МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

В авторській редакції

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Навчально-методичні рекомендації
до виконання контрольного завдання на тему:
«Розрахунок електромагнітного контактора»

Електронне видання

ДНІПРО
2024

УДК 621.3.04(076.1)
Е 50

Упорядник:
Д. В. Устименко

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми
141 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

Протокол № 5 від 01.02.2024

Е 50 Електричні апарати : навчально-методичні рекомендації до виконання контрольного завдання на тему: «Розрахунок електромагнітного контактора» / упоряд. Д. В. Устименко ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2024. – 17 с.

Навчально-методичні рекомендації до виконання контрольного завдання на тему «Розрахунок електромагнітного контактора».

Навчально-методичні рекомендації містять основні теоретичні положення та методику розрахунку електромагнітного контактора.

Іл. 4. Табл. 3. Бібліогр.: 2 назв.

© Устименко Д. В., упорядкування, 2024
© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2024

ЗМІСТ

Вступ 4
Оформлення контрольного завдання 4
Вихідні дані 5
Розрахунок механічної характеристики контактора 6
Розрахунок котушки електромагнітного контактора 12
Порядок оформлення розрахунків 14
Бібліографічний список 15

ВСТУП

Метою контрольного завдання є закріплення та поглиблення знань, одержаних під час вивчення матеріалу дисципліни «Електричні апарати».

В завданні виконується розрахунок електромагнітного контактора. Робота складається з двох частин:

- розрахунок механічної характеристики електромагнітного контактора;
- розрахунок котушки електромагнітного контактора.

В навчально-методичних рекомендаціях наведені вимоги до змісту контрольного завдання, а також рекомендації до його виконання.

ОФОРМЛЕННЯ КОНТРОЛЬНОГО ЗАВДАННЯ

Усі записи виконуються на одній стороні листа А4 формату. З лівої сторони листа залишають поля шириною 25…30 мм для підшивки, з правої – поля шириною 15 мм, зверху та знизу − не менше 10 мм. Приклад оформлення титульної сторінки наведено в кінці цих методичних рекомендацій.

Розрахунки виконуються в послідовності, що наведена в даних методичних рекомендаціях. На кожному етапі розрахунку вказується його порядковий номер та найменування величини яка розраховується. В формулах розшифровують тільки ті символи і числові коефіцієнти, які не мали пояснення на більш ранніх етапах розрахунку. Після цього в формулу підставляють числові значення змінних і, не наводячи проміжних обрахунків, наводять кінцевий результат.

Усі рисунки повинні бути пронумерованими. Нумерація наскрізна. Розміщуються вони зразу після посилання на них в тексті роботи або на наступній сторінці, якщо вони виконуються на окремих сторінках.

Графіки виконуються в масштабі.

Відмічені рецензентом помилки повинні бути акуратно виправлені. Для виправлень можна використовувати зворотну сторону попередньої сторінки. Не можна заклеювати чи виривати сторінки з помилковими розрахунками.

ВИХІДНІ ДАНІ

Вихідні дані для розрахунку задаються табл. 1 у відповідності до навчального шифру (номеру залікової книжки) студента.

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку електромагнітного контактора

Параметр	Номер варіанту (остання цифра шифру)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сила натискання контактів $Q_{н}$, Н	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Довжина котушки h, мм	170	170	180	180	190	190	200	200	210	210

Продовження таблиці 1.

Параметр	Номер варіанту (передостання цифра шифру)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Жорсткість пружини, що вимикає апарат $ж_{в}$, Н/м	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
Початковий натяг пружини, що вимикає апарат $Q_{вп}$, Н	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39

Інші вихідні данні загальні для усіх варіантів:

- Початковий повітряний зазор між якорем і осердям δ_0=14 мм.
- Зазор між якорем і осердям, за умови дотикання контактів, $\delta_{с}$=6 мм.
- Кінцевий зазор між якорем і осердям $\delta_{к}$=1 мм.
- Зміна довжини пружини притирання в процесі притирання $\Delta l_{п}$=0,008 м.
- Зміна довжини пружини, що забезпечує відключення, в процесі увімкнення контактора $\Delta l_{в}$=0,01 м.
- Плече сили електромагнітного притягнення $l_{м}$=0,08 м.
- Плече сили пружини вимикання $l_{в}$=0,072 м.
- Плече сили пружини притирання $l_{п}$=0,06 м.
- Діаметр осердя в повітряному зазорі $d_{с}$=0,06 м.
- Максимальний діаметр витка котушки D=0,075 м.
- Максимальний діаметр витка котушки d=0,035 м.

1. РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТОРА

Конструктивне влаштування електромагнітного контактора та його принцип дії розглядається в [1]. Кінематичні схеми увімкненого і вимкненого контактора наведені на рис. 1, а, б та його магнітне коло – рис. 2.

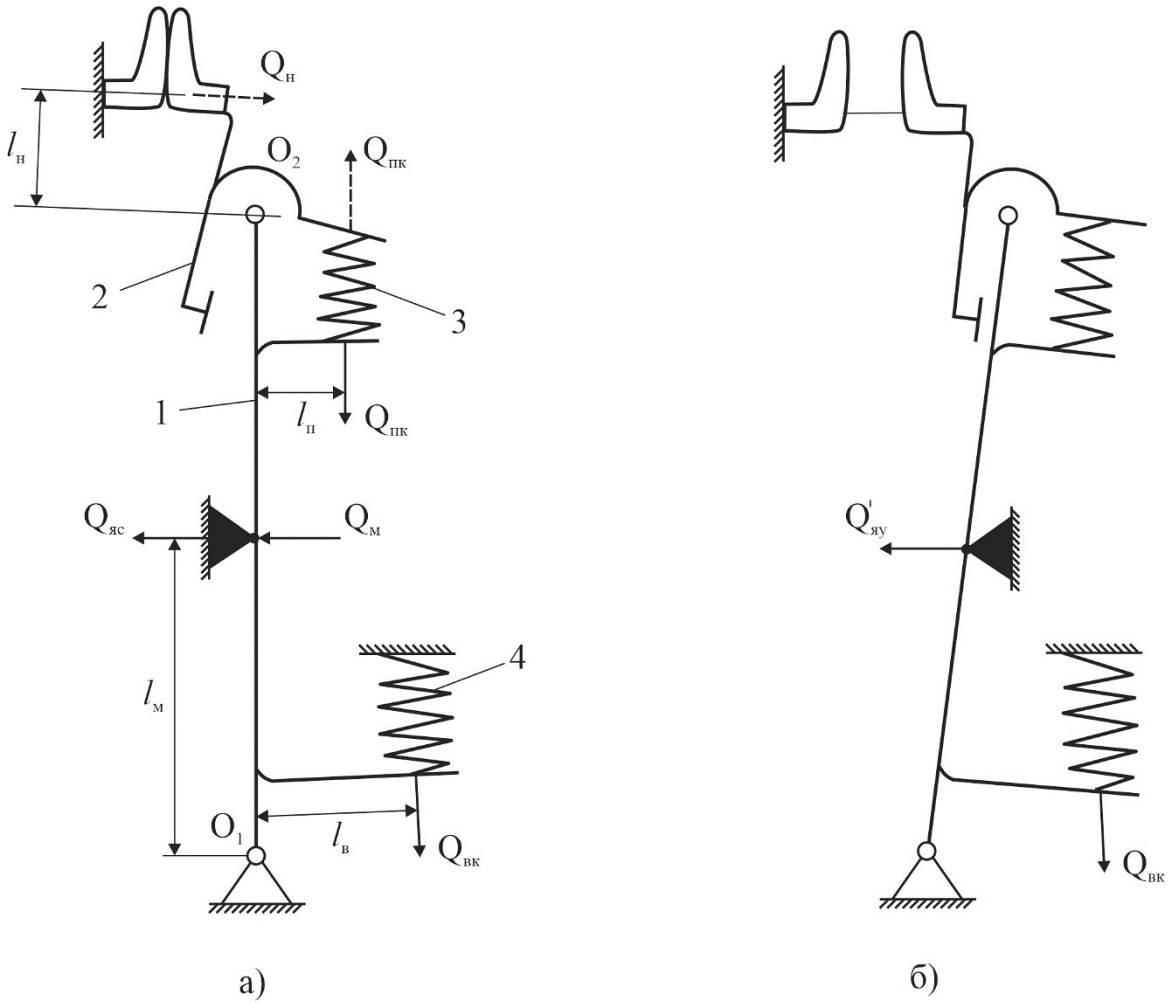

Рис. 1 Розрахункові схеми сил, що діють на важелі увімкненого (а) і вимкненого (б) електромагнітного контактора

На відміну від електропневматичного, у вимкненого електромагнітного контактора контактний важіль 2 не складається з поворотним важелем 1. В результаті натискання контактів не залежить від сили, що вмикає апарат, функції якої виконує сила електромагнітного притягування $Q_м$. Із умови рівноваги контактного важеля сума моментів діючих на нього сил (на рис. 1,а вони показані пунктирними стрілками) відносно осі O_2 рівна нулю:

$$Q_{пк} \cdot l_п - Q_н \cdot l_н = 0, \tag{1.1}$$

де $Q_{пк}$ − сила, що створюється пружиною притирання 3 в кінцевому (стисненому) стані;

$l_п$, $l_н$ − плечі сил (дивись рис. 1,а).

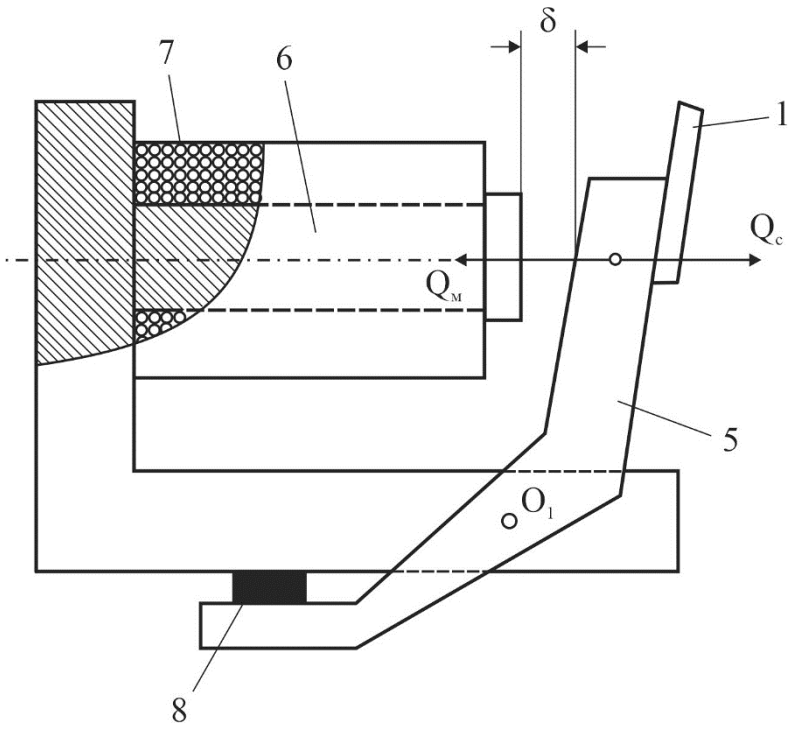

Рис. 2 Електромагнітний привод

Зазвичай $l_{н} \approx l_{п}$. За такої умови з рівняння (1.1) отримуємо:

$$Q_{н} = Q_{пк}. \tag{1.2}$$

Сила пружини притирання в кінцевому (стисненому) стані:

$$Q_{пк} = Q_{пп} + \Delta l_{п} \cdot ж_{п}, \tag{1.3}$$

де $Q_{пп}$ – початковий натяг пружини притирання;

$\Delta l_{п}$ – зміна довжини пружини притирання в процесі притирання;

$ж_{п}$ – жорсткість пружини притирання.

Сила, що створюється пружиною вимикання в кінцевому (стисненому) стані:

$$Q_{вк} = Q_{вп} + \Delta l_{в} \cdot ж_{в}, \tag{1.4}$$

де $Q_{вп}$ – початковий натяг пружини вимикання;

$\Delta l_{в}$ – зміна довжини пружини вимикання в процесі увімкнення контактора;

$ж_{в}$ – жорсткість пружини вимикання.

У ввімкненого контактора якір повинен бути притисненим до осердя з певним зусиллям $Q_{яс}$, величина якого повинна бути достатньою для утримання якоря в кінцевому положенні за умови дії на нього вібрацій та ударів, що виникають при роботі контакторів на рухомому складі. Необхідне

мінімальне значення зусилля $Q_{\text{яс}}$ залежить від конструкції контактора і його розміщення на електрорухомому складі. В даній роботі приймається загальне для усіх варіантів значення $Q_{\text{яс min}} = 50$ Н. Із рис. 1,а отримують

$$Q_{\text{м}} l_{\text{м}} - Q_{\text{яс}} l_{\text{м}} - Q_{\text{пк}} l_{\text{п}} - Q_{\text{вк}} l_{\text{в}} = 0. \tag{1.5}$$

Приводячи сили, що діють в конструкції рівняння (5) можна переписати у вигляді:

$$Q_{\text{м}} - Q_{\text{яс}} - Q'_{\text{пк}} - Q'_{\text{вк}} = 0. \tag{1.6}$$

Усі приведені сили відмічаються штрихом.

У вимкненого контактора сила притискання якоря 5 до упору 8 (дивись рис. 2) повинна бути достатньою для упередження переміщення рухомої частини при вібраціях і ударах. Ця сила, приведена до осі осердя, позначена на рис. 1,б як $Q'_{\text{яу}}$.

З рис. 1,б

$$Q'_{\text{яу}} = Q'_{\text{вп}} = Q_{\text{вп}} \frac{l_{\text{в}}}{l_{\text{м}}}, \tag{1.7}$$

де $Q'_{\text{вп}}$ − приведений початковий натяг пружини вимикання.

В рівняннях (1.5) – (1.7) не враховується дія сили тяжіння рухомої частини, оскільки у даного типу контакторів якір розміщено практично вертикально і плече цієї сили наближається до нульового значення. Прийняті нульовими і сили тертя.

Залежність сили $Q_{\text{с}}$ опору руху якоря при вмиканні контактора від величини повітряного зазору δ між якорем та осердям називається механічною характеристикою. Для того щоб мати можливість порівнювати силу опору з електромагнітною силою, усі складові $Q_{\text{с}}$ повинні бути приведеними до лінії дії електромагнітної сили, тобто до осі осердя. Для контактора, що розглядається з урахуванням прийнятих допущень:

$$Q_{\text{с}} = Q'_{\text{в}} + Q'_{\text{п}}, \tag{1.8}$$

де $Q'_{\text{в}}$ − приведена сила пружини вимикання;

$Q'_{\text{п}}$ − приведена сили пружини притирання.

Принцип побудови механічної характеристики проілюстровано на рис. 3.

На рис. 3 позначені:

δ_0 − зазор між якорем і осердям за умови, що контактор вимкнений, дуже часто називають початковим повітряним зазором;

$\delta_{\text{с}}$ − зазор між якорем і осердям за умови дотикання контактів;

$\delta_{\text{к}}$ − зазор між якорем та осердям за умови, що контактор увімкнений, називають кінцевим зазором.

З точки зору конструкції наявність кінцевого зазору забезпечується або за рахунок прокладки з немагнітного матеріалу, яку приклепують до якоря, або за рахунок упору. Зазор $\delta_к$ необхідний для унеможливлення «залипання» якоря під дією залишкової намагніченості сталі магнітопроводу контактора.

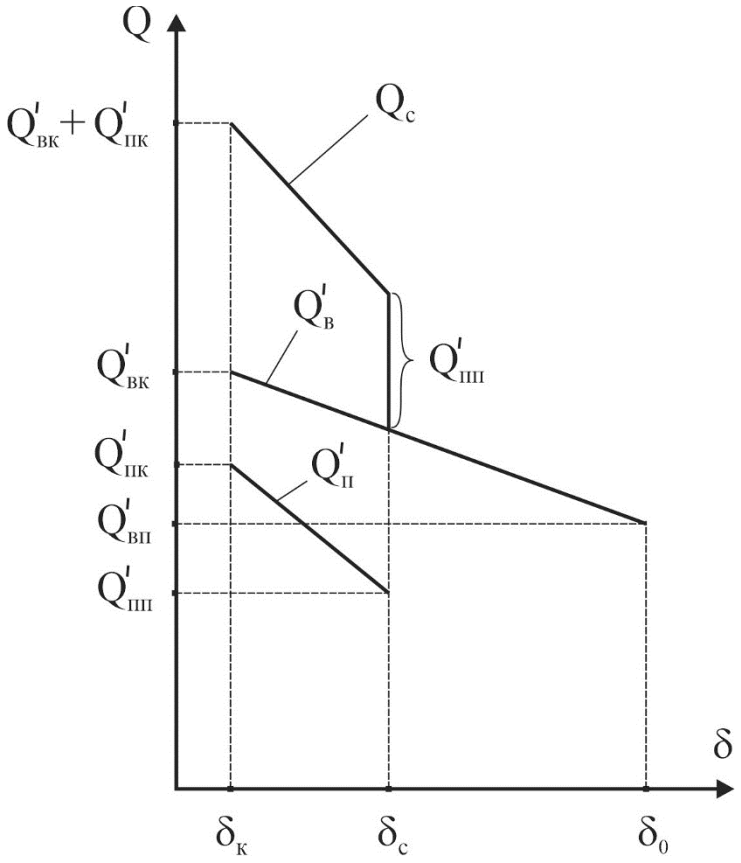

Рис. 3 Побудова механічної характеристики електромагнітного контактора

Залежність електромагнітної сили $Q_м$ від величини повітряного зазору між якорем і осердям δ називається тяговою характеристикою. Приклад тягової характеристики показаний на рис. 4.

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

$$F = I \cdot w, \tag{1.9}$$

де I – струм в котушці, А;
w – кількість витків в котушці.
Струм в котушці:

$$I = \frac{U}{R}, \tag{1.10}$$

де U – напруга живлення котушки, В;
R – опір котушки, Ом.

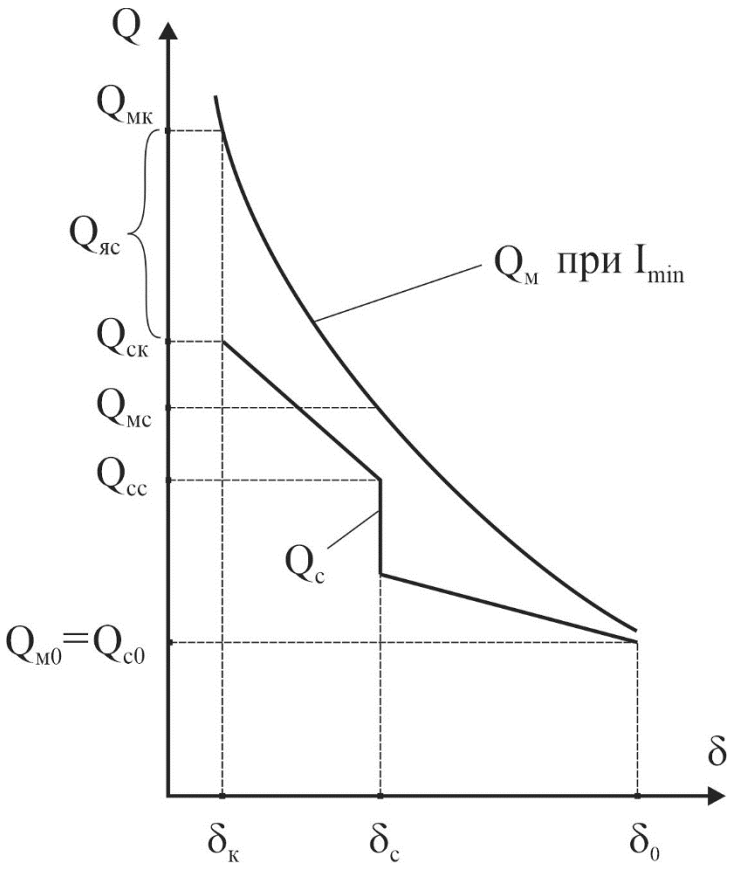

Рис. 4 Узгодження механічної і тягової характеристик

Апарати електрорухомого складу повинні нормально функціонувати за напруги живлення кіл керування, що складає 60% від номінального значення $U_{\text{ном}}$ =50 В. Опір котушки також не є постійним і залежить від її температури. Мінімальне значення сили намагнічування $F_{\min}$ досягається за умови протікання в котушці мінімального струму, тобто:

$$I_{\min} = \frac{0,6U_{\text{ном}}}{R_{\max}}. \tag{1.11}$$

Для того аби в найгірших умовах експлуатації контактор зберігав працездатність, усі точки, тягової характеристики при $F_{\min}$ повинні лежати вище точок механічної характеристики, причому, як було показано вище, сила притискання якоря до осердя повинна бути не менше ніж $Q_{\text{яс min}}$. Сили опору при зазорах δ_0, $\delta_{\text{с}}$ і $\delta_{\text{к}}$ позначені відповідно $Q_{\text{с0}}$, $Q_{\text{сс}}$, $Q_{\text{ск}}$ (рис. 4), а електромагнітні сили − $Q_{\text{м0}}$, $Q_{\text{мс}}$, $Q_{\text{мк}}$. Тоді при $F_{\min}$ повинні виконуватись умови:

$$Q_{\text{м0}} \geq Q_{\text{с0}}, \tag{1.12}$$

$$Q_{\text{мс}} \geq Q_{\text{сс}}, \tag{1.13}$$

$$Q_{\text{мк}} \geq Q_{\text{ск}} + Q_{\text{яс min}}. \tag{1.14}$$

З рис. 3:

$$Q_{\text{с0}} = Q'_{\text{вп}}, \tag{1.15}$$

$$Q_{\text{сс}} = Q'_{\text{вп}} + \frac{\left(Q'_{\text{вк}} - Q'_{\text{вп}}\right)\cdot\left(\delta_0 - \delta_{\text{с}}\right)}{\delta_0 - \delta_{\text{к}}} + Q'_{\text{пп}}, \tag{1.16}$$

$$Q_{\text{ск}} = Q'_{\text{вк}} + Q'_{\text{пк}}. \tag{1.17}$$

Для розрахунків $Q_{\text{м0}}$, $Q_{\text{мс}}$ можна скористатись формулою:

$$Q_{\text{м}} = \frac{0{,}5\mu_0 S_\delta F^2}{\delta^2}, \tag{1.18}$$

де $Q_{\text{м}}$ – електромагнітна сила, Н;

$\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна проникність повітря;

S_δ – площа осердя в повітряному зазорі, м;

F – МРС котушки, А;

δ – повітряний зазор, м.

Для малих повітряних зазорів формула (1.18) дає завищений результат, оскільки при її отриманні не врахований магнітний опір магнітопроводу. В контрольній роботі розрахунок точок тягової характеристики в інтервалі $\delta_{\text{к}}$ – $\delta_{\text{с}}$ роблять по даним табл. 2, в якій значення $Q_{\text{м}}$ наведені у відносних (відносно $Q_{\text{м0}}$) величинах.

Таблиця 2. Координати точок тягової характеристики

δ, мм	1	2	4	6	8	14
$Q_{\text{м}}/Q_{\text{м0}}$	13,5	11	7,3	5,44	3,06	1

З табл. 2 випливає, що для заданого значення $\delta_{\text{к}} = 1$ мм умова (1.14) може бути записана у вигляді:

$$13{,}5\cdot Q_{\text{м0}} \geq Q_{\text{ск}} + Q_{\text{яс min}}. \tag{1.19}$$

Із отриманих по умовам (1.12), (1.13), (1.19) значень $F_{\min}$ вибирається найбільше і за цим значенням розраховується котушка контактора.

2. РОЗРАХУНОК КОТУШКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КОНТАКТОРА

Котушка намотується мідним проводом круглого перерізу на виконаному з ізоляційного матеріалу каркасі. По заданим розмірам котушки і розрахованому значенню $F_{\min}$ необхідно визначити кількість витків котушки w та діаметр обмоткового проводу $d_{\text{пр}}$.

Опір котушки:

$$R = \frac{\rho l_{\text{ср}}}{q} w, \tag{2.1}$$

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

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

q – переріз обмоткового проводу, мм^2;

Середня довжина витка:

$$l_{\text{ср}} = 0{,}5\pi\left(D + d\right). \tag{2.2}$$

де D – максимальний діаметр витка, м;

d – мінімальний діаметр витка, м.

Напруга на котушці:

$$U = IR = I\frac{\rho \cdot l_{\text{ср}}}{q} w = F\frac{\rho \cdot l_{\text{ср}}}{q}. \tag{2.3}$$

З формули (2.3) отримуємо розрахунковий перетин обмоткового проводу, який забезпечить значення $F_{\min}$ за найгірших умов експлуатації:

$$q_{\text{р}} = \frac{F_{\min} \cdot \rho_{\max} \cdot l_{\text{ср}}}{U_{\min}}, \tag{2.4}$$

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

Через різні умови охолодження шари котушки нагріваються неоднаково. У випадку ізоляції класу А температура найбільш перегрітих середніх шарів може досягати 125ºС при температурі навколишнього повітря 50ºС. Розрахункова температура, для якої наведено значення $\rho_{\max}$, прийнята рівною 90ºС.

Після розрахунку $q_{\text{р}}$ з табл. 3 вибирається провід, який має найближчий більш перетин $q_{\text{пр}}$.

Таблиця 3. Стандартний ряд діаметрів і перетинів круглих проводів

$d_{\text{пр}}$, мм	0,31	0,33	0,35	0,38	0,41	0,44	0,47	0,49	0,51	0,53
$q_{\text{пр}}$, мм^2	0,075	0,086	0,096	0,113	0,132	0,152	0,174	0,189	0,204	0,22
$d_{\text{пр}}$, мм	0,55	0,57	0,59	0,62	0,64	0,67	0,69	0,72	0,74	0,77
$q_{\text{пр}}$, мм^2	0,238	0,255	0,273	0,302	0,322	0,353	0,371	0,407	0,43	0,466

Обмотковий простір («вікно») котушки:

$$S_0 = 0{,}5\left(D - d\right)h, \tag{2.5}$$

де h – довжина котушки, мм;

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

Кількість витків котушки:

$$w = \frac{S_0 \cdot k_{\text{з}}}{q_{\text{пр}}}, \tag{2.6}$$

де $k_{\text{з}}$ – коефіцієнт заповнення обмоткового простору міддю. Його величина залежить від діаметра проводу і товщини ізоляції. Для проводів з $d_{\text{пр}}$=0,3…1,2 мм і емалевою ізоляцією розрахункове значення $k_{\text{з}}$=0,7.

Після розрахунків котушка перевіряється на нагрів. Повний тепловий розрахунок виконується з використанням коефіцієнтів і номограм, що отримують в результаті випробувань аналогічних апаратів. В контрольному завданні оцінка нагріву котушки виконується орієнтовно шляхом порівняння фактичної густини струму в витках котушки з допустимим значенням.

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

$$P_{\max} = \frac{U_{\max}^2}{R}. \tag{2.7}$$

Допустима густина струму в А/мм^2 пов’язана з $P_{\max}$ (Вт) емпіричним співвідношенням:

$$j_{\text{доп}} = \frac{80 + P}{P}. \tag{2.8}$$

Густина струму в витках котушки:

$$j = \frac{U_{\max}}{R \cdot q_{\text{пр}}}. \tag{2.9}$$

Якщо $j > j_{доп}$, то необхідно корегувати «вікно» котушки.

В розрахунках P_{max} і j опір котушки, що визначається за формулою (2.1), приймається максимальним, тобто $\rho = \rho_{max}$.

ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКІВ

1.1 Розрахунок початкової величини натягнення $Q_{пп}$ і жорсткості $ж_{п}$ пружини притирання. Для розрахунків використовують формули (1.2), (1.3) та приймають наступне співвідношення $Q_{пп} = 0,7 \cdot Q_{пк}$.

1.2 Розрахунок приведених сил пружини притирання $Q'_{пп}$, $Q'_{пк}$.

1.3 Розрахунок приведених сил пружини вимикання $Q'_{вп}$, $Q'_{вк}$.

1.4 Розрахунок точок механічної характеристики $Q_{с0}$, $Q_{сс}$, $Q_{ск}$.

1.5 Розрахунок мінімального значення сили намагнічування F_{min}.

1.6 Розрахунок точок тягової характеристики при F_{min}. Результати розрахунку звести до таблиці.

1.7 Побудова механічної і тягової характеристик при F_{min}. Характеристики будуються в одній координатній площині (по аналогії з рис. 4).

2.1 Розрахунок середньої довжини витка котушки $l_{ср}$.

2.2 Визначення розрахункового перетину обмоткового проводу $q_{р}$.

2.3 Вибір діаметра проводу $d_{пр}$ і його перетину $q_{пр}$.

2.4 Розрахунок площі вікна котушки S_0.

2.5 Розрахунок кількості витків котушки w.

2.6 Розрахунок опору котушки R.

2.7 Розрахунок максимальної потужності котушки P_{max}.

2.8 Розрахунок допустимої густини струму в котушці $j_{доп}$.

2.9 Розрахунок фактичної густини струму в котушці j. Оцінка допустимості перегріву котушки.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навч. посіб. Харків : Вид-во «Точка», 2012. 340 с.

2. Клименко Б. В. Комутаційна апаратура, апаратура керування, запобіжники. Терміни, тлумачення, коментарі : навч. посіб. Харків : Талант, 2008. 208 с.

Приклад оформлення титульної сторінки контрольного завдання.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет науки і технологій

ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту»

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

КОНТРОЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

з дисципліни

«Електричні апарати»

на тему:

«Розрахунок електромагнітного контактора»

Виконавець:
студент (ка) групи_____

_____
(Прізвище, ініціали)

Перевірив:

_____
(Прізвище, ініціали)

м. Дніпро, 20__

Навчально-методичне видання

Устименко Дмитро Володимирович

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Навчально-методичні рекомендації
до виконання контрольного завдання на тему:
«Розрахунок електромагнітного контактора»

Електронне видання

Експертний висновок склав д-р техн. наук, проф. Андрій Муха

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 706 від 12.03.2024)

В авторській редакції

Комп’ютерна верстка Д. В. Устименко

Формат 60х84 1/16. Ум. друк. арк. 0,99. Обл.-вид. арк. 0,37.
Зам. № 33

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010