

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

Кафедра «Локомотиви»

ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ЛОКОМОТИВІВ

Контрольне завдання з методичними рекомендаціями

Дніпро – 2022

УДК 629.424-83/075.8/

Укладачі:

Д. В. Бобирь, В. Н. Сердюк, А. Є. Десяк

Рекомендовано до друку МКФ ТІ (протокол № 5 від «22» квітня 2022 р.)

Зареєстровано НМВ ДНУЗТ (реєстр. № 556 від «16» червня 2022 р.)

Електричне обладнання локомотивів : контрольне завдання з методичними рекомендаціями / уклад.: Д. В. Бобирь, В. Н. Сердюк, А. Є. Десяк. Україн. держ. ун-т науки і технол. – Дніпро, 2022. – 24 с.

Методичні рекомендації містять варіанти контрольного завдання з дисципліни «Електричне обладнання локомотивів» та методику його виконання.

Для студентів усіх форм навчання освітнього ступеня «бакалавр» за ОПП «Локомотиви та локомотивне господарство» спеціальності 273 «Залізничний транспорт».

Іл. 6. Табл. 4. Бібліогр.: 5 назв.

- © Бобирь Д. В., Сердюк В. Н. Десяк А. Є., укладання, 2022
- © Україн. держ. ун-т науки і технол., редагування, оригінал-макет, 2022

ЗМІСТ

Передмова.....	3
1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНОГО КОНТАКТОРА.....	4
1.1. Розрахунок натиснення та ширини контактів.....	5
1.2. Розрахунок дугогасного пристрою	7
1.3. Розрахунок пневматичного привода.....	10
2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КОНТАКТОРА.....	15
2.1. Розрахунок механічної характеристики контактора	15
2.2. Розрахунок котушки електромагнітного контактора.....	22
Бібліографічний список.....	24

Передмова

В курсі навчальної дисципліни «Електричне обладнання локомотивів» системно розглядаються питання: вивчення фізичних основ та принципів електромеханічного перетворення енергії, особливості конструкції та експлуатації тягових і допоміжних електричних машин, трансформаторів, напівпровідникових перетворювачів, вивчення основ теорії електричних апаратів і схем сучасних та перспективних магістральних, маневрових та промислових локомотивів.

Метою методичних рекомендацій є досягнення компетентностей, передбачених освітньо-професійною програмою, а саме:

- розрізняти типи та серії локомотивів, їх системи, агрегати та вузли з визначенням вимог до їхньої конструкції, параметрам та характеристикам;
- здатність організувати експлуатацію локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів, з обґрунтуванням структури управління експлуатацією, технічного обслуговування та ремонту;
- здатність аналізувати техніко-економічні та експлуатаційні показники локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів з метою виявлення та усунення негативних чинників та підвищення ефективності виробничого процесу.

Контрольне завдання сприяє досягненню студентами таких результатів навчання:

- ідентифікувати типи та серії локомотивів, їх системи, агрегати, вузли та вимоги до їх характеристик та параметрів;
- визначати параметри локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів шляхом проведення вимірювального експерименту з оцінкою його результатів;
- виконувати розрахунок основних характеристик та параметрів технологічних процесів виробництва, експлуатації та ремонту локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів з метою їх порівняння та формування управлінських рішень щодо подальшого функціонування підприємства з оцінкою якості його

го продукції

– розраховувати техніко-економічні та експлуатаційні показники локомотивів, їх систем, агрегатів та вузлів.

Під час оформлення контрольної роботи слід дотримуватися таких правил:

1. Усі записи роблять з однієї сторони аркуша формату А4. З правого боку аркуша залишають поля шириною 10–15 мм, з лівого – 15–20 мм для підшивання.

Робота складається з двох частин. На першому аркуші кожної частини наводять її заголовок та вихідні дані для розрахунків, які вибираються з табл. 1, 2 за двома останніми цифрами навчального шифру.

2. Розрахунки виконують у послідовності, наведеній у методичних вказівках. На кожному етапі розрахунку вказують його порядковий номер та назву величини, яка розраховується. Потім записують розрахункову формулу або, якщо це потрібно, наводять її виведення. У формулах розшифровуються лише ті символи й числові коефіцієнти, які не були пояснені на попередніх етапах розрахунку або у вихідних даних. Після цього у формулу підставляють числові значення змінних і, пропускаючи проміжні обчислення, наводять результат розрахунку.

3. Усі розрахунки виконують з точністю до трьох значущих цифр.

4. Усі рисунки повинні мати наскрізну нумерацію. Розміщуються вони відразу після посилання на них у тексті роботи або на наступній сторінці, якщо вони виконуються на окремих аркушах.

5. Графіки виконують на міліметровому папері олівцем. Координатні осі проводяться по лініях міліметрової сітки. Масштаби вибираються лише з нормального ряду: 1; 2; 2,5; 4; $5 \times 10 \pm n$ од/см, де n – будь-яке ціле число або 0. Вказувати на графікові масштаб не потрібно. Достатньо розмітити осі через 10, 20 або 25 мм.

6. Графіки, схеми та інші рисунки виконують за допомогою креслярських інструментів. Від руки дозволяється виконувати лише дрібні деталі рисунків.

7. Відмічені рецензентом помилки мають бути виправлені охайно. Для виправлення можна використовувати зворотну (чисту) сторону попереднього аркуша. Не можна заклеювати або виривати аркуші з помилковими розрахунками.

1. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНОГО КОНТАКТОРА

Контактор призначений для роботи на електрорухомому складі (ЕРС) у колах постійного струму як комутаційний апарат. Характер навантаження контактора – індуктивний. Конструкція та принцип дії електропневматичного контактора розглянуті в [1–3].

Вихідні дані для розрахунку контактора вибираються з табл. 1 за двома останніми цифрами навчального шифру.

Вихідні дані для розрахунку електропневматичного контактора

Параметр	Остання цифра навчального шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
I_{∞}, A	750	700	650	600	550	500	450	400	350	300
U_{H}, B	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 600	2 800	3 000
Параметр	Передостання цифра навчального шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$A_{\text{к}}, \frac{\text{A}^2}{\text{мм} \cdot \text{H}}$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145

Примітка: I_{∞} – тривалий струм контактів; U_{H} – номінальна напруга на контактах; $A_{\text{к}}$ – тепла стала контактів.

1.1. Розрахунок натиснення та ширини контактів

Розрахунок ведеться виходячи з допустимої температури перегріву контактів $\tau_{\text{к}}$ при протіканні через них тривалого струму I_{∞} . Рівняння балансу електричної та теплової потужності в сталому режимі має вигляд:

$$I_{\infty}^2 R_{\text{к}} = \alpha S \tau_{\text{к}}, \quad (1.1)$$

де $R_{\text{к}}$ – контактний опір;

α – коефіцієнт тепловіддачі;

S – поверхня тепловіддачі.

Поверхня тепловіддачі прямо пропорційна ширині контакту $b_{\text{к}}$. Позначивши коефіцієнт пропорційності $k_{\text{с}}$, отримаємо

$$S = k_{\text{с}} b_{\text{к}}. \quad (1.2)$$

Контактний опір залежить від сили натиснення контактів Q_{H}

$$R_{\text{к}} = \frac{k_{\text{H}}}{Q_{\text{H}}^m}, \quad (1.3)$$

де k_{H} – коефіцієнт, який залежить від матеріалу та конструкції контактів;

m – показник степеня, який залежить від типу контактів (точковий, лінійний, поверхневий).

З рівнянь (1.1) – (1.3) отримуємо:

$$\frac{I_{\infty}}{b_k} \frac{I_{\infty}}{Q_H^m} = \frac{\alpha k_s \tau_k}{k_H}. \quad (1.4)$$

При відомому допустимому перегріві, який для мідних силових контактів апаратів ЕРС становить 50 °С, максимальне значення правої частини рівності (1.4) для однотипних контактів є сталою величиною і її можна нормувати. Для розрахунків зручніше користуватися однозначно пов'язаною з виразом (1.4) величиною A_k , яка називається тепловою сталою контактів

$$A_k = \frac{I_{\infty}}{b_k} \frac{I_{\infty}}{Q_H}. \quad (1.5)$$

З рівності (1.5) випливає, що забезпечити допустимий тепловий режим роботи контактів можна за рахунок збільшення або їх ширини, або натиснення. Доцільний спосіб залежить від типу привода. Наприклад, при електропневматичному приводі набагато легше отримати великі натиснення, ніж при електромагнітному.

У контрольній роботі для розрахунку Q_H приймаємо для всіх варіантів типове для електропневматичних контакторів значення відношення $\frac{I_{\infty}}{b_k} = 20 \frac{\text{А}}{\text{мм}}$. Значення I_{∞} та A_k беруться з вихідних даних.

Розраховане значення Q_H потрібно перевірити на забезпечення надійної роботи контакту при перевантаженнях. Для цього визначаються граничний струм контакту $I_{гр}$, при якому відбуваються структурні зміни (розм'якшення) матеріалу контакту, і струм плавлення матеріалу контакту $I_{пл}$

$$I_{гр} = \frac{0,7 \Delta U_{стр}}{R_k}, \quad (1.6)$$

де $\Delta U_{стр} = 0,11 \text{ В}$ – спад напруги на контакті, при якому досягається температура розм'якшення міді, що дорівнює 190 °С.

$$I_{пл} = \frac{0,9 \Delta U_{пл}}{R_k}, \quad (1.7)$$

де $\Delta U_{пл} = 0,44 \text{ В}$ – спад напруги на контакті, при якому досягається температура плавлення міді, що дорівнює 1083 °С.

Під час розрахунку R_k за формулою (1.3) приймаємо типові для лінійних

мідних контактів значення $k_{\text{н}} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Ом·Н та $m = 0,75$.

За робочих перевантаженнях струм, що протікає через контакти, може сягати $2I_{\infty}$, а при аварійних перевантаженнях – $10I_{\infty}$. Відповідно повинні виконуватися умови:

$$I_{\text{гр}} \geq 2I_{\infty}, I_{\text{пл}} \geq 10I_{\infty}. \quad (1.8)$$

У разі порушення цих умов натиснення контактів потрібно збільшувати.

Оформлення підрозділу.

1. Розрахунок ширини контактів $b_{\text{к}}$. Отримане значення (у міліметрах) округляється до найближчого більшого цілого.

2. Розрахунок натиснення контактів $Q_{\text{н}}$.

3. Розрахунок контактної опору $R_{\text{к}}$.

4. Розрахунок граничного струму $I_{\text{гр}}$ та струму плавлення $I_{\text{пл}}$, перевірка умов (1.8) і, якщо необхідно, коригування величини $Q_{\text{н}}$.

5. Розрахунок потужності, що розсіюється на контактах при струмові, рівному I_{∞} .

1.2. Розрахунок дугогасного пристрою

У контрольній роботі розраховуються елементи системи дугогасіння електромагнітного типу з послідовним включенням дугогасної котушки зі щілинною камерою без деіонної решітки.

У процесі гасіння дуга розтягується до кінцевої довжини $l_{\text{дк}}$, величина якої визначається (у метрах) для індуктивного навантаження за емпіричною формулою:

$$l_{\text{дк}} = 13 \cdot 10^{-5} U_{\text{н}} \cdot \sqrt[3]{I_{\text{р}}}, \quad (1.9)$$

де $U_{\text{н}}$ – номінальна напруга, яка вибирається з табл. 1, В;

$I_{\text{р}}$ – струм розриву, який для розрахунків приймається рівним $I_{\text{р}} = 2I_{\infty}$, А.

У разі використання простої щілинної камери розрив максимального струму $I_{\text{р}} = 2I_{\infty}$ супроводжується виходом дуги за межі камери на 0,1 – 0,2 м. З урахуванням цього необхідна для розміщення дуги площа бічної поверхні камери при типовому для контакторів співвідношенні її сторін 1:2 визначається за формулою:

$$S_k = \frac{0,04I_{\text{дк}}^2}{k_{\text{вп}}}, \quad (1.10)$$

де $k_{\text{вп}}$ – коефіцієнт використання простору, який враховує форму дуги; залежить від типу камери, для щільної камери $k_{\text{вп}} = 0,8$.

Площа полюса, через яку в камері проходить магнітний потік

$$S_{\text{п}} = 0,6S_k. \quad (1.11)$$

Повітряний зазор у магнітній системі камери дорівнює відстані між полюсами $l_{\text{п}}$ і залежить від розрахованої раніше ширини контакту b_k

$$l_{\text{п}} = (b_k + 2 \cdot b_c + 2 \cdot b_3) \cdot 10^{-3}, \quad (1.12)$$

де $b_c = 10$ мм – товщина стінки камери;

$b_3 = 2$ мм – зазор між контактом і стінкою.

Параметри дугогасної котушки визначаються виходячи із заданої середньої індукції B_c при розриві тривалого струму I_{∞} . Чим більша величина індукції, тим більша електромагнітна сила, що діє на дугу, і тим швидше вона розтягнеться до критичної довжини і згасне. Проте при цьому збільшуються знос контактів у момент їх розходження та перенапруження на обладнанні, що вимикається. Для розрахунку приймаємо індукцію $B_c = 0,01T$, за якій забезпечується достатньо великий ресурс контактів при прийнятному часові (0,05–0,1 с) відключення струму й незначних перенапругах. У розрахунку камери швидкодіючого вимикача довелося б збільшити значення B_c у 10–15 разів.

При розрахунковій індукції магнітним опором сталі магнітопровода можна знехтувати порівняно з магнітним опором зазору між полюсами. За цієї умови

$$B_c = \mu_0 H = \frac{\mu_0 F_d}{l_{\text{п}} \sigma}, \quad (1.13)$$

де $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнітна проникність повітря;

H – напруженість магнітного поля, А/м;

$\sigma = 1,8$ – коефіцієнт розсіювання даної магнітної системи.

За отриманим із (1.13) значенням МРС визначаємо кількість витків дуго-

гасної котушки за формулою:

$$\omega_d = \frac{F_d}{0,5I_\infty}. \quad (1.14)$$

Тут коефіцієнт 0,5 враховує, що середня індукція повинна забезпечуватися при середньому значенні струму, який змінюється в процесі дугогасіння від I_∞ до 0. Отримане значення ω_d заокруглюється до найближчого більшого цілого числа.

Далі розраховується середній магнітний потік у зазорі між полюсами

$$\Phi_{\text{пс}} = B_c S_{\text{п}} \quad (1.15)$$

та середній магнітний потік в осерді котушки

$$\Phi_{\text{кс}} = \Phi_{\text{пс}} \sigma. \quad (1.16)$$

Площа поперечного перерізу осердя S_o має бути достатньою для унеможливлення насичення сталі (індуктивність насичення сталі $B_H = 0,2 \text{ Т}$) при граничному струмі розриву $I_p = 2I_\infty$

$$S_o = \frac{2\Phi_{\text{кс}}}{B_H}. \quad (1.17)$$

Дугогасна котушка виготовляється з мідної шини, намотаної на вузьке ребро. Переріз шини вибирається за допустимою густиною струму $j_{\text{доп}}$, яка залежить від товщини шини $b_{\text{ш}}$. Чим товща шина, тим гірші умови її охолодження й тим менше значення $j_{\text{доп}}$. При $b_{\text{ш}} = 1 \text{ мм}$ $j_{\text{доп}} = 9 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$, а при $b_{\text{ш}} = 8$

мм – $j_{\text{доп}} = 3,6 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$. У контрольній роботі для вибору перерізу шини приймаємо $j_{\text{доп}} = 6 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$. Це значення є середнім для шин товщиною 2–4 мм.

Спочатку розраховується мінімальний переріз шини:

$$S_{\text{шм}} = \frac{I_\infty}{j_{\text{доп}}}. \quad (1.18)$$

Потім вибирається стандартна шина, у якої переріз $S_{\text{ш}}$ найближчий за значенням до $S_{\text{шм}}$ та водночас $S_{\text{ш}} \geq S_{\text{шм}}$.

Фактичний переріз шини

$$S_{\text{ш}} = h_{\text{ш}} b_{\text{ш}}, \quad (1.19)$$

де $h_{\text{ш}}$ – висота шини, вибирається зі значень стандартного ряду 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 мм;

$b_{\text{ш}}$ – товщина шини, вибирається зі значень 2; 2,5; 3; 4 мм.

Оформлення розділу.

1. Розрахунок кінцевої довжини дуги $l_{\text{дк}}$.
2. Розрахунок площі полюса камери $S_{\text{п}}$.
3. Розрахунок відстані між полюсами $l_{\text{п}}$.
4. Розрахунок кількості витків дугогасної котушки $\omega_{\text{д}}$.
5. Розрахунок перерізу осердя $S_{\text{о}}$.
6. Вибір висоти $h_{\text{ш}}$ та товщини $b_{\text{ш}}$ шини.

1.3. Розрахунок пневматичного привода

Кінематична схема електропневматичного контактора наведена на рис. 1, розрахункові схеми контактора – на рис. 2, *a*. На рис. 2, *a*: $Q_{\text{ш}}$ – сила, що передається зі штока на рухомий важіль l ; $Q_{\text{в}}$ – вага рухомих частин контактора, прикладених у центрі тяжіння рухомої системи; $Q_{\text{н}}$ – сила реакції в точці дотику контактів, рівна силі натиснення контактів. Сила притираючої пружини на рис. 2, *a* не показана, оскільки в кінці ходу поршня зазор Δl (див. рис. 1) дорівнює нулю і сила пружини є внутрішньою силою важеля. Силами тертя в шарнірах рухомої системи нехтуємо, зважаючи на їх відносно мале значення.

За умови рівноваги системи сума моментів сил відносно точки O дорівнює нулю

$$Q_{\text{ш}} l_{\text{ш}} - Q_{\text{в}} l_{\text{в}} - Q_{\text{н}} l_{\text{н}} = 0. \quad (1.20)$$

Розділивши обидві частини рівняння на $l_{\text{ш}}$, отримуємо:

$$Q_{\text{ш}} - Q_{\text{в}} \frac{l_{\text{в}}}{l_{\text{ш}}} - Q_{\text{н}} \frac{l_{\text{н}}}{l_{\text{ш}}} = 0. \quad (1.21)$$

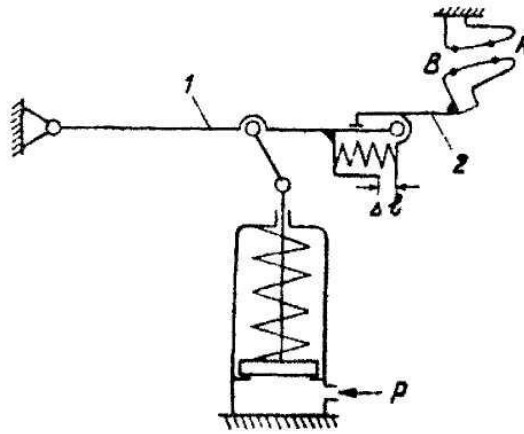


Рис. 1. Кінематична схема електропневматичного контактора

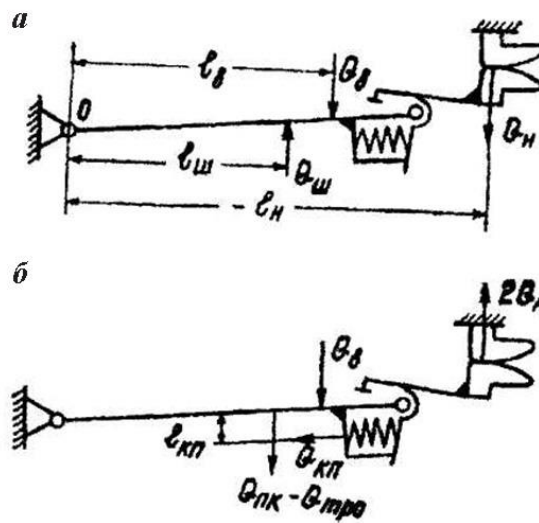


Рис. 2. Розрахункові схеми сил, що діють на поворотний важіль при включеному контакторі (а) та при розриві контактів, які зварилися (б)

Добутки $Q_B \frac{l_B}{l_{\text{ш}}}$ та $Q_H \frac{l_H}{l_{\text{ш}}}$ називаються приведеними силами ваги та натиснення контактів.

Далі всі приведені сили позначаються штрихом:

$$Q_{\text{ш}} - Q'_B - Q'_H = 0, \quad (1.22)$$

Як бачимо з рівняння (1.23), зручність використання для розрахунків приведених сил пов'язана з тим, що їх можна додавати. Усі сили приводяться до лінії дії будь-якої однієї сили, котра називається базовою. У наведеному прикладі базовою силою є $Q_{\text{ш}}$. Коефіцієнт приведення, на який повинна множитися приведена сила, дорівнює відношенню її плеча до плеча базової

сили.

Сила на штокові:

$$Q_{\text{ш}} = Q_{\text{тп}} - Q_{\text{пк}} - Q_{\text{тер}}, \quad (1.23)$$

де $Q_{\text{тп}}$ – сила тиску повітря;

$Q_{\text{пк}}$ – сила вимикальної пружини в кінцевому (стисненому) стані;

$Q_{\text{тер}}$ – сила тертя поршня.

Підставляємо (1.23) в (1.24)

$$Q_{\text{тп}} - Q_{\text{пк}} - Q_{\text{тер}} - Q'_{\text{в}} - Q'_{\text{н}} = 0. \quad (1.24)$$

Сила пружини в стисненому стані $Q_{\text{пк}}$ повинна забезпечити швидке, за час 0,03 – 0,06 с, вимкнення контактора. Крім того, у аварійних режимах роботи обладнання має забезпечуватися розмикання контактів, які зварилися. Остання умова зазвичай є визначальною при розрахунку сили вимикальної пружини. Для її реалізації сила, що розриває контакти, які зварилися, повинна як мінімум у два рази перевищувати силу їх натиснення при включеному контакторі.

З розрахункової схеми, наведеної на рис. 2, б, отримаємо:

$$Q_{\text{пк}} - Q_{\text{тро}} + Q'_{\text{в}} + Q'_{\text{кп}} - 2Q'_{\text{н}} = 0, \quad (1.25)$$

де $Q_{\text{тро}} = 1,5Q_{\text{тер}}$ – сила тертя спокою;

$Q'_{\text{кп}}$ – приведена сила контактної пружини.

Оскільки $l_{\text{кп}} \ll l_{\text{н}}$ та $Q_{\text{кп}} \ll 2Q_{\text{н}}$, значенням $Q'_{\text{кп}}$ при попередніх розрахунках можна знехтувати.

З рівнянь (1.24) та (1.25) із урахуванням $Q'_{\text{кп}} = 0$ отримуємо

$$Q_{\text{тп}} = 2,5Q_{\text{тер}} + 3Q'_{\text{н}}. \quad (1.26)$$

Сила тертя поршня залежить від діаметра поршня. Її величина (у ньютонках) розраховується за емпіричною формулою

$$Q_{\text{тер}} = 510^3 d_{\text{п}}, \quad (1.27)$$

де $d_{\text{п}}$ – діаметр поршня, м.

Сила тиску повітря

$$Q_{\text{тп}} = \frac{\pi d^2 n}{4} P_{\text{мін}}, \quad (1.28)$$

де $P_{\text{мін}} = 0,75P_{\text{н}}$ – мінімальний робочий тиск стисненого повітря, що становить 75 % від номінального тиску $P_{\text{н}} = 5 \cdot 10^5$ Па.

Для розрахунку приведеної сили натиснення контактів приймаємо типове для контакторів співвідношення плечей $\frac{l_{\text{н}}}{l_{\text{тп}}} = 1,2$. Тоді

$$Q_{\text{н}}' = 1,2Q_{\text{тп}}. \quad (1.29)$$

На основі виразів (1.26) – (1.29) складається квадратне рівняння, розв'язок якого з урахуванням отриманого раніше значення $Q_{\text{н}}$ дає можливість визначити діаметр поршня $d_{\text{п}}$ і потім силу тиску повітря $Q_{\text{тп}}$.

За розрахованим значенням $Q_{\text{тп}}$ із (1.24) визначається сила стисненої виконавчої пружини:

$$Q_{\text{пк}} = Q_{\text{тп}} - Q_{\text{тер}} - Q_{\text{в}}' - Q_{\text{н}}'. \quad (1.30)$$

Вага рухомої частини привода залежить від габаритів контактора, які пов'язані з робочим струмом і відповідно з натисненням контактів. Для розрахунку приймається $Q_{\text{в}}' = 0,1Q_{\text{н}}'$.

Хід поршня в процесі включення контактора $h_{\text{х}}$ залежить від розхилу контактів $h_{\text{р}}$ та від зазору Δl між поворотним важелем l і важелем рухомого контакту 2 (див. рис. 1). У процесі зменшення Δl до нуля відбувається притирання контактів, під час якого лінія контактування переміщується з початкової точки дотику контактів A в кінцеву точку B . При цьому здійснюється зачистка контактів за рахунок проковзування рухомого контакту по нерухомому. При відключенні контактора відбувається зворотний рух – лінія контакту переміщується з точки B в точку A і електрична дуга починає горіти на відстані 15...25 мм від точки робочого контакту B . Відстань, на яку переміщується рухомий контакт при усуненні нерухомого, називається провалом. Провал $h_{\text{п}}$ залежить від зазору $\Delta l_{\text{к}}$ та геометричних розмірів контактів та контактного важеля. У роботі приймаємо середнє для електропневматичних контакторів ЕРС значення $h_{\text{п}} = 10^{-2}$ м.

Необхідний розхил контактів (у метрах) залежить від номінальної напруги $U_{\text{н}}$ (у вольтах)

$$h_{\text{р}} = 10^{-5} U_{\text{н}}. \quad (1.31)$$

З урахуванням прийнятого раніше співвідношення l_H та l_{III} хід поршня приблизно можна розрахувати за формулою:

$$h_x = \frac{h_p + h_{II}}{1,2}. \quad (1.32)$$

При включеному контакторі вимикальна пружина має початковий натяг Q_{III} за рахунок її стиснення при складанні апарата на величину h_0

$$Q_{III} = h_0 ж, \quad (1.33)$$

де $ж$ – жорсткість пружини, Н/м.

Сила стиснення пружини в кінцевому положенні поршня

$$Q_{ПК} = Q_{III} + h_x ж = (h_0 + h_x) ж. \quad (1.34)$$

Зазвичай $h_0 \approx h_x$. Тоді необхідна жорсткість пружини визначається виразом

$$ж = \frac{Q_{ПК}}{2h_x}. \quad (1.35)$$

Отримані значення d_{II} , h_0 , h_x , $ж$ є вихідними для обчислення розмірів пружини, знаючи які можна визначити габарити циліндра привода. У контрольній роботі цей розрахунок не виконується.

Оформлення підрозділу.

1. Кінематична схема електропневматичного контактора.
2. Розрахункова схема діючих сил при включеному контакторі.
3. Розрахункова схема діючих сил при розриві контактів, які зварилися.
4. Виведення розрахункового рівняння і визначення діаметра поршня d_{II} .
5. Розрахунок сили тиску повітря на поршень $Q_{тп}$ при мінімальному робочому тиску.
6. Розрахунок сили тертя поршня $Q_{тер}$.
7. Розрахунок сили вимикальної пружини в стисненому стані $Q_{ПК}$.
8. Розрахунок розхилу контактів h_p .
9. Розрахунок ходу поршня при включенні апарата h_x .
10. Розрахунок жорсткості вимикальної пружини $ж$.
11. Розрахунок початкового натягу вимикальної пружини Q_{III} .

2. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КОНТАКТОРА

Вихідні дані для розрахунку контактора вибираються з табл. 2 за двома останніми цифрами навчального шифру.

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку електромагнітного контактора

Параметр	Остання цифра навчального шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Q_H , Н	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
h , мм	170	170	180	180	190	190	200	200	210	210
Параметр	Передостання цифра навчального шифру									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$ж_B$, Н/м	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900
$Q_{вп}$, Н	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39

Примітка: Q_H – сила натиснення контактів; h – довжина котушки; $ж_B$ – жорсткість вимикальної пружини; $Q_{вп}$ – початковий натяг вимикальної пружини.

Інші вихідні дані однакові для всіх варіантів:

- початковий повітряний зазор між якорем та осердям $\delta_o = 14$ мм;
- зазор між якорем та осердям, при якому стикаються контакти, $\delta_c = 6$ мм;
- кінцевий зазор між якорем та осердям $\delta_k = 1$ мм;
- зміна довжини притираючої пружини в процесі притирання $\Delta l_{\Pi} = 0,008$ м;
- зміна довжини вимикальної пружини в процесі включення контактора $\Delta l_B = 0,01$ м;
- плече сили електромагнітного притягання $l_M = 0,08$ м;
- плече сили вимикальної пружини $l_B = 0,072$ м;
- плече сили притираючої пружини $l_{\Pi} = 0,06$ м;
- діаметр осердя в повітряному зазорі $d_o = 0,06$ м;
- максимальний діаметр витка котушки $D = 0,075$ м;
- мінімальний діаметр витка котушки $d = 0,035$ м.

2.1. Розрахунок механічної характеристики контактора

Кінематичні схеми включеного та виключеного контактора наведені на

рис. 3, магнітне коло – на рис. 4.

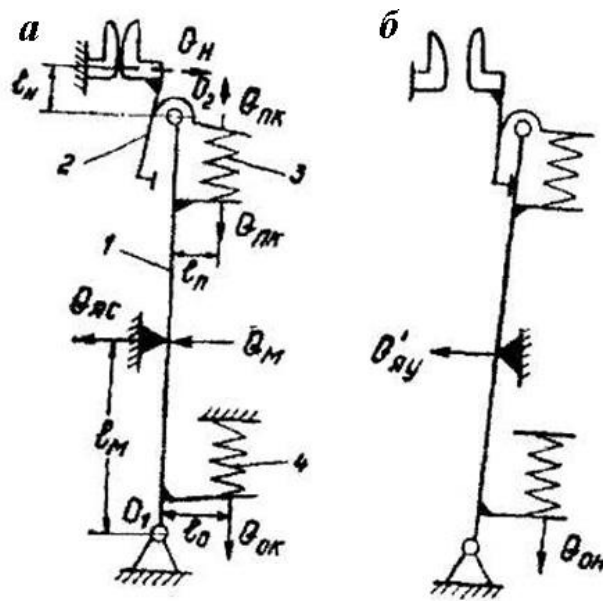


Рис. 3. Розрахункові схеми сил, що діють на важелі включеного (а) та виключеного (б) електромагнітного контактора

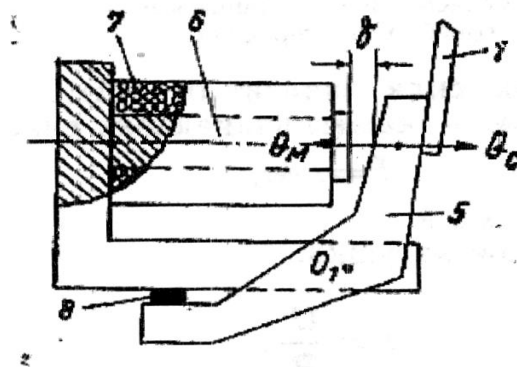


Рис. 4. Електромагнітний привод

На відміну від електропневматичного, у включеного електромагнітного контактора контактний важіль 2 не сумується з поворотним важелем 1. У результаті натиснення контактів не залежить від включаючої сили, функції якої виконує сила електромагнітного притягання Q_M . Із умови рівноваги контактного важеля сума моментів діючих на нього сил (на рис. 3, а вони показані пунктирними стрілками) відносно осі O_2 дорівнює нулю

$$Q_{\text{ПК}} l_{\text{П}} - Q_{\text{Н}} l_{\text{Н}} = 0, \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{ПК}}$ – сила притираючої пружини 3 в кінцевому (стисненому) стані;
 $l_{\text{П}}, l_{\text{Н}}$ – плечі сил (див. рис. 3, а).

Зазвичай $l_{\text{н}} \approx l_{\text{п}}$. За цієї умови з (2.1) отримуємо:

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{пк}}, \quad (2.2)$$

Сила притираючої пружини в кінцевому (стисненому) стані

$$Q_{\text{пк}} = Q_{\text{пн}} + \Delta l_{\text{п}} j_{\text{п}}, \quad (2.3)$$

де $Q_{\text{пн}}$ – початковий натяг притираючої пружини;
 $\Delta l_{\text{п}}$ – зміна довжини притираючої пружини в процесі притирання;
 $j_{\text{п}}$ – жорсткість притираючої пружини.

Сила вимикальної пружини в кінцевому (стисненому) стані

$$Q_{\text{вк}} = Q_{\text{вп}} + \Delta l_{\text{в}} j_{\text{в}}, \quad (2.4)$$

де $Q_{\text{вп}}$ – початковий натяг вимикальної пружини;
 $\Delta l_{\text{в}}$ – зміна довжини вимикальної пружини в процесі включення контактора;
 $j_{\text{в}}$ – жорсткість вимикальної пружини.

У включеного контактора якір повинен бути притиснутий до осердя з певною силою $Q_{\text{яо}}$, величина якої має бути достатньою для утримання якоря в кінцевому положенні при дії на нього вібрацій та ударів, що виникають при роботі контактора на рухомому складі. Необхідне мінімальне значення $Q_{\text{яо}}$ залежить від конструкції контактора та його розміщення на рухомому складі. Для розрахунків приймаємо $Q_{\text{яо min}} = 50$ Н. З рис. 3, а отримуємо:

$$Q_{\text{м}} l_{\text{м}} - Q_{\text{яо}} l_{\text{м}} - Q_{\text{пк}} l_{\text{п}} - Q_{\text{вк}} l_{\text{в}} = 0. \quad (2.5)$$

Використовуючи принцип приведення сил, рівняння (2.5) можна записати у вигляді:

$$Q_{\text{м}} - Q_{\text{яо}} - Q'_{\text{пк}} - Q'_{\text{вк}} = 0. \quad (2.6)$$

У вимкненого контактора сила притиснення якоря 5 до упора 8 (див. рис. 4) має бути достатньою для запобігання переміщенням рухомої частини при вібраціях та ударах. Ця сила, приведена до осі осердя, позначена на рис. 3, б $Q'_{\text{яу}}$. З рис. 3, б

$$Q'_{\text{яу}} = Q'_{\text{вк}} = Q_{\text{вп}} \frac{l_{\text{п}}}{l_{\text{м}}}, \quad (2.7)$$

де $Q'_{\text{вк}}$ – приведений початковий натяг вимикальної пружини.

У рівняннях (2.5–2.7) не враховується дія сили тяжіння рухомої частини, оскільки в контактора, що розглядається, якір розташований практично вертикально і плече цієї сили близьке до нуля. Прийняті рівними нулю й сили тертя. На ЕРС використовуються також контактори з горизонтальним розташуванням рухомої частини, вага якої відіграє істотну роль у системі діючих сил. Вочевидь, що для таких контакторів нехтувати дією сили тяжіння рухомих частин не можна.

Залежність сили Q_c опору руху якоря при включенні контактора від повітряного зазору δ між якорем та осердям називається механічною характеристикою. Для того щоб мати можливість порівнювати силу опору з електромагнітною силою, усі складові Q_c мають бути приведені до лінії дії електромагнітної сили, тобто до осі осердя. Для даного контактора з урахуванням прийнятих допущень

$$Q_c = Q'_v + Q'_n, \quad (2.8)$$

де Q'_v – приведена сила вимикальної пружини;
 Q'_n – приведена сила притираючої пружини.

Принцип побудови механічної характеристики ілюструється рис. 5. На цьому рисунку позначені: δ_0 – зазор між між якорем і осердям при відключеному контакторі, який називається початковим повітряним зазором; δ_c – зазор між якорем та осердям, при якому контакти дотикаються; δ_k – зазор між якорем та осердям при включеному контакторі, який називається кінцевим зазором. Конструктивно наявність кінцевого зазору забезпечується або за рахунок прокладки із немагнітного матеріалу, котра приклепується до якоря, або за рахунок обмежуючого упору. Зазор δ_k необхідний для запобігання «залипанню» якоря під дією залишкової намагніченості сталі магнітопроводу контактора.

Залежність електромагнітної сили Q_m від повітряного зазору між якорем та осердям δ називається тяговою характеристикою. Приклад тягової характеристики показаний на рис. 6.

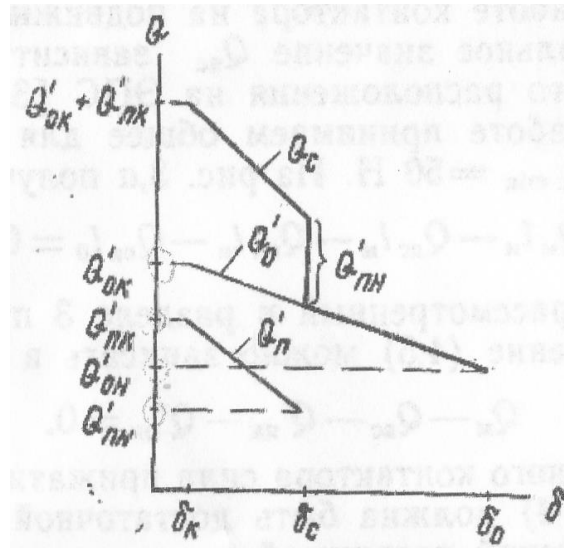


Рис. 5. Побудова механічної характеристики електромагнітного контактора

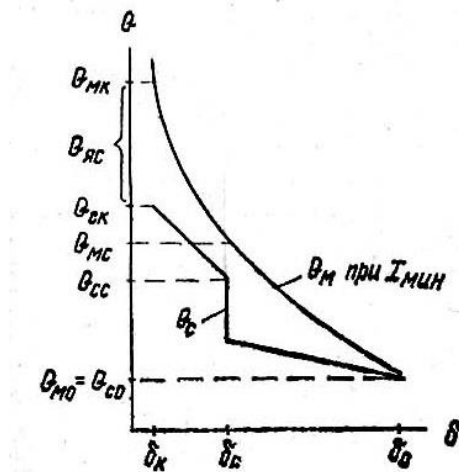


Рис. 6. Узгодження механічної та тягової характеристик

Електромагнітна сила залежить від МРС (магніторушійна сила, синонім – намагнічувальна сила) котушки F

$$F = I\omega,$$

де I – струм в котушці, А;
 ω – кількість витків котушки.

Струм у котушці

$$I = \frac{U}{R},$$

де U – напруга живлення котушки, В;

R – опір котушки, Ом.

Апарати ЕРС повинні нормально функціонувати при напрузі живлення кіл управління, рівній 60 % від номінального значення $U_H = 50$ В. Опір котушки також непостійний, він залежить від її температури. Мінімальна намагнічувальна сила F_{\min} буде при мінімальному струмі котушки

$$I_{\min} = \frac{0,6U_H}{R_{\max}}.$$

Для того щоб за найгірших експлуатаційних умов контактор зберігав працездатність, усі точки тягової характеристики при F_{\min} повинні лежати вище точок механічної характеристики, причому, як було показано вище, сила притиснення якоря до осердя має бути не менше $Q_{\text{яо min}}$. Сили опору при зазорах δ_o , δ_c та δ_k позначаються відповідно Q_{oo} , Q_{oc} та Q_{ok} , а електромагнітні сили – Q_{mo} , Q_{mc} та Q_{mk} . Тоді при F_{\min} повинні виконуватися умови

$$Q_{mo} \geq Q_{oo}; \quad (2.9)$$

$$Q_{mc} \geq Q_{oc}; \quad (2.10)$$

$$Q_{mk} \geq Q_{ok} + Q_{\text{яо min}}. \quad (2.11)$$

З рис. 5

$$Q_{oo} = Q'_{\text{ВП}};$$

$$Q_{oc} = Q'_{\text{ВП}} + \frac{(Q'_{\text{ВК}} - Q'_{\text{ВП}})(\delta_o - \delta_c)}{\delta_o - \delta_k} + Q'_{\text{ПП}};$$

$$Q_{ok} = Q'_{\text{ВК}} + Q'_{\text{ПК}}.$$

Для розрахунків Q_{mo} , Q_{mc} можна користуватися формулою:

$$Q_M = \frac{0,5\mu_0 S_\delta F^2}{\delta^2}, \quad (2.12)$$

де Q_M – електромагнітна сила, Н;

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{ГН}}{\text{м}}$ – магнітна проникність повітря;

S_δ – площа осердя в повітряному зазорі, м²;

- F – МРС котушки, А
 δ – повітряний зазор, м.

За малих повітряних зазорах формула (2.12) дає завищений результат, оскільки при виведенні її не враховується магнітний опір магнітопровода. У контрольній роботі розрахунок точок тягової характеристики в інтервалі $\delta_0 - \delta_k$ виконується за даними табл. 3, в якій значення Q_M подані у відносних (відносно Q_{M0}) величинах.

Таблиця 3

Координати точок тягової характеристики

δ , мм	1	2	4	6	8	14
Q_M/Q_{M0}	13,5	11	7,3	5,44	3,06	1

З табл. 3 випливає, що при заданому значенні $\delta_k = 1$ мм умову (2.11) можна записати у вигляді

$$13,5 \cdot Q_{M0} \geq Q_{OK} + Q_{yo \min} \cdot \tag{2.13}$$

З отриманих за умовами (4.9), (4.10), (4.13) значень F_{\min} вибирається найбільше і за ним розраховується котушка контактора.

Оформлення підрозділу.

1. Розрахунок початкового натягнення $Q_{пш}$ та жорсткості $j_{п}$ притираючої пружини.

Для розрахунку використовуються формули (2.2), (2.3) та приймається

$$Q_{пш} = 0,7Q_{пк} \cdot$$

2. Розрахунок приведених сил притираючої пружини $Q'_{пш}$.

3. Розрахунок приведених сил вимикальної пружини $Q'_{вп}$.

4. Розрахунок точок механічної характеристики $Q_{оо}$, $Q_{ос}$ та $Q_{ок}$.

5. Розрахунок мінімальної намагнічувальної сили F_{\min} .

6. Розрахунок точок тягової характеристики при F_{\min} . Результати розрахунку звести в таблицю аналогічну табл. 3.

7. Побудова механічної характеристики та тягової характеристики при F_{\min} . Характеристики будуються на одному рисунку (див. приклад на рис. 6) на аркуші міліметрового паперу формату А4.

2.2. Розрахунок котушки електромагнітного контактора

Котушка намотується мідним дротом круглого перерізу на виконаному з ізоляційного матеріалу каркасі. За заданими розмірами котушки і розрахованим значенням F_{\min} потрібно визначити кількість витків котушки ω та діаметр обмотувального дроту $d_{\text{др}}$.

Опір котушки

$$R = \frac{\rho l_{\text{сер}}}{q_{\text{др}}} \omega, \quad (2.14)$$

де ρ – питомий опір міді, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$;

$l_{\text{сер}}$ – середня довжина витка котушки, м;

$q_{\text{др}}$ – переріз обмотувального дроту, мм^2 .

Середня довжина витка

$$l_{\text{сер}} = 0,5\pi(D + d), \quad (2.15)$$

де D – максимальний діаметр витка, м;

d – мінімальний діаметр витка, м.

Напруга на котушці

$$U = IR = I \frac{\rho l_{\text{сер}}}{q} \omega = F \frac{\rho l_{\text{сер}}}{q}. \quad (2.16)$$

Із формули (2.16) отримуємо розрахунковий переріз обмотувального дроту, котрий забезпечує значення F_{\min} за найгірших експлуатаційних умов

$$q_{\text{р}} = \frac{F_{\min} \rho_{\text{max}} l_{\text{сер}}}{U_{\min}},$$

де $\rho_{\text{max}} = 0,0225 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ – питомий опір міді при максимально допустимій температурі котушки.

Через різні умови охолодження шари котушки нагріті неоднаково. При ізоляції класу А температура наперегрітіших середніх шарів може сягати 125°C при температурі навколишнього повітря 50°C . Розрахункова темпера-

тура, для якої наведено ρ_{\max} , прийнята рівною $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Після розрахунку q_p з табл. 4 вибирається дріт, котрий має найближчий більший переріз $q_{\text{др}}$.

Таблиця 4

Вибірki із стандартного ряду діаметрів і перерізів круглих обмотувальних дротів

$d_{\text{др}}, \text{мм}$	0,31	0,33	0,35	0,38	0,41	0,44	0,47	0,49	0,51	0,53
$q_{\text{др}}, \text{мм}^2$	0,075	0,086	0,096	0,113	0,132	0,152	0,174	0,189	0,204	0,22
$d_{\text{др}}, \text{мм}$	0,55	0,57	0,59	0,62	0,64	0,67	0,69	0,72	0,74	0,77
$q_{\text{др}}, \text{мм}^2$	0,238	0,255	0,273	0,302	0,322	0,353	0,374	0,407	0,43	0,466

Обмотувальний простір («вікно») котушки

$$S_o = 0,5(D - d)h,$$

де h – довжина котушки, мм;

D, d – відповідно максимальний та мінімальний діаметри витка, мм.

Кількість витків котушки

$$\omega = \frac{S_o k_3}{q_{\text{др}}},$$

де k_3 – коефіцієнт заповнення обмотувального простору міддю.

Коефіцієнт k_3 залежить від діаметру дроту та товщини його ізоляції. Для дроту з $d_{\text{др}} = 0,3 - 1,2$ мм та емалевою ізоляцією розрахункове значення $k_3 = 0,7$.

Розрахована котушка перевіряється на нагрівання. Повний тепловий розрахунок виконується з використанням коефіцієнтів та номограм, отриманих при випробуваннях аналогічних апаратів. У контрольній роботі оцінка нагріву котушки виконується орієнтовно шляхом порівняння фактичної густини струму у витках котушки з допустимою.

Допустима густина струму залежить від потужності, що розсіюється на котушці. Максимальна потужність буде при максимальній напрузі живлення U_{\max} , рівній $1,1U_{\text{ном}}$

$$P_{\max} = \frac{U_{\max}^2}{R}.$$

Допустима густина струму ($\frac{A}{\text{мм}^2}$) пов'язана з максимальною потужністю (Вт) емпіричним співвідношенням

$$j_{\text{доп}} = \frac{80 + P}{P}.$$

Густина струму у витках котушки

$$j = \frac{U_{\max}}{Rq_{\text{др}}}.$$

За $j_{\text{доп}} \geq j$ необхідне коригування «вікна» котушки. Під час розрахунку P_{\max} та j опір котушки, який визначається за формулою (2.14), приймається максимальним, тобто $\rho = \rho_{\max}$.

Оформлення підрозділу.

1. Розрахунок середньої довжини витка котушки $l_{\text{сер}}$.
2. Визначення розрахункового перерізу обмотувального дроту q_p .
3. Вибір діаметра дроту $d_{\text{др}}$ та його перерізу $q_{\text{др}}$.
4. Розрахунок площі вікна котушки S_o .
5. Розрахунок кількості витків котушки ω .
6. Розрахунок опору котушки R .
7. Розрахунок максимальної потужності котушки P_{\max} .
8. Розрахунок допустимої густини струму в котушці $j_{\text{доп}}$.
9. Розрахунок фактичної густини струму в котушці j . Оцінка допустимості перегріву котушки.

Бібліографічний список

1. Тягові електричні машини електрорухомого складу: навчальний посібник / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. 252 с.
2. Дубинець Л. В. Тягові електричні апарати контактні : Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2002. 104с.
3. Клименко Б.В. Електричні апарати. Загальний курс : навчальний посібник. Харків: Вид-во «Точка», 2012. 340 с.

Електронне видання

Бобирь Дмитро Валерійович
Сердюк Володимир Никандрович
Десяк Андрій Євгенович

ЕЛЕКТРИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ЛОКОМОТИВІВ

Методичні вказівки до виконання контрольної роботи