

Міністерство транспорту та зв'язку України
Державний економіко-технологічний університет транспорту
Кафедра «Тяговий рухомий склад залізничного транспорту»



В. М. Головань

Методичні вказівки

щодо виконання контрольних робіт студентами денної та заочної форми
навчання IV і V курсів спеціальності
«Електричний транспорт»
з дисципліни «Електропостачання залізниць»

Київ – 2009

УДК 629.23.

Головань В. М.

Методичні вказівки щодо виконання контрольних робіт студентами IV і V курсів спеціальності «Електричний транспорт» з дисципліни «Електропостачання залізниць». – К.: ДЕТУТ, 2009. – 30с.

У методичних вказівках викладений порядок розрахунку потужності ТТП та ТРС постійного струму, ККД ТРС та всієї системи електропостачання, напруги ТРС, гальмової сили, струму рекуперації та напруги на шинах ТТП.

Рекомендовано кафедрою «Тяговий рухомий склад залізничного транспорту» (протокол № 7 від 05 березня 2009 р.) та методичною радою факультету «Інфраструктура та рухомий склад залізничного транспорту» (протокол № 8 від 27 березня 2009 р.) ДЕТУТ

Автор: **В.М. Головань** доцент кафедри «Тяговий рухомий склад залізничного транспорту» ДЕТУТ

Рецензенти:

В. М. Людмирський - заступник начальника головного управління електрифікації та електропостачання Укрзалізниці

Ю.Ф. Дубравін – доцент кафедри «Тяговий рухомий склад залізничного транспорту» ДЕТУТ, к.т.н.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	4
1. Завдання з розрахунків задач 1 та 2	5
2. Методичні вказівки щодо вироблення задачі 1	8
3. Методичні вказівки щодо вироблення задачі 2	19
4. Приклад розрахунку задачі тягового режиму поїзда.	
Задача 1.	21
5. Приклад розрахунку задачі рекуперативного режиму поїзда.	
Задача 2.	26
Література.	29

ВСТУП

Прогрес на залізниці нероздільно зв'язаний з станом локомотивної тяги, удосконаленням експлуатації та технічного обслуговування локомотивів. Теорія та практика експлуатації локомотивів за останні роки набули деяких змін, пов'язаних із збільшенням навантаження на локомотивне господарство, збільшенням об'єму перевезень, введенням в експлуатацію нової техніки, широкого застосування ЕВМ. За останні роки створені нові зразки електровозів та моторвагонного рухомого складу. Однією з основних тенденцій розвитку тягових засобів є збільшення номінальної потужності тягового рухомого складу. Ця тенденція замовлена необхідністю збільшення маси поїздів та швидкостей руху, зростаючими експлуатаційними вимогами щодо параметрів руху.

При підготовці в транспортних навчальних закладах фахівців спеціальності «Електричний транспорт» необхідно знати як слід виконувати завдання з розрахунків тягового та рекуперативного режимів при керуванні сучасним електрорухомим складом.

Висока ефективність електровозів найкраще реалізується на швидкісних та вантажно-напружених лініях, на лініях з важким профілем колії, де є можливість рекуперативного гальмування.

В запропонованих контрольних роботах даного посібника розглядається тільки система електропостачання постійного струму з напругою в контактній мережі -- 3кВ. Під час виконання цих двох задач слід користуватися основними відомостями з механіки, електротехніки, електричних машин та тяги поїздів.

На кожен поїзд, що рухається, діють різні зовнішні та внутрішні сили. Як створюється сила тяги ЕРС, як діють сили опору рухові поїзда, як складається баланс і використання витраченої енергії і як підтримується рівень напруги в контактній мережі при рекуперації та дії гальмової сили під час прямування поїздів по ухилах розглядається в поданих методичних вказівках.

1. Завдання з розрахунків задач 1 та 2

Пропонована контрольна робота призначена допомогти студенту використовувати основні відомості з механіки та електротехніки при розв'язанні простих задач електричної тяги. На найпростіших схемах, розглянутих в контрольній роботуродемонстровано також зв'язок тягової мережі та електрорухомого складу, які складають єдину систему.

Контрольна робота складається з двох задач. В першій задачі розглядається режим тяги, а в другій - рекуперативне гальмування на ухилі.

Задача 1

На ділянці електричної залізниці постійного струму між двома тяговими підстанціями А та В (схема 1.)

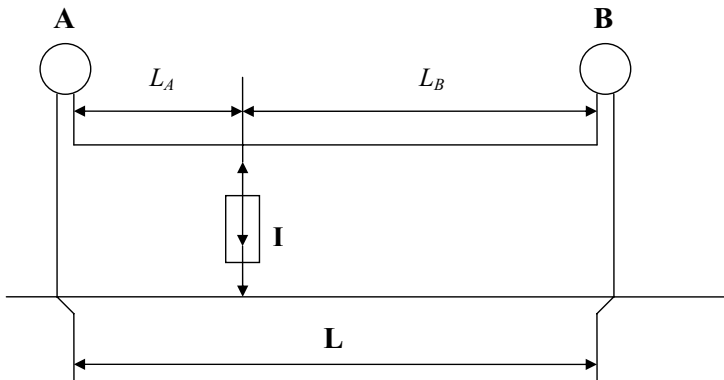


Схема 1

по підйому $i\%$ зі встановленою швидкістю рухається поїзд масою m .
Головний опір руху поїзда (без врахування опору руху від підйому) – W_o .

Знайти: 1) потужність тягових підстанцій; 2) потужність електровозу; 3) потужність віднесена до обода колеса ЕРС; 4) ККД електровоза та всієї системи

від шин підстанції до обода колеса електровоза; 5) напругу у електровоза, коли він знаходиться на відстані L_A від підстанції A , та швидкість руху поїзда.

Напруга на шляху підстанції A та B рівні $U_{ш} = 3300\text{В}$.

Величини підйомів такі самі як і інші вихідні дані, приведені в табл. 1 та 2.

Задача 2

Між двома підстанціями A та B (рис. 1) по ухилу $i\%$ з встановленою швидкістю V рухається поїзд масою m . Основний опір руху поїзда, з врахуванням механічних втрат в електровозі - W_o . ККД електричних машин, що працюють в режимі генераторів $\eta_r = 0,95$.

Знайти: 1) силу гальмування, необхідну для підтримки встановленої швидкості; 2) струм рекуперації; 3) ККД всієї системи та напруги на шинах тягових підстанцій (вважаючи їх рівними), якщо напруга у електровоза $U_e = 3300\text{В}$.

Величини ухилів, як і інші вихідні дані наведено у табл. 3 та 4.

Вихідні дані

Вихідними даними для розв'язування задач є величина підйому ухилу i , маса потяга m , головний опір руху W_o , відстань між підстанціями L , відстань від підстанцій до електровоза L_A та L_B , опір одного кілометра рухомої мережі r_o .

При розв'язанні задачі 1 підйоми i , відстань від підстанцій та до електровоза, вибираються студентом по табл. 1 за останньою цифрою свого шифру; маса поїзда, головний опір руху та опір одного кілометра тягової мережі беруться по табл. 2 залежно від передостанньої цифри шифру.

Вихідні дані для розв'язання задачі 2 беруться з табл. 3 та 4 за останньою та передостанньою цифрами шифру.

Таблиця 1

Остання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i, \%$	2	7	6	5	4		2	3	4	5
$L, \text{км}$	18	20	22	18	20	22	18	20	22	20
$L_A, \text{км}$	4	6	8	8	4	6	10	12	16	8
$L_B, \text{км}$	14	14	14	10	16	16	8	8	6	12

Таблиця 2

Остання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m, \text{т}$	3000	2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	2500	2700
$W_{os}, \text{кН}$	75	80	85	90	90	95	95	100	60	65
$r_{os}, \text{Ом/км}$	0,068	0,053	0,014	0,668	0,053	0,044	0,068	0,053	0,044	0,068

Таблиця 3

Остання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i, \%$ (спуск)	7	8	9	10	11	12	13	14	12	10
$V, \text{км/год}$	90	90	85	80	80	80	75	75	85	85
$L, \text{км}$	18	20	22	18	20	22	18	20	22	20
$L_A, \text{км}$	4	6	8	8	4	6	10	12	16	8
$L_B, \text{км}$	14	14	14	10	16	16	8	8	6	12

Таблиця 4

Остання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
m , т	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2000	2200
W_{os} , кН	60	61	65	70	70	65	60	80	62	62
r_o , Ом/км	0,068	0,053	0,014	0,068	0,053	0,044	0,068	0,053	0,044	0,068

2. Методичні вказівки виконання задачі 1

Під час розв'язання задач, наданих в контрольній роботі, студент повинен звернути особливу увагу на баланс спожитої та витраченої енергії. Виходячи з цього та електромеханічних і тягових характеристик електровоза, які приведені нижче, можна розв'язати задачі, не використовуючи які-небудь складні аналітичні залежності.

Слід звернути увагу, що у вихідних даних допущено приближення, які спрощують розв'язання задач. Як наприклад, це відноситься до основного опору руху. Цей опір за умовою має тільки одне значення, в дійсності ж воно залежить від швидкості руху, який до розв'язання задачі 1 невідомий.

Як буде подано нижче, швидкість руху залежить від напруги на електровозі. В нормальних умовах відхилення напруги від номінального порівняно невелике. А тому для визначеної маси поїзда невеликі, зв'язані з рівнем напруги, зміни основного опору руху.

В контрольній роботі розглядаються всі режими руху поїзда, коли опір руху, сила та швидкість не змінюються. Розв'язання найбільш подібних задач при зміні цих величин за часом, основане на інтегруванні диференціальних рівнянь. Воно буде розглядатися в спеціальних дисциплінах після вивчення студентами відповідних розділів математики.

В задачі 1 необхідно знайти ККД електровоза і всієї системи від шин тягової підстанції до ободу колеса електровоза.

ККД є дуже важливим показником будь-яких пристроїв. Він визначає, яка частина підведеної до пристрою енергії використовується корисно, тобто передається далі.

Якщо, наприклад, тягова підстанція отримує від лінії передачі енергію A_1 , а передає в тягову мережу енергію A_2 , то звісно $A_2 < A_1$ оскільки частина енергії розсіюється в пристроях підстанції. В свою чергу, сумарна енергія, яку отримують електровози від тягових підстанцій $A_{2\Sigma}$ і буде менша A_2 оскільки частина електричної енергії витрачається на нагрівання дротів тягової мережі.

Отже, якщо до окремого електровоза підводиться енергія A_{e1} то корисно використовується для руху частина цієї енергії $A_{2\Sigma}$, а різниця $A_{e2} - A_{e1}$ розповсюджується в вигляді тепла в провідниках при протіканні в ньому струму та в результаті тертя в підшипниках і передачах ККД окремого пристрою дорівнює відношенню:

$$\eta = A_{кор}/A \quad (1)$$

де $A_{кор}$ – енергія, корисно використана в пристрої;

A – енергія, підведена до пристрою.

Коли ми знаходимо ККД будь-якого пристрою, то під $A_{пол}$ маємо на увазі частину енергії, корисно використану тільки в розглянутому пристрої, а не в комплекті пристроїв, що входять до будь-якої системи. Якщо енергія $A_{пол}$ з одного пристрою підводиться до дрккого, то для нього вона стає вже підведеною енергією, частина якої марно розсіюється в цьому другому пристрої і т.д.

Нехай, наприклад, маємо два пристрої з ККД η_1 та η_2 . Перший пристрій отримує енергію A_1 від будь-якого зовнішнього джерела, переопрацьовує її та передає іншому пристрою. Цей пристрій знову переопрацьовує енергію та передає її далі. Схематично це відображено на так званій структурній схемі 2.

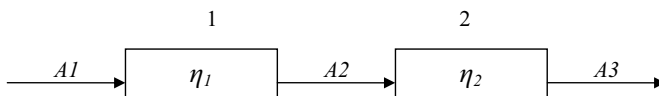


Схема 2

З формули (1) слідує, що $A_2 = \eta_1 A_1$ (2)

де A_2 – енергія, використання в пристроях;

A_1 – енергія підведена до пристроїв;

η_1 – коефіцієнт корисної дії пристрою.

Звідси $A_3 = \eta_1 \eta_2 A_1$.

Якщо розглянути систему, яка складається з цих двох пристроїв, як одне ціле, для неї ККД слід записати:

$$\eta = A_3 / A_1 \quad \text{або, враховуючи формулу 2,}$$

$$\eta = \eta_1 \eta_2. \quad (3)$$

Де η_1 – коефіцієнт корисної дії першого пристрою;

η_2 – коефіцієнт корисної дії другого пристрою.

Якби система складалась з трьох пристроїв з ККД η_1, η_2, η_3 , то загальний ККД системи:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3$$

Взагалі ККД будь-якої системи, яка складається з окремих пристроїв, що послідовно передають або перетворюють енергію, дорівнює добутку коефіцієнтів корисної дії окремих пристроїв.

Якщо протягом деякого часу – « t » потужності, підведені для пристрою та отримана від нього потужність не змінюється, то можна записати:

$$A_{кор} = P_{кор} \cdot t \quad \text{і} \quad A = P \cdot t$$

де $P_{кор}$ – потужність, яка отримується від пристрою;

A – робота виконана за час t;

P – потужність, підведена до пристрою;

t – час дії потужності.

Тоді для ККД можна записати

$$\eta = P_{\text{кор}}/P \quad (4)$$

У подальшому будемо користуватись цією формулою, оскільки розглядаються потужності в якийсь один момент часу.

З раніше приведеного видно, що ККД електровоза буде дорівнювати відношенню потужності, корисно використаної для руху – P_o до потужності, яка отримується ним з тягової мережі – P_e , а ККД всієї системи – відношенню P_o до потужності – $P_{ш}$ – отриманої від шин підстанцій, $\eta_{ш} = P_o/P_{ш}$

Потужність, як відомо, це робота, яка виконується в одиницю часу.

Під час руху тягового складу з постійною силою тяги робота дорівнює добутку сили тяги на шлях.

$$A = FS, \quad (5)$$

де F – сила тяги електровоза;

S – шлях прямування поїзда;

A – потужність

$$P = FS/t, \quad \text{а оскільки}$$

$$S/t = V, \text{ то}$$

$$P = FV, \quad (6)$$

де V – швидкість руху поїзда.

Звідси слідує, що при заданій силі тяги корисна потужність, а відповідно і та, що використовується, залежить від швидкості поїзда.

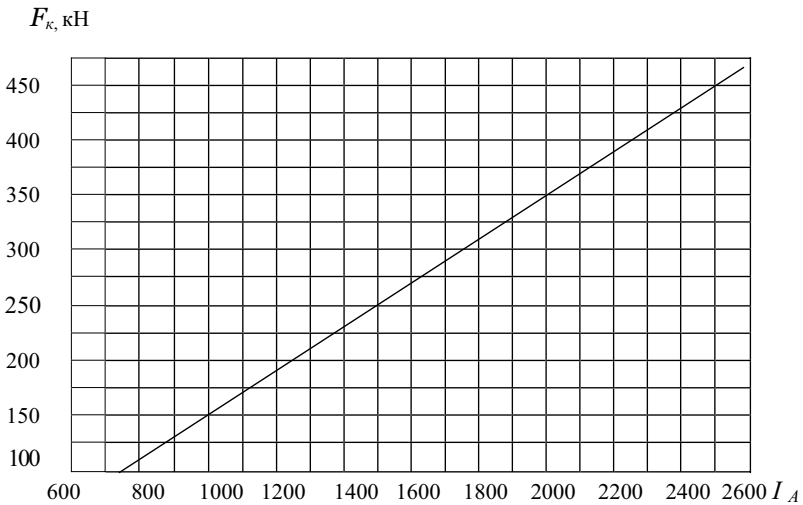
З поданого видно, що для вирішення задачі необхідно визначити швидкість руху. Цю величину треба визначити також за завданням. Швидкість руху поїзда у встановленому режимі залежить від підведеної до електровоза напруги, яка в свою чергу визначається струмом, який виникає від втрати напруги в тяговій мережі.

Таким чином, в першу чергу необхідно знайти струм, який використовується електровозом, що легко зробити використовуючи залежність $F_{\kappa}(I_e)$, яка приведена на діаграмі 1.

Для цього треба знайти силу тяги, яка при встановленій швидкості по підйому на прямій ділянці дорівнює сумі основного опору руху поїзда та опору руху від підйому.

За умовою задачі поїзд рухається з постійною швидкістю по прямій лінії. В цьому випадку, згідно з першим законом Ньютона, сума всіх сил, діючих на нього, дорівнює нулю.

В напрямку руху на поїзд діє сила тяги – F та протидіє їй сила опору руху. Коли поїзд їде по горизонтальному шляху, на прямій ділянці його руху протидіє сила - W_o , яка називається головним (основним) опором руху (опір повітряного середовища, внутрішнього тертя в рухомому складі, взаємодії рухомого складу та шляху)



Діаграма 1

В задачі розглядається рух поїзда по підйому, а тому з'являється ще сила опору руху від підйому W_i .

Її можна знайти (1,2) шляхом розкладу сили ваги G на силу R , перпендикулярну лінії підйому і паралельну їй силу W_i яка заважає руху. Це друга сила рівна $G \sin \lambda$, де λ – кут нахилу (рис.4.).

Якщо довжину підйому S_i виразити в км, а $\sin \lambda = h/1000S$:

Величину h/S_i виражають через i . Так як h дається в м, а S_i в км, то i виражає $\sin \lambda$ в тисячних частинах (в проміле). Проміле позначають символом ‰ (порівняйте з позначенням сотих часток - відсотків)

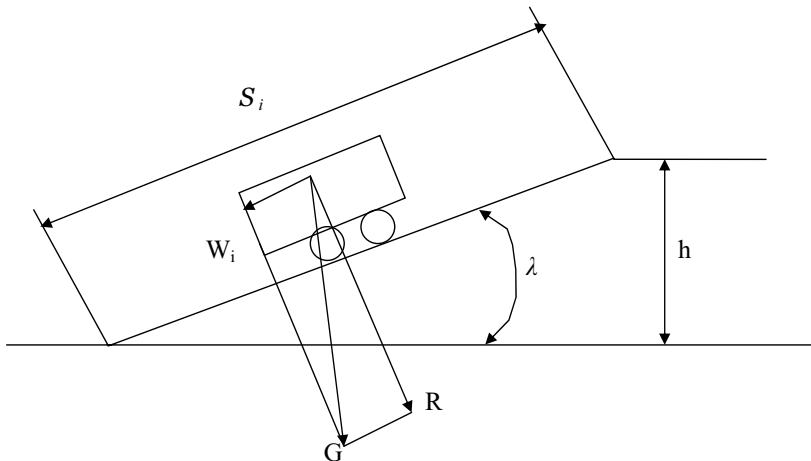


Рис.4

Таким чином, якщо силу виражають в Ньютонах, то $W_i = G \sin \lambda = G_i / 1000H$. Щоб не мати справ з великими числами, краще сили виразити в тисячах Ньютонів, тобто кН. Тоді $W_i = G_i \cdot 10^{-6}$ кН. Якщо масу потяга m давати в тоннах, то сила ваги в H буде дорівнювати $G = 9,81mi \cdot 10^{-3}$ кН, тобто сила опору руху від підйому на кожен тону його маси дорівнює $9,81 \cdot i$ Ньютон (де i виражено, як вказано в ‰)

Якщо поїзд прямує не на підйомі, а спускається по ухилу. Як в задачі 2, то сила W_i буде мати протилежний знак. Вона буде направлена в бік руху.

При прямолінійному і рівномірному русі поїзда по підйому вгору, сили W_g та W_i урівноважуються силою тяги F_k . Тоді

$$F_k = W_0 + 9,81 mi \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

По цій силі тяги, як уже було сказано, можна, використавши криву на діаграмі 1, знайти струм електровоза I_e . Знайшовши струм, що споживається

електровозом, із мережі, по його заданому положенню (час), не важко встановити втрату напруги в тяговій мережі.

Дійсно. Коли електровоз знаходиться на відстані L_A від підстанції А, й на відстані L_B від підстанції В можна знайти відповідний опір.

$$R_A = r_o L_A \quad \text{та}$$

$$R_B = r_o L_B$$

Де r_o – опір одного кілометра тягової мережі

L_A – відстань електровозу від підстанції А

L_B – відстань електровозу від підстанції В

Відповідно до першого закону Кіргофа (1), сума струмів, спрямованих до навантаження від підстанцій А та В, тобто струмів I_A та I_B , рівна струму електровоза I_e , тоді

$$I_B = I_e - I_A$$

Різниця напруг в шинах підстанцій $U_{ш}$ та на електровозі - U_e називаються втратами напруги і позначаються ΔU , оскільки прийнято, що втрата напруги буде однаковою від підстанції А і від підстанції В до навантаження. Але втрата напруги рівна добутку опору провідника на струм, який по ньому тече.

$$\Delta U = R_A I_A = R_B I_B \quad (8)$$

де $I_B = I_e - I_A$

або $R_A I_A = R_B (I_e - I_A)$

Звідси знайдемо:

$$I_A = \frac{R_B}{R_A + R_B} \cdot I_e \quad (9)$$

Підставляємо сюди замість $R_A - r_o I_A$, та замість $R_B - r_o I_B$ отримаємо:

$$I_A = \frac{I_B}{L} \cdot I_e \quad (10)$$

де $L = L_A + L_e$

Також можна знайти $I_B = I_A / L \cdot I_e$ (11)

Перевірити правильність розрахунків I_A та I_B можна по формулі:

$$I_A + I_B = I_e$$

Якщо це рівняння не виконано, то в розрахунках є помилки. Слід звернути увагу на те, що формула (9) є загальною для розрахунку розподілу струмів між двома паралельними вітками з опорами R_A та R_B , де опори R_A та R_B пропорційно відстаням провідників, як це має місце в даному випадку.

Визначивши по формулах (10) та (11) струми I_A та I_B можна по формулі (8) знайти втрати напруги ΔU , а потім напругу на навантаженні (електровозі) U_e .

$$U_e = U_w - \Delta U \quad (13)$$

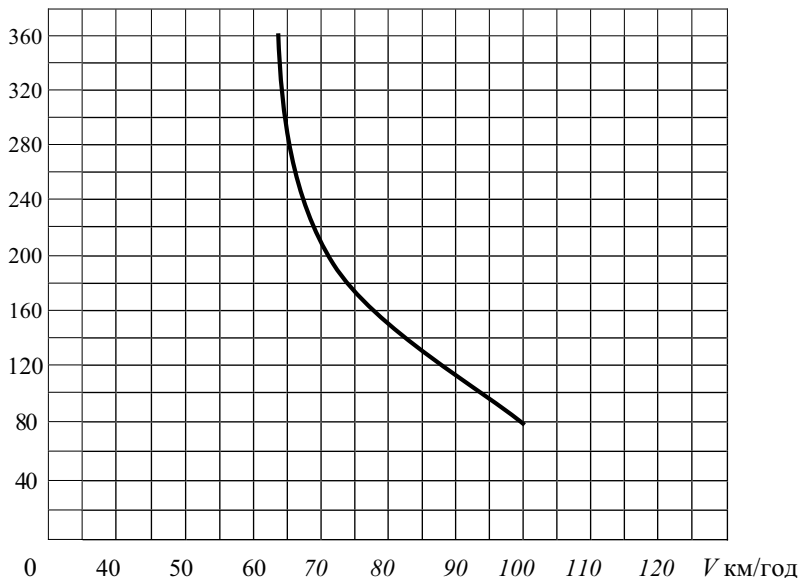
де U_w - напруга на шинах тягової підстанції;

ΔU - втрати напруги до навантаження ЕРС.

Знаючи напругу e можна визначити швидкість руху потяга. Спочатку необхідно знайти швидкість потяга при номінальній для електровоза напрузі $U_n = 3000$ В. Для цієї напруги на діаграмі 2 дана тягова характеристика електровоза - залежність F_k (В). Залежність сили тяги від струму та від швидкості (діаграм 1 та 2) нелінійні, що утрудняють розрахунки.

Покажемо, що встановлена швидкість при постійному опорі руху змінюється пропорційно зміні електрорушійної сили електровоза, та позначення E .

$F_k, \text{кН}$



Діаграма 2

Дійсно, ми приближено розраховуємо W , а виходячи з цього при постійній швидкості та F_k , незалежними від зміни швидкості за рахунок змін напруги, враховуючи їх невеликими. Тоді, вплив напруги на-швидкість в умовах задачі, треба оцінити для незмінної сили тяги.

При зрушенні з місця для обмеження струму послідовно з двигунами електровоза постійного струму вмикається реостати. По мірі розгону електровоза опір їх поступово зменшується до нуля. Після цього підведена до електровоза напруга, в основному, врівноважується електрорушійною силою (ЕРС), яка з'являється в обмотках якорів двигунів при їх обертанні в магнітному полі.

За законом елекромагнітної індукції, ЕРС в провіднику довжиною L_{II} дорівнює:

$$E = L_{II} B_{nm} V_{nn} \quad (14)$$

де B_m, V_m – складні індукції та швидкості переміщення ротора перпендикулярні магнітному полю;

L_{II} – довжина провідника.

Обмотка якоря складається із великої кількості послідовно з'єднаних провідників. Крім того, на електровозах постійного струму декілька двигунів з'єднуються послідовно, так що загальна ЕРС – E_o буде в багато разів більша, але пропорційна їй.

Індукція B та магнітний потік Φ теж пропорційні один одному. Врешті кінцева швидкість провідників обмотки, що розташована на якорі, пропорційна швидкості руху поїзда.

З цього всього можна зробити висновок, що ЕРС, яка створюється двигунами електровоза пропорційна магнітному потоку та швидкості руху поїзда V , тобто:

$$E_e = C_v \Phi_v B \cdot V \quad (15)$$

де C_v - коефіцієнт пропорційності.

Більш детальне утворення ЕРС двигунів буде розглянуто в контрольній роботі 2. Там же буде розглядатися зв'язок між магнітним потоком Φ , струмом якоря I_a та силою тяги F_k . Тут тільки скажемо, що при електричній тязі використовуються, в основному, двигуни з послідовним збудженням, при якому намагнічувальна сила, яка створить магнітний потік, створюється обмоткою полюсів, по якій протікає весь або певна частина струму якоря. А тому, якщо не змінюється частка струму якоря, яка тече по обмотці збудження, тоді кожному струму якоря I_a буде відповідати відповідний магнітний потік.

Таким чином, добуток магнітного потоку Φ на струм якоря I_a буде залежати тільки від струму якоря. А згідно з законом Ампера витікає, що сила, яка діє на провідник, пропорційна цьому добутку. Тобто, кожному значенню сили тяги буде відповідати деяке значення струму якоря I_a (якщо залишається незмінною частка струму якоря, яка проходить по обмотці збудження, яка створює магнітний потік).

Оскільки так прийнято, що за зміною напруги сила тяги не змінюється, то з цього виходить, що струм I_n та магнітний потік Φ не змінюється теж. З формули (15) видно, що при постійному потоці Φ ЕРС електровоза буде пропорційна швидкості руху поїзда V .

Хай при номінальній напрузі U_n ЕРС була E_n швидкість руху дорівнює V_n при такому ж потоці Φ (значить при тій самій силі тяги F_k), сила при напрузі ЕРС U_e , швидкість руху стала V_k . Тоді:

$$V_k/V_n = E_e/E_n$$

Звідки

$$V_k = \frac{E_e}{E_n} \cdot V_n \quad (16)$$

де V_n – швидкість при номінальній напрузі в км/год;

E_e – ЕРС при номінальній напрузі в к/м;

E_n – ЕРС електродвигунів електровоза:

Напруга U зрівноважується ЕРС E_e та відбувається спад напруги в опорі електровоза r_e . Цей спад напруги рівний $r_e I_e$ складає декілька відсотків від напруги U , отже, як уже сказано, в основному зрівноважується ЕРС E_e .

А тому з достатньою точністю можна замість формули (16) написати

$$V = (U_e / U_n) \cdot V_n \quad (17)$$

де U_e – напруга на електровозі;

U_n – номінальна напруга в контактній мережі.

По цій формулі знаходимо, знаючи U_e та V_n при заданому U_n , дійсну швидкість руху V .

При проведених розрахунках визначаємо величину F , V , U_e , I_e .

По цих величинах визначаємо потужність, необхідну для опору руху при швидкості V .

Швидкість руху подана в таблицях в км/год. Для переведу її в м/сек слід табличні значення швидкості помножити на 1000 та поділити на 3600. Тоді отримаємо $V = 1000/3600 = V/3,6$ м/с.

Сила тяги в H дорівнює $1000 F$, оскільки в таблицях F подана в кН.

Відповідно:

$$P_o = V/3,6 \cdot 1000 F \text{ Вт} = F \cdot V/3,6 \text{ кВт} \quad (18)$$

Потужності, які споживає електровоз із мережі P_e та від підстанцій P_{us} , легко знайти по струму I_e та відповідної напрузі. Після цього визначаємо ККД.

Слід звернути увагу, що всі отримані результати відносяться до однієї митті, а тому не можуть служити характеристикам системи в цілому за довгий період її роботи. В деяких випадках можуть бути низькі ККД для розглянутого моменту часу.

3. Методичні вказівки щодо виконання задачі 2

В задачі 2 необхідно в першу чергу знайти силу гальмування. Вона, як і тягове зусилля в задачі 1, визначається з умов зрівноваження сил.

$$B = 9,81 \text{ м} \cdot i \cdot 10^{-3} - W_0 \quad (19)$$

Знаючи гальмівні зусилля B та задану швидкість (див. табл. 3), слід знайти потужність, що розвивається при гальмуванні P_G . Для того, щоб знайти потужність. Яка віддається електровозом в контактну мережу, треба враховувати заданий ККД тягових двигунів $\eta_{гед} = 0,95$

$$P_p = \eta_{гед} \cdot P_G \quad (20)$$

де P_G – потужність при гальмуванні;

$\eta_{гед}$ – коефіцієнт корисної дії тягового двигуна;

P_p – потужність яку видає електровоз в контактну мережу.

Оскільки напругу у електровозі задано, то неважко, знаючи потужність P_p , знайти струм, що віддається електровозом а мережу. Отже, як і при тязі, цей струм розподіляється обернено пропорційно опорю до відповідних підстанцій.

Таким чином, при вирішенні задачі 2 може бути прийнятий такий порядок:

1. Визначається гальмівна сила B .

2. Визначається потужність гальмування $P_{Г}$.
3. Визначається потужність, генерована тяговими двигунами P_p
4. Знаходиться струм рекуперації I_p
5. Знаходиться розподіл струму I_p між підстанціями А та В враховуючи, що напруга на шипах обох підстанцій рівна.
6. Знаходиться на шипах підстанцій потужність, яка передається на підстанції та ККД всієї системи.

Гальмівна сила при рекуперації з'являється в результаті взаємодії струму в обмотці якоря та магнітного потоку в тягових двигунах, працюючи при рекуперації в режимі генераторів. Але струм з'являється та протікає тільки в замкненому електричному колі. Такий ланцюг створюється, якщо підстанції А та В (рис. 1) можуть проводити струм в обидві сторони. В цьому випадку, коли ЕДС електровоза стане більше напруги на шинах підстанції А та В струм не тече від ел-за до підстанції повернеться через рельси до електровоза. Струм в цьому випадку, буде мати напрям протилежний вказаному на рис.1.

Прості випрямні тягові підстанції, все ж таки не можуть проводити струм в напрямку, протилежному напрямку ЕДС підстанції, а тому при використанні рекуперативного гальмування, доводиться встановлювати на підстанціях більш складні агрегати-інвентори, які перетворюють постійні струми в змінний та повертають на підстанцію енергію рекуперації в мережу змінного струму. Замість інвенторів можлива установка поглинаючих резисторів. Це допустимо, якщо частина енергії рекуперації, що повертається на підстанцію і марно розсіювана в резисторах, невелика.

4. Приклад розрахунку задачі тягового режиму поїзда

Задача 1

На дільниці між двома тяговими підстанціями А і В по підйому з постійною швидкістю рухається поїзд масою 3000т. Основний опір руху поїзда (без врахування опору руху від підйому) $W_o = 90\text{кН}$.

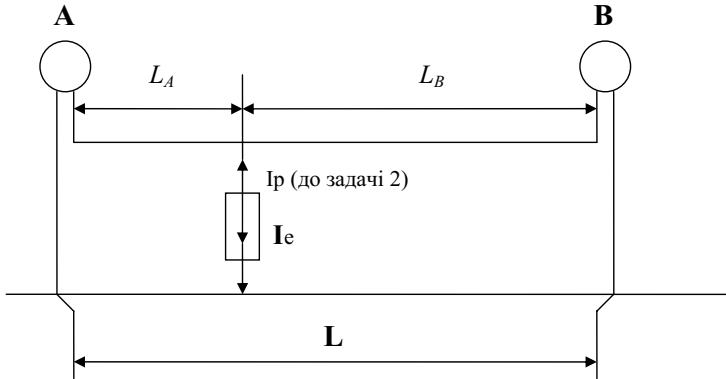


Рис.1

Вихідні дані:

величина підйому – $i = 3\%$;

відстань між підстанціями – $L = 22\text{км}$;

відстань між електровозом і підстанцією – А – $L_A = 6\text{км}$;

відстань між електровозом і підстанцією – В – $L_B = 16\text{км}$;

напруги підстанцій А та В; $U_w = 3300\text{В}$;

маса поїзда – $m = 3000\text{т}$;

основний опір руху поїзда – $W_o = 90\text{кН}$

опір одного кілометра тягової мережі – $R_o = 0,068\text{ Ом/км}$

Знайти:

1. Потужність віддану тяговими підстанціями;
2. Потужність спожиту електровозом;
3. Потужність необхідну для підтримання постійної швидкості;
4. ККД всієї системи;
5. ККД електровоза;
6. Напругу у електровоза;
7. Швидкість електровоза.

Розв'язок:

За умовою задачі поїзд рухається з постійною швидкістю. За першим законом Ньютона, сума всіх сил рівна нулю. За напрямком руху на поїзд діє сила тяги P , їй протидіють сили: W_o – основний опір руху, та W_i – сила опору руху від підйому.

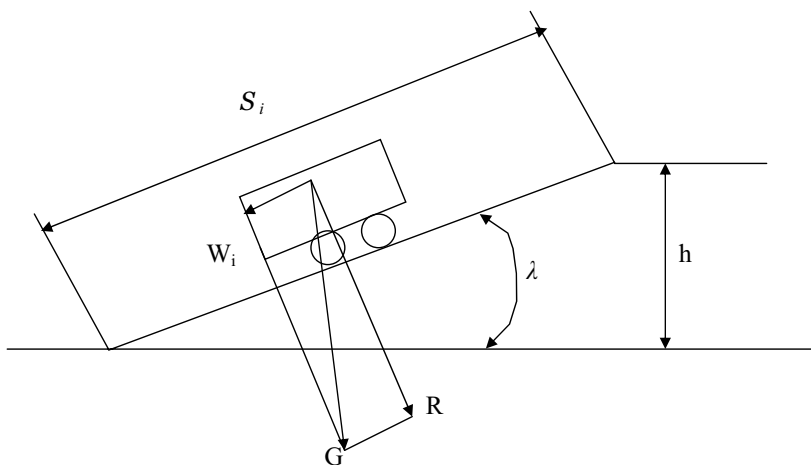


Рис.2

Силу W_i знаходимо розкладаючи силу ваги G на силу R перпендикулярну лінії підйому і сили W_i , таким чином:

$$W_i = G \sin \lambda$$

де λ – кут похилу.

Якщо довжину підйому виражати в км, а висоту підйому h , в м, то очевидно:

$$\sin\varphi = h/1000 \cdot s_i$$

Величину h/s_i позначають через i , опис

$$W_i = G_i \cdot 1000 \text{ (Н)}$$

Враховуючи, що $G = 9,81 \cdot m \cdot 10^{-3}$ маємо що:

$$W_i = 9,81 \cdot m \cdot i \cdot 10^{-3} \text{ кН.}$$

При прямолінійному і рівномірному русі поїзда по підйому вгору сили W_o та W_i зрівноважені силою тяги F_k . Отже:

$$F_k = W_o + 9,81 \cdot m \cdot i \cdot 10^{-3}$$

$$F_k = 90 + 9,81 \cdot 300 \cdot 10^{-3} = 178,29 \text{ кН}$$

При цій силі тяги користуючись кривою визначаємо струм електровоза.

$$I_e = 1200 \text{ А.}$$

Опір контактної мережі по дільниці L_A :

$$R_B = R_o \cdot L_A = 0,068 \cdot 6 = 0,408 \text{ Ом}$$

Втрата напруги (різниця напруг на шинах підстанції Um і на навантаженні електровоза U_e)

$$\Delta U = R_A \cdot I_A = R_B \cdot I_B, \text{ або}$$

$$R_A \cdot I_A = R_B \cdot (I_e - I_A), \text{ звідки знайдемо}$$

$$I_A = R_B / R_A + R_B \cdot I_e.$$

Підставивши замість $R_A - R_o \cdot L_A$, та замість $R_B - R_o \cdot L_B$ отримаємо:

$$I_A = R_B / R_A + R_B \cdot I_e = 16/6 \cdot 1200 = 872,7 \text{ А}$$

Таким чином можна знайти:

$$I_B = L_A / L_A + L_B \cdot I_e = 6/6 + 16 \cdot 1200 = 327,3 \text{ А}$$

Втрата напруги:

$$\Delta U = 0,48 \cdot 872,7 = 1,088 \cdot 327,3 = 356,1 \text{ В}$$

Напруга при навантаженні (електровозі):

$$U_e = U_{\text{ш}} - \Delta U = 3300 - 356,1 = 2943,9 \text{ В}$$

За тяговою характеристикою при напрузі $U_H = 3000 \text{ В}$ визначаємо швидкість поїзда при заданій силі тяги F_{κ}

$$V_H = 67 \text{ км/год}$$

Знаючи V_e та V_H , при заданому V_H знайдемо дійсну швидкість V :

$$V = (V_e / V_H) \cdot V_H = 2943,9 / 3000 \cdot 67 = 65,7 \text{ км / год .}$$

Потужність , необхідна для подолання опору руху при швидкості $-V$:

$$P_o = FV / 3,6 = 178,29 \cdot 65,7 / 3,6 = 3253,8 \text{ кВт.}$$

Потужність спожита електровозом в мережі :

$$P_e = I_e \cdot U_e = 1200 \cdot 2943,9 = 3532,68 \text{ кВт.}$$

Потужність , віддана тяговими підстанціями :

$$R_{\text{ш}} = I_{\text{ш}} \cdot U_{\text{ш}} = 1200 \cdot 3300 = 3960 \text{ кВт}$$

ККД електровоза :

$$n = P_o / P_e = 3253,8 / 3532,68 = 0,92$$

ККД всієї системи від шин підстанції до електровоза:

$$\eta_c = P_o / P_{ш} = 3253 / 3690 = 0,82$$

Відповідь:

Потужність віддана тяговими підстанціями – $P_{ш} = 3960$ кВт;

Потужність необхідна для підтримання постійної швидкості – $P_o = 3253,8$ кВт;

ККД всієї системи – $\eta_c = 0,82$

ККД електровозу – $\eta_e = 0,92$.

Напруга у електровоза – $U_e = 2943,9$ В.

Швидкість електровоза – $V = 65,7$ км / год.

5. Приклад розрахунку задачі рекуперативного режиму поїзда

Задача 2

Між двома підстанціями А і В на ухилі 12 ‰ з постійною швидкістю рухається поїзд вагою 2 300 т. Основний опір руху поїзда з врахуванням механічних втрат в електровозі $W_o = 70$ кН. ККД електричних машин працюючих в режимі генераторів $\eta_T = 0,95$

Вихідні дані:

Величина спуску $- i ‰ = 12 ‰$;

Відстань між підстанціями $- L = 22$ км;

Відстань між електровозом і підстанцією – А $- L_A = 6$ км;

Відстань між електровозом і підстанцією – В $- L_B = 16$ км;

Швидкість поїзда $- V = 80$ км/год;

Маса поїзда $- m = 2300$ т;

Основний опір руху поїзда $- W_o = 70$ кН;

Опір одного км. тягової мережі $- R_o = 0,068$ Ом/км

Знайти:

1. Гальмівну силу, необхідну для підтримання постійної швидкості;
2. Струм рекуперації;
3. ККД всієї системи ;
4. Напруги на шинах тягових підстанцій (вважаючи їх рівними), якщо напруга у електровоза $- U_e = 3300$ В.

Рішення :

Необхідно визначити гальмівну силу. Вона, як і тягове зусилля в задачі 1 визначається з умов рівноваги сил:

$$B = 9,81 \cdot m \cdot i \cdot 10^{-3} - W_o = 9,81 \cdot 2300 \cdot 12 \cdot 10^{-3} - 70 = 200,756 \text{ кН.}$$

Знаючи гальмівне зусилля і задану швидкість знаходимо потужність розвинуту при гальмуванні :

$$P_{op} = B \cdot V / 3,6 = 200,756 \cdot 80 / 3,6 = 4461,2 \text{ кВт}$$

Потужність передана електровозом в мережу, з врахуванням ККД тягових машин :

$$P_p = \eta_T \cdot P_{op} = 0,95 \cdot 4461,2 = 4238,14 \text{ кВт}$$

Струм рекуперації електровоза:

$$I_A = P_p / U_e = 4238,14 / 3300 = 1284,28 \text{ А.}$$

Знайдемо розподіл струму I_p між підстанціями А та В вважаючи, що напруги на шинах цих підстанцій рівні :

$$I_A = L_B / L_A + L_B \cdot I_p = 16 / 6 + 16 \cdot 1284,28 = 934,02 \text{ А}$$

$$I_B = L_A / L_A + L_B \cdot I_p = 6 / 6 + 16 \cdot 1284,28 = 350,26 \text{ А}$$

Втрата напруги (різниця напруги на електровозі і на шинах підстанції), вважаючи напругу на шинах підстанції рівною .

$$\Delta U = R_o \cdot L_A \cdot I_{AP} = R_o \cdot L_B \cdot I_{BP} = 0,068 \cdot 6 \cdot 934,02 = 0,068 \cdot 16 \cdot 350,26 = 381,08 \text{ В.}$$

Напруга на шинах підстанції :

$$U_m = U_c - \Delta U = 3300 - 381,08 = 2918,92 \text{ В.}$$

Потужність прийнята підстанціями :

$$P_m = I_p \cdot U_m = 1284,28 \cdot 2918,92 = 3748,71 \text{ кВт.}$$

ККД всієї системи:

$$\eta_c = P_m / P_{op} = 3748,71 / 4461,2 = 0,84$$

Відповідь:

1. Гальмівна сила, необхідна для підтримання постійної швидкості – $B = 200,756 \text{ кН}$;
2. Струм рекуперації – $I_p = 1284,28 \text{ А}$;
3. ККД всієї системи – $\eta_c = 0,84$;
4. Напруга на шинах тягових підстанцій – $U_m = 2918,92 \text{ В}$.

Список літератури

Основна:

1. *Звездкин М.Н.* Електроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1985. – 187 с.
2. *Інструкція* по технічному нормуванню витрат електричної енергії і палива локомотивами на тягу поїздів ЦТ-0059, 2003. – 27 с.

Додаткова:

1. *Пронитарский А.Ф.* Системы и устройства электроснабжения. – М.: Транспорт, 1983. – 261 с.
2. *Прохорский А.А.* Тяговые трансформаторные подстанции. – М.: Транспорт, 1983. – 245 с.
3. *Правила* технічної експлуатації залізниць України ЦРП 0004, 2008.
4. *Колесов І.С.* Взаємодія контактної мережі та струмоприймачів. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2006. – 280 с.

Навчально-методичне видання

Валерій Миколайович Головань

Методичні вказівки

щодо виконання контрольних робіт студентами денної та заочної форми
навчання IV і V курсів спеціальності
«Електричний транспорт» з дисципліни «Електропостачання залізниць»

Відповідальний за випуск *В. М. Головань*

Редактор: *Н. В. Щербак*

Підписано до друку 21.05.2009. Формат 60 x 84 / 16. Папір офсетний.

Друк на ризографі. Зам. № 188-09. Наклад 100 прим.

Надруковано в Редакційно - видавничому центрі ДЕТУТ

Свідоцтво про реєстрацію Серія ДК № 3079 від 27.12.07 р.
03049, м. Київ, вул. Миколи Лукашевича, 19

