,3	4,07	4,07	9,61	9,61
	2	23	6	20	119,7	1,59	5,66	8,83	18,44
	3	28	5	25,5	99,3	1,6	7,26	11,3	29,74
	4	33	5	30,5	81,1	1,95	9,21	16,5	46,24
	5	37	4	35	60,3	2,1	11,31	20,4	66,64
	6	41	4	39	41,7	3,04	14,35	32,9	99,54
	7	45	4	43	28,3	4,48	18,83	53,5	153
	8	48	3	46,5	17,4	5,46	24,29	70,5	223,5
	9	51	3	49,5	10,2	9,32	33,61	128,2	351,7
	10	53	2	52	5,6	11,32	44,93	163,5	515,2
	11	55	2	54	1,6	39,6	84,5	594	1109
Гальмування	0	0	-	-	-	-	0	-	0
	1	5	5	2,5	124,5	1,273	1,273	0,9	0,9
	2	10	5	7,5	124,6	1,272	2,545	2,65	3,55
	3	15	5	12,5	125,1	1,267	3,812	4,4	7,95
	4	20	5	17,5	125,7	1,261	5,073	6,13	14,08
	5	25	5	22,5	126,8	1,25	6,323	7,81	21,89
	6	30	5	27,5	127,9	1,239	7,562	9,46	31,35
Вибіг	0	30	-	-	-	-	7,562	-	31,35
	1	35	5	32,5	19,3	8,211	15,773	74,13	105,48
	2	40	5	37,5	21	7,547	23,32	78,61	184,09
	3	45	5	42,5	23	6,89	30,21	81,34	265,43
Тяга	6	41	4	39	41,7	3,04	14,35	32,9	99,54
	7'	44,5	3,5	42,75	28,8	3,85	18,2	45,71	145,25
Вибіг	2	40	5	37,5	21	7,547	23,32	78,61	184,09
	3'	44,5	4,5	42,25	22,93	6,22	29,54	73	257,1

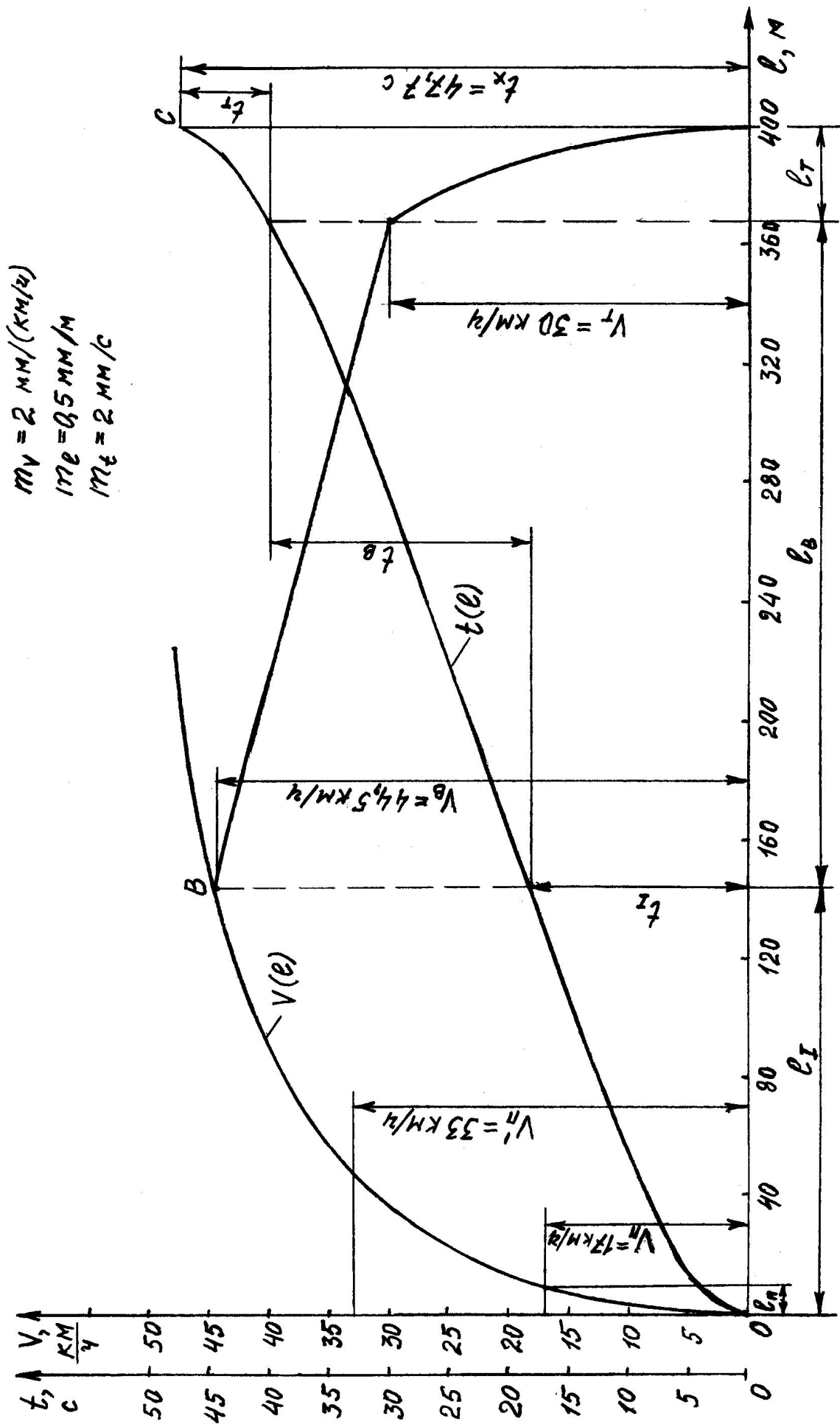


Рис. 10 – Криві руху $V(l)$ и $t(l)$ вагона трамвая КТМ-5М

Крива руху $V(l)$ на перегоні будувалася в такому порядку. Спочатку по точках була побудована ділянка кривої для режиму тяги від $V=0$ до $V=48$ км/год, а потім у зворотному порядку з кінця перегону ділянка кривій гальмування й далі ділянка кривій вибігу до перетинання із кривої тяги в точці В при $V=44,5$ км/год. Після цього минулого визначення довжини граничних інтервалів швидкості для режимів тяги й вибігу, виконані розрахунки збільшень часу і шляхи були занесені відповідно в рядка 7' й 3' табл.7. Сума розрахункових довжин $\ell_I + (\ell_T + \ell_B) = 145,25 + 257,1 = 402,35$ м вийшла більше реальної довжини перегону $\ell_{пер} = 400$ м на 2,35 м, що цілком припустимо.

Крива $t(l)$ побудована по точках. До значення часу $t_I = 18,2$ с (див. табл.7, рядок 7') послідовно додавали збільшення часу руху на вибігу й гальмуванні. Час руху на перегоні відповідає ординаті точки С кривій $t(l)$ і дорівнює $t_x = 47,7$ с, середня (ходова) швидкість на перегоні $V_x = (\ell_{пер} / t_x) \cdot 3,6 = (400 / 47,7) \cdot 3,6 = 30,2$ км/год.

6. ГАЛЬМІВНІ ЗАВДАННЯ

Безаварійна робота міського електротранспорту залежить від гальмових засобів, режиму руху, профілю колії й коефіцієнта зчеплення, а тому між швидкістю руху, ухилом, на якому можливе гальмування, наявністю гальмових засобів і довжиною гальмового шляху повинна існувати строга певна залежність, установлення якої є предметом гальмових завдань. На міському транспорті найбільш часто зустрічаються наступні різновиди гальмових завдань:

- 1) визначення припустимої швидкості на заданому ухилі при заданих гальмівних засобах і довжині гальмівного шляху;
- 2) визначення гальмівної сили для безпечного руху із заданою швидкістю по заданому ухилі й заданому гальмівному шляху;
- 3) визначення розрахункової довжини гальмівного шляху при заданих швидкостях початку гальмування, профілю колії й гальмівних засобів;
- 4) визначення максимального ухилу, на якому може бути витриманий заданий гальмівний шлях при заданих швидкостях руху й гальмівних засобів.

При рішенні гальмівних завдань необхідно розрізняти два поняття про гальмівний шлях: а) розрахунковий гальмівний шлях ℓ_{mp} – повний шлях, прохідний транспортною одиницею за час підготовки гальм до дії, з урахуванням часу реакції водія на сигнал, і за час від початку гальмування до зупинки; б) дійсний гальмівний шлях ℓ_m – шлях, пройдений за час фактичного гальмування рухомого складу.

Розрахунковий гальмівний шлях рівняється

$$\ell_{mp} = \ell_m + \ell_n, \quad (15)$$

де ℓ_n – довжина шляху за час t_n підготовки гальм до дії.

Шлях ℓ_n розраховують, допускаючи, що рухомий склад проходить його з постійною швидкістю початку гальмування V_T , км/год:

$$\ell_n = \frac{1}{3,6} V_T t_n, \text{ м.} \quad (16)$$

Час t_n витрачається, головним чином, на реакцію водія; орієнтовно приймають для вагонів метрополітену $t_n = 2$ с, для трамваїв і тролейбусів $t_n = 1$ с.

Гальмові завдання вирішуються аналітичними або графічними способами. Графічні способи рішення гальмових завдань більше наочні й точніше, ніж аналітичні. При рішенні гальмових завдань корисно мати криві питомої діючої гальмової сили залежно від швидкості руху рухомого складу, тобто

$$f_D = -(b_0 + w_i) = -(b + w_0 + w_i) = f(V), \quad (17)$$

тому що гальмівна сила b і основний опір руху w_0 змінюються зі зміною швидкості руху.

Під b_0 розуміють питому силу, що сповільнює, на прямому горизонтальному шляху для механічних ($b_0 = b + w_{0x}$) або електричних ($b_0 = b + w_0$) гальм, а також при їхній спільній дії. На кривих ділянках шляху додатково враховують питомий опір від кривої $w_{кр}$.

При механічних барабанних гальмах питома, тобто віднесена до одного кілоньютона ваги рухомого складу, гальмова сила визначається за виразом:

$$b = 1000 \cdot \theta \cdot \varphi_k, \text{ Н/кН}, \quad (18)$$

де φ_k – коефіцієнт тертя між поверхнею гальмового барабана (накладкою) і колодкою;

θ – гальмівний коефіцієнт поїзда, що представляє собою відносне значення сумарної наведеної до обода гальмівних коліс сили натискання гальмових колодок, що доводиться на 1 кН ваги поїзда (тари):

$$\theta = \frac{\sum K_n}{G} = \frac{\sum K_n}{mg}, \quad (19)$$

звідки

$$\sum K_n = \theta \cdot G. \quad (20)$$

Рівність (20) при тягових розрахунках дозволяє обходитися без розрахунку натискання гальмівних колодок або накладок тим більше, що для такого розрахунку звичайно відсутні потрібні відомості.

Коефіцієнт φ_k залежить в основному від матеріалу тертьових поверхонь, швидкості тертьової поверхні, а отже, швидкості руху й сили натискання K на гальмівну колодку. На значення φ_k впливає також форма гальмівної колодки, стан тертьових поверхонь (влучення між тертьовими поверхнями мастильних речовин, води, бруду) і температура.

Підставою для визначення значення φ_k можуть бути тільки досвідчені дані. З урахуванням проведених випробувань можна запропонувати наступну формулу для визначення коефіцієнта тертя барабанних гальм з азбестовими накладками на ебонітовій і бакелітовій основі:

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02V} , \quad (21)$$

де V – швидкість руху в км/год.

На трамвайних вагонах при екстреному гальмуванні використовуються рейкові електромагнітні гальма. На підставі досвідчених даних виведена наступна формула розрахунку коефіцієнта тертя для башмаків електромагнітних рейкових

гальм:

$$\varphi_{mp} = \frac{0,18}{1 + 0,02V} . \quad (22)$$

Наведене сумарне натискання $\sum K_n$ гальмових колодок обмежується зчепленням коліс із рейкою або полотном дороги. Для барабанного гальма і запобігання юза необхідно дотримуватися умови:

$$B = 1000\varphi_k \sum K_n \leq 1000G_T\psi \quad (23)$$

або

$$\frac{\sum K_n}{G_T} \leq \frac{\psi}{\varphi_k} , \quad (24)$$

де ψ - коефіцієнт зчеплення й G_T - гальмова вага поїзда.

Відношення найбільшого сумарного натискання гальмівних колодок $\sum K_{n \max}$ до сили натискання гальмівних коліс на рейки або полотно дороги G_T називають коефіцієнтом натискання δ гальмівних колодок:

$$\delta = \frac{\sum K_{n \max}}{G_T} . \quad (25)$$

За умови, що всі осі (колеса) рухомого складу гальмівні й, отже, гальмівна вага G_T дорівнює ваги поїзда $G = mg$, найбільший гальмівний коефіцієнт буде дорівнювати коефіцієнту натискання: $\theta_{\max} = \delta$. Таке значення гальмівного коефіцієнта варто вибирати при екстреному гальмуванні. При робочому гальмуванні гальмівний коефіцієнт складе $\theta = (0,6 \dots 0 \dots 0,7) \theta_{\max}$.

Величину коефіцієнта натискання вибирають так, щоб одержати по можливості найбільшу гальмівну силу й у той же час не допустити заклинювання коліс. Найбільша небезпека заклинювання коліс при гальмуванні виникає при малих швидкостях руху, тому що коефіцієнт зчеплення в меншому ступені, чим коефіцієнт тертя колодок, залежить від швидкості руху. У розрахунках приймають наступні значення коефіцієнта натискання δ від гальмівної ваги G_T порожнього поїзда: для вагонів метрополітену при колісно-колодковому гальмі $\delta = 0,5 \dots 0 \dots 0,6$; для вагонів трамвая при барабанних і дискових гальмах $\delta = 0,7 \dots 0 \dots 0,9$; для тролейбусів $\delta = 1,5 \dots 2 \dots 2$; для трамвайних вагонів з рейковим електромагнітним гальмом $\delta = 2$.

Коефіцієнт зчеплення змінюється в широких межах залежно від умов руху рухомого складу. Із цієї причини не можна рекомендувати яку-небудь певну величину для всіх розрахунків. Умови поставленого завдання визначають ту величину коефіцієнта, який необхідно користуватися в заданому випадку. Наприклад, під час проектування тролейбусних маршрутів і більших ухилах

необхідно приймати мінімальний коефіцієнт зчеплення, тому що під час спуску машини по ухилу можуть відбутися «заноси» і перекидання.

Аналітичне рішення гальмівних завдань

Задача 1. Дано: моторний трамвайний вагон вагою $G=200$ кН; гальмівний коефіцієнт $\theta = 0,85$; спуск $i = -40\%$; гальмівний шлях $\ell_T = 20$ м; коефіцієнт інерції обертових частин $1+\gamma = 1,15$. Потрібно визначити припустиму швидкість.

Для вагона трамвая спуск $i = -40\%$ є шкідливим. На коротких шкідливих спусках допускається рух з постійною припустимою швидкістю за допомогою підгальмовування поїзда. На довгих же шкідливих спусках необхідно передбачити зупинку вагона. У цьому випадку гальмівні засоби повинні бути достатні для того, щоб створити потрібну зупинку на належній довжині гальмівного шляху. Цим диктується необхідне обмеження швидкості руху під ухил. Потрібно вирішити гальмівну задачу: визначити початкову швидкість гальмування V_T при заданій величині гальмівного шляху ℓ_T .

Тут дві невідомих – початкові швидкості гальмування й рівнодіюча сила f_D , тому що остання є функцією швидкості. Крім того, можлива зупинка тут повинна бути забезпечена при всіх умовах руху, а тому в цьому випадку необхідно для гальмівної сили ввести коефіцієнт запасу (надійності) $K_3 = 1,3$.

Приблизно ця задача може бути вирішена методом підбору (послідовних наближень). Задавшись значенням $V_T = 20$ км/год, визначимо за формулами (21) і (18) відповідно до значення φ_k і b , прийнявши в якості розрахункової швидкості $V_p = 0,75 V_T = 0,75 \cdot 20 = 15$ км/год:

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02 V_p} = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot 15} = 0,192;$$

$$b = 1000 \cdot \theta \cdot \varphi_k = 1000 \cdot 0,85 \cdot 0,192 = 163,2 \text{ Н/кН}.$$

Питомий основний опір руху без струму

$$w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V_p^2 = 9 + 0,005 \cdot 15^2 = 10,1 \text{ Н / кН}.$$

З урахуванням обраного для гальмівної сили коефіцієнта запасу $K_3 = 1,3$, знаходимо

$$b_0 = \frac{b + w_{ox}}{K_3} = \frac{163,2 + 10,1}{1,3} = 133,3 \text{ Н / кН}.$$

Питома рівнодіюча гальмівна сила

$$f_D = -(b_0 + w_i) = -(133,3 - 40) = -93,3 \text{ Н / кН}.$$

Для перевірки правильності прийнятого значення швидкості на початку гальмування використовуємо вираження для розрахунку збільшення шляху [2,

$$\text{формули (10.12)]:} \quad \Delta \ell = 7,87(1 + \gamma) \frac{V_k^2 - V_n^2}{2f_{Dcp}}. \quad (26)$$

Прийнявши $\Delta \ell = \ell_T, V_K = 0, V_H = V_T, f_{дср} = f_D$ на підставі формули (26), знаходимо

$$V_T = \sqrt{\frac{2\ell_T f_D}{7,87(1+\gamma)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20 \cdot 93,3}{7,87 \cdot 1,15}} = 20,3 \text{ км/год.}$$

Отримане значення швидкості початку гальмування трохи більше прийнятого попереднього значення. Тому що різниця невелика, то на цьому розрахунок можна закінчити, або ж прийняти нове значення швидкості, наприклад, $V_T = 20,2$ км/год і повторити розрахунок.

Задача 2. Дано: моторний трамвайний вагон вагою $G = 200$ кН; спуск $i = -80\%$; гальмівний шлях $\ell_T = 20$ м; гальмування електромагнітне рейкове з гальмівним коефіцієнтом натискання гальмівних башмаків $\theta_{mp} = 2$; коефіцієнт інерції обертових частин вагона $1 + \gamma = 1,15$; коефіцієнт запасу гальмівної сили $K_3 = 1,3$. Потрібно визначити припустиму швидкість.

Рішення цієї задачі подібно попередньої задачі. Задаємося попереднім значенням початкової швидкості гальмування $V_T = 25$ км/год. За формулами (22) і (18) визначаємо відповідно значення коефіцієнта φ_{mp} й питомої гальмівної сили b , прийнявши в якості розрахункової швидкості $V_p = 0,75 V_T = 0,75 \cdot 25 = 18,75$ км/год:

$$\varphi_{mp} = \frac{0,18}{1 + 0,02 \cdot V_p} = \frac{0,18}{1 + 0,02 \cdot 18,75} = \frac{0,18}{1,375} = 0,131;$$

$$b = 1000 \varphi_{mp} \theta_{mp} = 1000 \cdot 0,131 \cdot 2 = 262 \text{ Н / кН.}$$

Питомий основний опір руху без струму

$$w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V_p^2 = 9 + 0,005 \cdot 18,75^2 = 10,76 \text{ Н / кН.}$$

Далі з урахуванням обраного значення коефіцієнта запасу визначаємо питому силу, що сповільнює на прямому горизонтальному шляху й питому рівнодіючу гальмівну силу:

$$b_0 = \frac{b + w_{ox}}{K_3} = \frac{262 + 10,76}{1,3} = 209,8 \text{ Н / кН;}$$

$$f_D = -(b_0 + w_i) = -(209,8 - 80) = -129,8 \text{ Н / кН.}$$

Швидкість початку гальмування

$$V_T = \sqrt{\frac{2\ell_T f_D}{7,87(1+\gamma)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20 \cdot 129,8}{7,87 \cdot 1,15}} = 23,95 \text{ км/год} < 25 \text{ км/год.}$$

Очевидно, взятую попередню швидкість варто зменшити, наприклад, до 24 км/год і повторити розрахунок:

$$V_T = 24 \text{ км/год; } V_p = 0,75 \cdot V_T = 0,75 \cdot 24 = 18 \text{ км/год ;}$$

$$\varphi_{mp} = \frac{0,18}{1 + 0,02 \cdot 18} = 0,132; \quad b = 1000 \cdot 0,132 \cdot 2 = 264 \text{ Н/кН;}$$

$$w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot 18^2 = 10,6 \text{ Н / кН}; \quad b_0 = \frac{264 + 10,6}{1,3} = 211,2 \text{ Н / кН};$$

$$f_D = -(b_0 + w_i) = -(211,2 - 80) = -131,2 \text{ Н / кН};$$

$$V_T = \sqrt{\frac{2\ell_T f_D}{7,87(1+\gamma)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20 \cdot 131,2}{7,87 \cdot 1,15}} = 24,08 \text{ км / год} \approx 24 \text{ км / год},$$

тобто результат досить близько збігається з попередньо прийнятою в другому наближенні швидкістю 24 км/год.

Задача 3. Дано: тролейбус вагою $G=150$ кН; гальмівний коефіцієнт $\theta = 2$; спуск $i=-80\%$; гальмівний шлях $l_T=15$ м; коефіцієнт інерції обертових частин $1+\gamma = 1,15$; коефіцієнт запасу $K_3=1,5$. Потрібно визначити припустиму швидкість.

Рішення. Задаємося попереднім значенням швидкості $V_T=25$ км/год. За формулами (21) і (18) визначаємо відповідно значення φ_k й b , прийнявши в якості розрахункової швидкості $V_p = 0,75 \cdot V_T = 0,75 \cdot 25 = 18,75$ км / год :

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot V_p} = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot 18,75} = 0,182 ;$$

$$b=1000 \cdot \theta \cdot \varphi_k = 1000 \cdot 2 \cdot 0,182 = 364 \text{ Н / кН}.$$

Далі послідовно розраховуємо значення w_{ox} , b_0 , f_D , V_T :

$$w_{ox} = 16 + 0,004 \cdot 18,75^2 = 17,4 \text{ Н / кН};$$

$$b_0 = \frac{b + w_{ox}}{K_3} = \frac{364 + 17,4}{1,5} = 254,3 \text{ Н / кН};$$

$$f_D = -(b_0 + w_i) = -(254,3 - 80) = -174,3 \text{ Н / кН};$$

$$V_T = \sqrt{\frac{2\ell_T f_D}{7,87(1+\gamma)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15 \cdot 174,3}{7,87 \cdot 1,15}} = 24 \text{ км / год} < 25 \text{ км / год}.$$

Приймаємо $V_T=24$ км/год і повторюємо розрахунок. У підсумку одержуємо $V_T=24,2$ км/год. Цим результатом можна обмежитися.

Задача 4. Дано: моторний трамвайний вагон, маса тари вагона 18 т, маса пасажирів 5,5 т; швидкість 30 км/год; ухил $i = -80\%$. Потрібно визначити необхідну гальмівну силу для руху з постійною швидкістю 30 км/год.

Рішення даної задачі легко перебуває безпосередньо з рівняння руху поїзда. З умов завдання випливає, що

$$f_D = b + w_{ox} + w_i = 0 \quad \text{або}$$

$$b = -(w_i + w_{ox}) = -(i + w_{ox}) = 80 - 13,5 = 66,5 \text{ Н / кН},$$

$$\text{де } w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V^2 = 9 + 0,005 \cdot 30^2 = 13,5 \text{ Н / кН}.$$

Тоді необхідна гальмівна сила

$$B = b \cdot G = 66,5 \cdot (18+5,5) \cdot 9,81 = 15331 \text{ Н},$$

де G - вага вагона з пасажирами, кН.

Необхідна величина сумарної наведеної сили натискання гальмівних колодок барабанного гальма:

$$\sum K_n = \frac{B \cdot K_3}{1000 \cdot \varphi_k} = \frac{15331 \cdot 1,5}{0,156 \cdot 1000} = 147,4 \text{ кН},$$

де $K_3 = 1,5$ – коефіцієнт запасу гальмівної сили;

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot V} = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot 30} = 0,156.$$

Таким чином, гальмівний коефіцієнт повинен бути:

$$\theta = \frac{\sum K_n}{mg} = \frac{147,4}{18 \cdot 9,81} = 0,83,$$

де $m = 18 \text{ т}$ – маса тари вагона.

Задача 5. Дано: моторний трамвайний вагон масою $m = 18 \text{ т}$, гальмівний коефіцієнт $\theta = 0,85$, швидкість початку гальмування $V_T = 20 \text{ км/год}$, гальмівний шлях $\ell_T = 30 \text{ м}$, гальма механічні барабанні, $1 + \gamma = 1,15$.

Потрібно визначити, який максимальний ухил можна допустити на маршруті, для того щоб гальмівний шлях був не більше заданого.

Рішення. На підставі формули (26) при $\Delta \ell = \ell_T = 30 \text{ м}$, $V_H = V_T = 20 \text{ км/год}$ і $V_k = 0$ розраховуємо значення середньої рівнодіючої гальмівної сили:

$$f_d = -\frac{7,87(1 + \gamma) \cdot V_T^2}{2\ell_T} = -\frac{7,87 \cdot 1,15 \cdot 20^2}{2 \cdot 30} = -60,3 \text{ Н / кН}.$$

За формулами (21) і (18) розраховуємо значення відповідно φ_k і b при розрахунковій швидкості $V_p = 0,666 V_T = 0,666 \cdot 20 = 13,3 \text{ км/год}$:

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot V_p} = \frac{0,25}{1 + 0,02 \cdot 13,3} = 0,197;$$

$$b = 1000 \theta \cdot \varphi_k = 1000 \cdot 0,85 \cdot 0,197 = 167,4 \text{ Н / кН}.$$

Питомий основний опір руху без струму

$$w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V_p^2 = 9 + 0,005 \cdot 13,3^2 = 9,9 \text{ Н / кН}.$$

Вибираємо коефіцієнт запасу $K_3 = 1,5$ і розраховуємо питому гальмівну силу на горизонтальному прямолінійному шляху:

$$b_0 = \frac{b + w_{ox}}{K_3} = \frac{167,4 + 9,9}{1,5} = 118,2 \text{ Н / кН}.$$

На підставі рівняння (17) знаходимо шуканий ухил

$$i = -b_0 - f_d = -118,2 + 60,3 = -57,9 \text{ ‰}.$$

Задача 6. Дано: моторний трамвайний вагон гальмується барабанными гальмами зі швидкості 30 км/год . Гальмівний коефіцієнт $\theta = 0,85$. Профіль

колії: прямолінійний спуск $i=-10\%$. Потрібно визначити довжину гальмівного шляху.

Рішення. Прийmemo коефіцієнт інерції оберткових мас $K_n=1+\gamma =1,15$ і $\Delta V = 5 \text{ км / год}$. Розрахунок робимо за формулами:

$$\Delta \ell = \frac{7,87(1+\gamma)(V_n^2 - V_k^2)}{2f_{\text{Дср}}} = \frac{4,52(V_n^2 - V_k^2)}{f_{\text{Дср}}}, \text{ м};$$

$$f_{\text{Дср}} = b + w_{\text{ox}} + w_i = b + w_{\text{ox}} - 10, \text{ Н / кН};$$

$$b = 1000\theta\varphi_k = 1000 \cdot 0,85 \cdot \varphi_k = 850 \cdot \varphi_k, \text{ Н / кН};$$

$$\varphi_k = \frac{0,25}{1+0,02 \cdot V_{\text{ср}}}; \quad w_{\text{ox}} = 9 + 0,005 \cdot V_{\text{ср}}^2, \text{ Н / кН};$$

$$\ell_{\text{mp}} = \ell_T + \ell_n; \quad \ell_n = \frac{30}{3,6} \cdot 1 = 8,3 \text{ м}.$$

Результати розрахунку представлені у вигляді табл. 8.

Дійсний гальмівний шлях $\ell_T = \sum \Delta \ell = 8,9 + 6,9 + 5,0 + 3,3 + 1,8 + 0,6 = 26,5 \text{ м}$.

Розрахунковий гальмівний шлях $\ell_{\text{mp}} = \ell_T + \ell_n = 26,5 + 8,3 = 34,8 \text{ м}$.

Графічне рішення гальмівних завдань

Гальмівні задачі можна вирішувати більш наочно й у багатьох випадках більш точно графічним способом, наприклад «способом Липец-Лебедєва». Для цього спочатку вибирають масштаби швидкості m_v , мм/(км/год); шляхи m_ℓ , мм/м; питомої сили m_f , мм/(Н/кН), що задовольняють наступній рівності:

$$m_f = \frac{0,127 \cdot m_v^2}{(1+\gamma)m_\ell}. \quad (27)$$

Значення масштабів, що рекомендуються, за умови $(1+\gamma)$, що $=1,1$ наведено в табл.9.

Таблиця 9 – Значення масштабів, які рекомендуються при рішенні гальмівних задач

Тип транспорту	m_v , мм/(км/год)	m_ℓ , мм/м	m_f , мм/(Н/кН)
метрополітен	1	0,25	0,462
Трамвай, тролейбус	2	2	0,231

При інших значеннях $(1+\gamma)$ масштаби повинні бути перелічені відповідно до формули (27). В обраних масштабах будується відповідно до завдання крива гальмівних сил $(b + w_{\text{ox}}) = f(V)$ і потім графічно залежно від цієї кривої й профілю колії будується крива $V(l)$. Ці криві дають можливість вирішувати різноманітні гальмівні задачі.

Таблиця 8 – Розрахунок довжини гальмівного шляху вагона зі швидкості 30 км/год

$V_n,$ км/год	$V_K,$ км/год	$V_n^2,$ км ² /год ²	$V_K^2,$ км ² /год ²	$V_n^2 - V_K^2,$ км ² /год ²	$V_{cp},$ км/год	φ_K	b, Н/кН	w_{ox} Н/кН	w_i Н/кН	$f_{Дср}$ Н/кН	$\Delta\ell,$ м	$\ell_{mp},$ м
30	25	900	625	275	27,5	0,161	137	12,8	-10	139,8	8,9	17,2
25	20	625	400	225	22,5	0,172	146	11,5	-10	147,5	6,9	24,1
20	15	400	225	175	17,5	0,185	157	10,5	-10	157,5	5	29,1
15	10	225	100	125	12,5	0,2	170	9,8	-10	169,8	3,3	32,4
10	5	100	25	75	7,5	0,217	185	9,3	-10	184,3	1,8	34,2
5	0	25	0	25	2,5	0,238	202	9,0	-10	201	0,6	34,8

Задача 1. Визначити припустимі швидкості руху тролейбуса, якщо дані розрахунковий гальмівний шлях $\ell_{mp}=30$ м, ухили $i = -80\text{‰}$, $i = 0$ і $i = +80\text{‰}$, коефіцієнт $(1 + \gamma) = 1,1$.

При рішенні цього завдання виходимо з випадку екстреного гальмування, при якому використовуються механічні гальма з найбільшим натисканням колодок. Характеристику питомої гальмівної сили розраховуємо по формулі

$$b = 1000\varphi_k \theta_{\max}.$$

Значення коефіцієнта тертя φ_k для барабанних гальм розраховуємо по формулі (21): $\varphi_k = 0,25 / (1 + 0,02 \cdot V)$. Питомий основний опір руху без струму розраховуємо за вираженням:

$$w_{ox} = 16 + 0,004V^2.$$

Приймаємо $\theta_{\max} = 2$ і розраховуємо залежність $(b + w_{ox}) = f(V)$.

Результати розрахунку зводимо в табл. 10.

Таблиця 10 – Розрахункові дані для побудови характеристики $(b + w_{ox}) = f(V)$ тролейбуса

V, км/год	0	10	20	30	40	50	60
φ_k	0,25	0,208	0,179	0,156	0,139	0,125	0,114
$b, \text{Н/кН}$	500	416	358	312	278	250	228
$w_{ox}, \text{Н/кН}$	16	16,4	17,6	19,6	22,4	26	30,4
$b + w_{ox}, \text{Н/кН}$	516	432,4	375,6	331,6	300,4	276	258,4

У масштабах, наведених у табл. 9 будуємо характеристику $(b + w_{ox}) = f(V)$ (рис.11, а, крива 1). Побудовану криву розділимо на ділянки (інтервали), наприклад, через кожні $\Delta V = 10$ км/год (0-10; 10-20; 20-30 і т.д.); можна взяти й менші інтервали. У межах кожного інтервалу швидкості діючи на поїзд гальмівну силу приймаємо постійною, обумовленою ординатою середньої точки кожної ділянки. Рівень відліку ординати середньої точки визначається значенням ухилу, для якого визначається V_{\max} .

На діаграмі $V(\ell)$ (рис.11, б) по осі абсцис в обраному масштабі шляху відкладаємо розрахунковий гальмівний шлях $\ell_{mp}=30$ м і з його кінця O' у зворотному порядку (від $V=0$) графічним методом будуємо криві гальмування $V(\ell)$ для заданих ухилів $i = -80\text{‰}$, $i=0$ та $i = +80\text{‰}$.

Як видно з рис.11, а початок координат переноситься на відрізок $OO_1 = m_f \cdot 80 = 18,5$ мм нагору по осі ординат у випадку спуску й на відрізок $OO_2 = m_f \cdot 80 = 18,5$ мм вниз по осі ординат у випадку підйому. Варто пам'ятати, що підйом або спуск, виражений у тисячних частках, чисельно дорівнює питомій силі опору від ухилу, вираженою в Н/кН.

Для обліку підготовчого шляху досить для будь-якої швидкості V відкласти від осі ординат відрізок $\ell_n = Vt_n / 3,6$ м, в обраному масштабі шляху і з'єднати його кінець прямою лінією з точкою O'' .

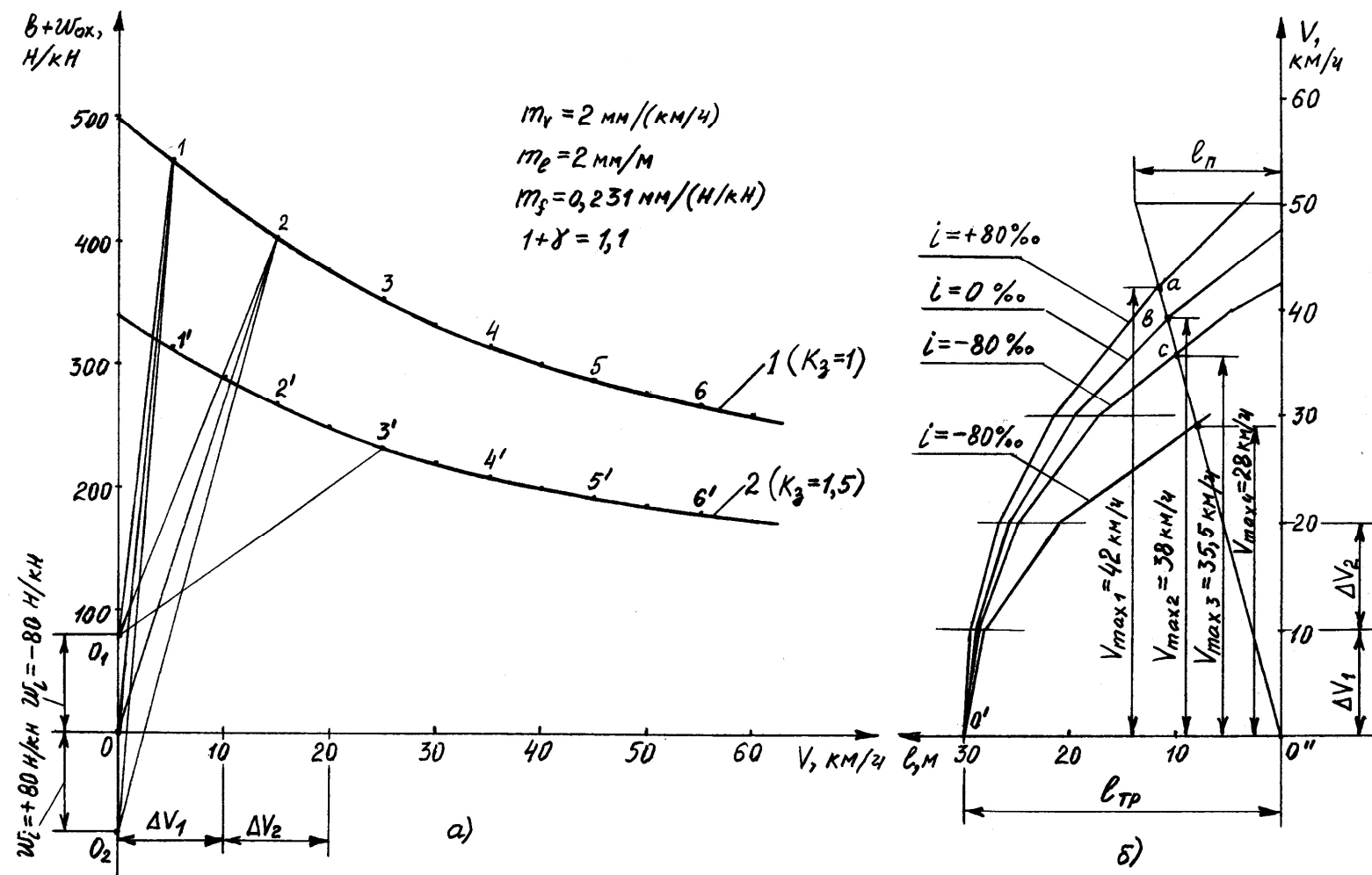


Рис. 11 – Визначення припустимих швидкостей руху тролейбуса

Для швидкості $V=50$ км/год шлях підготовки $\ell_n = 50 \cdot 1/3,6 = 13,9$ м, з урахуванням масштабу $m_\ell \ell_n = 2 \cdot 13,9 = 27,8$ мм. Ординати точок а, б, с перетинання цієї прямої із кривими $V(l)$ для заданих значень ухилів визначають припустимі швидкості: $V_{\max 1} = 42$ км/год на підйомі $i=80$ ‰; $V_{\max 2} = 38$ км/год на горизонтальній ділянці $i=0$; $V_{\max 3}=35,5$ км/год на спуску $i=-80$ ‰.

На рис. 11, а побудована також характеристика $(b + w_{ox}) = f(V)$, що відповідає коефіцієнту запасу $K_z=1,5$ (крива 2), а на рис 11,б – крива $V(l)$, що відповідає цій характеристиці й ухилу $i = -80$ ‰. Для зазначених умов припустима швидкість $V_{\max 4} = 28$ км/год. У задачі №3 для приблизно таких же умов гальмування аналітично отримане припустима швидкість $V_T=24,2$ км/год.

Задача 2. Визначити припустимі швидкості руху трамвайного вагона, якщо задані розрахунковий гальмівний шлях $\ell_{mp}=35$ м, ухили $i= -30$ ‰, $i=0$, $i=+40$ ‰ і коефіцієнт інерції обертових мас вагона $(1 + \gamma) = 1,1$.

Для трамвая, як екстрене гальмування, застосовується рейкове електромагнітне гальмування. Питома гальмівна сила рейкового електромагнітного гальма визначається вираженням

$$b = 1000 \cdot \varphi_{mp} \theta_{\max}.$$

У розрахунках можна прийняти $\theta_{\max}=2$, а коефіцієнт тертя φ_{mp} визначається за формулою (22): $\varphi_{mp}=0,18/(1+0,02V)$. Вибираємо розрахункове вираження для питомого основного опору руху вагона трамвая

$$w_{ox} = 9 + 0,005 \cdot V^2$$

і розраховуємо залежність $(b + w_{ox}) = f(V)$. Результати розрахунку представлені у вигляді табл. 11.

Таблиця 11 – Розрахункові дані для побудови характеристики $(b + w_{ox}) = f(V)$ вагона трамвая

V, км/год	0	10	20	30	40	50	60
φ_{mp}	0,18	0,15	0,1285	0,1125	0,1	0,09	0,082
$b=2000 \varphi_{mp}$, Н/кН	360	300	257	225	200	180	164
w_{ox} , Н/кН	9	9,5	11	13,5	17	21,5	27
$b + w_{ox}$, Н/кН	369	309,5	268	238,5	217	201,5	191

Графічне рішення завдання в масштабах, наведених у табл. 9 представлено на рис.12. Отримано наступні значення припустимих швидкостей руху трамвая: $V_{\max 1}=40$ км/год на підйомі $i=+40$ ‰; $V_{\max 2}=38$ км/год на горизонтальній ділянці $i=$ про; $V_{\max 3}= 36$ км/год на спуску $i = -30$ ‰.

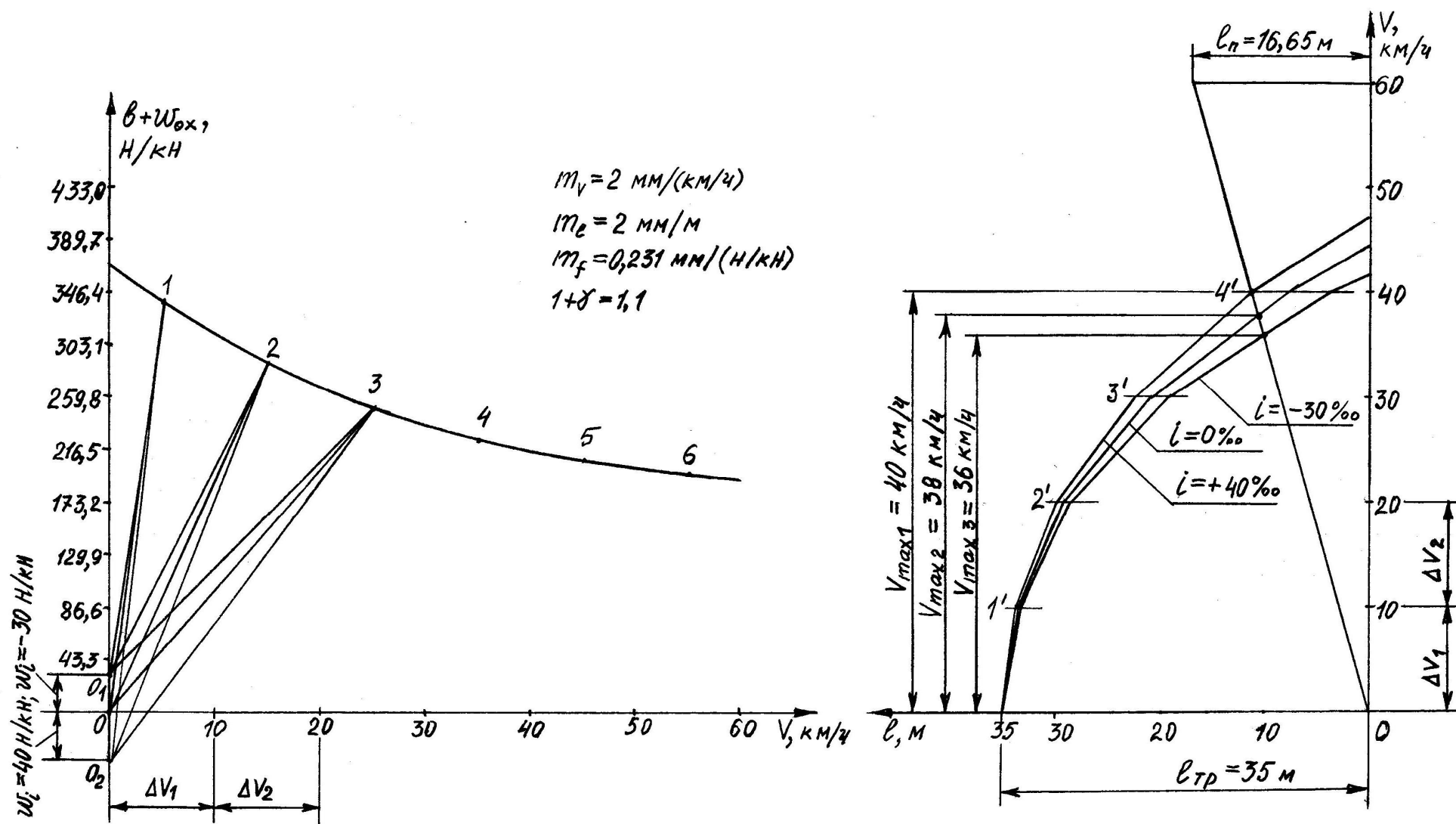


Рис. 12 – Визначення припустимих швидкостей руху трамвая

7. ПЕРЕВІРКА ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ СПОСОБОМ СЕРЕДНЬОГО КВАДРАТИЧНОГО СТРУМУ

Тяговий електричний двигун при своїй роботі може нагріватися лише до певної, припустимої температури, обумовленої нагрівостійкістю застосованих ізоляційних матеріалів.

Визначення нагрівання тягових двигунів роблять обов'язково. Сутність перевірки двигуна з нагрівання складається в зіставленні припустимої для нього температури, з тієї, яку він має при роботі. Перевірка може бути виконана прямим методом, що передбачає побудову кривої перегріву $\tau(t)$ за цикл роботи двигуна, і непрямими методами, що не вимагають побудови графіка $\tau(t)$. До їхнього числа належить метод середніх втрат потужності й засновані на ньому методи еквівалентних величин: еквівалентного (середньоквадратичного) струму, еквівалентного моменту й еквівалентної потужності.

Метод середньоквадратичного (еквівалентного) струму може бути використаний у тому випадку, коли відомий графік зміни струму двигуна в часі, постійні втрати не змінюються за цикл роботи, а опору головних кіл двигуна залишаються незмінними в циклі роботи (не враховується зміна опору обмоток при зміні температури).

Наближена перевірка придатності двигуна з потужності зводиться до порівняння середнього квадратичного струму навантаження двигуна $I_{cp.kv} = \sqrt{\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} I^2 dt}$ за час t_p рейсу (циклу) з його струмом I_∞ тривалого номінального режиму, що є паспортною величиною.

При розрахунках середньоквадратичний струм двигуна за час рейсу визначається за формулою:

$$I_{cp.kv} = \sqrt{\frac{1}{t_p} \left(\sum I_{cp.i}^2 \Delta t_i + \sum I_{m.cp.i}^2 \Delta t_i \right)}, \quad (28)$$

де $I_{cp.i}$ й $I_{m.cp.i}$ - середні струми двигуна, обумовлені в інтервалі часу Δt_i по кривих споживання струму відповідно в режимах тяги й реостатного гальмування; $t_p = \sum t_x + \sum t_0$ - час рейсу, рівне сумі часів ходу t_x і часу зупинок $t_0 = 15 \dots 20 \dots 20$ с.

У режимах реостатного гальмування можна приблизно прийняти

$$I_m = 0,8 I_n = const \text{ й } \sum I_{m.cp.i}^2 \Delta t_i = (0,8 I_n)^2 t_T,$$

де t_T - час гальмування до зупинки.

Придатність тягового двигуна з потужності визначається співвідношенням

$$I_{cp.kv} \leq \frac{I_\infty}{K_3} \text{ або } K_3 I_{cp.kv} \leq I_\infty, \quad (29)$$

де $K_3 = 1,1 \dots 1,2$ - коефіцієнт запасу, значення якого вибирається з урахуванням впливу на нагрівання двигуна способу його охолодження, температури навколишнього середовища, нерівномірності розподілу навантажень між паралельно

з'єднаними двигунами, погіршення реальних умов охолодження, а також покладених в основу розглянутого способу допущень.

Якщо в результаті перевірки потужність двигуна виявиться недостатньою, варто дати рекомендації зі зміни режиму руху рухливого состава, щоб потужність двигуна була достатньою.

Якщо в результаті перевірки потужність двигуна виявиться надмірної, варто дати рекомендації зі способів кращого використання тягового двигуна.

Приклад обчислення $I_{cp.кв}$.

Дано: ЕРС - трамвай; тип ТЕД - ДК259Г-3; криві споживання тяговим двигуном струму (рис.8, табл.5);

$$I_{\infty} = 146 \text{ А}; t_o = 15 \text{ с}; t_x = 70 \text{ с}; t_p = 85 \text{ с}; I_m = 0,8 I_n = 160 \text{ А}; t_T = 15 \text{ с}.$$

Визначаємо витрату квадратичного струму при першому включенні двигунів (пуск):

$$\sum I_{cp.i}^2 \Delta t_i = 40000 \cdot 5 + 40000 \cdot 5 + 37539 \cdot 1,5 + 32852 \cdot 1,0 + 28477 \cdot 1,0 + 24414 \cdot 1,5 = 554258 \text{ А}^2 \text{ с}.$$

Визначаємо витрату квадратичного струму при повторному включенні двигунів:

$$\sum I_{cp.i}^2 \Delta t_i = 40000 \cdot 3,5 + 32400 \cdot 3,5 + 20736 \cdot 3,5 + 12996 \cdot 4,5 = 384458 \text{ А}^2 \text{ с}.$$

Визначаємо витрату квадратичного струму при електричному гальмуванні:

$$\sum I_{m.cp.i}^2 \Delta t_i = (0,8 I_n)^2 t_T = 160^2 \cdot 15 = 384000 \text{ А}^2 \text{ с}.$$

Визначаємо середньоквадратичний струм двигуна

$$I_{cp.кв} = \sqrt{\frac{1}{t_p} [\sum I_{cp.i}^2 \Delta t_i + (0,8 I_n)^2 t_T]} = \sqrt{\frac{1}{85} [554258 + 384458 + 384000]} = 125 \text{ А}.$$

З урахуванням коефіцієнта запасу $K_3 = 1,15$ одержуємо

$$K_3 \cdot I_{cp.кв} = 1,15 \cdot 125 = 144 \text{ А}.$$

Отримане значення порівнюємо зі струмом тривалого номінального режиму $I_{\infty} = 146 \text{ А}$:

$$I_{\infty} = 146 \text{ А} > K_3 \cdot I_{cp.кв} = 144 \text{ А}.$$

Висновок: нагрівання двигуна не перевищує встановленої ДСТУ норми.

8. ВИБІР ПОТУЖНОСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

Корисна потужність тягового електричного двигуна (ТЕД), що розвивається на ободі рушійного колеса

$$P = F_k V / (3,6 \cdot 10^3), \text{ кВт}, \quad (30)$$

де F_k – сила тяги, створювана двигуном на ободі рушійного колеса, Н;

V – швидкість руху, км/год.

Цю механічну потужність можна виразити через електричну потужність $P_1 = U_K I$, споживану двигуном,

$$P = U_K I \cdot \eta \cdot 10^{-3} \text{ кВт}, \quad (31)$$

де U_K – напруга на затискачах (колекторі) двигуна, В;

I – струм якоря, А;

η – ККД двигуна на ободі колеса.

При роботі електрорухомого складу (ЕРС) всі величини, що входять в обидва ці рівняння, не залишаються постійними, чим викликається зміна в дуже широких межах потужності, що розвивається двигунами. Такий характер роботи дуже утрудняє визначення величини необхідної номінальної потужності двигунів і дозволяє зробити лише попередній вибір, правильність якого надалі перевіряється тяговими розрахунками й типовими випробуваннями досвідчених зразків ЕРС (локомотивів).

Попередня номінальна (тривала або короточасна годинна) потужність двигунів визначається, як правило, непрямим шляхом з гранично можливим (прикордонним) режимом роботи. Для цього необхідні такі дані, як максимальна вага поїзда, найбільша можлива величина розрахункового підйому, найбільша припустима швидкість.

Потужність, сила тяги й інші параметри ЕРС (локомотива), знайдені для цих граничних режимів, часто відповідають умовам перевантаження або режиму максимальної швидкості. Для переходу ж до номінальних параметрів використовують співвідношення між цими граничними й номінальними даними, отриманими при узагальненні досвіду експлуатації. При цьому часто доводиться користуватися передбачуваними попередніми характеристиками двигунів, у якості яких використовують типові або універсальні характеристики.

Універсальні характеристики:

$$[V/V_u] \% = f[I/I_u] \%, \quad [F/F_u] = f[I/I_u] \%, \quad [\eta/\eta_{\text{зод}}] \% = f[I/I_u] \%$$

ТЕД постійного струму послідовного порушення складені на підставі аналізу характеристик сучасних вітчизняних і закордонних ТЕД для режиму повного поля й номінальної постійної напруги на затискачах машини.

При визначенні вихідних параметрів ТЕД часто необхідні характеристики у вигляді функціональних залежностей $F(P)$ і $V(P)$. Для ТЕД постійного струму в першому наближенні приймають потужність P пропорційно току I , тобто використовують ті ж універсальні характеристики.

Визначення потужності тягових двигунів послідовного збудження

Вихідні дані, які прийняті при визначенні (виборі) потужності ТЕД моторного вагона, що впливають:

1. Максимальна (конструкційна) швидкість V_k . Для моторних вагонів електропоїздів приміського сполучення $V_k = 130$ км/год, метрополітену $V_k = 85 \dots 100$ км/год, трамвая $V_k = 65$ км/год, тролейбуса $V_k = 70$ км/год.
2. Швидкість завершення пуску або швидкість виходу на природну (автоматичну) характеристику V_m у відношенні до конструкційної швидкості

V_k . Для моторних вагонів з ТЕД постійного струму $V_m/V_k = 0,33...0...0,40$, метрополітену $V_m/V_k = 0,38...0...0,42$.

3. Ходова або середня швидкість V_k на еквівалентному перегоні довжиною ℓ_9 й підйомом i_9 . При визначенні параметрів ТЕД установлюються співвідношення між швидкостями V_x, V_k і V_k , що обумовлені, крім ℓ_9 і i_9 , значеннями пускового прискорення a_n та гальмівного уповільнення a_m , які для кожного типу поїзда змінюються мало. Тому на рис. 13 дані співвідношення між швидкостями залежно тільки від довжини еквівалентного перегону.

4. Пускові прискорення a_n й гальмівні з a_T . Якщо поряд з моторними вагонами загальною вагою $\sum G_M$ (брутто) до складу поїзда входять причіпні вагони загальною вагою $\sum G_{II}$, то пускове прискорення буде

$$a_n = \left[\frac{\sum G_M}{\sum G_M + \sum G_{II}} \right] \cdot 1,1, \quad \text{м / с}^2.$$

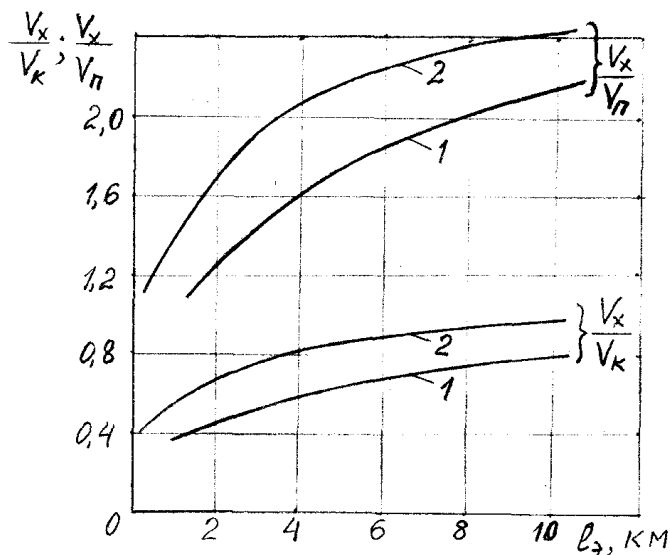


Рис.13 – Залежності $V_x/V_{II} = f(\ell_9)$ и $V_x/V_k = f(\ell_9)$:

1 – для приміських поїздів; 2 – для поїздів метрополітену

5. Основний питомий опір руху при проходженні під струмом w_0 і без струму w_{0X} залежно від швидкості.

6. Коефіцієнт зчеплення ψ , приблизно прийнятий постійним і рівним для поїздів приміського сполучення 0,21...0...0,22, метрополітену – 0,18. При більш точних розрахунках ураховують залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості (табл.12).

Таблица 12 - Залежність коефіцієнта зчеплення від швидкості

V, км/год	0	10	20	35	50	65	80	100	120
ψ	0,3	0,246	0,226	0,21	0,197	0,187	0,178	0,165	0,152

Для поїздів метрополітену значення ψ з табл.12 зменшуються на 12...15...15%.

7. Коефіцієнт інерції обертових частин $(1 + \gamma)$, прийнятий рівним для моторних вагонів 1,10...1...1,15, причіпних – 1,04...1,05.

8. Коефіцієнт вентильованости тягових двигунів $K_B = P_\infty / P_\psi$, прийнятий рівним для мотор-вагонних двигунів із самовентиляцією 0,75...0...0,80, з незалежною вентиляцією – 0,85...0,90.

Вибравши всі необхідні вихідні дані, варто переходити до визначення потужності двигунів.

1. Визначення потужності за пусковою швидкістю й порожньою вагою

Якщо всі осі вагона моторні, то при заданій вазі порожнього вагона G_M в кН і числі двигунів Z_M максимальна сила тяги за умовами зчеплення буде

$$F_{k \max} = F_{c\psi} = \psi G_M / Z_M, \text{кН},$$

де ψ визначається для швидкості V_Π .

Припускаючи нерівномірність пуску в межах $\pm 15\%$, знаходять пускову потужність тягового двигуна

$$P_{кп} = 0,85 F_{c\psi} V_\Pi / 3,6, \text{кВт}.$$

Годинну потужність двигуна визначають за коефіцієнтом експлуатаційного перевантаження $K_{нз} = P_n / P_{ном}$ рівному для електропоїздів без електричного гальмування 1,6...1...1,7, з електричним гальмуванням – 1,5...1...1,6: $P_\psi = P_{ном} = P_\Pi / K_{нз}$

Для вагонів метрополітену розглянутий спосіб визначення потужності двигунів відрізняється тільки тим, що в розрахунок приймається вага вагона з пасажирями при середнім заповненні.

Обраний коефіцієнт перевантаження $K_{нз}$ дозволить перейти від V_Π до V_ψ і V_K , для чого визначають співвідношення між цими величинами за універсальними характеристиками двигунів.

2. Визначення потужності за ходовою швидкістю V_X на еквівалентному перегоні

У цьому випадку, крім ваги вагона G_M , задається перегін довжиною ℓ_ψ з підйомом i_ψ і ходова (середня по перегоні) швидкість V_X . Пускову швидкість V_Π знаходять за графіком (див. рис.13) залежності $V_X / V_\Pi = f(\ell_\psi)$. Потім визначають $F_{c\psi}$ і пускову потужність двигуна $P_{кп}$, а далі йде розрахунок, аналогічний попередньому випадку. Цей спосіб визначення потужності дає найбільш точні результати для составів метрополітену, формованих тільки з моторних вагонів.

3. Визначення потужності за пусковим прискоренням

У цьому випадку задаються: середнє пускове прискорення a_n , вага секції або поїзда Q_Π (брутто), число тягових двигунів Z_M і пускова швидкість V_Π .

Якщо необхідне прискорення необхідно забезпечити на розрахунковому підйомі i_p (непереборний за рахунок сил інерції й на якому передбачається рух зі сталою швидкістю), тоді його величина також повинне бути задане.

Питоме прискорювальне зусилля визначається рівнянням

$$f_y = 102 \cdot (1 + \gamma) a_n, \text{ Н/кН.}$$

При швидкості V_{Π} пускову силу тяги кожного двигуна $F_{\text{кп}}$ визначають з рівняння

$$F_{\text{кп}} = \frac{Q_{\Pi}}{Z_m} (f_y + w_0 + i_p), \text{ Н,}$$

де Q_{Π} – вага поїзда, кН;

Z_m – число тягових двигунів.

Потім пускову силу тяги $F_{\text{кп}}$ перевіряють щодо зчеплення. Питомий опір руху w_0 приймають для швидкості V_{Π} . Потім вибирають значення коефіцієнта перевантаження $K_{nэ}$ й визначають годинну (номінальну) потужність двигуна

$$P_{\text{ч}} = F_{\text{кп}} V_n / (3,6 \cdot 10^3 K_{nэ}) \text{ кВт.}$$

4. Визначення потужності за витратою енергії

Цей спосіб заснований на використанні рівняння витрати енергії для руху поїзда на еквівалентному перегоні. Вихідні дані: вага поїзда (брутто) Q_{Π} , довжина еквівалентного перегону $\ell_{\text{э}}$ і його підйом $i_{\text{э}}$, ходова швидкість V_x або час ходу по перегоні t_x , число тягових двигунів у поїзді Z_m .

Сутність методу полягає в наступному:

1. Розраховують витрати енергії на рух поїзда по еквівалентному перегоні, кВт·год,

$$A = [(w_{\text{ср}} + i_{\text{э}})(\ell_{\text{э}} - \ell_T) + w_{\text{ср.н}} \ell_n + 3,93(1 + \gamma)(V_T^2 + K_n V_n^2)] \frac{Q_{\Pi}}{\eta_{\text{ср}} \cdot 3,6 \cdot 10^6},$$

де $\ell_n, \ell_{\text{э}}, \ell_T$, – пусковий, еквівалентний і гальмовий шлях, м;

$w_{\text{ср}}$ – середній питомий опір руху на шляху $\ell_{\text{э}} - \ell_T$, Н/кН;

$w_{\text{ср.н}}$ – те ж на шляху ℓ_n ;

$1 + \gamma = K_u$ – коефіцієнт інерції обертових частин;

$i_{\text{э}}$ – еквівалентний підйом, ‰;

V_{Π}, V_T – швидкості закінчення пуску й початку гальмування, км/год;

Q_{Π} – вага поїзда, кН;

$\eta_{\text{ср}}$ – середній ККД за періоди роботи двигунів під струмом;

K_n – коефіцієнт пуску.

2. Визначають середній струм двигуна за час роботи під струмом, А,

$$I_{cp} = \frac{A \cdot 3,6 \cdot 10^6}{Z_M t_I U_D},$$

де t_I – час роботи під струмом, с;

U_D – напруга на двигуні, В;

Z_M – число тягових двигунів.

3. Від середнього струму переходять до середньоквадратичного

$$I_{cp.kv} = K_{эф} I_{cp},$$

де $K_{эф}$ – коефіцієнт форми кривої струму, обраний у межах 1,03÷1,15.

При електричному гальмуванні час роботи тягових двигунів під струмом збільшується й становить

$$t_{IT} = t_I + t_T.$$

Повний час, віднесений до еквівалентного перегону,

$$t_K = t_x + t_0, c,$$

де t_0 – час зупинки (15...20...20 с).

4. $I_{cp.kv}$, знайдений для часу t_I , поширюють на період t_{IT} , і переходять до середньоквадратичного тривалого струму двигуна I_K , віднесеному в часно t_K , користуючись співвідношенням

$$I_K^2 t_K = I_{cp.kv}^2 t_{IT} = K_{эф}^2 I_{cp}^2 t_{IT},$$

звідки

$$I_K = K_{эф} I_{cp} \sqrt{t_{IT} / t_K}.$$

5. Визначають годинний струм двигуна

$$I_{\text{г}} = \frac{K_{\text{зн}}}{K_B} I_K,$$

де $K_{\text{зн}} = 1,05$ – коефіцієнт запасу, що компенсує можливі неточності розрахунків;

K_B – коефіцієнт вентильованості тягових двигунів, рівний 0,75.

6. Визначають годинну потужність тягових двигунів

$$P_{\text{г}} = I_{\text{г}} U_D \cdot \eta_{\text{ср}} 10^{-3}, \text{кВт}.$$

При відсутності електричного гальмування приймають $t_{IT} = t_I$.

Значення V_T , ℓ_n , ℓ_T , t_I , t_{IT} визначають за кривою руху $V(t)$ для заданого перегону, що будують на підставі обраних значень a_n і a_T .

5. Визначення потужності тягових двигунів за питомими нормами

Попередньо потужність тягових двигунів визначають за питомими величинами, тобто з потужності, віднесеної до одиниці ваги поїзда.

Норми питомої потужності спочатку визначають за яких-небудь обмежуючими умовами, наприклад: по зчепленню, максимальній швидкості, прискоренню або ж беруть дані діючого електрорухомого складу.

Визначення норм питомої потужності для електропоїздів метрополітену.

Норми питомої потужності тягових двигунів можна розраховувати за пусковими прискореннями. Як відомо, повна питома сила тяги на горизонтальному шляху має бути

$$f_n = f_y + w_0, \text{ Н/кН},$$

де f_y питома прискорювальна сила (динамічна сила) у процесі пуску

$$f_y = 102(1 + \gamma)a_n, \text{ Н / кН}.$$

При швидкості закінчення пуску V_{Π} питома потужність

$$P_{\Pi} = \frac{f_{\Pi} V_{\Pi}}{3,6 \cdot 10^3}, \text{ кВт/кН},$$

де V_{Π} - швидкість закінчення пуску в км/год.

Після заміни f_{Π} через f_y і w_0

$$P_{\Pi} = \frac{102(1 + \gamma)a_{\Pi} + w_0}{3,6 \cdot 10^3} V_{\Pi}, \text{ кВт/кН}. \quad (32)$$

Для переходу до залежності $P_q(V_q)$ необхідно вибрати коефіцієнти експлуатаційного перевантаження $K_{\Pi\Delta}$ і пускової швидкості K_{Vn} за співвідношеннях: $K_{\Pi\Delta} = P_{\Pi} / P_{\text{ном}}$, $K_{Vn} = V_{\Pi} / V_{\text{ном}}$.

Замінивши в рівнянні (32) P_{Π} і V_{Π} через $K_{\Pi\Delta} P_q$ і $K_{Vn} V_q$, одержимо

$$P_q = \frac{K_{Vn}}{K_{\Pi\Delta}} \cdot \frac{102(1 + \gamma)a_n + w_0}{3,6 \cdot 10^3} V_q, \text{ кВт/кН}.$$

Задаючись значеннями V_q , можна побудувати залежність $P_q(V_q)$, попередньо вибравши величини коефіцієнтів, що входять у рівняння. При цьому основний питомий опір руху w_0 приймають для швидкості $V_{\Pi} = K_{Vn} V_q$. Залежність $P_q(V_q)$ досить близька до прямолінійної, тому отримане рівняння можна замінити простими вираженнями.

Якщо прийняти $a_{\Pi} = 1,1 \text{ м/с}^2$, $\gamma = 0,15$, а значення w_0 взяти по кривій для поїздів метрополітену ($w_0 = 3,5 \text{ Н/кН}$), то

$$P_q = (K_{Vn} / K_{\Pi\Delta}) \cdot 0,0368 V_q \text{ кВт/кН},$$

або приймаючи за характеристикою повного поля $K_{\Pi\Delta} = 1,4$ і $K_{Vn} = 0,85$,

$$P_q = 0,0223 V_q \text{ кВт/кН}.$$

9. КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНИХ ЗАНЯТЬ

До виконання контрольних завдань варто приступитися тільки після вивчення й засвоєння відповідного теоретичного матеріалу.

Контрольні завдання варто виконувати в учнівському зошиті або на стандартних аркушах паперу, добре зброшурованих і вкладених в обкладинку. На обкладинці або титульному аркуші вказати назву контрольного завдання, номер варіанта, прізвище й ініціали виконавця, номер навчальної групи.

Рішення кожного завдання повинне містити її формулювання, повні розрахунки й необхідні короткі пояснення до них. Рішення варто виконувати в загальному виді й в отримані кінцеві (розрахункові) формули підставляти кількісні значення всіх величин, після чого необхідно написати результат розрахунку і вказати одиницю його виміру.

Всі записи варто виконувати акуратно, чітким почерком, без застосування чорнила або пасти червоного кольору.

Контрольне завдання № 1

Студент виконує той варіант контрольного завдання, що збігається з останньою цифрою його навчального шифру. Номера завдань для відповідного варіанта наведені в табл. 13.

Таблиця 13 – Варіанти контрольного завдання

Номер варіанта	Номера задач контрольних завдань							
1	1	6	16	26	31	35	41	47
2	2	7	17	27	32	36	42	48
3	3	8	18	28	33	37	43	45
4	4	9	19	29	34	38	44	46
5	5	10	20	30	31	39	45	47
6	1	11	21	26	32	40	46	48
7	2	12	22	27	33	37	47	10
8	3	13	23	28	34	38	48	17
9	4	4	24	29	31	39	49	45
0	5	15	25	30	33	40	50	48

Тексти задач до контрольних завдань наведені нижче. Наприкінці тексту кожного завдання зазначений порядковий номер рекомендованих джерел, глави і параграфи цих джерел, вивчення яких дозволить вирішити задачу.

Задачі контрольного завдання № 1

Задача 1. Визначити коефіцієнт інерції K_u , наведену масу m_{np} і еквівалентну масу m , обертових частин тролейбуса ЗІУ-9, що має фізичну масу $m=9,5$ т і рухається під дією прискорювальної сили $F_y=11$ кН із прискоренням $a=1$ м/с².

[1], гл. 1; [3], §1; [4], §1.1

Задача 2. Визначити наведену масу $m_{пр}$, фізичну масу m , вагу G і коефіцієнт інерції обертових частин K_u моторного трамвайного вагона, що має еквівалентну масу обертових частин $m_o = 2,5$ т і рухається під дією прискорювальної сили $F_v = 30$ кН із прискоренням $a = 1,2$ м/с².

[1], гл. 1; [3], §1; [4], §1.1.

Задача 3. Визначити коефіцієнт інерції K_u і еквівалентну масу m_o обертових частин трамвайного поїзда, що складає з моторного вагона масою $m_m = 16$ т і двох причіпних вагонів, кожний з яких має масу $m_n = 10$ т. Коефіцієнт інерції обертових частин моторного й причіпного вагонів прийняти відповідно рівними 1,12 і 1,08.

[1], гл. 1; [3], §1; [4], §1.1.

Задача 4. Визначити коефіцієнт інерції обертових частин причіпного чотиривісного вагона, якщо його маса $m = 14$ т, а маса однієї колісної пари $m_b = 0,45$ т. Середнє значення відносини радіуса інерції колісної пари до радіуса коліс прийняти рівним $\rho_b/R_b = 0,75$.

[1], гл. 1; [3], §1; [4], §1.1.

Задача 5. Визначити передаточне число редуктора моторного трамвайного вагона, якщо його фізична маса $m = 28$ т, коефіцієнт інерції обертових частин $K_u = 1 + v = 1,14$, маса однієї колісної пари $m_k = 0,45$ т, маса якоря тягового двигуна й пов'язаних з ним елементів редуктора $m_y = 0,1$ т, середнє значення відносин радіусів інерції колісної пари ρ_k і якоря ρ_y до радіуса коліс R_k відповідно рівні: $\rho_{до}/R_k = 0,75$, $\rho_y/R_k = 0,4$.

[1], гл. 1; [3], §1; [4], §1.1.

Задача 6. Визначити найбільшу силу тяги трамвайного вагона типу КТМ-5М з пасажирями й без пасажирів, реалізовану без буксування коліс. Маса тари вагона $m_b = 18$ т, місткість 140 чоловік, середня маса пасажирів 75 кг. Коефіцієнт зчеплення $\Psi = 0,16$.

[1], гл. 2; [3], §2; [4], §2.1.

Задача 7. Визначити найбільшу силу тяги тролейбуса типу ЗІУ-9 з пасажирями й без пасажирів, реалізовану без буксування коліс. Маса тари тролейбуса ЗІУ-9 $m_b = 9,5$ т, місткість 125 чоловік, середня маса пасажирів 75 кг, коефіцієнт зчеплення $\psi = 0,35$.

[1], гл. 2; [3], §2; [4], §2.1.

Задача 8. Визначити найбільшу припустиму по зчепленню гальмову силу трамвайного вагона типу КТМ-5М з пасажирями й без пасажирів. Маса тари вагона $m_b = 18$ т, місткість 140 чоловік, середня маса пасажирів 75 кг, коефіцієнт зчеплення $\psi = 0,16$.

[1], гл. 2; [3], §2 [4], §2.1.

Задача 9. Визначити найбільшу припустиму по зчепленню гальмову силу тролейбуса ЗІУ-9 з пасажирями й без пасажирів. Маса тари тролейбуса $m_b = 9,5$ т, місткість 125 чоловік, середня маса пасажирів 75 кг, коефіцієнт зчеплення $\psi = 0,35$.

[1], гл. 2; [3], §2 [4], §2.1.

Задача 10. Визначити потужність механічних втрат у тягових двигунах і механічних передачах (редукторах) моторного трамвайного вагона типу КТМ-5М, що має масу $m_b = 28$ т і рухається зі швидкістю $V_{max} = 30$ км/год.

[1], гл. 3; [3], §3; [4], §3.1.

Задача 11. Визначити гальмову силу B , при якій моторний трамвайний вагон типу КТМ-5М масою $m=25\text{т}$ на спуску з ухилом $i = -50\%$ буде рухатися з найбільшою припустимою швидкістю $V_{\max}=25\text{км/год}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1, 3.2, 3.3.

Задача 12. Визначити, на спуску якої крутості трамвайний вагон масою $m=25,5\text{т}$ буде рухатися з постійною швидкістю, якщо сума гальмової сили та сили основного опору руху $B+W_0=10\text{кН}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 13. Визначити, на спуску якої крутості моторний трамвайний вагон типу КТМ-5М масою 25т буде рухатися з постійною швидкістю $V=15\text{км/год}$, якщо гальмова сила $B=20\text{кН}$

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 14. Визначити додатковий опір руху $W_{\text{доп}}$ трамвайного вагона типу КТМ-5М масою 24т при русі на криволінійному спуску з ухилом $i = -10\%$ і радіусом кривизни $R_{\text{кр}} = 150\text{м}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 15. Для тролейбуса типу ЗІУ-9 масою 15т визначити опір руху від ухилу довжиною 500м з висотами на початку й наприкінці відповідно $h_{\text{н}}=2\text{м}$ і $h_{\text{к}}=12\text{м}$. Визначити також збільшення потенційної енергії поїзда наприкінці підйому.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 16. Визначити повний опір руху для трамвайного вагона типу КТМ-5М масою 25т при русі в режимі тяги на криволінійному підйомі з ухилом $i=20\%$ і радіусом кривизни $R_{\text{кр}}=150\text{м}$ зі швидкістю $V=20\text{км/год}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 17. Визначити потужність механічних втрат у тяговому двигуні й механічній передачі тролейбуса типу ЗІУ-9 при швидкості руху $V=30\text{км/год}$. Маса тролейбуса $m=15\text{т}$.

[1], гл. 1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 18. Визначити сталу швидкість руху моторного трамвайного вагона типу КТМ-5М у режимі вибігу на прямолінійному спуску з ухилом $i = -13\%$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 19. Визначити сталу швидкість руху тролейбуса типу ЗІУ-9 у режимі вибігу на спуску з ухилом $i = -19\%$.

[1], гл. 1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 20. Визначити сталу швидкість руху моторного трамвайного вагона типу КТМ-5М у режимі вибігу на криволінійному спуску з ухилом $i = -20\%$ і радіусом кривизни $R_{\text{кр}}=450\text{м}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 21. Визначити повний опір руху для тролейбуса ЗІУ-9 масою 15т при русі в режимі тяги на підйомі з ухилом $i=10\%$ зі швидкістю $V=30\text{км/год}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 22. Визначити питому силу електричного гальмування, при якій трамвайний вагон типу КТМ-5М при русі на криволінійному спуску з ухилом $i = -20\%$ радіусом кривизни $R_{кр} = 75\text{м}$ не перевищить максимально припустиму швидкість $V_{\text{max.кр}} = 20\text{ км/год}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 23. Визначити пускову силу тяги $F_{\text{п}}$ трамвайного вагона типу КТМ-5М и тролейбуса типу ЗІУ-9 у момент рушання ($V=0$) на прямолінійному підйомі з ухилом $i=2\%$, якщо пускове прискорення $a_{\text{п}}=0,4\text{ м/с}^2$. Вага трамвая 250 кН, приведена маса 28,6т. Вага тролейбуса 180 кН, приведена маса 21 т.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 24. Визначити прискорення трамвайного вагона типу КТМ-5М и тролейбуса типу ЗІУ-9 на прямій і горизонтальній ділянці шляху, якщо при швидкості $V=50\text{ км/год}$ сила тяги $F=5000\text{Н}$. Вага трамвая $G=250\text{кН}$, приведена маса $m_{\text{п}}=28,6\text{ т}$. Вага тролейбуса $G=150\text{кН}$, приведена маса $m_{\text{п}}=17,5\text{т}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 25. Визначити величину прискорення трамвайного вагона типу КТМ-5М у момент рушання ($V=0$) на криволінійному спуску з ухилом $i = -2\%$ і радіусом кривизни $R_{кр} = 90\text{м}$, якщо пускова сила тяги $F_{\text{п}}=10\text{кН}$. Вага трамвая $G=250\text{ кН}$, приведена маса $m_{\text{п}}=28,6\text{ т}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 26. Визначити, при якому значенні коефіцієнта зчеплення ψ буде неможлива реалізація гальмової сили $B=29\text{кН}$, що розвивається при електричному гальмуванні трамвайного вагона вагою $G=235\text{кН}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 27. При механічному гальмуванні на прямолінійному спуску з ухилом $i = -39,5\%$ трамвайний вагон типу КТМ-5М рухається зі сталою швидкістю $V_y=10\text{км/год}$. Визначити величину гальмової сили вагона, якщо його вага $G=235\text{кН}$.

[1], гл. 1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 28. Визначити, чи можливо зупинити трамвайний вагон типу КТМ-5М на прямолінійному пуску з ухилом $i = -100\%$, якщо гальмова сила вагона $B=20\text{кН}$, швидкість початку гальмування $V_{\text{т}}=30\text{км/год}$. Вага вагона $G=240\text{кН}$, коефіцієнт інерції оберткових частин вагона $1+\gamma=1,12$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 29. Визначити пускову силу тяги $F_{\text{п}}$ трамвайного вагона типу КТМ-5М и тролейбуса типу ЗІУ-9 у момент рушання з місця ($V=0$) на прямолінійному спуску з ухилом $i = -2\%$, якщо початкове значення пускового прискорення $a_{\text{нач}}=0,3\text{ м/с}^2$. Вага трамвая 220кН, тролейбуса - 150кН, коефіцієнт інерції оберткових частин трамвая й тролейбуса $1+\gamma=1,12$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 30. Визначити величину гальмового уповільнення $a_{\text{т}}$ у момент початку механічного гальмування трамвайного вагона типу КТМ-5М на прямолінійному спуску з ухилом $i = -5\%$, якщо гальмова сила $B=20\text{кН}$, вага вагона $G=235\text{кН}$, коефіцієнт інерції оберткових частин вагона $1+\gamma=1,12$, швидкість початку гальмування $V_{\text{т}}=30\text{км/год}$.

[1], гл. 1,3; [3], §1,3; [4], §1.1, 3.1 - 3.3.

Задача 31. Визначити величину припустимого по зчепленню максимального прямолінійного підйому, що може перебороти трамвайний вагон типу КТМ-5М зі швидкістю $V=30$ км/год, при коефіцієнті зчеплення коліс із рейками $\psi=0,16$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22.

Задача 32. Визначити величину припустимого по зчепленню максимального прямолінійного підйому, на якому можливе рушання з місця ($V=0$) трамвайного вагона типу КТМ-5М з прискоренням $a_{\text{нач}}=0,4$ м/с², якщо коефіцієнт зчеплення коліс із рейками $\psi=0,16$ коефіцієнт інерції оберткових частин вагона $1+\gamma=1,14$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22.

Задача 33. Визначити величину припустимого по зчепленню максимального підйому, що може перебороти тролейбус типу ЗІУ-9 зі швидкістю 30 км/год при коефіцієнті зчеплення коліс із дорожнім покриттям $\psi=0,35$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22.

Задача 34. Визначити величину припустимого по зчепленню максимального підйому, на якому можливе рушання з місця ($V=0$) тролейбуса типу ЗІУ-9 із прискоренням $a_{\text{нач}}=0,3$ м/с², якщо коефіцієнт зчеплення коліс із дорожнім покриттям $\psi=0,35$, коефіцієнт інерції оберткових частин тролейбуса $1+\gamma=1,15$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22.

Задача 35. Визначити величину з a_t і гальмовий шлях L_t трамвайного вагона типу КТМ-5М при екстреному гальмуванні рейковим гальмом на прямій і горизонтальній ділянках шляху. Швидкість початку гальмування $V_t=30$ км/год, вага вагона $G=250$ кН, коефіцієнт інерції оберткових частин вагона $1+\gamma=1,12$, середнє значення коефіцієнта тертя гальмового башмака об рейку $\varphi_p=0,14$, площа зіткнення з рейкою одного полюсного башмака $S=0,2$ м², магнітна індукція в зазорі між черевиком і рейкою $B\delta=1,2$ Тл.

[1], гл. 1,3,4; [3], §1,3,8; [4], §1.1, 3.1 - 3.3,4.4.

Задача 36. Визначити величину з a_t трамвайного вагона типу КТМ-5М у початковий момент екстреного гальмування рейковим гальмом на прямій і горизонтальній ділянках шляху. Швидкість початку гальмування $V_t=50$ км/год, вага вагона $G=230$ кН, коефіцієнт інерції оберткових частин $1+\gamma=1,12$, площа зіткнення одного полюсного черевика з рейкою $S=0,18$ м², магнітна індукція в зазорі між черевиком і рейкою $B\delta=1,3$ Тл, коефіцієнт тертя гальмового черевика об рейку визначається з вираження

$$\varphi_p = 0,19 \frac{10,8 \cdot V + 100}{21,6 \cdot V + 100}.$$

[1], гл. 1,3,4; [3], §1,3,8; [4], §1.1, 3.1 - 3.3,4.4.

Задача 37. Визначити величину припустимого по зчепленню максимального прямолінійного спуска, на якому можна загальмувати трамвайний вагон типу КТМ-5М при електричному гальмуванні із уповільненням 1 м/с², якщо коефіцієнт зчеплення коліс із рейками $\psi=0,15$, коефіцієнт інерції оберткових частин вагона $1+\gamma=1,12$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22.

Задача 38. Визначити величину припустимого максимального криво-лінійного спуска, на якому трамвайний вагон типу КТМ-5М у режимі електричного гальмування буде рухатися рівномірно зі швидкістю $V=10\text{ км/год}$, якщо коефіцієнт зчеплення коліс із рейками $\psi=0,15$, коефіцієнт інерції обертових частин вагона $1+\gamma=1,12$, радіус кривизни спуска $R_{кр}=150\text{ м}$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22.

Задача 39. Визначити величину припустимого по зчепленню максимального спуска на якому тролейбус типу ЗІУ-9 буде рухатися при електричному гальмуванні із уповільненням 1 м/с^2 , якщо коефіцієнт зчеплення коліс із полотном дороги $\psi=0,35$, коефіцієнт інерції обертових частин

$1+\gamma=1,12$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22.

Задача 40. Визначити величину припустимого по зчепленню максимального спуска, на якому тролейбус типу ЗІУ-9 у режимі електричного гальмування буде рухатися рівномірно зі швидкістю $V=10\text{ км/год}$, якщо коефіцієнт зчеплення коліс із дорожнім покриттям $\psi=0,35$, коефіцієнт інерції обертових частин $1+\gamma=1,12$.

[1], гл. 1,2,3; [3], §1,2,3; [4], §1.1, 2.1,3.1 - 3.3; [5], §22.

Задача 41. Визначити найбільшу припустиму по зчепленню силу натискання на одну гальмову колодку барабанного гальма тролейбуса, якщо коефіцієнт притискання гальмових колодок $\delta=2$, діаметр гальмового барабана $D_б=400\text{ мм}$, діаметр рушійного колеса $D_к=1070\text{ мм}$, вага тролейбуса $G=150\text{ кН}$.

[1], гл. 8; [3], §8; [4], §4.2; [6], §6.2.

Задача 42. Визначити гальмову силу B , створювану тяговим двигуном послідовного збудження при реостатному гальмуванні, якщо при струмі якоря $I_T=200\text{ А}$ и швидкості $V=20\text{ км/год}$ електрорушійна сила якоря $E=600\text{ В}$. Сумарні магнітні й механічні втрати у двигуні і передачі

$\Delta P_T = (\Delta P_M + \Delta P_{MX} + \Delta P_3) = 4\text{ кВт}$.

[1], гл. 4,9; [3], §4,9; [4], §5.1, 6.2, 6.3.

Задача 43. Визначити рівнодіючу (сумарну) гальмову силу тролейбуса ЗІУ-9 масою $m=15\text{ т}$, якщо при русі на спуску з ухилом $i=-20\%$ при швидкості $V=30\text{ км/год}$ струм якоря двигуна ДК-211 А працюючого в режимі реостатного гальмування, $I_T=350\text{ А}$, ЕРС $E=800\text{ В}$, сумарні магнітні й механічні втрати у двигуні і передачі

$\Delta P_T = (\Delta P_M + \Delta P_{MX} + \Delta P_3) = 5\text{ кВт}$.

[1], гл. 4,9; [3], §4,9; [4], §5.1, 6.2, 6.3.

Задача 44. Визначити найбільшу припустиму по зчепленню силу натискання K_{max} на одну гальмову колодку барабанного гальма трамвайного вагона типу КТМ-5М, якщо коефіцієнт натискання гальмових колодок $\delta=0,6$, передаточне число редуктора $\mu=7,143$, діаметр рушійного колеса $D_к=0,7\text{ м}$, діаметр гальмового барабана $D_б=200\text{ мм}$, ККД механічної передачі (редуктора) $\eta_3=0,96$, маса вагона $m=25\text{ т}$, число колодок, що притискаються до гальмового барабана, $n=2$.

[1], гл. 8; [3], §8; [4], §4.2; [6], §6.2.

Задача 45. У номінальному режимі роботи ЕРС якоря тягового двигуна $E_{ном}=0,9U_{ном}$. Визначити, як зміниться струм якоря I і електромагнітний момент

$M_{\text{см}}$ двигуна стосовно їхніх номінальних значень $I_{\text{ном}}$ і $M_{\text{см.ном}}$, якщо магнітний потік зменшиться до значення $\Phi=0,8\Phi_{\text{ном}}$, а частота обертання (швидкість руху) залишиться колишньому, рівної номінальному значенню ($n=n_{\text{ном}}=\text{const}$).

[1], гл. 5; [3], §5; [4], §5.2.

Задача 46. Два тягових двигуни ДК-261А відповідно до своїх характеристик при $U=U_{\text{ном}}=275$ В и $I=I_{\text{ном}}=250$ А мають частоти обертання 1430 і 1480 об/хв. Яка буде частота обертання двигунів при їхньому послідовному включенні до напруги контактної мережі $U_{\text{к}}=550$ В і струмі навантаження $I=I_{\text{ном}}=250$ А? В якому співвідношенні будуть перебувати їх ЕРС і електромагнітні моменти (сили тяги)?

[1], гл. 6; [3], §6; [4], §5.3.

Задача 47. Тяговий двигун послідовного збудження ДК-211Б має наступні номінальні дані: $P_{\text{ном}}=150$ кВт, $U_{\text{ном}}=550$ В, $n_{\text{ном}}=1860$ об/хв, опір двигуна при 115°C $r_{115^{\circ}}=0,12$ Ом, номінальний ККД $\eta_{\text{ном}}=91\%$.

Як зміниться струм якоря двигуна I , ЕРС якоря E , корисна потужність на валу P , частота обертання n і КПД η , якщо напруга мережі знизиться на 20%, а момент на валу двигуна залишиться колишнім (не зміниться). Зміною внутрішнього моменту опору двигуна ΔM зневажити.

[1], гл. 4,5; [3], §4,5; [4], §5.1, 5.2.

Задача 48. Тяговий двигун послідовного збудження ТЕ-022 має наступні номінальні дані: $P_{\text{ном}}=45$ кВт, $U_{\text{ном}}=300$ В, $n_{\text{ном}}=1750$ об/хв, опір двигуна $r_{115^{\circ}}=0,152$ Ом, число паралельних галузей обмотки якоря $2a=2$, число пар полюсів $p=2$, число провідників обмотки якоря $N=290$, номінальний ККД двигуна $\eta_{\text{ном}}=91\%$.

Визначити струм якоря I , ЕРС якоря E , магнітний потік Φ , потужність на валу P , частоту обертання n і ККД двигуна η при зниженні напруги на 25% і незмінному моменті на валу. Зміною внутрішнього моменту опору двигуна ΔM зневажити.

[1], гл. 4,5; [3], §4,5; [4], §5.1, 5.2.

Задача 49. Визначити силу тяги P моторного трамвайного вагона, якщо потужність на валу тягового двигуна $P=40$ кВт, частота обертання $n=1200$ об/хв, передаточне число редуктора $\mu=7,17$, коефіцієнт корисної дії редуктора (передатчі) $\eta_3=0,96$, діаметр рушійних коліс $D_{\text{к}}=0,7$ м.

[1], гл. 1,4; [3], §1,4; [4], §1.2, 5.1.

Задача 50. Задані характеристики швидкості $V(I)$ і сили тяги $F_{\text{к}}(I)$ двигуна, що відповідають діаметру ведучого колеса $D_{\text{к}}=0,7$ м і передаточному числу редуктора $\mu=7,143$ перерахувати на діаметр ведучого колеса $D_{\text{к1}}=0,68$ м і передаточне число $\mu_1=6,71$. Характеристики $V(I)$ і $F_{\text{к}}(I)$ задані у вигляді таблиці.

$I, \text{А}$	100	200	250	300
$V, \text{км/год}$	56	33,5	28,5	26,5
$F_{\text{к}}, \text{Н}$	3500	8000	10250	12500

Задані й отримані характеристики побудувати у загальних осях координат.
[1], гл. 1,4; [3], §1,4; [4], §1.2, 5.1.

КОНТРОЛЬНЕ ЗАВДАННЯ № 2

Розрахувати значення величин, зазначених у табл. 14 знаком питання, що характеризують рух тролейбуса в режимі тяги з постійною швидкістю.

У табл. 14 прийняті такі позначення:

D_k - діаметр рушійних і підтримуючих коліс, м;

$\Delta P_{3\%} = 100 \Delta P_3 / P_1$ - втрати потужності в механічній передачі, %;

η_d - ККД на валу тягового двигуна, о.е.;

η_3 - ККД механічної передачі, о.е.;

η - ККД тягового двигуна на ободі рушійних коліс, о. е.;

$\mu = \omega / \omega_k$ - передаточне число механічної передачі;

ω - кутова швидкість вала двигуна, рад/с;

ω_k - кутова швидкість рушійних і підтримуючих коліс, рад/с;

P_1 - підведена до двигуна потужність, кВт;

P_2 - потужність на валу тягового двигуна, кВт;

P - потужність тягового двигуна на ободі рушійних коліс, кВт;

M - обертаючий момент на валу тягового двигуна, Н·м;

V - поступальна швидкість руху тролейбуса, км/год;

m - маса тролейбуса, Т;

m_{np} - приведена до швидкості V маса тролейбуса, Т;

K_H - коефіцієнт інерції обертових частин тролейбуса;

J_a - момент інерції якоря двигуна, включаючи частини механічної передачі, що жорстко пов'язані з його валом, кг·м²;

J_k - момент інерції рушійних і підтримуючих коліс, включаючи частини механічної передачі, жорстко пов'язані з ними, кг·м²;

J_{np} - приведений до кутової швидкості ω вала двигуна момент інерції тролейбуса, кг·м²;

W - повний опір руху тролейбуса, кН;

$w_0 = 12 + 0,004V^2$ - питомий основний опір руху тролейбуса, Н/кН;

i - ухил профілю колії, ‰.

Приклад розрахунку

Варіант №1

1. Результуючий ККД механічної передачі тягового електропривода

$$\eta_3 = 1 - \frac{\Delta P_{3\%}}{100 \cdot \eta_d} = 1 - \frac{6}{100 \cdot 0,85} = 0,93.$$

2. ККД тягового двигуна, віднесений до обода рушійних коліс,

$$\eta = \eta_d \cdot \eta_3 = 0,85 \cdot 0,93 = 0,79.$$

3. Потужність, що розвивається ТЕД на ободі рушійних коліс,

$$P = F_k \cdot V / 3,6 = W \cdot V \cdot 3,6 = 5 \cdot 40 / 3,6 = 55,56 \text{ кВт},$$

де F_k – сила тяги, створювана тяговим двигуном, кН. При русі з постійною швидкістю сила тяги врівноважується повною силою опору руху, тобто $F_k = W$.

4. Потужність на валу тягового двигуна $P_2 = P / \eta_3 = 55,56 / 0,93 = 59,74$ кВт.

5. Підведена до тягового двигуна потужність $P_1 = P / \eta = 55,56 / 0,79 = 70,3$ кВт.

6. Радіус приведення кінематичної схеми тягового електроприводу між виконавчим органом (рушійними колесами) і валом двигуна

$$\rho = \frac{V}{\omega} = \omega_k \frac{D_k}{2} \cdot \frac{1}{\omega} = \frac{D_k}{2\mu} = \frac{1,07}{2 \cdot 11,4} = 0,0469 \text{ м.}$$

6. Кутова швидкість вала двигуна

$$\omega = V / \rho = 40 / (3,6 \cdot 0,0469) = 236,9 \text{ рад/с.}$$

7. Обертаючий момент на валу двигуна

$$M = P_2 / \omega = 59,74 \cdot 10^3 / 236,9 = 252,2 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

8. Частота обертання вала двигуна

$$n = \frac{30}{\pi} \omega = \frac{30}{3,14} 236,9 = 2263 \text{ об/хв.}$$

1. Приведена маса тролейбуса

$$m_{np} = m + m_g = m + (J_y \frac{\omega^2}{V^2} + J_k \frac{\omega_k^2}{V^2}) = m + (J_y \frac{\mu^2}{R_k^2} + J_k \frac{1}{R_k^2}) =$$

$$= 18 \cdot 10^3 + (3,2 \frac{11,4^2}{0,535^2} + 70 \frac{1}{0,535^2}) = 18000 + 1454 + 245 = 19699 \text{ кг.}$$

Приведену до поступальної швидкості V масу тролейбуса визнають з рівності кінетичної енергії елементів у розрахунковій і реальній кінематичних схемах тролейбуса (рис.14).

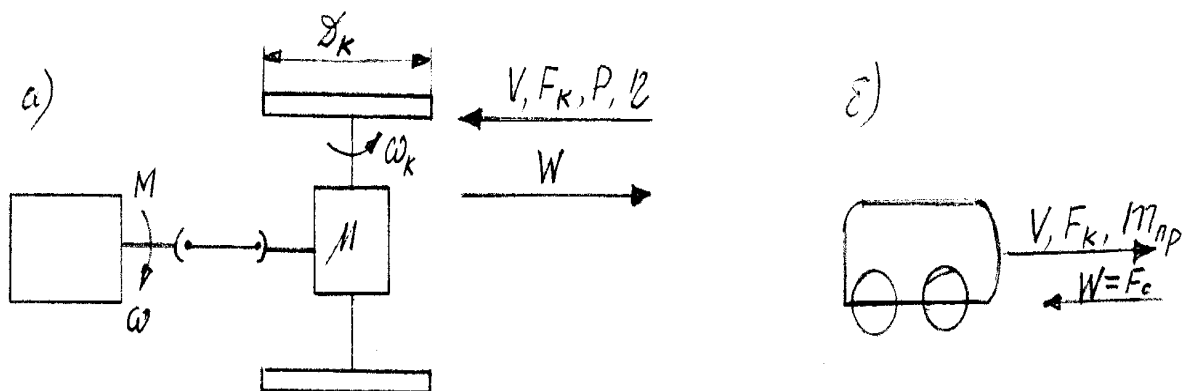


Рис. 14 - Кінематична реальна (а) і розрахункова (б) схеми тролейбуса при операції приведення до поступальної швидкості руху

Таблиця 14 – вихідні дані до розрахунку параметрів тягового електроприводу й руху тролейбуса

№ варіанта	$D_{\kappa},$ м	$\Delta P_3,$ %	η_D о.е.	η_3 о.е.	η о.е.	$\mu,$ о.е.	$P_1,$ кВт	$P_2,$ кВт	$P,$ кВт	$M,$ Н·м	$V,$ км/год	$\omega,$ рад/с	$m,$ т	$m_{np},$ т	$K_{II},$ о.е.	$J_{\kappa},$ кг·м ²	$J_K,$ кг·м ²	$J_{np},$ кг·м ²	$W,$ кН	$w_o,$ Н/кН	$i,$ ‰
1	1,07	6	0,85	?	?	11,4	?	?	?	?	40	?	18	?	?	3,2	70	?	5	?	?
2	1,10	?	?	0,94	?	11,3	68	?	55	?	45	?	16	?	?	3,5	65	?	?	?	?
3	1,10	5	0,84	?	?	12,0	?	?	52	220	?	250	20	?	?	3,4	75	?	?	?	?
4	1,07	?	?	0,95	?	12,0	60	?	?	?	36	?	22	?	1,1	?	80	?	?	?	5
5	1,07	4,5	0,82	?	?	?	?	?	?	?	?	240	18	?	?	3,2	?	43	?	18,4	9,9
6	?	5	0,83	?	?	11,4	?	?	?	?	30	173	17	?	?	?	70	45	?	?	7
7	?	?	?	0,94	?	11,3	67	?	?	?	?	257	16	?	?	3,3	68	?	?	20,1	8
8	1,10	5	0,84	?	?	12,0	?	?	53	220	?	250	20	?	?	3,3	77	?	?	?	?
9	1,07	6	0,85	?	?	11,3	?	?	?	?	?	?	19	?	?	3,1	70	?	6	22	?
0	1,10	4,6	0,83	?	?	?	?	?	50	?	?	235	18	?	?	3,0	80	?	?	18,4	?

Тролейбус із масою m , що має поступальний рух з одночасним обертанням деяких його частин, еквівалентний тілу з наведеною масою m_{np} , що робить тільки поступальний рух:

$$m_{np} \frac{V^2}{2} = m \frac{V^2}{2} + J_{\text{я}} \frac{\omega^2}{2} + J_{\text{к}} \frac{\omega_{\text{к}}^2}{2};$$

$$m_{np} = m + m_{\text{э}} = m + \left(J_{\text{я}} \frac{\omega^2}{V^2} + J_{\text{к}} \frac{\omega_{\text{к}}^2}{V^2} \right);$$

$$\omega = \mu \omega_{\text{к}} = \mu \frac{V}{R_{\text{к}}}; \quad R_{\text{к}} = \frac{D_{\text{к}}}{2};$$

$$m_{np} = m + m_{\text{э}} = m + \left(J_{\text{я}} \frac{\mu^2}{R_{\text{к}}^2} + J_{\text{к}} \frac{1}{R_{\text{к}}^2} \right).$$

2. При визначенні наведеного моменту інерції тролейбуса J_{np} використовують його розрахункову схему (рис.15), що представляє собою тяговий двигун з наведеним моментом інерції J_{np} й наведеним моментом навантаження $M_c = F_{\text{к}} V / (\eta_3 \omega) = F_{\text{к}} \rho / \eta_3$. Це вираження перебуває з рівняння балансу потужності навантаження ЕП у реальній і розрахунковій схемах:

$$M_c \omega = F_{\text{к}} V / \eta_3 = P_2.$$

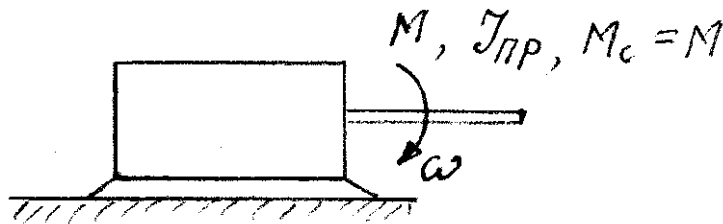


Рис. 15 - Розрахункова схема тролейбуса при операції приведення руху тролейбуса до кутової швидкості вала двигуна

Рівняння балансу кінетичної енергії в розрахунковій (рис. 15) і реальній (рис.14, а) кінематичних схемах має вигляд:

$$J_{np} \frac{\omega^2}{2} = J_{\text{я}} \frac{\omega^2}{2} + J_{\text{к}} \frac{\omega_{\text{к}}^2}{2} + m \frac{V^2}{2}.$$

Із цієї рівності знаходимо

$$J_{np} = J_{\text{я}} + J_{\text{к}} \frac{\omega_{\text{к}}^2}{\omega^2} + m \frac{V^2}{\omega^2} = J_{\text{я}} + J_{\text{к}} / \mu^2 + m \rho^2 =$$

$$= 3,2 + 70 / 11,4^2 + 18 \cdot 10^3 \cdot 0,0469^2 = 3,2 + 0,538 + 39,6 = 43,338 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

3. Коефіцієнт інерції обертючих частин тролейбуса

$$K_u = \frac{m_{np}}{m} = \frac{19699}{18000} = 1,0944$$

або

$$K_u = \frac{J_{np}}{J_{\odot}} = \frac{43,338}{39,6} = 1,0944 ,$$

де $J_{\odot} = m\rho^2$ - еквівалентний момент інерції маси поїзда.

4. Основний опір руху тролейбуса

$$W_0 = mgw_0 = mg(12 + 0,004V^2) = 18 \cdot 9,81(12 + 0,004 \cdot 40^2) = 18 \cdot 9,81 \cdot 18,4 = 3249 \text{ Н.}$$

5. Опір руху від ухилу профілю колії

$$W_i = W - W_0 = 5000 - 3249 = 1751 \text{ Н.}$$

6. Ухил профілю колії

$$i = \frac{W_i}{mg} = \frac{1751}{18 \cdot 9,81} = 9,9 \text{ ‰}.$$

16. Питомий основний опір руху тролейбуса при русі під струмом (роботі двигунів) на асфальтових і бетонних дорогах і швидкості V , км/год,

$$w_0 = 12 + 0,004 + 40^2 = 18,4 \text{ Н/кН.}$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи електричної тяги: навч.посібник/В. Х.Далека, П. М. Пушков, В. П. Андрійченко, Ю. В. Мінеєва; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2012. – 312с.
2. Методичні вказівки до практичних і самостійних занять з дисципліни (для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання спеціальностей 6.092200 – «Електричні системи і комплекси транспортних засобів»; «Електричний транспорт»). Уклад.: П. М. Пушков, Ю. В. Мінеєва – Х.: ХНАМГ, 2009-79с.
3. Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги. Учебник для вузов ж-д. транспорт – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
4. Кутыловский М.П. Электрическая тяга / городской электрический транспорт /. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1970.-263с.
6. Байрыева Л.С., Шевченко В.В. Электрическая тяга: городской наземный транспорт: Учебник для техникумов. – М.: Транспорт, 1986.-206с.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	3
1. Випрямлення профілю ділянки шляхи	3
2. Розрахунок еквівалентного, за витратою енергії, ухилу ділянки шляхи	6
3. Розрахунок і побудова тягової характеристики поїзда	11
4. Визначення витрати електроенергії на рух поїзда	18
5. Розрахунок і побудова кривих руху	23
6. Гальмівні завдання	28
7. Перевірка потужності тягових двигунів способом середнього квадратичного струму	41
8. Вибір потужності тягових електричних двигунів	42
9. Контрольні завдання до самостійних занять	49
Список використаних джерел	61

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних і самостійних занять
із тягових розрахунків з дисципліни
«ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ»

(для студентів 3 курсу денної і 4 курсу заочної форм навчання
за напрямом підготовки 6.050702 – «Електромеханіка»
та слухачів другої вищої освіти за спеціальностями
«Електричний транспорт» і «Електричні системи і комплекси
транспортних засобів»)

Укладач: **МІНЄЄВА** Юлія Віталіївна

Відповідальний за випуск *В. Х. Далека*

Редактор *З. І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2012, поз. 165М

Підп. до друку 16.03.2012

Друк на ризографі.

Зам. №

Формат 60 x 84 1/16

Ум. друк. арк. 3,5

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,

вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК №4064 від 12.05.2011р.