

ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА



Р.В. ТЕЛЮТА

# ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ



ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА

Р.В. Телюта.

# ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

Методичні вказівки

*для самостійної роботи та виконання  
контрольних завдань студентів напрямку підготовки  
«Електротехніка та електротехнології»*

Кіровоград  
КНТУ  
2015

Методичні вказівки для виконання контрольних та самостійних робіт з навчальної дисципліни «Електричні апарати» для студентів за напрямком 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» спеціальності 7.090603 «Електротехнічні системи електропостачання» / Укл.: Р.В.Телюта - Кіровоград: КНТУ, 2015 – 120с.

Укладач: доц., к.т.н. Р.В. Телюта.

Рецензент проф., д.т.н. С.І. Осадчий.

© Р.В. Телюта, 2015

РВЛ КНТУ, тиражування, 2015

## Зміст

	Вступ	5
1.	Загальні положення	6
2.	Зміст та робоча програма курсу	8
	Питання екзаменаційних білетів	10
	Перелік лабораторних робіт	14
	Література	14
3.	Програма дисципліни і методичні вказівки по темам	15
3.1	Вступ. Принцип дії і загальна конструкція основних видів електричних апаратів	15
3.2	Електромагнітні явища в електричних апаратах	17
3.3	Сила тяги і динаміка роботи електромагнітів. Електродинамічні зусилля в електричних апаратах	24
3.4	Електричні контакти	40
3.5	Електрична дуга. Теплообмін в електричних апаратах.	45
3.6	Електричні апарати керування	56
3.7	Електричні апарати захисту	65
3.8	Загальні відомості, принцип будови і класифікація безконтактних електричних апаратів	74
4.	Методичні вказівки до виконання контрольних робіт	76
4.1	Завдання для виконання спецпитання.	77
4.2	Методичні рекомендації по виконанню задачі 1.	86
4.2.1	Розрахунок і вибір апаратури керування та захисту	86
4.2.2	Вибір рубильників і перемикачів	86
4.2.3	Вибір запобіжників	89
4.2.4	Вибір автоматичних вимикачів	91
4.2.5	Вибір електромагнітних пускачів	95
4.2.6	Вибір електротеплових реле	99
4.2.7	Вибір проводів і кабелів силової проводки	104
4.3	Методичні рекомендації по виконанню задачі 2	115
4.3.1	Вибір запобіжника	117
4.3.2	Вибір автоматичного вимикача	119

## Вступ

Енергетика як галузь промисловості має ряд особливостей, що різко виділяють енергетичне виробництво з інших галузей промисловості.

Найважливіша особливість енергетики полягає в тому, що виробництво електроенергії, її транспорт, розподіл і споживання здійснюються в один і той же момент часу. Ця особливість перетворює всю систему виробництва, передачі, розподілу і споживання електроенергії, окремі ланки якої можуть бути віддалені на сотні кілометрів один від одного, в єдиний, складний механізм, в якому системою електропостачання називають сукупність електроустановок, призначених для забезпечення споживачів електроенергією.

Все наростаючі темпи підвищення енергоємності промисловості і аграрного сектора економіки вимагають неухильного росту електричних апаратів. І тут простим збільшенням їх чисельності питання не вирішити. Потрібні нові підходи, оригінальні зберігаючі технології, свіжі конструктивні рішення. Така робота може проводитися тільки на базі ясних уявлень про фізику явищ, що протікають в електричних апаратах, і умінню застосовувати закони електротехніки при їх проектуванні.

Електричні апарати - це електротехнічні пристрої, які використовують для включення і відключення електричних ліній, виміру, захисту, управління і регулювання електроустановок, призначених для передачі, перетворення, розподілу і споживання електроенергії. Також під електричними апаратами розуміють широкий круг всіляких пристроїв, використовуваних в побуті, промисловості та енергетиці.

Електричні апарати нині розробляються на основі глибоко розроблених теоретичних основах. Досягнення в області напівпровідникових технологій дозволили значно розширити функціональні можливості електричних апаратів і відповідно до сфери їх застосування. Пристрій сучасних електричних апаратів, дозволяє управляти потоками електроенергії не лише в цілях її перетворення з одного виду в інший, але і для розподілу, організації швидкодіючого захисту електричних ланцюгів, компенсації реактивної потужності та ін. Ці функції, тісно зв'язані з традиційними завданнями електроенергетики.

## 1. Загальні положення

Дисципліна «Електричні апарати» одна з основних дисциплін, яка базується на вивченому матеріалі попередніх курсів: «Фізика», «Хімія», «Теоретичні основи електротехніки», «Промислова електроніка», «Електричні машини», «Електротехнічні матеріали», «Електричні апарати», «Електричні мережі і системи», «Електрична частина станцій і підстанцій», «Перехідні процеси в системі електропостачання», «Автоматизований електропривод», «Типовий електропривод промислових установок», «Теплоенергетичні установки», «Загальна теплотехніка», «Електропостачання промислових підприємств», а також при виконанні курсового і дипломного проектів за фахом.

Метою вивчення дисципліни є вивчення та набуття необхідних теоретичних і практичних знань по електричним апаратам керування і захисту, вміння творчо вирішувати завдання їх використання в конкретних схемах керування технологічними процесами переробки сільськогосподарської продукції, електроприводі та автоматики, а також проводити дослідження, випробування та оцінку апаратів в умовах експлуатації.

Завдання курсу засвоєння основних положення теорії електричних апаратів; вивчення основних фізичних законів, на яких базується принцип дії апаратів керування і захисту; набуття та свідоме застосування знань з використання та технічної експлуатації апаратів керування і захисту; знання взаємозалежності електричних та механічних характеристик апаратів керування і захисту.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен знати: основні положення теорії електричних апаратів; призначення, принцип дії і конструкцію основних груп електричних апаратів керування і захисту; основні елементи електричних апаратів: електромагніти, їх основні технічні характеристики; контакти, їх режими роботи, матеріал виготовлення та вимоги до них; дугогасильні пристрої, їх основні механічні рішення та режими роботи тощо; галузь використання основних груп електричних апаратів, особливості їх режиму роботи, а також основні принципи та методи вибору.

вміти: визначати в лабораторних умовах необхідні характеристики електричних апаратів; здійснювати вибір електричних апаратів керування і захисту; виконувати налагодження електричних апаратів, встановлення та регулювання їх уставок; здійснювати регулювання контактних систем електричних апаратів; застосовувати вибраний електричний апарат або пристрій відповідно до умов його застосування.

У відповідності з учбовими планами курс ЕТУ поділяється на години самостійної роботи та години аудиторних занять, що складаються з лекційних та лабораторних занять. Передбачено виконання контрольних робіт на протязі семестру, контрольне тестування знань студентів по курсу, залік по лабораторним роботам та екзамен з дисципліни.

Основна форма вивчення даного курсу це самостійна робота, для полегшення якої матеріал розбитий на окремі теми, до кожної з яких дані методичні вказівки, питання для самоперевірки і рекомендована література.

Курс рекомендується вивчати послідовно по темах програми. Після ознайомлення зі змістом програми і методичними вказівками слід опрацювати матеріал по вказаній літературі. Деякі питання в одному підручнику можуть викладатися коротко або зовсім бути відсутнім, тому при вивченні курсу необхідно користуватися декількома підручниками. При цьому опрацьовуваний матеріал необхідно обов'язково конспектувати. Якщо виникнуть питання, які неможливо вирішити самостійно, слід звернутися за усною або письмовою консультацією до викладача. Після вивчення матеріалу слід перевірити, чи правильно зрозумілі і чи добре засвоєні найбільш суттєві положення теми. Для цього необхідно відповісти на питання для самоперевірки, приведені у кінці кожної теми.

Вивчаючи курс, студенти виконують лабораторні роботи, мета яких глибше засвоїти теоретичний матеріал і навчитися самостійно робити розрахунки і проводити експерименти. Для підготовки лабораторних робіт користуються методичними вказівками по виконанню лабораторних робіт. Після виконання лабораторних робіт студенти здають залік. При цьому вони повинні знати теоретичні положення, методику проведення дослідів, їх фізичний зміст і практичне значення отриманих результатів.

В процесі вивчення курсу студенти виконують контрольні роботи.

До здачі екзамену допускаються студенти які не мають пропуски занять, мають конспект лекцій, вчасно виконали і захистили контрольні та лабораторні роботи.

## 2. Зміст та робоча програма курсу

№ теми	Назва теми та її зміст	Кількість годин	Кількість годин самот. роботи
1	2	3	4
1	<b>Вступ. Принцип дії і загальна конструкція основних видів електричних апаратів.</b>	1	6
	Поняття про електричний апарат. Класифікація і вимоги до електричних апаратів (ЕА). Принцип дії і конструкція електричних апаратів керування. Принцип дії і конструкція електричних апаратів захисту		
2	<b>Електромагнітні явища в електричних апаратах.</b>	2	14
	Принцип дії електромагніту. Основні співвідношення для магнітного кола електромагніту Магнітна провідність повітряних зазорів Основні характеристики і параметри електромагнітів Конструктивні типи і тягові характеристики електромагнітів.		
3	<b>Сила тяги і динаміка роботи електромагнітів. Електродинамічні зусилля в ЕА.</b>	3	22
	Енергетичний баланс електромагніта. Сила тяги. Час зрушення, руху і відпускання електромагніта. Стабілізація характеристик електромагніта. Електродинамічні зусилля в ЕА і методи їх розрахунку. Електродинамічна стійкість ЕА. Механічний резонанс.		
4	<b>Електричні контакти.</b>	2	16
	Основні поняття і класифікація контактів. Перехідний опір контакту. Нагрів електричних контактів. Вібрація, знос і масоперенос у контактах. Матеріали контактів і вимоги до них. Загальні закономірності процесів комутації. Основний закон комутації.		



1	2	3	4
5	<b>Електрична дуга. Теплообмін в електричних апаратах.</b>	3	22
	Властивості електричної дуги. Енергетичний баланс дуги. Статичні і динамічні характеристики дуги. Процеси в дуговому проміжку. Втрати в деталях. Види теплопереносу в ЕА. Нагрів ЕА в усталених і перехідних режимах.		
6	<b>Електричні апарати керування</b>	4	22
	Призначення, конструкція і принцип дії рубильників. Призначення, конструкція і принцип дії командо апаратів. Пакетно-кулачкові вимикачі і перемикачі. Кнопки керування та кнопкові пости. Шляхові вимикачі і перемикачі. Призначення, конструкція і принцип дії контакторів. Призначення, конструкція і принцип дії магнітного пускача. Призначення, конструкція і принцип дії електричних реле. Призначення, конструкція і принцип дії електромагнітної муфти.		
7	<b>Електричні апарати захисту</b>	4	22
	Призначення, конструкція і принцип дії запобіжників. Вибір запобіжників. Призначення, конструкція і принцип дії автоматичних вимикачів. Вибір та перевірка автоматичних вимикачів. Призначення, конструкція і принцип дії теплових реле. Вибір теплових реле. Призначення, принцип дії спеціальних апаратів захисту УВТЗ, ФУЗ, РУД.		
8	<b>Безконтактні електричні апарати керування.</b>	1	10
	Загальні відомості, принцип будови і класифікація безконтактних електричних апаратів Безконтактні комутаційні та регулюючі пристрої		

**Питання екзаменаційних білетів по дисципліні «Електричні апарати»:**

1. Поняття про електричний апарат.
2. Класифікація електричних апаратів.
3. Поділ електричних апаратів за призначенням.
4. Загальні вимоги до електричних апаратів.
5. Принцип дії і конструкція контактора.
6. Конструкція і принцип дії електромагнітних муфт.
7. Пристрій і принцип дії герконів.
8. Принцип дії і конструкція автоматичного вимикача.
9. Пристрій і принцип дії теплового реле.
10. Принцип дії електромагніту.
11. I закон Кирхгофа для магнітного кола.
12. II закон Кирхгофа для магнітного кола.
13. Магнітний опір ділянки кінцевої довжини.
14. Магнітна провідність.
15. Закон Ома для магнітного кола.
16. Визначення провідності повітряних зазорів для простих форм полюсів.
17. Визначення провідності повітряних зазорів при циліндричних полюсах.
18. Визначення провідності повітряних зазорів для прямокутних полюсів.
19. Визначення провідності повітряних зазорів методом ймовірних шляхів потоку (графічний метод).
20. Визначення провідності повітряних зазорів (метод трубок).
21. Основні характеристики електромагнітів.
22. Основні параметри електромагнітів.
23. Конструктивні типи і тягові характеристики електромагнітів (з внутрішнім якорем).
24. Конструктивні типи і тягові характеристики електромагнітів (з зовнішнім якорем, що рухається вздовж магнітного потоку).
25. Конструктивні типи і тягові характеристики електромагнітів (з зовнішнім якорем, що рухається поперек магнітного потоку).
26. Енергетичний баланс електромагніта постійного струму.
27. Сила тяги електромагнітна змінного струму.
28. Час зрушення якоря електромагніта.
29. Час руху якоря електромагніта.
30. Час відпускання електромагніта.
31. Стабілізація характеристик електромагніта.
32. Електродинамічні зусилля в ЕА.
33. Розрахунок електродинамічного зусилля (перший метод).

34. Розрахунок електродинамічного зусилля (другий метод).
35. Електродинамічні зусилля у витку.
36. Електродинамічні зусилля в котушці.
37. Електродинамічні зусилля між витками.
38. Електродинамічна стійкість апаратів.
39. Механічний резонанс.
40. Основні поняття про електричні контакти.
41. Класифікація електричних контактів.
42. Перехідний опір контакту.
43. Модель Хольма ( модель кругової площадки торкання).
44. Емпірична формула (практична) перехідного опору.
45. Нагрівання електричних контактів.
46. Термоелектричний Ефект Томсона.
47. Термоелектричний Ефект Пельтьє.
48. Термоелектричний Ефект Колера.
49. Вібрація контактів.
50. Усунення вібрації.
51. Масоперенос у контактах.
52. Фізичний знос (ерозія).
53. Хімічний знос (корозія).
54. Вимоги до контактів.
55. Матеріали контактів.
56. Загальні закономірності процесів комутації.
57. Основний закон комутації.
58. Властивості електричної дуги.
59. Криві Пашена.
60. Автоелектронна емісія.
61. Термоелектронна емісія.
62. Іонізація поштовхом.
63. Іонізація поштовхом.
64. Рекомбінація.
65. Дифузія.
66. Характеристики дуги по довжині її стовпа.
67. Енергетичний баланс дуги.
68. Баланс енергії в контактах.
69. Статичні характеристики дуги.
70. Динамічні характеристики дуги постійного струму.
71. Динамічні характеристики дуги змінного струму.
72. Енергія, що виділяється в дузі (дуга постійного струму)
73. Енергія, що виділяється в дузі (дуга змінного струму).
74. Умови гасіння дуги (постійного струму).
75. Умови гасіння дуги (змінного струму).
76. Види теплопереноса в електричних апаратах.

- 77. Теплопровідність.
- 78. Конвекція.
- 79. Теплове випромінювання.
- 80. Нагрів електричних апаратів у сталому режимі.
- 81. Нагрів електричних апаратів при сталості потужності.
- 82. Нагрів електричних апаратів при сталості струму.
- 83. Нагрів електричних апаратів при сталості напруги.
- 84. Нагрів апаратів при короткочасному режимі роботи.
- 85. Нагрів апаратів при повторно-короткочасному режимі роботи.
- 86. Призначення, конструкція і принцип дії рубильників.
- 87. Вибір рубильників.
- 88. Призначення, конструкція і принцип дії пакетно-кулачкових вимикачів і перемикачів.
- 89. Призначення, конструкція і принцип дії кнопок керування та кнопочових постів.
- 90. Призначення, конструкція і принцип дії шляхових вимикачів і перемикачів.
- 91. Призначення, конструкція і принцип дії контакторів.
- 92. Вибір контакторів.
- 93. Призначення, конструкція і принцип дії магнітного пускача.
- 94. Вибір електромагнітних пускачів.
- 95. Призначення, конструкція і принцип дії електричних реле.
- 96. Реле струму.
- 97. Реле напруги.
- 98. Реле проміжні.
- 99. Реле часу.
- 100. Реле часу з електромагнітним управлінням РЭВ-800
- 101. Електромагнітне реле часу ЭВ-100.
- 102. Пневматичне реле часу РВП.
- 103. Моторне реле часу типу ВС-10.
- 104. Напівпровідникові реле часу.
- 105. Герконові реле.
- 106. Призначення, конструкція і принцип дії електромагнітної муфти.
- 107. Призначення, конструкція і принцип дії запобіжників.
- 108. Вибір запобіжників.
- 109. Призначення, конструкція і принцип дії автоматичних вимикачів.
- 110. Диференціальні автоматичні вимикачі.
- 111. Вибір автоматичних вимикачів.
- 112. Призначення, конструкція і принцип дії теплових реле.
- 113. Вибір теплових реле.

Таблиця 1. Розподіл контрольних питань за варіантами.

Передостання цифра шифру	Остання цифра шифру									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,50,100	2,51,101	3,52,102	4,53,103	5,54,104	6,55,105	7,56,106	8,57,107	9,58,108	10,59,109
1	11,60,110	12,61,111	13,62,112	14,63,113	15,64,114	16,65,115	17,66,116	18,67,117	19,68,118	20,69,119
2	21,70,120	22,71,121	1,23,72,	2,24,73	3,25,74,	4,26,75,	5,27,76,	6,28,77,	7,29,78,	8,30,79,
3	8,31,80,	9,32,81,	10,33,82,	11,34,83,	12,35,84,	13,36,85,	14,37,86,	15,38,87,	16,39,88,	17,40,89,
4	18,41,90,	19,42,91,	20,43,92,	21,44,93,	22,45,94,	23,46,95,	24,47,96,	25,48,97,	26,49,98,	27,41,99,
5	1,55,102,	2,54,103,	3,53,104,	4,52,101,	5,51,100,	6,59,109,	7,58,108,	8,56,106,	9,50,107,	10,57,105,
6	11,69,115,	12,68,114,	13,67,113,	14,66,112,	15,65,111,	16,64,110,	17,63,119,	18,62,118,	19,61,117,	20,60,116,
7	21,75,91	23,74,92	25,73,93	27,72,94	29,71,121	20,70,120	22,76,95	24,77,96	26,78,97	28,79,98
8	38,88,99	39,87,100	30,89,101	31,86,102	37,85,103	36,84,104	32,83,105	33,82,106	35,81,107	34,80,108
9	45,99,109	46,98,110	47,97,111	48,96,112	49,95,113	44,94,114	43,93,115	42,92,116	41,91,117	40,90,119

114. Призначення і принцип дії УВТЗ.
115. Призначення і принцип дії ФУЗ.
116. Призначення і принцип дії РУД.
117. Призначення і принцип дії ЗОУП-25.
118. Загальні відомості про безконтактні ЕА.
119. Класифікація безконтактних ЕА.
120. Безконтактні пристрої (постійного струму)
121. Безконтактні пристрої (змінного струму).

### **Перелік лабораторних робіт**

1. Стенд лабораторний.
2. Дослідження електромагнітних реле струму і напруги.
3. Дослідження індукційних реле струму.
4. Випробування диференційних реле з швидкосичуючимся трансформатором.
5. Вивчення низьковольтних плавких запобіжників
6. Вивчення біметалевих теплових реле.
7. Дослідження магнітного підсилювача із зовнішнім зворотнім зв'язком.
8. Вивчення контакторів змінного та постійного струму.
9. Вивчення автоматичного вимикача.

### **Література**

1. Чунихин А. А. Электрические аппараты. Общий курс – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 718 с.
2. Основы теории электрических аппаратов. И. С. Таев, Б. К. Буль, А. Г. Годтелло и др. – М.: Высшая школа, 1987. – 351 с.
3. Таев И. С. Электрические аппараты управления. -2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.
4. Родштейн Л. А. Электрические аппараты. - 4-е изд. перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат Ленингр. отд - ние, 1989. – 302 с.
5. Образцов В. А. Контрольные испытания низковольтных аппаратов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 219 с.
6. Кукеков Г.А. Полупроводниковые электрические аппараты: Учеб. пособие для вузов.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991.- 256 с.
7. Технический каталог. – К.: «Интерэлектрокомплект», 2013. – 28 с. – Режим доступа: [www.iek.com.ua](http://www.iek.com.ua)
8. Буткевич Г. В. и др. Задачник по электрическим аппаратам. – М.: Высшая школа, 1977. – 199 с.
9. Курсове і дипломне проектування: Навчальний посібник /

П.С.Кашенко, О.І.Біленко, О.А.Устименко, Н.В. Ходосолва, Н.О. Малюжко, О.В. Малай, А.О. Стогній, В.Г. Устименко, Т.А. Медведєва. – К., 2008. – 502с.

10. Довідник сільського електрика / В.С. Олійник, В.М. Гайдук, В.Ф. Гончар та ін.; за ред. В.С. Олійника – 3 вид. перероб. і доп. – К.: Урожай, 1989. – 264 с.

### **3. Програма дисципліни і методичні вказівки по темам**

#### **3.1 Вступ. Принцип дії і загальна конструкція основних видів електричних апаратів.**

**Прочитайте відповідний матеріал в літературі: [1]; [2]; [3]; [4]; [5]; [7]; [9].**

Апарат (від лат. apparatus - устаткування) - це прилад, технічний пристрій, пристосування.

Електричний апарат - це електротехнічний пристрій, що використовується для комутації електричних кіл, контролю, виміру, захисту, керування і регулювання установок, призначених для передачі, перетворення, розподілу і споживання електроенергії. Електричні апарати являють собою засоби керування електричним струмом, функції яких полягають у керуванні параметрами, що характеризують струм: електричною напругою, електричною потужністю й енергією, частотою струму, його силою і т.п.

Класифікація електричних апаратів: за призначенням (основною виконуваною функцією); за областю застосування; за принципом дії; за напругою; за родом струму; за виконанням захисту від впливів навколишнього середовища; за конструктивними особливостям.

За призначенням апарати діляться на групи:

- комутаційні апарати розподільних пристроїв. Призначені для комутації електричних кіл (рубильники, пакетні вимикачі, вимикачі навантаження, вимикачі високої напруги, роз'єднувачі, відокремлювачі, короткозамикачі, автоматичні вимикачі, запобіжники). Для цієї групи характерно відносно рідке їх вмикання і вимикання.

- обмежуючі апарати призначені для обмеження токів короткого замикання (реактори) і перенапруги (розрядники). Режимми к.з. і перенапруг є аварійними.

- пускорегулюючі апарати призначені для пуску, регулювання частоти обертання, напруги і струму електричних машин або інших споживачів енергії. До цієї групи відносяться контролери,

командоконтролери, контактори, пускачі, резистори і реостати. Характерна риса - часті вмикання і відключення (3600 у час і більш).

- контролюючі апарати електричних або неелектричних параметрів (реле і датчики). Для реле характерно плавна зміна величини, що контролюється, яка викликає стрибкоподібну зміну вихідної величини. У датчиках плавна зміна вхідної величини перетворюється у плавну зміну (вимірювальні датчики) або стрибкоподібну (реле-датчики) вихідної величини.

- вимірюючі апарати. За допомогою кола первинної комутації (головного струму) ізолюють вимірювальне коло від нього, а величина, що вимірюється набуває стандартного значення (трансформатори струму, напруги, ємнісні дільники напруги).

- електричні регулятори. Призначені для регулювання заданого параметра за визначеним законом.

Розподіл апаратів за областю застосування умовне тому, що одні і ті ж апарати можуть бути віднесені до різних груп.

Класифікація апаратів у межах групи:

- а) за напругою - низького (до 1000 В включно) і високого (від 1000 В и вище);

- б) за родом струму - постійного, змінного промислової частоти і змінного підвищеної частоти;

- в) за родом захисту від навколишнього середовища - відкриті, захищені, бризгозахищені, водозахищені, герметичні, вибухонебезпечні й ін.;

- г) за засобом (принципу) дії - електромагнітні, магнітоелектричні, індукційні, теплового й інші;

- д) за інших факторами (швидкодія, засоби гасіння дуги й ін.).

Загальні вимоги до електричних апаратів

1. При номінальному режимі роботи температура струмоведучих елементів апарата не повинна перевершувати значень, що рекомендуються ДСТУ. При к.з. термічні і динамічні навантаження в струмоведучих елементах не повинні порушувати працездатність апарата після його усунення.

2. Апарати, призначені для частого вмикання і відключення, повинні мати високу зносостійкість.

3. Контакти апаратів, що призначені для відключень струмів к.з. повинні бути розраховані на цей режим.

4. Ізоляція апаратів повинна витримувати перенапруги і мати запас, що враховує погіршення її властивостей з часом.

5. Апарати повинні мати специфічні вимоги, які обумовлені його застосуванням.

6. Апарати повинні мати високу надійність.



7. Маса, розміри, вартість і час, необхідний для його установки повинні бути мінімальними.

Апарати керування призначені для частих оперативних відключень і включень нормальних струмів навантаження. До них відносяться: контактори, пускачі, командоапарати, електромагнітні муфти, реле управління і тому подібне.

Основними конструктивними елементами апаратів управління є: обмотка; магнітопровід; контакти.

Апарати захисту призначені для захисту ланцюгів від аномальних режимів роботи (перевантажень, коротких замикань, перенапружень та ін.). До них відносяться автоматичні вимикачі, теплові і струмові реле, запобіжники і ін.

Основними конструктивними елементами захисних апаратів є: контакти; електромагніт або нагрівальний елемент, плавка вставка.

### **Питання для самоконтролю**

1. Загальні поняття про електричний апарат їх призначення та класифікація.

2. Які вимоги ставляться до електричних апаратів?

3. Який принцип дії і конструкція контактора, електромагнітного пускача та теплового реле?

4. Який принцип дії і конструкція автоматичного вимикача?

5. Яка конструкція і принцип дії електромагнітних муфт?

6. Який принцип дії герконів?

### **3.2 Електромагнітні явища в електричних апаратах.**

**Прочитайте відповідний матеріал в літературі:** [1]; [2]; [3]; [4].

### **Теоретичні відомості**

Принцип дії електромагніту розглянемо на прикладі клапанної електромагнітної системи. Рухлива частина 1 кола, що створює зусилля, називається якорем. Ділянки 3 і 4 - стержнями або осердям (рисунок 3.2.1). При проходженні струму по котушці 2, що намагнічує, створюється МРС, що збуджує магнітний потік  $\Phi$ . Він замикається як через зазор  $\delta$ , так і між іншими частинами магнітного кола, що мають різні магнітні потенціали. Зазор  $\delta$  і потік  $\Phi_{\delta}$ , що проходить через цей зазор називаються робочими. Всі інші потоки в магнітному колі, що не проходять через робочий зазор, називають потоками розсіювання  $\Phi_{\sigma}$ . Електромагнітне зусилля, що розвивається

якорем, визначається величиною магнітного потоку у робочому зазорі  $\delta$ .

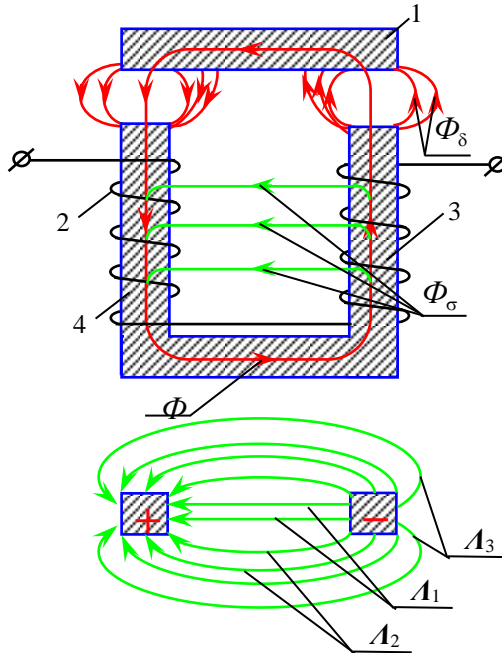


Рис. 3.2.1. Клапана магнітна система електромагніта

При розрахунку магнітного кола визначається МРС котушки, що необхідна для створення заданого робочого потоку  $\Phi_\delta$  (*пряма задача*), або робочий потік  $\Phi_\delta$  по відомій МРС котушки (*обернена задача*). Ці задачі вирішуються за допомогою законів Кирхгофа.

**Основні співвідношення для магнітного кола електромагніту:**

І закон Кирхгофа: алгебраїчна сума потоків у будь-якому вузлі магнітного кола дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0. \quad (3.2.1)$$

II закон Кирхгофа: падіння магнітного потенціалу по замкнутому контуру дорівнює сумі МРС, що діють у цьому контурі:

$$\oint \Phi dR_m = \sum i w. \quad (3.2.2)$$

Коли потік в окремих ділянках магнітного кола не змінюється, інтеграл у (3.2.2) можна замінити кінцевою сумою:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k R_{mk} = \sum F_k, \quad (3.2.3)$$

де  $R_m$  - магнітний опір, Гн<sup>-1</sup>.

*Напрямок МРС*, що збігається з напрямком обходу контуру приймається за *позитивний*, протилежний йому - за *негативний*. За *напрямок обходу* приймається напрямок магнітного потоку.

За аналогією з електричним, магнітний опір ділянки кінцевої довжини  $l$  визначиться:

$$R_m = \frac{1}{\mu a} \frac{l}{S} = \rho_m \frac{l}{S}, \quad (3.2.4)$$

де  $\rho_m$  - магнітний опір одиниці довжини магнітного кола, м/Гн.

Якщо відома не крива  $\rho_m(B)$ , а крива намагнічування матеріалу  $B(H)$ , і на ділянках індукція постійна, то II закон Кирхгофа має вигляд:

$$\sum_{j=1}^n H_j l_j = \sum F_j. \quad (3.2.5)$$

При відомій індукції  $B$  за допомогою кривої  $B(H)$  знаходять  $H_j$ , після чого по (3.2.5) знаходять МРС котушки.

При розрахунку магнітних кіл більш зручна величина магнітної провідності, яка зворотна  $R_m$ , Гн:

$$\Lambda = \frac{1}{R_m} = \mu_a \frac{S}{l}, \quad (3.2.6)$$

Підставляючи в (3.2.3) одержимо:

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j \frac{1}{\Lambda_j} = \sum F_j, \quad (2.7)$$

або перетворивши до вигляду

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j = \sum F_j \Lambda_j, \quad (3.2.8)$$

одержимо закон Ома для магнітного кола: загальний потік замкнутого магнітного кола  $\Phi$  дорівнює МРС  $R$ , помноженої на магнітну провідність усього кола  $\Lambda$ .

Для простих форм полюсів магнітна провідність повітряних зазорів визначається алгебраїчно. Для полюсів на рисунку 3.2.2, при малому зазорі і при магнітних лініях, що йдуть паралельно

$$\Lambda = \mu_o \frac{S}{\delta}, \quad (3.2.9)$$

Для полюсів на рис. 3.2.2 а:  $\Lambda = \mu_o \frac{a\delta}{\delta}$ ,

на рис 3.2.2 б:  $\Lambda = \mu_o \frac{\pi d^2}{4\delta}$ .

У дійсності при великих зазорах у країв полюсів виникають потоки випинання і магнітна проникність зростає (рис. 3.2.2 в).

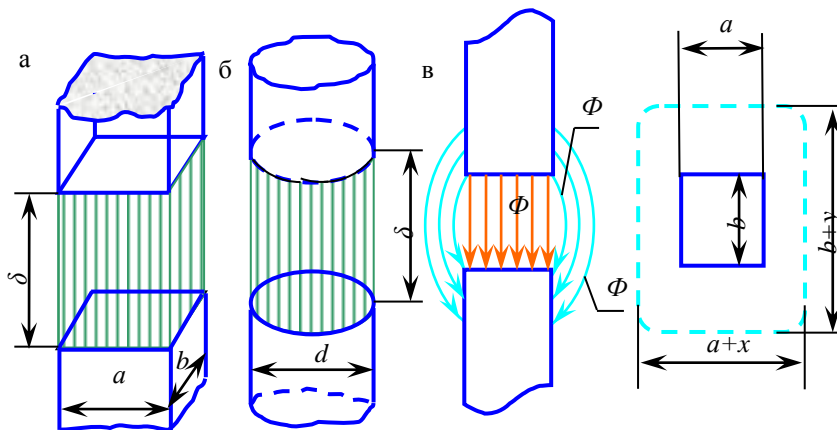


Рис. 3.2.2. До визначення провідності повітряних зазорів.

Приведені вище рівняння справедливі при  $a/\delta, \delta/d, d/\delta > 20$ . Розрахунок провідності з урахуванням випинання пов'язаний з великими неточностями через нерівномірність щільності картини магнітного поля. Для розрахунку використовують *три методи*:

1 Розрахунок по емпіричним формулам.

а) При циліндричних полюсах:

$$\Lambda = \mu_o \left( \frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,48d + \frac{0,36d^2}{2,4d + \delta} \right), \quad (3.2.10)$$

Останні дві складових враховують потік випинання.

б) Для прямокутних полюсів:

$$\Lambda = \frac{\mu_o}{\delta} \left( a + \frac{0,307\delta}{\pi} \right) \cdot \left( b + \frac{0,307}{\pi} \right), \quad (3.2.11)$$

2 Методом ймовірних шляхів потоку - графічний метод.

Заснований на побудові картини магнітного поля з наступною розбивкою його на прості геометричні фігури (визначення провідності між полюсом і площиною й ін.). Результуюча провідність дорівнює сумі провідностей окремих фігур.

3 Метод трубок.

Якщо неможливо порахувати по першим двох методах, то будують картину поля і розраховують провідності. Силкові лінії виходять перпендикулярно поверхні полюсів. Поле розбивається на трубки, у межах яких потік однаковий:  $\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_2 = \Delta\Phi_3 = \Delta\Phi_4 = \Delta\Phi_5$ . Еквіпотенціальні поверхні йдуть перпендикулярно силковим лініям і визначають розподіл магнітних потенціалів  $U_{m1} - U_{m2}$ . Провідність елемента трубки:

$$\Lambda_{el} = \mu_0 \epsilon_{cp} \frac{c}{l_{cp}}. \quad (3.2.12)$$

Повна провідність визначається сумарною провідністю усіх трубок:

$$\Lambda = \mu_0 h \frac{m}{n},$$

де  $m$  - кількість трубок,

$n$  - кількість елементів (клітин у трубці),

$h$  - висота полюса.

Метод складний і трудомісткий, але точний.

Основними характеристиками електромагніта є:

Тягова характеристика (статична) - залежність електромагнітної сили від робочого зазору при постійних значеннях напруги, що підведена до обмотки, або струму в обмотці:  $P_{EM} = f(\delta)$ , при  $U = const$ , або  $P_{EM} = f(\delta)$  при  $I = const$ .

Якщо зневажити розсіюванням і магнітним опором сталі, рівняння електромагнітної тягової характеристики має вигляд:

$$P_{EM} = \frac{\mu_0 S F^2}{\delta^2}. \quad (3.2.13)$$

При наявності одного повітряного зазору у виразу (3.2.13) додається множник  $\frac{1}{2}$ , двох –  $\frac{1}{4}$ .

Тягова характеристика для втяжного електромагніта приведена на рис. 3.2.3.

Характеристика протидіючого зусилля (навантажувальна) – залежність протидіючих сил (у загальному випадку приведених до точки прикладення  $P_{EM}$ ) від робочого зазору  $P_n = f(\delta)$ .

Для нормального спрацьовування електромагніта необхідно, щоб тягова характеристика, побудована при  $I_{спрац} = const$ , у всьому діапазоні ходу якоря, проходила вище протидіючої. Для чіткого відпускання (повернення) навпаки, тягова характеристика повинна проходити нижче протидіючої (рис. 3.2.4).

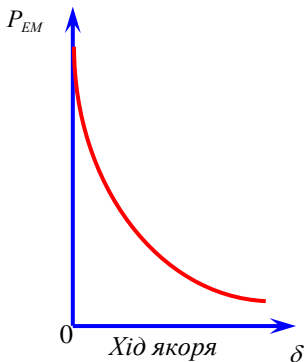


Рис. 3.2.3. Тягова характеристика електромагніту

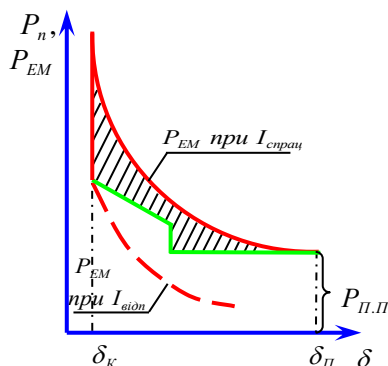


Рис. 3.2.4. Співставлення характеристик електромагніту.

Час спрацьовування електромагніта - це час з моменту подачі сигналу на обмотку до переходу якоря в кінцеве положення. При інших рівних умовах, він є функцією початкової протидіючої сили  $P_{П.П}$  і заштрихованої площі  $S$ .

Основні параметри електромагнітів:

Потужність споживана електромагнітом. Вона обмежується величиною припустимого нагрівання обмотки і умовами живлення її кола. Теоретично, ця потужність може бути знижена шляхом збільшення розмірів котушки, але практично, межу цьому створює довжина середнього витка обмотки і довжина середньої лінії магнітної індукції, які при цьому збільшуються. Через це магніт стає малоефективним.

Коефіцієнт запасу - відношення МРС, що відповідає сталому значенню струму, до МРС спрацьовування:

$$K_z = \frac{F_{ст}}{F_{спрац}} = \frac{I_{ст}}{I_{спрац}} > 1. \quad (3.2.13)$$

Параметр спрацьовування - мінімальне значення струму або напруги, при якому відбувається спрацьовування електромагніта (переміщення якоря від  $\delta_H$  до  $\delta_K$ ).

Параметр відпускання (повернення) - максимальне значення струму або напруги, при якому якір повертається у вихідне положення.

Коефіцієнт повернення - відношення МРС, при якому відбувається повернення якоря в початкове положення, до МРС спрацьовування:

$$K_{пов} = \frac{F_{пов}}{F_{спрац}} = \frac{I_{пов}}{I_{спрац}} \quad (3.2.14)$$

Для звичайних електромагнітів  $K_{пов}$  завжди менше одиниці і складає від 0,1 до 0,9.

Основною характеристикою електромагніта є його тягова характеристика. Форма її сильно залежить від конструкції електромагніта.

Всі магнітні системи діляться на дві групи:

1) системи з внутрішнім якорем (якір переміщується в середині котушки);

2) системи з зовнішнім якорем (якір переміщається поза котушкою).

До систем із внутрішнім якорем відносяться броньові магніти зі стопом або без стопа із замкнутою магнітною системою. На форму характеристики істотно впливає форма стопа: конічна форма дозволяє збільшити початкове тягове зусилля. Броньові магніти з незамкненою магнітною системою і соленоїди - дозволяють одержати постійне тягове зусилля на довжині робочого ходу.

Електромагніти з зовнішнім якорем діляться на дві групи:

а) з переміщенням якоря уздовж магнітного потоку.

До цієї групи відносяться: найбільш широко поширені електромагніти клапанного типу; підковоподібні електромагніти; Ш – подібні електромагніти; неповні Ш – подібні. Тягові характеристики підковоподібного магніту і неповного Ш – подібного значно крутіші, чим клапанного електромагніта. Їхнє початкове зусилля нижче за рахунок більшого початкового зазору, а кінцеві зусилля вище за рахунок зусиль притягнення в обох зазорах.

б) з переміщенням якоря поперек магнітного потоку.

Ця група електромагнітів має найбільший різновид тягових характеристик. Системи з таким якорем мають невеликі зусилля і моменти і використовуються головним чином у реле і приладах. Форма тягових характеристик в деяких залежить від характеру зміни повітряного зазору при повороті якоря, тобто від форми якоря. Значно великі зусилля дають підковоподібні магніти і клапани з зубом. Останні використовують для отримання тягового зусилля не тільки робочий зазор, але і потоки розсіювання.

### **Питання для самоконтролю**

1. Який принцип дії електромагніту?
2. Закони Кирхгофа для магнітного кола.
3. Який магнітний опір ділянки кінцевої довжини.
4. Поясніть поняття магнітної провідності.
5. Закон Ома для магнітного кола.

6. Дайте пояснення провідності повітряних зазорів для простих форм полюсів.

7. Дайте пояснення провідності повітряних зазорів при циліндричних полюсах.

8. Дайте пояснення провідності повітряних зазорів для прямокутних полюсів.

9. Дайте пояснення провідності повітряних зазорів методом ймовірних шляхів потоку (графічний метод).

10. Дайте пояснення провідності повітряних зазорів (метод трубок).

11. Наведіть основні характеристики електромагнітів.

12. Наведіть основні параметри електромагнітів.

13. Наведіть конструктивні типи і тягові характеристики електромагнітів (з внутрішнім якорем).

14. Наведіть конструктивні типи і тягові характеристики електромагнітів (з зовнішнім якорем, що рухається вздовж магнітного потоку).

15. Наведіть конструктивні типи і тягові характеристики електромагнітів (з зовнішнім якорем, що рухається поперек магнітного потоку).

### **3.3 Сила тяги і динаміка роботи електромагнітів. Електродинамічні зусилля в ЕА**

**Прочитайте відповідний матеріал в літературі: [1]; [2]; [3]; [4].**

#### **Теоретичні відомості**

Енергетичний баланс електромагніта розглянемо на прикладі електромагніту (ЕМ) клапанного типу (рисунок 3.3.1).

Після вмикання обмотки, прикладена до неї напруга визначиться:

$$U = ir + \frac{d\Psi}{dt} = ir + d \frac{Li}{dt}, \quad (3.3.1)$$

При нерухомому якорі  $L = const$ , струм у колі визначиться:

$$i = I_{cm} \left(1 - e^{-t/T}\right), \quad T = \frac{L}{R}, \quad I_{cm} = \frac{U}{r} \quad (3.3.2)$$

де  $T$  - постійна часу;

$I_{cm}$  - стале значення струму.



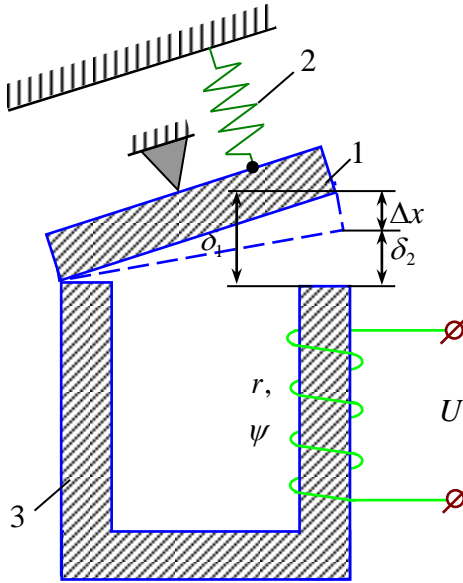


Рис. 3.3.1. ЕМ клапанного типу

Перемноживши обидві частини рівняння на  $idt$  одержимо:

$$Uidt = i^2 r dt + id\psi.$$

Для будь-якого моменту часу  $t$  справедлива рівність:

$$\int_0^t Uidt = \int_0^t i^2 r dt + \int_0^{\Psi} id\Psi, \quad (3.3.3)$$

де  $\Psi$  - потокозчеплення до моменту часу  $t$ .

Ліва частина (3.3.3) - енергія, що витрачена джерелом живлення. Перший член правої частини - втрати енергії в активному опорі кола, другий - енергія, що затрачується на створення магнітного поля.

Сила тяги електромагнітна змінного струму.

а) Розглянемо ЕМ з двома повітряними зазорами, зробивши припущення:  $R_{cm} = 0$ ,  $R_{обм} = 0$ ,  $\Delta P_{cm} = 0$ ,  $U$ ,  $I$ ,  $\Phi$  змінюються по синусоїдальному закону. У цьому випадку  $\Phi$ , а отже, і  $\Psi$  не залежать від зазору ( $d\psi / d\delta = 0$ ), тоді миттєве значення сили дорівнює:

$$P_{EM} = \frac{1}{2} \Psi \frac{di}{d\delta}, \quad (3.3.4)$$

Враховуючи те, що  $i = I_m \sin \omega t$ ,  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ,  
 $\Psi = \Psi_m \sin \omega t$ , одержимо:

$$P_{EM} = \frac{1}{2} \Psi_m \frac{dI_m}{d\delta} \sin^2 \omega t, \quad (3.3.5)$$

Т. я. при даному зазорі  $\delta$ ,  $\Phi_m$  і  $dI_m/d\delta$  не залежать від часу, то можна записати:

$$P_{EM} = P_m \sin^2 \omega t; \quad P_m = \frac{1}{2} \Psi_m \frac{dI_m}{d\delta}, \quad (3.3.6)$$

Амплітудне значення сили тяги для системи з двома зазорами дорівнює:

$$P_m = \frac{B_m^2 S}{\mu_0} = \frac{\Phi_m^2}{\mu_0 S}, \quad (3.3.7)$$

тоді миттєве значення сили тяги:

$$P_{EM} = \frac{\Phi_m^2 \sin^2 \omega t}{\mu_0 S}, \quad (3.3.8)$$

Із (3.3.8) очевидно, що при зроблених припущеннях  $P_{EM}$  не залежить від зазору. Проте якщо врахувати активний опір обмотки, то з ростом зазору,  $\Phi$  в системі зменшується, що призводить до зменшення амплітуди сили тяги.

б) Розглянемо зміну сили тяги в часі.

$$\text{Т.я. } \sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos^2 \omega t}{2}, \text{ то}$$

$$P_{EM} = \frac{P_m}{2} - \frac{P_m}{2} \cos 2\omega t, \quad (3.3.10)$$

тобто миттєве значення сили можна виразити через середнє:

$$P_{EM} = P_{cp} - P_{cp} \cos 2\omega t. \quad (3.3.11)$$

Звідси видно, що миттєве значення сили тяги пульсує з подвійною частотою по відношенню до частоти струму і напруги мережі.

Зміна сили у часі викликає вібрацію якоря, що порушує роботу контактів, створюється шум, розхитується магнітна система. Для усунення цього в однофазних електромагнітах використовують к.з. виток. Наконечник полюса розчіплюють і на його більшу частину надівають к.з. виток з міді, алюмінію чи латуні.

У трифазному ЕМ, якщо в магнітному відношенні усі його три фази симетричні, то сила тяги під кожним полюсом дорівнює:

$$P_A = P_m \sin^2 \omega t;$$

$$P_B = P_m \sin^2 \left( \omega t - \frac{2}{3} \pi \right);$$

$$P_C = P_m \sin^2 \left( \omega t - \frac{4}{3} \pi \right).$$

Результуюча сила при цьому дорівнює:

$$P = P_A + P_B + P_C = \frac{3}{2} P_m, \quad (3.3.12)$$

З цього виразу видно, що сила у часі не змінюється. При проходженні потоку в кожній фазі через нуль, сила, що розвивається цією фазою дорівнює 0. Тому  $\Phi$  точка прикладення рівнодіючої сили тяги всіх 3-х фаз переміщується по тілу якоря, а т. я. точка прикладення  $P_n$  незмінна, те виникає вібрація якоря.

Процес спрацьовування електромагнітів має динамічний характер. Час спрацьовування визначиться:

$$t_{\text{спрац}} = t_{\text{зр}} + t_p, \quad (3.3.13)$$

де  $t_{\text{зр}}$  - час зрушення - час спочатку подачі напруги до початку руху якоря;

$t_p$  - час руху - час переміщення якоря з положення при зазорі  $\delta_H$  до положення при зазорі  $\delta_K$ .

Час зрушення якоря пояснюється тим, що після вмикання кола, струм в обмотці для ЕМ постійного струму визначиться виразом:

$$i = I_{cm} (1 - e^{-t/T}).$$

Струм обмотки, при якому починається рух якоря, називається струмом зрушення  $i_{\text{зр}}$ . Розв'язавши (3.3.13) відносно  $t_{\text{зр}}$  одержимо:

$$t_{\text{зр}} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - i_{\text{зр}} / I_{cm}}, \quad (3.3.14)$$

Як тільки починається рух якоря (т. а, рисунок 3.3.2), зазор зменшується і його провідність росте  $\mathcal{A}_\delta$ . Індуктивність обмотки також росте, тому що  $L = W^2 \mathcal{A}_\delta$ . Т.я.  $L \uparrow$  то напруга, що прикладена до обмотки дорівнює:

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}, \quad (3.3.15)$$

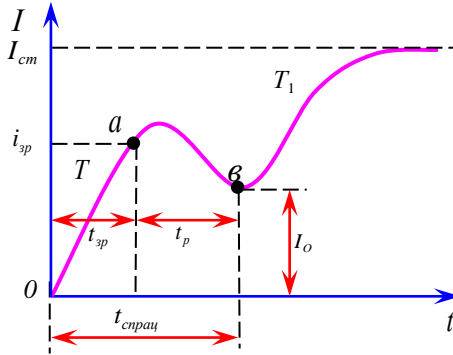


Рис. 3.3.2. Зміна струму в обмотці ЕМ при його включенні.

При русі якоря  $\frac{dL}{dt} > 0$ , тому  $i$  і  $\frac{di}{dt}$  починають зменшуватися, оскільки  $\sum \Delta U$  в (3.3.15) дорівнює прикладеній напрузі джерела  $U$ . Чим більше швидкість руху якоря, тим більше спад струму. У т. в, що відповідає крайньому положенню якоря, зменшення  $i$  припиняється і далі струм змінюється за законом:

$$i = I_o e^{-\frac{t}{T_1}} + I_{cm} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right), \quad (3.3.16)$$

де  $T_1 = \frac{L_K}{R_K}$  - постійна часу при  $\delta = \delta_K$ .

Початок руху якоря має місце при  $i_{zp} < I_{cm}$  (рис. 3.3.2). З рис. 3.3.2 очевидно, що під час руху якоря, коли зазор змінюється від  $\delta_{ноч}$  до  $\delta_K$ ,  $i$  в обмотці значно менше  $I_{cm}$ . Тому сила тяги, що розвивається ЕМ у динаміці, значно менше, ніж у статиці при  $I_{cm} = const$ .

**Час руху якоря** можна пояснити виходячи з виразу енергетичного балансу електромагніта, який описується:

$$P_{EM} dx = d \left( \frac{mV^2}{2} \right) + P_{II} dx, \quad (3.3.17)$$

де  $P_{EM}$  - електромагнітна сила, що впливає на якір;

$dx$  - шлях, пройдений якорем;

$m$  - маса рухливої частини, що приведена до зазору;

$V$  - швидкість переміщення якоря, що приведена до зазору;

$P_{\Pi}$  - протидіюче зусилля, що приведене до зазору.

Рівняння (3.3.17) нелінійне, тому в загальному випадку  $t_p$  якоря можна визначити користуючись статичною тяговою характеристикою.

На рисунку 3.3.3 приведена статична характеристика ЕМ  $P_{EM} = f(\delta)$  і характеристика протидіючої сили  $P_{\Pi} = f(\delta)$ .

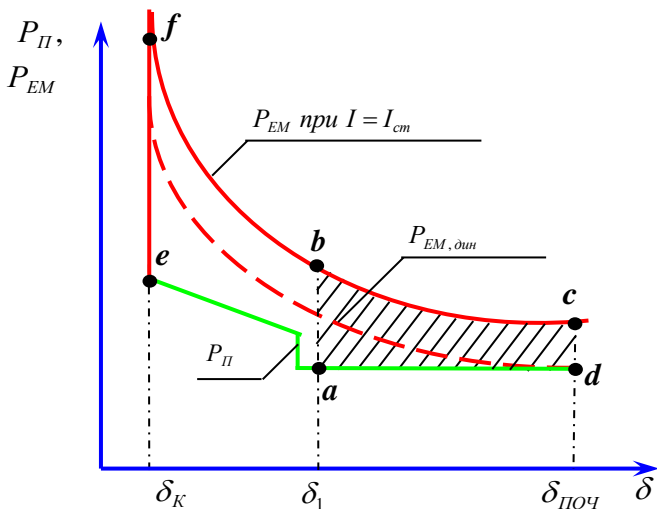


Рис. 3.3.3. Розрахунок часу руху якоря.

Різниця  $P_{EM} - P_{\Pi}$  витрачається на завдання прискорення якорю:

$$P_{EM} - P_{\Pi} = m \frac{d^2 x}{dt^2} = mV \frac{dV}{dx}. \quad (3.3.18)$$

На рисунку 3.3.3 приведена статична характеристика ЕМ  $P_{EM} = f(\delta)$  і характеристика протидіючої сили  $P_{\Pi} = f(\delta)$ . Різниця  $P_{EM} - P_{\Pi}$  витрачається на завдання прискорення якорю:

$$P_{EM} - P_{\Pi} = m \frac{d^2 x}{dt^2} = mV \frac{dV}{dx}. \quad (3.3.19)$$

Після інтегрування одержимо:

$$\int_0^x (P_{EM} - P_{\Pi}) dx = \frac{mV^2}{2}. \quad (3.3.20)$$

Швидкість якоря в точці ходу, що відповідає зазору  $\delta_1$ :

$$V_1 = \sqrt{2 \frac{m_p m_\delta S_{abcd}}{m}}, \quad (3.3.21)$$

де  $m_p$ ,  $m_\delta$  - масштаби по осях  $P$  і  $\delta$ ;

$S_{abcd}$  - площа, що пропорційна роботі рушійної сили.

Знаючи швидкість у будь-якій точці ходу, визначаємо час на кожній ділянці руху:

$$\Delta t_1 = \frac{\delta_{Поч} + \delta_1}{V_{CP1}}; \quad V_{CP1} = \frac{0 + V_1}{2}. \quad (3.3.22)$$

Повний час руху:

$$t_p = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n, \quad (3.3.23)$$

Цей час менше дійсного тому, що характеристика  $P_{EM}$  розташовується вище  $P_{EM \text{ дин.}}$ .

Час відпускання електромагніта можна пояснити тим, що при розмиканні кола обмотки ЕМ, магнітний потік у ньому починає зменшуватися через ведення в коло великого опору дугового або тліючого розряду між контактами. В момент коли  $P_{EM} < P_{\Pi}$ , відбувається відпускання якоря. Час відпускання дорівнює:  $t_{відн} = t_{cn} + t_{p \text{ відн}}$ , де  $t_{cn}$  - час спаду потоку  $\Phi_{відн}$ ;  $t_{p \text{ відн}}$  - час руху при відпусканні.

Процес відпускання описується рівнянням:

$$U = iR_o + iR + L_\kappa \frac{di}{dt}, \quad (3.3.24)$$

де  $R_o$  - опір іскри (дуги);

$L_\kappa$  - індуктивність кола обмотки при кінцевому зазорі.

Майже завжди  $R_o \gg R$  і якщо припустити, що  $R_o = const$ , то розв'язавши рівняння щодо  $i$  спаду, одержимо:

$$i_{cn} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t_{cn}}{T_K}}, \quad (3.3.25)$$

де  $T_K = \frac{L_\kappa}{R_o + R}$  - постійна часу.

Так як  $R_o$  велике, то  $T_K$  дуже мале.

Процес спаду струму протікає дуже швидко. Якщо осердя суцільне і має великий переріз, то спад  $\Phi$  сповільнюється через

виникнення вихрових струмів, поле яких підтримує потік, що спадає. Це потрібно враховувати при розрахунку  $t_{cn}$ .

Після зрушення якоря його рух відбувається за рахунок зусилля протидіючої пружини. Якщо воно постійне і дорівнює  $P_{п.ср} = (P_K + P_{поч})/2$ , то рух описується рівнянням:

$$P_{п.ср} = ma = m \frac{dV}{dt}. \quad (3.3.26)$$

Тоді час руху визначиться:

$$t_{pvidn} = \sqrt{2(\delta_{поч} - \delta_K) \frac{m}{P_{п.ср}}}, \quad (3.3.27)$$

У процесі роботи магніту спостерігається зменшення потоку в робочому зазорі - старіння магніту. Розрізняють: структурне, механічне і магнітне старіння.

При структурному старінні матеріал магніту після загартування або виливки має нерівномірну структуру, але згодом ця нерівномірність переходить у більш рівноважний - стабільний стан. При цьому в металі зникають внутрішні напруги. Одночасно зменшуються значення  $B_r$  і  $H_c$ .

Механічне старіння настає при ударах і вібраціях магніту.

Магнітне старіння - зміна властивостей під впливом зовнішніх магнітних полів.

Для стабілізації характеристик, ЕМ піддають термообробки (відпустці), механічним впливам (ударам, вібраціям), попередньому розмагнічуванню полем невеличкої напруженості.

Електродинамічні зусилля в ЕА, можна пояснити так, що прямолінійний провідник  $l$ , який обтікається струмом  $i$  та розташований у магнітному полі з індукцією  $B$ , відчуває дію механічної сили  $P$  (рисунок 3.3.4):

$$dP = idlB \sin \beta \quad (3.3.28)$$

де  $\beta$  - кут між напрямком вектора  $B$  і напрямком струму в провіднику.

Для системи з декількох провідників, що обтікаються струмом можна уявити, що любий з цих провідників розташований у магнітному полі, яке створене струмами інших провідників, відповідним чином взаємодіє з цим полем, тобто між провідниками, охопленими загальним магнітним потоком, завжди виникають механічні сили, що називаються електродинамічними. Аналогічні сили виникають між провідником з струмом і феромагнітною масою. Напрямок сили визначається правилом "лівої руки".

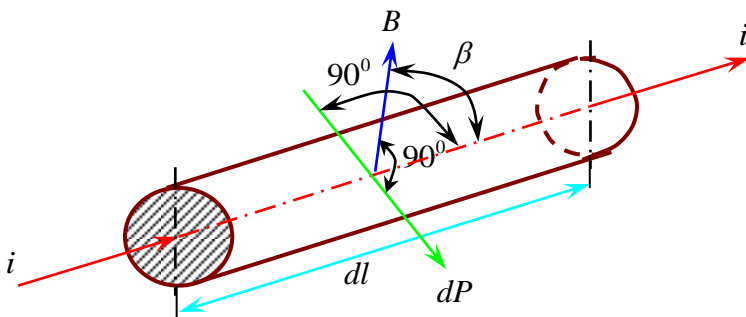


Рис. 3.3.4. Визначення напрямку ЕДЗ, що діє на елемент з струмом.

При нормальних експлуатаційних умовах електродинамічні зусилля (ЕДЗ) малі. Проте при к.з. досягають великих значень і можуть викликати деформацію або руйнацію окремих деталей, а також всього апарата. Це потребує проведення розрахунків на електродинамічну стійкість. Такий розрахунок необхідний і для одержання мінімальних габаритів в апаратах при розташуванні струмоведучих частин як найближче друг до другу.

Для розрахунку ЕДЗ використовують два методи.

Перший метод. Сила розглядається як результат взаємодії провідника з струмом і магнітним полем.

На провідник із струмом у магнітному полі діє зусилля  $P$ , що визначається (3.3.28).

Напрямок індукції  $B$ , що створюється іншим провідником визначається за правилом буравчика (правоходового гвинта).

Для визначення повного ЕДЗ, що діє на провідник довжиною  $l$ , потрібно просумувати зусилля, що діють на усі його елементи:

$$P = \int_0^l P = \int_0^l B i \sin \beta dl. \quad (3.3.28)$$

У випадку розташування провідників в одній площині  $\beta = 90^\circ$  (4.2) спрощується:

$$P = \int_0^l B i dl. \quad (3.3.29)$$

Другий метод заснований на використанні енергетичного балансу системи провідників з струмом. Якщо зневажити електростатичною енергією системи і прийняти, що при деформації



струмоведучих контурів під дією ЕДЗ струми в них незмінні, то зусилля дорівнює:

$$P = \frac{\partial W}{\partial x}, \quad (3.3.30)$$

де  $W$  - електромагнітна енергія,

$x$  - можливе переміщення в напрямку дії зусилля.

Формула (3.3.30) називається енергетичною.

Електромагнітна енергія системи обумовлена енергією магнітного поля кожного ізольованого контуру й енергією, обумовленою магнітним зв'язком між контурами, і для двох взаємозв'язаних контурів:

$$W = \frac{L_1 i_1^2}{2} + \frac{L_2 i_2^2}{2} + M i_1 i_2, \quad (3.3.31)$$

де  $L_1, L_2$  - індуктивності ізольованих контурів;

$M$  - взаємоіндукція.

Рівняння (3.3.31) дозволяє розрахувати як зусилля, що діють в ізольованому контурі, так і зусилля взаємодії одного контуру з іншими.

Зусилля усередині одного незалежного контуру визначається:

$$P = \frac{\partial W}{\partial x i^2} \cdot \frac{\partial L}{\partial x}. \quad (3.3.32)$$

Зусилля взаємодії між двома контурами:

$$P = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial x}. \quad (3.3.32)$$

Енергетичний момент зручний, коли відома аналітична залежність індуктивності або взаємної індукції від геометричних розмірів котушки.

Електродинамічні зусилля у витку, пояснюються таким чином, що індуктивність кругового витка при  $r/R \leq 0,25$  з точністю 1 % визначається:

$$L = \mu_o R \left( \ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right). \quad (3.3.33)$$

Для визначення ЕДЗ у витку користуємося енергетичним методом, тому що відома  $L$  від розмірів витка. Зусилля у витку спрямовано по радіусу:

$$P_R = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR}. \quad (3.3.34)$$

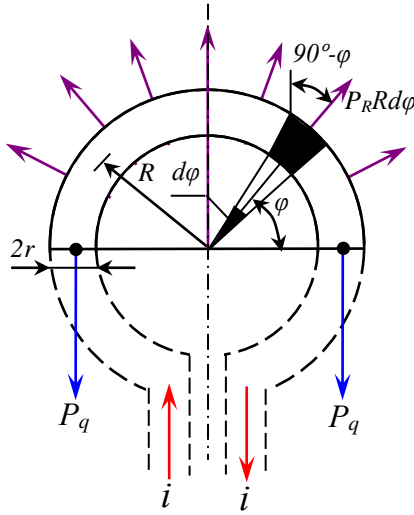


Рис. 3.3.5. Електродинамічні зусилля у витку.

З (3.3.33) і (3.3.34) одержимо:

$$P_R = \frac{\mu_o}{2} i^2 \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right). \quad (3.3.35)$$

При розрахунку електродинамічної стійкості потрібно знати зусилля  $P_q$ , що діє в перетині витка і намагатиметься його розірвати.

Для визначення  $P_q$  розглянемо рівняння рівноваги напіввитка.

Очевидно, що:

$$P_q = \int_0^{\frac{\pi}{2}} P_R R d\varphi \sin \varphi. \quad (3.3.36)$$

де  $P_R$  - зусилля, що діє на одиницю довжини, рівне  $P_R / 2\pi R$ .

Після інтегрування одержимо:

$$P_q = 10^{-7} i^2 \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right). \quad (3.3.37)$$

Якщо виток складається з  $W$  витків, які обтікаються одним струмом, то індуктивність збільшується у  $W^2$  разів і:

$$P_q = 10^{-7} (i^2 W)^2 \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right). \quad (3.3.38)$$

Електродинамічні зусилля у котушці спрямовані так, щоб її поточкозчеплення зростало. Вони ринуться стиснути котушку по висоті і товщині і збільшити її середній діаметр. Для визначення зусиль, що діють у різноманітних точках циліндричної котушки, визначають індукцію в цих точках і проводять розрахунок.

в) ЕДЗ між витками.

Якщо відстань між витками приблизно така ж як і їх діаметри, то їхня взаємна індукція дорівнює, Гн:

$$M = \mu_o R_1 \left( \ln \frac{8R}{\sqrt{y^2 + c^2}} - 2 \right). \quad (3.3.39)$$

Розглянемо зусилля (рис. 3.3.6), що діє на виток із струмом  $i_2$

Вертикальна складова зусилля відповідно до (4.3) дорівнює:

$$P_y = \frac{dW}{dx} = i_1 i_2 \frac{dM}{dy} = \mu_o i_1 i_2 \frac{R_1 y}{y^2 + c^2}. \quad (3.3.40)$$

Горизонтальна складова зусилля становить:

$$P_x = \frac{dW}{dx} = i_1 i_2 \frac{dM}{dx} = \mu_o i_1 i_2 \frac{R_1 x}{y^2 + c^2}. \quad (3.3.41)$$

Тоді загальне зусилля, що діє на виток із струмом буде дорівнювати:

$$P = \sqrt{(P_x)^2 + (P_y)^2}. \quad (3.3.42)$$

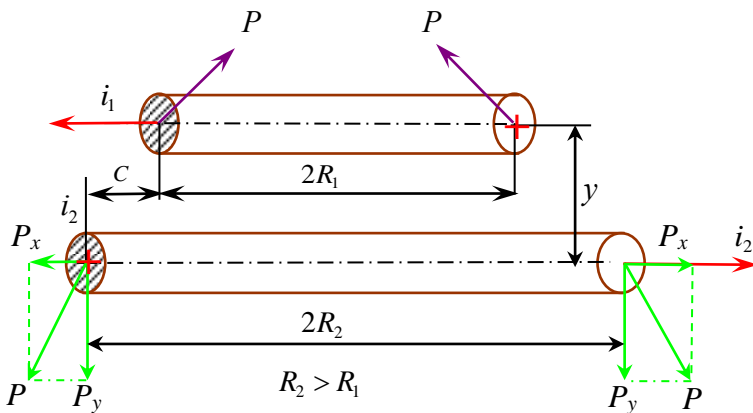


Рис. 3.3.6. Електродинамічні зусилля між витками.

При розрахунку контакторів, автоматів захисту й інших апаратів необхідно враховувати ЕДЗ, що діють у їхніх струмоведучих частинах при к.з.

Розглянемо однофазне коло. Нехай струм у провіднику змінюється за законом:

$$i = I_m \sin \omega t . \quad (3.3.43)$$

При однаковому напрямку струму провідники притягається з зусиллям:

$$P = 10^{-7} k I_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{P_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) , \quad (3.3.44)$$

де  $k$  - коефіцієнт контуру.

Для двох довільно розташованих провідників різної довжини (рисунк 3.3.7):

$$k = \frac{(D_1 + D_2) - (S_1 + S_2)}{a} , \quad (3.3.45)$$

Тобто зусилля має постійну складову  $P_m/2$  і змінну складову подвійної частоти  $\left(\frac{P_m}{2}\right) \cos 2\omega t$ .

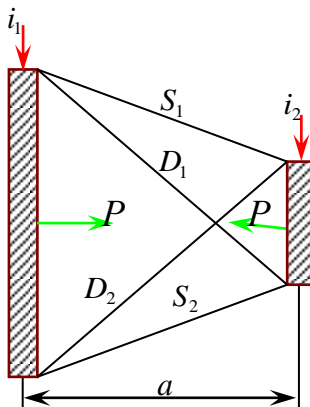


Рис. 3.3.7 Визначення ЕДЗ між паралельними провідниками.

Середнє значення зусилля за період  $T$  становить:

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{P_m}{2} = 10^{-7} k \frac{I_m^2}{2} = 10^{-7} k I^2 = c I^2 ; c = 10^{-7} k \quad (3.3.46)$$

де  $I$  - діюче значення струму.

Тобто, зміна ЕДЗ у часі в однофазному колі відбувається без зміни свого знака.

Нехай апарат включається, коли в колі навантаження к.з. Для випадку  $\omega L \gg R$  (мережі високої напруги) і  $\varphi \approx \pi/2$ .

Якщо вмикання відбувається в момент часу, коли примушена складова  $i_{np} = 0$ , то вільної складової в колі не виникає й аперіодична складова відсутня (рис. 3.3.8, а). При вмиканні в будь-який інший момент часу, виникає вільна аперіодична складова, яка при  $t = 0$  має обернений знак по відношенню до примушеної (рис. 3.3.8, б). Причина виникнення її - наявність індуктивності. Так як енергія в індуктивності ( $Li^2/2$ ) не може змінюватися миттєво, то струм у колі зростає з нульового значення. Вільна складова спадає за законом:

$$i_{\epsilon} = i_{\epsilon 0} e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (3.3.47)$$

де  $T_a = \frac{L}{R}$  - постійна часу аперіодичної складової.

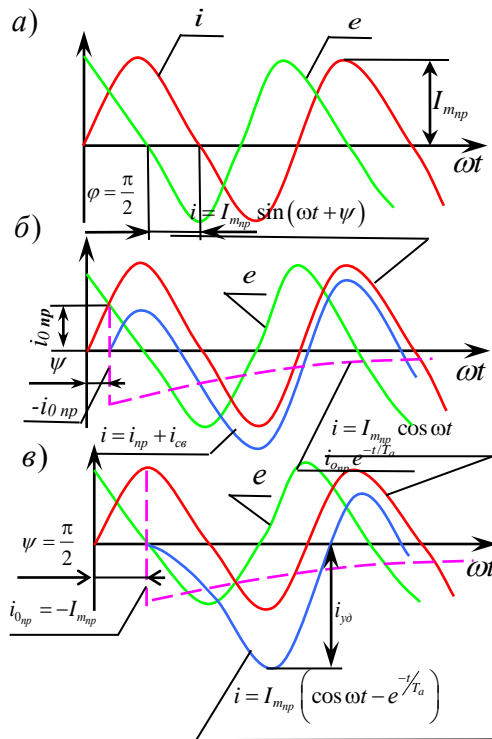


Рис. 3.3.8 Виникнення аперіодичної складової струму вмикання.

Найбільша аперіодична складова з'являється при  $t = 0$ ,  $i_{0np} = \pm I_{mnp}$  (рис. 3.3.8, в). Якщо при  $t = 0$   $i_{0np} = -I_{mnp}$ , то струм у колі змінюється за законом:  $i = I_{mnp} \left( \cos \omega t - e^{-\frac{t}{T_a}} \right)$ .

Через  $t = \pi/\omega$ , струм у колі стає найбільшим і називається ударним.

$$i_{y0} = I_{mnp} \left( 1 + e^{-(R/L)(\pi/\omega)} \right) = k_{y0} I_{mnp}; \quad k_{y0} = 1 + e^{-\pi/(\omega T_a)}. \quad (3.3.48)$$

У високовольтних установках  $T_a = 0,05$  с, при цьому  $k_{y0} = 1,8$ . З ростом потужностей і напруг установок  $T_a$  зростає і досягає 0,3 с. У низьковольтних установках  $k_{y0}$  приймають 1,3.

При наявності аперіодичної складової струму зусилля змінюється за законом:

$$P = 10^{-7} k I_{mnp}^2 \left( e^{-t/T_a} - \cos \omega t \right)^2. \quad (3.3.49)$$

Найбільшого значення зусилля досягає через півперіоду після початку к.з. При  $k_{y0} = 1,8$ :

$$P = 10^{-7} k k_{y0}^2 I_{mnp}^2 = 3,24 \cdot 10^{-7} k I_{mnp}^2. \quad (3.3.50)$$

Тобто, аперіодична складова у 3,24 раз збільшує амплітуду зусилля.

Електродинамічна стійкість апаратів, можна пояснити таким чином, що механічна міцність елементів конструкції електричних апаратів залежить від величини електродинамічного зусилля, його напрямку, тривалості впливу і крутизни наростання. Так як особливості роботи провідників і ізоляційних матеріалів вивчені недостатньо, то розрахунки міцності конструкцій ведуться по максимальному значенню ЕДЗ, хоча діє воно короткочасно.

Для 3-х фазного апарата за розрахунковий струм береться  $I_{y0} = k_{y0} I_{m3}$ , де  $I_{m3}$  - амплітуда періодичної складової струму 3-х фазного к.з. Розрахунок електродинамічної стійкості проводиться для провідників середньої фази, так як в ній виникає найбільше зусилля. Механічні напруги в провідникових матеріалах не повинні перевищувати 140 МПа для міді марки МТ і 70 МПа алюмінію марки АТ.

Електродинамічною стійкістю апарата називається його спроможність протистояти ЕДЗ, що виникає при проходженні струмів к.з. Вона може виражатися або безпосереднім амплітудним значенням

струму  $i_{\text{дин}}$ , при якому механічні напруги в деталях апарата виходять за межі припустимих значень, або кратністю цього струму відносно амплітуди номінального струму.

$$k_{\text{дин}} = \frac{i_{\text{дин}}}{\sqrt{2}I_{\text{ном}}} . \quad (3.3.51)$$

Іноді електродинамічна стійкість оцінюється діючим значенням струму за один період ( $T = 0,02\text{с}$ ,  $f = 50\text{Гц}$ ) після початку к.з.

При розрахунку електродинамічної стійкості апарата потрібно враховувати можливість появи резонансу між ЕДЗ, що змінюється гармонійно і власними механічними коливаннями струмоведучих деталей. У випадку, коли частота змінної складової ЕДЗ близька до власної частоти механічних коливань можливо руйнація апарата внаслідок явища резонансу. Якщо сила, що виводить механічну систему з рівноваги, буде змінюватися з частотою, рівній частоті власних коливань, то на деформацію одного періоду буде накладатися деформація наступного періоду і система буде розгойдуватися з зростаючою амплітудою. Збіг частоти власних коливань із частотою зміни ЕДЗ називають механічним резонансом. Для його запобігання потрібно, щоб частота власних коливань конструкції відрізнялася від частоти зміни ЕДЗ.

### Питання для самоконтролю

1. Наведіть енергетичний баланс електромагніта постійного струму.
2. Яка сила тяги електромагнітна змінного струму?
3. Який час зрушення якоря електромагніта?
4. Який час руху якоря електромагніта?
5. Який час відпускання електромагніта?
6. Назвіть стабілізаційні характеристики електромагніта.
7. Які електродинамічні зусилля в електричних апаратах?
8. Наведіть методи розрахунку електродинамічного зусилля.
9. Які електродинамічні зусилля у витку?
10. Які електродинамічні зусилля в котушці?
11. Які електродинамічні зусилля між витками?
12. Поясніть сутність Електродинамічної стійкості апаратів.
13. Що таке механічний резонанс?

### 3.4 Електричні контакти.

Прочитайте відповідний матеріал в літературі: [1]; [2]; [3]; [4].

#### Теоретичні відомості

Торкання тіл, що забезпечує безперервність електричного кола називається електричним контактом. Деталь, що стикається з іншою деталлю при утворенні електричного контакту називається контакт-деталлю, а утворення й існування електричного контакту - електричним контактуванням.

За формою контактування розрізняють три види контактів: *крапковий, лінійний, поверхневий*.

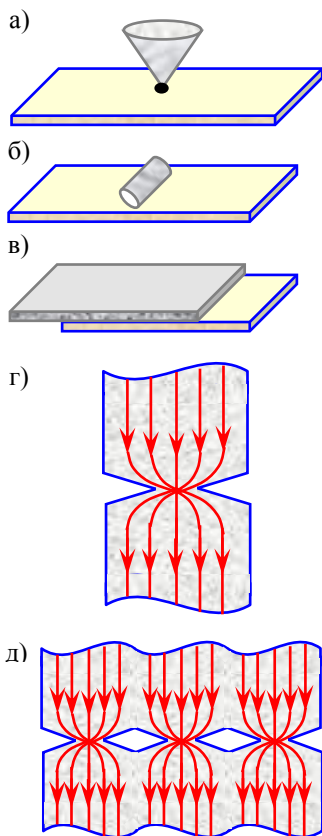


Рис. 3.4.1 Типи контактів і картина контактування

Крапковий електричний контакт - контакт, при якому зіткнення робочих поверхонь контакт-деталей відбувається в точці (сфера-сфера, сфера-площина, вершина конус-площина), рисунок 4.1, а) і г). Лінійний контакт - зіткнення робочих поверхонь контакт-деталей відбувається по лінії (циліндр-циліндр, циліндр-площина). Фізична картина контактування представляє ряд точок-площадок (мінімум дві), розташованих на одній лінії, рисунок 4.1, б) і д). Поверхневий контакт - зіткнення контакт-деталей відбувається по поверхні. Фізична картина контактування представляє ряд точок-площадок (мінімум три), рисунок 4.1 в).

Під робочою поверхнею контакт-деталі розуміють частину поверхні контакт-деталі для здійснення електричного контакту. При цьому, частину цієї поверхні, по якій відбувається зіткнення з іншою поверхнею називають умовною площею контактування, а ту частину умовної площі



контактування, по якій відбувається перехід струму з однієї контакт-деталі в іншу - ефективною площею контактування.

За призначенням контакти діляться на з'єднувальні, що служать для проведення струму, і комутуючі, на які додатково покладаються задачі вмикання, вимикання або перемикання електричних кіл. З'єднувальні поділяються на взаємнорухомі нероз'ємні (болтові) і взаємнорухомі (ковзані або ті що котяться). Вони повинні тривало витримувати номінальні і короткочасні струми аварійних режимів. Комутуючі контакти поділяються на рублячі, торцеві, щіткові, пальцеві, розеточні та інші.

У зоні переходу струму з однієї деталі в іншу має місце відносно великий електричний опір, що називається перехідним опором контакту. Поява його пов'язана з забрудненням або окислюванням поверхонь і торканням не по всій площині контакт-деталей, тобто опір контакту визначиться:

$$R_{\kappa} = R_{cm} + R_{nl}. \quad (3.4.1)$$

де  $R_{cm}$  - опір стягування, що виникає за рахунок стягування ліній струму до істинної площі торкання контакт-деталей;

$R_{nl}$  - опір сторонніх прошарків або плівок.

Для оцінки факторів, що впливають на опір стягування, необхідно розглядати спрощену модель контактування. Найбільшого розповсюдження отримали моделі Р. Хольма. Однією з простіших моделей Хольма є модель кругової площадки торкання. В основу покладена ідеалізована картина контактування двох однакових ізотропних провідників.

При проходженні струму через область стягування його ліній контакт нагрівається. Найбільшу температуру має площадка торкання. При віддаленні від неї температура контакту швидко падає. Протяжність області стягування складає (5–6) радіусів контактування. При розм'якшенні площадка торкання збільшується, а перехідний опір різко зменшується при незмінній напрузі, тобто  $U_{\kappa} = U_{розм}$ , де  $U_{розм}$  напруга рекристалізації (розм'якшення). Якщо температура продовжує рости, то площадка торкання може розплавиться, чому відповідає температура плавлення  $U_{\kappa} = U_{плав}$ . Температура контакту не повинна перевищувати (досягати) температури розм'якшення матеріалу.

Поряд з виділенням джоулевої теплоти в контактах при протіканні струму можуть проявлятися три види термоелектричних ефекти: Томсона, Пельтьє і Колера.

Ефект Томсона полягає в переносі теплоти з однієї сторони контакту на другу носіями електричного струму; в результаті одна сторона контакту нагрівається більше другої. Ефект Пельтьє виникає

при проходженні струму через місце контактування провідників із двох різнорідних металів за рахунок виникнення контактної різниці потенціалів. Якщо електричне поле, яке утворюється в спаї контактною різницею потенціалів, прискорює електрони, то в спаї виділяється тепло Пельтьє; якщо поле затримує рух електронів, то тепло поглинається. Ефект Колера - результат тунельного опору, який підвласний плівкам на поверхні контактів. Кінетична енергія тунельних електронів, що пройшли через плівку, збільшується, коли вони досягають анода, що має менший негативний потенціал, чим катод. Надлишок енергії перетворюється в тепло.

Істотний вплив ці три ефекти мають у контактах при протіканні дуже малих струмів.

*При вмиканні апаратів* у їх контактних системах виникає: 1) вібрація контактів; 2) ерозія на поверхні контактів в результаті утворення електричного розряду між ними.

а) *Вібрацію контактів* розглянемо на прикладі контактора.

При його вмиканні, електромагніт впливає на його контакти, що рухаються, переміщення якоря якого призводить до зіткнення рухомих і нерухомих контактів. В момент зіткнення контактів відбувається удар і відбувається деформація стиску і відбій рухливого контакту. Між контактами утворюється зазор і під дією напруги загоряється електрична дуга. Відбій контакту припиниться тоді, коли енергія, отримана їм при ударі, перейде в енергію стиску пружини. Після цього контакт почне рухатися у бік відштовхування пружини. Відбудеться новий удар і відбій контакту. Процес буде продовжуватися, поки сила удару не стане дорівнювати нулю. При вібрації відбувається багатократне утворення дуги, що приводить до зносу контакту через оплавлення і розпилення його матеріалу.

*Усунення вібрації:* створення попередньої деформації (натягу) контактної пружини при розімкнутих контактах. Проте при надмірно великому початковому зусиллі вібрація зростає через недостатню потужність електромагніта; збільшення жорсткості контактної пружини; введення між контактним важелем і рухливим важелем противібраційного вкладиша з пористого матеріалу; закріплення магнітопроводу на пружинах-амортизаторах.

б) *Масоперенос у контактах.*

У процесі вмикання при наближенні рухомого контакту до нерухомого зростає напруженість електричного поля між ними. При визначеній відстані відбувається пробій між контактним зазором. У апаратах низької напруги пробій відбувається при малій відстані між ними (соті долі міліметра). Дуга при пробіі не виникає, тому що контакт продовжує рухатися і, замикаючи проміжок, припиняє розрядні процеси. Але якщо відбудеться пробій, електрони

бомбардують контакт із позитивним потенціалом - анод, і його матеріал переходить на катод, відкладаючись на ньому у виді тонких голок. Знос контакту в результаті переносу матеріалу з одного контакту на інший, тобто випаровування у навколишній простір без зміни складу матеріалу, називається фізичним зносом або ерозією.

При розмиканні контактів контактне натискання зменшується, перехідний опір зростає і росте температура точок торкання. При цьому контакти нагріваються до температури плавлення і між ними виникає місток із рідкого металу. При подальшому русі місток обривається й у залежності від параметрів кола виникає дуговий або тліючий розряд. Висока температура призводить до інтенсивного окислювання і розпилення матеріалу контактів у навколишнє середовище й утворенню плівок. Знос, пов'язаний з окислюванням і утворенням плівок хімічних з'єднань матеріалів із середовищем, називається хімічним зносом або корозією.

Масоперенос найбільш шкідливий при постійному струмі, тому що напрямок переносу матеріалу постійний, що веде до виходу з ладу одного з контактів.

Для боротьби з ерозією на струми від 1 до 600 А: скорочують тривалість горіння дуги за допомогою дугогасильних пристроїв; усувають вібрацію контактів; застосовують дугостійкі матеріали контактів.

Вимоги до контактів: високі електропровідність і теплопровідність; висока корозійна стійкість у повітряній і інших середовищах; стійкість проти утворення плівок із високим електроопором; мала твердість для зменшення необхідної сили натискання; мала ерозія; висока дугостійкість (температура плавлення); простота обробки, низька вартість.

Матеріали контактів:

Мідь. Позитивні властивості: високі питома електрична провідність і теплопровідність, достатня твердість, простота технології, низька вартість. Негативні властивості: низька температура плавлення, утворення стійких плівок оксидів. У контактах, що не мають взаємного ковзання, застосовувати не рекомендується.

Срібло. Позитивні властивості: високі електро- і теплопровідність, плівка оксиду має малу механічну стійкість і швидко руйнується, усталеність, малий перехідний опір. Негативні властивості: мала дугостійкість і недостатня твердість. Застосовується в реле до 20 А.

Алюміній. Позитивні властивості: високі електро- і теплопровідність, мала питома маса. Негативні властивості: утворення плівок із великою стійкістю, низька дугостійкість (менше ніж у міді і срібла), мала механічна прочність.

Вольфрам. Позитивні властивості: висока дугостійкість, велика стійкість проти ерозії і зварювання, висока твердість. Негативні властивості: високий ПЕО, мала теплопровідність, утворення стійких оксидних і сульфідних плівок.

У реле на малі струми з невеликим натисканням застосовують стійкі проти корозії матеріали: золото, платину, палладій і їхні сплави.

Металокерамічні матеріали - дозволяють одержати потрібні види матеріалів для свого виду апарата.

Сукупність операцій, що викликають зміну струму в колі або напруги на окремих її ділянках називається комутацією електричних кіл. Вмикання, вимикання, перемикання під струмом окремих гілок, зміна напрямку струму та інші явища називають «комутацією». Електричні апарати здійснюють комутацію кіл за рахунок зміни електричного опору свого комутуємого органа.

Для комутуючого органа апарата характерні два режими: комутаційний і підсилювальний.

У включеному стані опір контактів становить мкОм, при відключеному апараті опір ізоляції між контактного проміжку становить МОм.

Відношення опору комутуючих органів у відключеному стані до опору у включеному стані, яке визначає комутаційну можливість апарата називається глибиною комутації  $\eta_k$ . Для контактно-дугогасильних систем  $\eta_k = 10^{10} \div 10^{14}$ , для безконтактних апаратів  $\eta_k = 10^4 \div 10^7$ .

Перехід від одного стану до іншого займає деякий час. Це пояснюється тим, що кожному сталому стану кола відповідає визначений запас енергії електричних або магнітних полів, створених напругою і струмом цього кола. Перехід до нового режиму пов'язаний з наростанням або убуттям енергії цих полів.

Основний закон комутації: в процесі комутації струм в індуктивності та напруга на ємності змінюється плавно і не може змінюватися стрибком.

### Питання для самоконтролю

1. Які основні поняття про електричні контакти.
2. Приведіть класифікацію електричних контактів.
3. Що таке перехідний опір контакту.
4. Поясніть модель Хольма (модель кругової площадки торкання).
5. Поясніть емпіричну формулу (практичну) перехідного опору.
6. Дайте пояснення нагрівання електричних контактів.

7. Охарактеризуйте термоелектричний Ефект Томсона.
8. Охарактеризуйте термоелектричний Ефект Пельтьє.
9. Охарактеризуйте термоелектричний Ефект Колера.
10. Поясніть поняття вібрації контактів.
11. Наведіть способи усунення вібрації.
12. В чому сутність масопереносу у контактах.
13. Що таке фізичний знос (ерозія)?
14. Що таке хімічний знос (корозія)?
15. Які ставляться вимоги до контактів.
16. Які використовують матеріали контактів.
17. Наведіть загальні закономірності процесів комутації.
18. Який основний закон комутації?

### **3.5 Електрична дуга. Теплообмін в ЕА.**

**Прочитайте відповідний матеріал в літературі:** [1]; [2]; [3]; [4].

#### **Теоретичні відомості**

Розмикання електричного кола супроводжується виникненням дугового розряду між контактами. Він виникає, коли струм і напруга на контактах перебільшують критичні значення, що залежать від матеріалу контактів, параметрів кола, навколишнього середовища й інших факторів.

Виникнення і горіння дуги в повітряному проміжку свідчить про іонізацію цього проміжку. Для того, щоб повітряний проміжок став провідником, потрібно створити в ньому необхідну концентрацію заряджених часток - негативних (вільні електрони) і позитивних - іонів. Процес відділення від нейтральної частки одного або декількох електронів та утворення вільних електронів і іонів, називають іонізацією. Фізичний процес відключення кола складається в деіонізації повітряного проміжку між контактами, тобто відновлення його діелектричних властивостей.

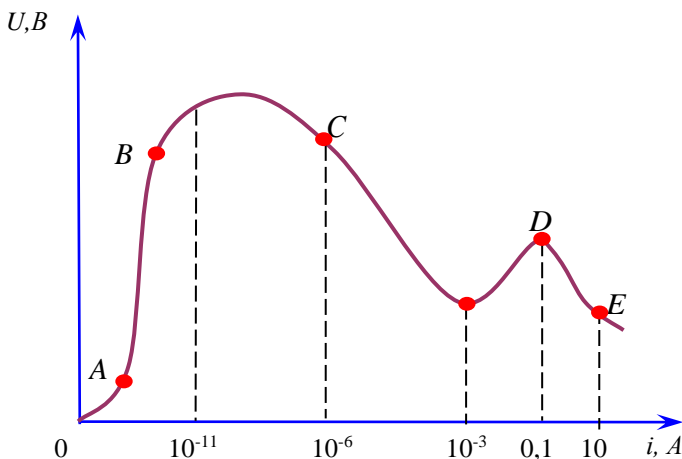


Рис. 3.5.1 Вольтамперна характеристика газового розряду

Явище проходження струму через газ називають газовим розрядом. Може спостерігатися при будь-яких значеннях струму. Вольт-амперна характеристика послідовних його стадій у повітрі приведена на рисунку 3.5.1. У зоні  $OB$  струм (ділянка  $OA$ ) росте з ростом напруги, а потім ( $AB$ ) практично не змінюється - настає «насичення» - усі заряди досягають електродів. Зона  $OB$  являє собою зону несамостійного розряду. Тут струм підтримується за рахунок зовнішніх іонізаторів (космічні промені, світло й інш.). За т.  $B$  напруга достатня для початку самостійного розряду. Тут носії виникають у розрядному каналі за рахунок іонізуючих факторів, що підвладні самому газорозрядному каналу. Ділянка  $BC$  відповідає стадії пробою або таунсендовській стадії (по імені Таунсенда, що розробив математичну теорію цієї стадії). Найбільше характерні ознаки стадії пробою - ударна іонізація, незначні прошаркові заряди, лавиноподібний процес утворення електронів і іонів. При великих відстанях між електродами або високої щільності газу таунсендовська стадія може перейти в стримерну стадію процесу пробою. Коли потужність джерела велика і достатня для підтримки струму порядку міліампер, пробій переходить у стадію тліючого розряду ( $CD$ ). Ділянка  $OE$  є перехідною від тліючого до дугового розряду, де переважаючою формою іонізації є термічна іонізація.

Дуговий розряд характеризується: ясно обкресленою межею між стовбуром дуги і навколишнім середовищем; високою щільністю струму в стовбурі дуги (до сотень ампер на  $\text{мм}^2$ ); високою щільністю струму на катоді і малим падінням напруги біля катода (10 - 20 В);

високою температурою у середині стовбура дуги (5000 - 1000 К і більш), яка забезпечує термічну іонізацію.

Характеристика фізичних процесів, що призводять до іонізації і деіонізації повітряного проміжку.

Автоелектронна емісія - явище виходу електронів із катода під впливом сильного електричного поля -  $10^5$  В/см і вище. Місце розриву кола можна уявити як конденсатор змінної ємності. Ємність у початковий момент дорівнює  $\infty$  й зменшується по мірі розбіжності контактів. Через опір кола конденсатор заряджається, і напруга на ньому росте від 0 до  $U_c$ . Напруженість поля між контактами під час росту напруги перевищує  $10^{5-108}$  В/см. Струм при цьому малий і достатній для початку розвитку дугового розряду.

Термоелектронна емісія - явище випуску електронів із нагрітої поверхні. Воно має місце при розходженні контактів, де остання площадка контактування сильно розігрівається, часто до розплавлювання і випари. На негативному електроді утвориться катодна пляма (розпечена площадка), що служить основою дуги й осередком випромінювання електронів. Щільність струму при цьому залежить від температури і матеріалу контактів. Струм невеликий і достатній для виникнення дуги, але недостатній для її горіння.

Іонізація поштовхом. Якщо електрон буде мати достатню швидкість, то при сутичці з нейтральною часткою (атом, а іноді і молекула) він може вибити з неї електрон. У результаті з'являється новий електрон і позитивний іон. Така іонізація називається іонізацією поштовхом. Швидкість електрону залежить від різниці потенціалів на відстані його вільного пробігу. Ця різниця потенціалів називається потенціалом іонізації (тобто різниця потенціалів, яка необхідна для розгону електрона до швидкості, при якій відбувається іонізація поштовхом).

Термічна іонізація - іонізація під впливом високої температури. При високих температурах, що мають місце в дугах, іонізація більш ймовірна, чим від впливу електричного поля. Основна характеристика цієї іонізації є ступінь іонізації - відношення числа іонізованих атомів у газі дуги до загального числа атомів у газі. Деіонізація йде одночасно з іонізацією й інтенсивність їх однакова при дузі, що стійко горить. При переваженні процесів деіонізації дуга гасне, дуговий розряд припиняється. Основними фізичними процесами тут є рекомбінація і дифузія.

Рекомбінація - процес, при якому різноманітні заряджені частки, приходячи у взаємне зіткнення, утворюють нейтральні частки. У дуговому стовпі рекомбінація електрона і позитивно зарядженого іона через велику різницю у масі малоймовірна. Звичайно спочатку електрон заряджає нейтральну частку, після чого відбувається

рекомбінація позитивного і негативного іона, що утворився. Зменшення числа зарядів за рахунок рекомбінації визначається:

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_p = \alpha n^2, \quad (3.5.1)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт рекомбінації;

$n$  - число іонів одного знака;

$\left| \frac{dn}{dt} \right|_p$  - швидкість зменшення числа зарядів.

Коефіцієнт рекомбінації залежить від роду газу, тиску і температури.

Дифузія – процес виносу заряджених часток із дугового проміжку в навколишній простір, що зменшує провідність дуги. З теорії дифузії газів відомо, що швидкість зменшення числа часток пропорційна їхній кількості.

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_d = \frac{20n}{r^2}, \quad (3.5.2)$$

де  $\left| \frac{dn}{dt} \right|_d$  - швидкість зменшення часток за рахунок дифузії;

$r$  - радіус стовпа дуги;

$D = \lambda V / 3$  - коефіцієнт дифузії;

$\lambda$  - довжина вільного пробігу іона;

$V$  - середня швидкість прямовання іона.

З формули випливає, що з ростом  $r$ , швидкість зменшення заряджених часток падає.

Канал електричної дуги має характерні 3 зони: катодну, анодну і зону основного стовпа. У порівнянні з основним стовпом дуги катодна й анодна зони мають меншу довжину і звужений перетин. Основний стовп дуги має високу температуру (тисячі і десятки тисяч градусів). Температура на поверхні катода й анода обмежена температурами кипіння металів, з яких виготовлені контакти. Напруженість електричного поля в основному стовпі дуги однакова по довжині. У дузі відключення вона залежить від умов охолодження і струму. Характеристики основного стовпа дуги визначаються температурою газу, характером її розподілу по радіусу, що у свою чергу, залежить від середовища й умов теплопередачі.

Розрізняють 3 зони дуги по перетині (рис. 3.5.2): 1 – зона електропровідності ( $\sigma_e > 0$ ), 2 – зона теплопровідності (електропровідності  $\sigma_e = 0$ ), 3 - зона конвекції.



До катода підводиться енергія нейтралізації позитивних іонів, що приходять із стовпа дуги, і їхня кінетична енергія при ударі. На аноді і катоді виділяється теплова енергія, що передається зі стовпа дуги за рахунок теплопровідності, випромінювання і конвекції. На катоді й аноді витрачається енергія на нагрів контактної плями і відвід теплоти в контактну деталь, а також на плавлення і випаровування контактного матеріалу. З контактів енергія уноситься потоками плазми.

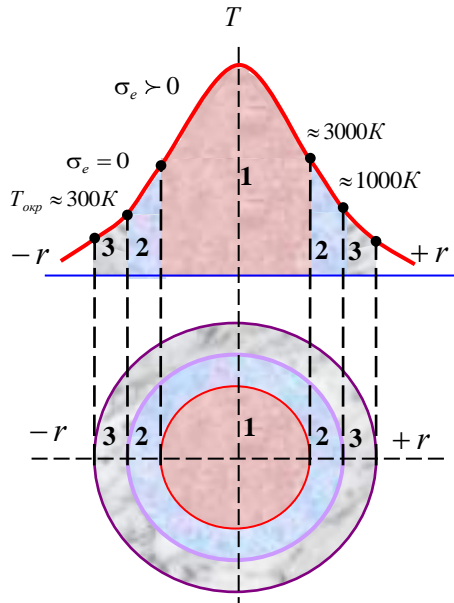


Рис. 3.5.2. Зони дуги.

На катоді витрачається робота виходу електронів, що витрачається на подолання потенційного бар'єра на поверхні металу. Ця енергія виділяється в подальшому при ударі електрона об анод разом із кінетичною енергією, що запасена в електроні, що рухається.

Теплопередача в зонах здійснюється: зона 1 - випромінюванням (електромагнітними хвилями) і теплопровідністю ("удари" атомів і молекул), зона 2 - теплопровідністю і випромінюванням, зона 3 - конвекцією (переміщення потоку часток). Цей розподіл на зони відноситься до дуги, що горить в атмосфері повітря.

Аналіз процесів комутації і розрахунок комутаційних контактних пристроїв проводять на основі їхньої ВАХ, що визначають

у кінцевому рахунку активний опір дугового стовпа в різних умовах і режимах. Статичною ВАХ називають залежність напруги дуги від струму при незмінному (сталому) його значенні.

$$U_{\text{д}} = U_{\text{к}} + U_{\text{а}} + E_{\text{д}} I_{\text{д}}. \quad (3.5.3)$$

Динамічною ВАХ дуги називають залежність напруги дуги від струму, що змінюється у часі.

Енергія, що виділяється в дузі постійного струму

Незалежно від роду струму опір дуги можна вважати чисто активним. Він є змінним, падаючим з ростом струму, і може бути визначений з ВАХ дуги.

$$R_{\text{д}} = \frac{U_{\text{д}}}{i}. \quad (3.5.5)$$

Потужність дуги дорівнює:

$$P_{\text{д}} = U_{\text{д}} i. \quad (3.5.6)$$

Енергія  $W_{\text{д}}$ , що виділяється в дузі за час  $t_{\text{з}}$  її горіння:

$$W_{\text{д}} = \int_0^{t_{\text{з}}} U_{\text{д}} i dt. \quad (3.5.7)$$

Для апаратів, що відключають коло, важливо визначити значення цієї енергії за одне відключення. Ємністю кола через малі струми втечі можна зневажити. Для будь-якого моменту часу маємо:

$$U = U_{\text{д}} + iR + L \frac{di}{dt}, \quad (3.5.8)$$

Підставивши в (3.5.8) значення  $U_{\text{д}}$  одержимо:

$$W_{\text{д}} = \int_0^{t_{\text{з}}} R(I_{\text{о}} - i) dt + \int_{I_{\text{о}}}^0 L i dt = L \frac{I_{\text{о}}^2}{2} + \int_0^{t_{\text{з}}} R(I_{\text{о}} - i) dt = W_{\text{М}} + W_{\text{Г}}, \quad (3.5.9)$$

де  $W_{\text{М}}$  - енергія, запасена в магнітному полі, відключаємого кола;

$W_{\text{Г}}$  - енергія, що надходить від генератора в дугу за час її горіння.

Тобто, незалежно від способу горіння дуги постійного струму в ній виділяється енергія, запасена в магнітному полі, кола, що відключається, плюс частка енергії, що надходить від генератора за час її горіння (у дузі, яка стійко горить, вся енергія, що виділяється в ній, надходить від генератора).

Зміна струму в дузі відключення дорівнює:

$$i = I_{\text{о}} \left( 1 - (t / t_{\text{з}})^n \right), \quad (3.5.10)$$

де  $t_e$  - час гасіння,  
 $n$  - постійна величина для даних умов,  
 $t$  - поточна координата.

Підставивши (3.5.10) у  $W_\Gamma$  (3.5.9), одержимо:

$$W_\Gamma = kRI_o^2 t_e = LI_o^2 k \frac{t_e}{T}, \quad (3.5.11)$$

де  $k = n / (2n^2 + 3n + n)$ ;

$T = L/R$  - постійна часу кола, що відключається.

Коефіцієнт  $k$  характеризує дугогасильний устрій. Коли струм у дузі змінюється за законом, близькому до лінійного, тоді  $k = 0,167$ .

Енергія, що виділяється в дузі при відключенні постійного струму дорівнює:

$$W_o = W_M + W_\Gamma = L \frac{I_o^2}{2} \left( 1 + 2k \frac{t_e}{T} \right). \quad (3.5.12)$$

де  $k = n / (2n^2 + 3n + n)$  - коефіцієнт характеризує дугогасильний пристрій;

$T = L/R$  - постійна часу кола, що відключається.

Дуга відключення змінного струму

Якщо відключення відбувається в момент переходу струму через 0, тоді виділяється тільки енергія  $W_\Gamma$ :

$$W_\Gamma = \left( \frac{1}{\pi f} I_m U_o \right) m, \quad (3.5.13)$$

де  $m$  - число півперіодів горіння дуги.

Енергія, запасена в магнітному полі,  $L \frac{I_o^2}{2}$  вертається у генератор. Мінімальна кількість енергії виділиться, якщо дуга погасне при першому проходженні струму через нуль ( $m=1$ ). Якщо дуга почне гаснути раніше переходу через 0, то частина  $L \frac{I_o^2}{2}$  не встигне повернутися в генератор і виділиться в дузі.

Умова гасіння дуги постійного струму необхідно, щоб при будь-якому значенні струму дотримувалася умова:

$$U_o > U - iR. \quad (3.5.14)$$

При змінному струмі, струм у дузі кожний півперіод переходить через нуль, тобто кожний півперіод дуга гасне і запалюється знову.

Теплова інерція дугового стовбура значна, і в момент переходу струму через нуль температура стовбура (газів) не завжди падає до припинення термічної іонізації. *Перехід струму через нуль не обумовлює гасіння дуги*, проте, процеси після переходу струму через нуль у ряді випадків створюють умови для її гасіння. У відкритій дузі при високій напрузі, коли активний опір її є визначальним, умови гасіння дуги наближаються до умов гасіння дуги постійного струму і процеси переходу через нуль струму мало впливають на гасіння дуги.

Види теплопереносу в електричних апаратах

Розрізняють три види теплопереносу - теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання.

Теплопровідність - процес передачі тепла від однієї частки тіла до іншої або одного тіла до іншого, коли ці частки або тіла стикаються один з одним. Теплопровідність у металах здійснюється шляхом теплового руху електронів, а в інших випадках - молекул.

Кількість теплоти  $Q_T$ , що проходить в одиницю часу  $t$  від більш нагрітої ділянки до менш нагрітої, дорівнює:

$$Q_T = \lambda \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\delta} S t, \quad (3.5.15)$$

де  $\delta$  - товщина стінки;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності середовища (матеріалу);

$S$  - площа перетину, через який передається теплота;

$t$  - час,

$\Theta_1 - \Theta_2$  - перепад температур тіл (ділянок).

Кількість тепла, що проходить через поверхню площею  $1 \text{ м}^2$  за час  $1 \text{ с}$  називається щільністю теплового потоку.

$$\Phi_0 = -\lambda \frac{d\Theta}{dx}. \quad (3.5.16)$$

Тепловий потік, що проходить за  $1 \text{ с}$  через поверхню  $S$  дорівнює:

$$\Phi = \Phi_0 S. \quad (3.5.17)$$

Тепловий законом Ома.

$$\Delta\Theta = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda} = \frac{\Phi \delta}{\lambda S} = \Phi R_T, \quad (3.5.18)$$

де  $R_T$  - термічний опір стінки.

Конвекція - процес передачі тепла шляхом переміщення часток рідини або газу. При природній конвекції рух рідини, що охолоджує, відбувається за рахунок різниці щільності нагрітих і холодних об'ємів рідин.

Кількість тепла, Вт, що віддається тілом за рахунок конвекції за час  $t$ :

$$Q_k = \alpha (\Theta_2 - \Theta_1) St, \quad (3.5.19)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт теплопередачі при конвекції;

$\Theta_2$  - температура поверхні, що охолоджується, °С;

$\Theta_1$  - температура середовища, що охолоджує, °С.

Коефіцієнт теплопередачі - кількість теплоти, що віддається в секунду з  $1\text{ м}^2$  нагрітої поверхні при різниці температур поверхні і середовища, що охолоджує  $1\text{ К}$ .

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від наступних факторів: а) температури, густини і щільності середовища, що охолоджує; б) форми поверхні, що охолоджується і її розташування щодо потоку середовища, що охолоджує та поля тяжіння; в) швидкості змусеного руху середовища, що охолоджує; г) температури поверхні, що охолоджується.

Теплове випромінювання - процес переносу теплової енергії від нагрітого тіла до тіл, що розташовані у навколишньому просторі за рахунок випромінювання електромагнітних коливань (ультрафіолетових, світлових і інфрачервоних). Цей спосіб може називатися променюванням або радіацією.

Тепло, що віддається тілом, за рахунок теплового випромінювання визначається за рівнянням Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{випр}} = c_0 \varepsilon \left[ \left( \frac{T_2}{1000} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{1000} \right)^4 \right] S, \quad (3.5.20)$$

де  $T_1$  - температура поверхні, що охолоджує, К;

$T_2$  - температура тіла, К;

$c_0 = 5,7 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 / \text{К}^4$  випромінювальна спроможність абсолютно чорного тіла;

$\varepsilon$  - коефіцієнт теплового випромінювання.

Якщо потужність втрат у провіднику при проходженні по ньому електричного струму дорівнює  $P$ , то за час  $dt$  у ньому виділиться енергія:

$$P dt = G c d\tau + F k_T \tau dt. \quad (3.5.20)$$

де  $G$  - маса провідника;

$c$  - питома теплоємність, Дж/(кг К);

$F$  - площа поверхні тепловіддачі провідника,  $\text{м}^2$ ;

$\tau$  - перевищення температури провідника відносно навколишнього середовища, °С або К;

$k_T$  - коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ .

Частина цієї енергії піде на нагрів провідника:  $Gcd\tau$ , інша частина буде відведена в навколишній простір:  $Fk_T\tau dt$ .

Нагрів апаратів або окремих їх елементів може проходити при таких основних режимах:

а) при сталості потужності втрат

$$I = I_0 = \text{const}; R = R_0 = \text{const}; P = I_0^2 R_0 = \text{const}. \quad (3.5.20)$$

До цього режиму відносяться пристрої, у яких електричний опір мало змінюється від температури);

б) при сталості струму

$$I = I_0 = \text{const}; R = R_0(1 + \alpha\tau); P = I_0^2 R_0(1 + \alpha\tau). \quad (3.5.21)$$

де  $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору.

До цього режиму відносяться силові кола майже всіх апаратів, так як струм у колі визначається навантаженням:  $R_{\text{апарату}} \ll R_{\text{навантаження}}$ ;

в) при сталості напруги

$$U = \text{const}; R = R_0(1 + \alpha\tau); I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_0(1 + \alpha\tau)};$$

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R_0(1 + \alpha\tau)} = \frac{I_0^2 R_0^2}{R_0(1 + \alpha\tau)} = \frac{I_0^2 R_0}{1 + \alpha\tau}. \quad (3.5.22)$$

Цьому режиму нагріву підпорядковуються котушки апаратів.

Нагрів апаратів у перехідних режимах.

а) Короткочасний режим роботи характеризується тим, що при вмиканні температура апарата не досягає сталої. Після короткочасного нагрівання апарат відключається, і його температура падає до значення температури навколишнього середовища. Тривалість  $t_k$  проходження струму  $I_k$  вибирається так, щоб  $\tau \leq \tau_{\text{дон}}$ .

Допустиме перевищення температури при короткочасному режимі роботи дорівнює:

$$\tau_{\text{дон}} = \tau_{\text{см}}(1 - e^{-t_k/T}), \quad (3.5.23)$$

Відкіля

$$t_k = T \ln \frac{1}{1 - \tau_{\text{дон}} / \tau_k}. \quad (3.5.24)$$

Струм тривалого режиму  $I_{\text{mp}}$  з струмом короткочасного  $I_k$  режиму зв'язаний співвідношенням:

$$I_k = I_{\text{mp}} / \sqrt{1 - e^{-t_k/T}}, \quad (3.5.25)$$

Коефіцієнт перевантаження по струму показує в скільки разів може зростати припустиме навантаження по струму при короткочасному режимі в порівнянні з тривалим режимом:

$$k_i = \frac{I_{\kappa}}{I_{mp}} = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_{\kappa}/T}}}. \quad (3.5.26)$$

б) Повторно-короткочасний режим роботи – це режим, при якому періоди роботи  $t_p$  чергуються з паузами  $t_n$ , при цьому перевищення температури не досягає сталого значення. Режим характеризується відносною повторністю вмикань (ПВ) у відсотках і частотою вмикання – кількістю циклів у час

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100\%. \quad (3.5.27)$$

Коефіцієнт перевантаження по потужності втрат і струму при повторно-короткочасному режимі визначається:

$$k_p = \frac{P_{нк}}{P_{mp}} = \frac{\tau_{max}}{\tau_{ст}} = \frac{1 - e^{-t_u/T}}{1 - e^{-t_p/T}}; \quad k_i = \frac{I_{нк}}{I_{mp}} = \sqrt{k_p}. \quad (3.5.28)$$

де  $P_{нк}$  - потужність втрат при повторно-короткочасному режимі.

$P_{mp}$  - потужність втрат при тривалому режимі.

$t_u$  - час циклу,  $t_u = t_p + t_n$ .

Термічна стійкість апарата - це спроможність апарата витримувати без ушкоджень, що перешкоджають подальшій нормальній роботі, термічну дію струмів короткого замикання, що протікають протягом визначеного проміжку часу.

### Питання для самоконтролю

1. Назвіть властивості електричної дуги.
2. Дайте пояснення кривим Пашена.
3. Поясніть поняття автоелектронна емісія.
4. Поясніть поняття термоелектронна емісія.
5. Поясніть поняття іонізація поштовхом.
6. Поясніть поняття іонізація поштовхом.
7. Поясніть поняття рекомбінація.
8. Поясніть поняття дифузія.
9. Наведіть характеристики дуги по довжині її стовпа.
10. Який енергетичний баланс дуги?
11. Який баланс енергії в контактах?
12. Які статичні характеристики дуги?
13. Наведіть динамічні характеристики дуги постійного струму.
14. Наведіть динамічні характеристики дуги змінного струму.

15. Яка енергія виділяється в дузі (дуга постійного струму)?
16. Яка енергія виділяється в дузі (дуга змінного струму)?
17. Які умови гасіння дуги (постійного струму) ?
18. Які умови гасіння дуги (змінного струму) ?
19. Які види теплопереносу в електричних апаратах?
20. Дайте пояснення теплопровідності.
21. Дайте пояснення конвекції.
22. Дайте пояснення теплового випромінювання.
23. Нагрів електричних апаратів у сталому режимі.
24. Нагрів електричних апаратів при сталості потужності.
25. Нагрів електричних апаратів при сталості струму.
26. Нагрів електричних апаратів при сталості напруги.
27. Нагрів апаратів при короткочасному режимі роботи.
28. Нагрів апаратів при повторно-короткочасному режимі роботи.

### **3.6 Електричні апарати керування**

**Прочитайте відповідний матеріал в літературі:** [1]; [2]; [3]; [4]; [5]; [7]; [9].

#### **Теоретичні відомості**

Апарати керування призначені для ручного (безпосереднього) управління електродвигунами і іншими споживачами електричної енергії змінного і постійного струму. Застосовуються для нечастого включення і виключення електричних кіл, реверсування, перемикання схем з'єднання обмоток, зміни опору при управлінні електродвигунами і т. д.

До них відносяться: рубильники, кнопки управління, пакетні вимикачі і перемикачі, універсальні перемикачі, ящики опорів, пускові і регульовальні реостати, командоконтролери і контроллери.

Рубильники призначені для ручної комутації електричних кіл номінальною напругою до 660 В змінного і до 440 В постійного струму. Перевага рубильників над іншими апаратами в тому, що вони дешеві і створюють видимий розрив електричного кола. В електроприладі рубильники найчастіше використовують як ввідні апарати розподільчих та низьковольтних комплектних пристроїв.

За конструкцією рубильники поділяються на одно-, дво- і триполюсні; з приводом центральною або боковою рукояткою через вал, центральною рукояткою через систему важелів; з дугогасними пристроями і без них; з переднім або заднім приєднанням проводів; з одинарним або подвійним розривом кола. Промисловість виготовляє



також блоки запобіжник-вимикач, які крім комутації електричних кіл здійснюють захист від струмів пе

За ступенем захисту рубильники бувають відкритими (IP00), захищеними (IP32) і закритими (IP54).

Величина номінального струму рубильника залежить не тільки від його габариту, а й від виконання за захищеністю. Комутаційна здатність рубильників залежить від роду струму, величини напруга і конструкції апарата.

Вибір рубильників здійснюється за номінальною напругою, номінальним струмом, допустимим комутованим струмом, конструктивним виконанням і ступенем захисту.

Вибір рубильників:

за напругою установки

$$U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}; \quad (3.6.1)$$

за струмом навантаження

$$I_{\text{ном}} \leq I_{\text{ном}}; I_{\text{max}} \leq I_{\text{ном}}; \quad (3.6.2)$$

за конструктивним виконанням;

за електродинамічною стійкістю

$$i_y \leq i_{\text{гр, с}}; \quad (3.6.3)$$

за термічною стійкістю

$$B_k \leq I_{\text{тер}}^2 t_{\text{тер}}. \quad (3.6.4)$$

Номінальний струм  $I_{\text{ном}}$ , граничний наскрізний струм  $i_{\text{гр, с}}$ , струм і час термічної стійкості  $I_{\text{тер}}$ ,  $t_{\text{тер}}$  наводяться в каталогах і довідниках.

Командоапарати призначені для комутації електричних кіл керування, сигналізації і вимірювання. До них належать кнопки і кнопкові пости, універсальні перемикачі, пакетно-кулачкові перемикачі, командоконтролери, шляхові вимикачі і перемикачі.

Пакетно-кулачкові вимикачі і перемикачі призначені для нечастих (до 30 за годину) комутацій електричних кіл напругою до 220 В постійного струму або до 380 В змінного струму. Апарати використовуються як ввідні в низьковольтних комплектних пристроях, як комутуючі в колах автоматики та для керування асинхронними електродвигунами. Номінальний струм пакетних вимикачів і перемикачів залежить від їх габаритів і напруги електричних кіл, які вони комутують. Їх стійкість проти електричного спрацювання досягає 200-400 тис циклів вмикання-вимикання, а стійкість проти механічного спрацювання - від 1 до 6 млн циклів, їх застосовують як комутаційні апарати в електроустановках змінного струму напругою до 380 В, для перемикачів кіл керування та автоматики, а також для керування асинхронними електродвигунами з короткозамкненим ротором.

Пакетні вимикачі складаються з набору однотипних елементів (пакетів), пов'язаних загальним центральним стержнем з поворотною

рукояткою. Випускають пакетні перемикачі двох типів: з ковзними ламелями та кулачковим механізмом.

Кнопки керування та кнопкові пости призначені для комутації електричних кіл керування з напругою змінного струму до 500 В і постійного струму до 220 В. Їх використовують для ручного дистанційного керування електромагнітними апаратами - реле, контакторами, електромагнітними пускатими тощо. Найпоширенішими є кнопки серії КЕ, КМЕ і кнопкові пости серії ПКЕ.

Кнопка складається з однієї або кількох пар нерухомих контактів, рухомих контактів місткового типу, що приводяться в рух підпружиненим штовхачем. Контакти і штовхачі змонтовані на пластмасовій основі. Для підвищення надійності контакти часто виготовляють зі срібла. Кнопки виконують із замикаючими і розмикаючими контактами у різних комбінаціях. Найчастіше кнопки вбудовуються у комплектні пристрої керування електроустановками.

Кнопкові пости можуть мати один і більше кнопкових елементів, змонтованих у пластмасовому корпусі з пластмасовим кожухом або без нього. Залежно від експлуатаційного призначення пости можуть бути вбудовані в нішу, панель або змонтовані на будь-якій рівній поверхні. За ступенем захисту від дії навколишнього середовища кнопкові пости бувають захищеними і пилеводонепроникними.

Кнопки і кнопкові пости вибирають за напругою, струмом, кількістю і видом контактів, конструктивним виконанням та ступенем захисту від дії навколишнього середовища.

Шляхові вимикачі і перемикачі призначені для перемикання в колах керування залежно від просторового положення робочого органу машини або керованого чи захищуваного механізму. Якщо такі апарати використовуються для перемикання електричних кіл при крайніх положеннях контрольованих механізмів, то їх називають кінцевими вимикачами.

За принципом дії шляхові вимикачі поділяються на контактні і безконтактні. Контактні вимикачі складаються з групи контактів у різних комбінаціях і привода, змонтованих у металевому корпусі. Залежно від виду привода вимикачі поділяються на натискні (кнопкові), важільні, шпindelьні й обертові.

Контактор - це двопозиційний апарат з самозворотом, призначений для частих комутацій струмів, що не перевищують струми перевантаження, який приводиться в дію руховим приводом, (ГОСТ 17.703-72), тобто силою, що утворена будь-якими видами енергії, крім мускульної енергії оператора (електромагнітний, пневматичний і ін.)

Контактори постійного струму призначені для комутації кіл змінного струму, і, як правило, приводяться в дію електромагнітом постійного струму. Контактори змінного струму призначені для комутації кіл змінного струму. Електромагніти можуть бути як змінного, так і постійного струмів.

Основними технічними даними контакторів є:

- номінальний струм головних контактів;
- граничний відключаємий струм;
- номінальна напруга кола, що комутується;
- механічна і комутаційна зносостійкість;
- припустиме число вмикань у час;
- власний час вмикання і вимикання.

Вибір контакторів:

Вибір контакторів (КМ) виконується за такими показниками і умовам:

1. За типом або серією;
2. За номінальною напругою з умови:

$$U_{HKM} \geq U_C \quad (3.6.5)$$

3. За номінальним струмом КМ з умови:

$$I_{HKM} \geq I_P \quad (3.6.6)$$

4. За виконанням:

- а) кількості головних замикаючих і розмикаючих контактів;
- б) модифікацією КМ;
- в) комутаційної зносостійкості;
- г) наявності допоміжних контактів і механізму, що зачіпкує.

5. За режимі роботи: тривалий, короткочасний, повторно-короткочасний.

6. За родом струму головного кола і кола керування.

7. За номінальною напругою котушок, що втягують: 24, 127, 220, 380 і 660В - змінного струму; 24, 48, 110, 220 В - постійного струму.

8. За ступенем захисту і категорією розміщення.

7. За кліматичним виконанням і категорією розміщення.

Магнітний пускач - комутаційний електричний апарат, призначений для пуску, зупинки і захисту електродвигунів (при наявності теплового реле) без виведення в його коло опору резисторів. Вони застосовуються для дистанційного вмикання і вимикання трифазних АД з короткозамкненим ротором і ін. електроустановок потужністю до 75 кВт при напрузі 380 і 660 В змінного струму частотою 50 і 60 Гц.

*Основні вузли магнітного пускача.* Система головних контактів магнітного пускача має 3 полюса; система додаткових

контактів виконується у виді окремого блоку і може мати в залежності від типовиконання до 4 пар контактів. Зміна стану контактів здійснюється за допомогою електромагнітного привода пряморухомого типу із Ш-подібним магнітопроводом.

Промисловістю освоєно виробництво багатьох серій пускачів. Проте в нових розробках не припускається використання пускачів застарілих серій і серій, знятих з виробництва, наприклад, серії ПНВ, ПМЕ, ПАЕ й ін. Рекомендується використовувати електромагнітні пускачі серії ПМЛ і ПМА.

Вибір електромагнітних пускачів:

Вибір магнітних пускачів (МП) виконується за такими показниками і умовами:

1. За типом і серією.
2. За номінальною напругою з умови:

$$U_{НМП} \geq U_C \quad (3.6.7)$$

3. За номінальним струмом МП з умови:

$$I_{НМП} \geq I_P \quad (3.6.8)$$

4. За виконанням:

- а) реверсивний, неревверсивний;
- б) з тепловим реле, без теплового реле;
- в) з електро механічним блокуванням, без блокування.

5. За номінальним струмом неспрацьовування теплового реле серії РТЛ і РТТ з умови:

$$I_{НМП} \geq I_{НАД} \text{ або } I_{ННТР} \geq I_P \quad (3.6.9)$$

з наступним регулюванням струму неспрацьовування теплового реле, щоб забезпечувалася рівність

$$I_{ННТР} = I_{НАД} \text{ або } I_{ННТР} = I_P \quad (3.6.10)$$

6. За ступенем захисту і наявності кнопки «Пуск» і «Стоп».
7. За кількістю допоміжних контактів.
8. За родом струму і напрузі котушки, що втягує, МП.
7. За кліматичним виконанням і категорією розміщення.
8. За виконанням на комутаційну зносостійкість.

У якості розрахункових струмів мережі окремих електроустановок приймаються їхні номінальні струми, що визначаються для однофазних електроустановок.

$$I_P = I_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{U_H \cdot \cos \varphi_H}; \quad (3.6.11)$$

для трифазних електроустановок

$$I_P = I_H = \frac{P_H \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_H \cdot \cos \varphi_H}; \quad (3.6.12)$$

для трифазних АД

$$I_P = I_{HAD} = \frac{P_{HAD} \cdot 10^3}{\sqrt{3} U_H \eta_H \cdot \cos \varphi_H}; \quad (3.6.13)$$

Розрахунковий струм групової або магістральної мережі визначається за формулою:

$$I_P = K_O \sum_{i=1}^n I_H, \quad (3.6.14)$$

де  $K_O$  - коефіцієнт одночасності роботи електроустановок.

Реле - це електричний апарат, в якому при плавній зміні вхідного (керуючого) параметра до певної наперед заданої величини відбувається стрибкоподібна зміна вихідного (керованого) параметра. Хоча один з цих параметрів повинен бути електричним.

У цьому відношенні реле мають типову релейну характеристику – залежність між вихідною  $Y$  і вхідною  $X$  величинами, яка наведена на рис. 3.6.1. Стрілками показана послідовність переміщення по характеристиці при збільшенні вхідного сигналу від нуля до деякого значення  $X$ , з послідовним зменшенням знову до нуля.

Позначені точки  $X_{спр}$  і  $X_{відп}$  – значення спрацьовування (наприклад, притягується якор, замикаються контакти) і відпускання (повернення) у вихідний стан.

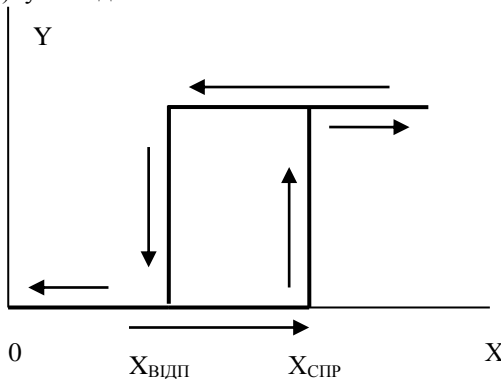


Рис. 3.6.1 Типова релейна характеристика.

Найчастіше реле класифікують за такими ознаками:

- за родом вхідної величини - реле струму, напруги, температури, частоти, тиску, швидкості і т.д.;

- за родом струму керування - постійного і змінного струму;
- за величиною напруги кола керування;
- за коефіцієнтом повернення реле струму і напруги - з нормованим коефіцієнтом повернення; з ненормованим коефіцієнтом повернення;
- за кількістю і видом контактів;
- за категорією застосування;
- за способом приєднання провідників - з переднім приєднанням; із заднім приєднанням;
- за конструктивним виконанням - відкриті, пилоблизкозахищені, герметичні, з герметизованими контактами, герконові;
- за принципом дії - контактні і безконтактні.

Реле звичайно мають три функціональні елементи: сприймаючий, проміжний і виконавчий. Реле часу, крім того, мають четвертий елемент, який створює витримку часу між моментом подачі керуючого сигналу на сприймаючий елемент і моментом спрацювання виконавчого елемента.

Сприймаючий елемент сприймає вхідний (керуючий) параметр (струм, напругу, тиск, температуру тощо) і перетворює її у фізичну величину, необхідну для роботи реле. В реле з рухомими частинами сприймаючий елемент є рушійним органом. В контактних реле вхідна величина перетворюється сприймаючим елементом, як правило, в механічну силу.

Проміжний елемент (у контактних реле - пружина) порівнює значення перетвореної вхідної величини із заданим значенням і при перевищенні керуючим параметром заданого значення передає первинну дію на виконавчий елемент.

Виконавчий елемент стрибкоподібно змінює вихідний параметр. У контактних реле виконавчим елементом є рухома контактна система. Виконавчі елементи безконтактних реле різко змінюють свій опір, сміність або індуктивність.

Обмотки реле струму вмикаються послідовно зі споживачами електроенергії, тому розраховані на струми в одиниці і десятки ампер. При більших значеннях робочих струмів реле вмикають через трансформатори струму. Для регулювання струму спрацювання реле мають спеціальні регулюючі пристрої. В електроприводах реле струму використовують як реле максимального струму, реле мінімального струму та реле контролю робочого струму.

Реле напруги використовуються для контролю напруги та як проміжні реле. Якщо потрібно контролювати зниження напруги, використовують реле напруги. При цьому контакти реле вимикають установку при зниженні напруги мережі нижче допустимої.

Проміжні реле використовуються як підсилювачі первинних сигналів або для розмноження кіл керування.

В системах захисту та автоматики часто потрібна витримка часу між спрацюванням двох або кількох апаратів, або створення певної часової послідовності операцій. Для створення таких витримок існують реле часу.

Загальні вимоги до реле:

а) стабільність витримки часу при коливаннях напруги, частоти струму, температури навколишнього середовища тощо;

б) мала споживана потужність, маса і габарити.

У схемах керування електроприводом при великій частоті вмикання реле часу повинні мати високу стійкість проти спрацювання ( $5 \dots 10 \cdot 10^6$  спрацювань). Розкид часу спрацювання їх може досягати 10%. Тривалість витримок часу знаходиться в межах 0,25... 10 с.

Для автоматизації технологічних процесів потрібні реле з великою витримкою часу - від кількох хвилин до кількох годин. У цьому випадку використовують моторні або напівпровідникові реле.

У реле часу з електромагнітним управлінням при відпусканні, типу РЗВ-800, витримка часу створюється за рахунок уповільнення спадання магнітного потоку в магнітопроводі після вимикання котушки. Для цього: 1) магнітопровід виконано з низьким опором магнітному потоку; 2) на одне з осердь магнітопроводу одягнена короткозамкнена обмотка у вигляді мідної або алюмінієвої гільзи. Реле спрацьовує без витримки часу. Після вимикання котушки спадаючий магнітний потік індукуює в гільзі е.р.с. самоіндукції, яка підтримує потік магнітопроводу. Витримка часу реле плавно регулюється натягом зворотної пружини. Грубе регулювання витримки часу здійснюється зміною товщини немагнітної прокладки між якорем і осердям магнітопроводу.

У пневматичних реле типу РВП при спрацюванні або відпусканні електромагніту під дією пружини колодка, зв'язана з гумовою діафрагмою, опускається і натискує на мікровимикач. Діафрагма вмонтована в пневматичний уповільнювач. Швидкість руху діафрагми колодкою визначається перерізом отвору, через який засмоктується повітря у верхню порожнину уповільнювача. Витримка часу регулюється голкою, яка змінює переріз цього отвору. Межі регулювання витримки часу 0,4... 180 с. Контактна система мікроперемикача допускає тривалий струм 3 А і струм вимикання 0,21 А при напрузі 380 В змінного струму. Реле РВП може об'єднуватися також і мікровимикачем, контакти якого перемикаються без витримки часу.

У моторних реле часу типу ВС-10 синхронний електродвигун через електромагнітну муфту та уповільнюючий редуктор приводить в обертання диски з кулачками. Кулачки дисків через проміжні кулачки

перемикають вихідні контакти. Витримка часу перемикання контактів регулюється зміною початкового положення дисків. Після вимкнення реле диски в попереднє положення повертаються зворотною пружиною. Діапазон витримок часу 1 с...26 хв. Точність роботи  $\pm 5$  с. Кількість дисків (незалежних груп контактів) - від 3 до 6. Вихідні контакти допускають тривалий струм 10 А і можуть вимикати навантаження змінного струму 800 В-А при напрузі 220 В. Допустимі коливання напруги (0,9 ...1,12)U<sub>ном</sub>, стійкість проти спрацювань - не менше 1000 циклів.

Напівпровідникові реле часу створюють витримки від долі секунди до 10 год. Витримки часу в цих реле створюються шляхом заряджання конденсатора через резистор або шляхом підрахунку лічильником заданої кількості імпульсів, які видаються генератором імпульсів. Вихідним елементом у напівпровідникових реле часу є проміжне реле. Напівпровідникові (електронні) реле часу діляться на аналогові й цифрові.

Герконові реле. Найменш надійним вузлом електромагнітних реле є контактна система. Електрична дуга або іскра, що виникають при розмиканні і замиканні контактів, швидко їх руйнують. Цьому також сприяють окислювальні процеси та покриття контактних поверхонь шаром пилу, вологи і бруду. Суттєвим недоліком електромагнітних реле є і наявність тертьових вузлів, спрацювання яких знижує їх роботоздатність. Іншим недоліком електромагнітних реле є їх інерційність, обумовлена значною масою рухомих частин. Вказані недоліки обумовили створення реле з герметичними магнітно-кермованими контактами.

Розроблено велику кількість конструктивних виконань герконових реле: з замикаючим, розмикаючим або перемикаючим контактом, багатоланцюгові реле; реле з керуванням постійним магнітом; реле з пам'яттю; силові герметичні контакти (геркони).

Основними параметрами, за якими вибираються геркони, є: максимальні комутовані потужність, струм і напруга, максимальна магніторушійна сила (МРС) спрацювання та мінімальна МРС відпускання.

Для регулювання частоти обертання, моменту, що обертає, на валу, для з'єднання і роз'єднання провідного і веденого валів застосовуються електричні апарати у вигляді муфт з електричним управлінням. Ці муфти можна підрозділити на індукційних і електромагнітних.

### **Питання для самоконтролю**

1. Яке призначення, конструкція і принцип дії рубильників?
2. Які умови вибору рубильників?



3. Яке призначення, конструкція і принцип дії пакетно-кулачкових вимикачів і перемикачів?

4. Яке призначення, конструкція і принцип дії кнопок керування та кнопових постів?

5. Яке призначення, конструкція і принцип дії шляхових вимикачів і перемикачів?

6. Яке призначення, конструкція і принцип дії контакторів?

7. Які умови вибору контакторів?

8. Яке призначення, конструкція і принцип дії магнітного пускача?

9. Які умови вибору електромагнітних пускачів?

10. Яке призначення, конструкція і принцип дії електричних реле?

11. Яке призначення, конструкція і принцип дії реле струму.

12. Яке призначення, конструкція і принцип дії реле напруги.

13. Яке призначення і принцип дії реле проміжні.

14. Яке призначення, конструкція і принцип дії реле часу.

15. Яке призначення, конструкція і принцип дії реле герконові реле?

16. Яке призначення, конструкція і принцип дії реле електромагнітної муфти?

### **3.7 Електричні апарати захисту.**

**Прочитайте відповідний матеріал в літературі:** [1]; [2]; [3]; [4]; [5]; [7]; [9].

#### **Теоретичні відомості**

При експлуатації електроустаткування і електричних мереж тривалі перевантаження дротів і кабелів, а також короткі замикання викликають підвищення температури струмопровідних жил зверху допустимих значень. Це призводить до передчасного зношування їх ізоляції, внаслідок чого може статися пожежа або вибух у вибухонебезпечних приміщеннях, а також поразка людей електричним струмом.

Для оберігання від надмірного нагріву проводів, кабелів і струмопровідних частин електроустаткування кожна ділянка електричної мережі має бути забезпечена захисним апаратом, що забезпечує відключення аварійної ділянки при непередбаченому збільшенні струмового навантаження понад тривало допустиму.

Апаратом захисту називається апарат, що автоматично відключає електричний ланцюг, що захищається, при ненормальних режимах.

До апаратів захисту відносяться: плавкі запобіжники, автоматичні вимикачі, теплові і струмові реле.

Запобіжник – це комутаційний електричний апарат, призначений для вимкнення електричного кола, яке захищається, руйнуванням спеціально передбачених для цього струмоведучих частин під дією струму, що перевищує певні значення.

В більшості запобіжників вимкнення кола виконується розплавленням плавкої вставки, яка нагрівається струмом, що проходить по ній. Після вимкнення кола необхідно замінити вставку, що перегоріла, на нову. Ця операція виконується вручну або автоматично заміною всього запобіжника.

Завдяки своїм перевагам – простоті конструкції, низькій вартості, високій швидкодії та здатності обмежувати струм КЗ, - запобіжники широко використовують для захисту мереж 6...35 і 0,4 кВ, а також різноманітного електроустаткування. Запобіжники виготовляються на напругу змінного струму 220, 380, 600 В і постійного струму 24, 110, 220, 440 В. Запобіжники напругою до 1кВ виготовляються на номінальні струми до 1000 А.

Основними елементами запобіжника є корпус, плавка вставка (плавкий елемент), контактна частина, дугогасильний пристрій та дугогасильне середовище.

Запобіжники характеризуються номінальним струмом плавкої вставки, тобто струмом, на який розрахована плавка вставка для тривалої роботи. В один і той же корпус запобіжника можуть бути вставлені плавкі елементи на різні номінальні струми, тому сам запобіжник характеризується номінальним струмом запобіжника (основи), який дорівнює найбільшому з номінальних струмів плавких вставок, призначених для даної конструкції запобіжника.

В нормальному режимі тепло, яке виділяється струмом навантаження в плавкій вставці, передається в навколишнє середовище, і температура всіх частин запобіжника не перевищує допустиму. При перевантаженнях або КЗ температура вставки збільшується, і вона розплавляється. Чим більший струм, що протікає, тим менший час плавлення.

Запобіжники не повинні вимикати електричне коло при проходженні умовного струму неплавлення і мають вимикати коло при проходженні умовного струму плавлення протягом певного часу, який залежить від номінального струму (ДЕСТ 17242–79Е).

Для того, щоб зменшити час спрацювання запобіжника, використовуються плавкі вставки з різного матеріалу, спеціальної

форми, а також використовується металургійний ефект. Найбільш широко розповсюдженими матеріалами плавких вставок є мідь, цинк, алюміній, свинець та срібло. Для прискорення плавлення вставок з міді і срібла використовується металургійний ефект – явище розчинення тугоплавких металів в розплавлених, менш тугоплавких.

Вибір запобіжників виконується:

- за напругою

$$U_{уст} \leq U_{ном}; \quad (3.7.1)$$

- за струмом запобіжника (основи)

$$I_{ном} \leq I_{ном}; I_{max} \leq I_{ном}; \quad (3.7.2)$$

- за номінальним струмом плавкої вставки

$$I_{п.в.} = \frac{\kappa_i I_H}{\alpha} . \quad (3.7.3)$$

де  $I_H$  – номінальний струм електродвигуна, А;

$\kappa_i$  - кратність пускового струму;

$\alpha$  - коефіцієнт, що враховує умови пуску двигуна

Номінальний струм плавкої вставки вибирається так, щоб у нормальному режимі і при допустимих перевантаженнях вимкнення запобіжника не відбувалося, а при довготривалих перевантаженнях і к.з. коло вимикалося б якомога швидше. При цьому виконуються умови селективності захисту. Номінальний струм запобіжника узгоджується з вибраним номінальним струмом плавкої вставки.

Запобіжники, обрані за нормальним режимом, перевіряються за граничним струмом вимкнення :

$$I_{Г.В} \leq I_{відм}. \quad (3.7.4)$$

Автоматичний вимикач (АВ) – це комутаційний електричний апарат призначений для автоматичної комутації електричних кіл при струмах перевантаження та короткого замикання, а також для нечастих комутацій струмів навантаження по команді оператора.

АВ виконують функції захисту електричних споживачів від коротких замикань, перевантаження, неприпустимого зниження або збільшення напруги (при наявності відповідних розчіплювачів); а також за допомогою них виконують оперативні комутації кіл в межах номінальних навантажень автоматичного вимикача.

Основні параметри АВ:

- номінальна напруга, яка характеризує здібність ізоляції автомата тривало витримувати прикладену напругу і короткочасні перенапруги;

- номінальний струм, що характеризує “пропускну” здатність АВ при тривалому навантаженню;

- механічна і комутаційна зносостійкість;

- гранична комутаційна зносостійкість – здібність АВ надійно відключати електричне коло при виникненні короткого замикання. В кількісному відношенні вона визначає максимальне діюче значення струму, який автомат здатен надійно відключити, остаючись у справному і працездатному становищі. Для АВ розрізняють одноразову граничну комутаційну здатність – максимальне значення струму к.з., який автомат може відключити один раз, після чого він не придатний для подальшої експлуатації.

- час спрацювання (швидкодія): розрізняють власний час спрацювання автомата, який представляє час з моменту начала к.з. до начала розмикання його головних (силових) контактів і повний час спрацювання (до повного відключення кола). Цей час враховує також час горіння дуги.

Найбільш розповсюдженими АВ, до яких не пред'являється особливих вимог до швидкодії є універсальні та установочні автомати, час спрацювання знаходиться в межах 10-100 мс.

Універсальні АВ не мають захисного корпусу і, як правило, встановлюються в приміщеннях розподільних пристроїв низького навантаження. Вони мають, як правило, два виду захисту: максимально струмовий та захист від зникнення і зниження напруги.

Установочні АВ мають пластмасовий захисний корпус і можуть встановлюватися в суспільних приміщеннях. Вони мають різні види захисту: максимально струмовий, від перевантажень і т.д. (ВА 51, АЕ 2000, АП 50, А 37 та інші.)

Швидкодіючі АВ призначені для захисту силових напівпровідникових приладів. Час спрацювання значно менше від вище наведених і складає 0,5-5 мс. Вони мають здатність обмежувати струм к.з. і час його протікання (АВ серії ВАБ, БВП-5, БВЗ-10).

Основні конструктивні елементи АВ:

- контактно-дугогасильна система;
- механізм вільного розчіплювання;
- розчіплювачі;
- привід.

Диференціальні автоматичні вимикачі забезпечують ефективний захист людини від ураження електричним струмом у випадку його дотику до струмопровідних частин або елементів електрообладнання, яке може потрапити під напругу у результаті ушкодження ізоляції струмоведучих частин. При цьому дифавтомат забезпечує ефективний захист електрообладнання від струмів короткого замикання і струмів перевантаження. Крім того, у ряді виконань АД-12 і АД-14 передбачено захист від імпульсних струмів перенапруги у мережі.

Конструкція диференціального автомата представляє собою

поєднання двох функціональних вузлів: електронного модуля диференціального захисту і автоматичного вимикача. Електронний модуль складається із диференціального трансформатора струму, електронного підсилювача з ступеневим пристроєм, виконавчого електромагніту скидання.

Вибір автоматичних вимикачів

Для вибору і настроювання захисної апаратури потрібно мати дані:

$I_n$  - номінальний струм електроустановки, що довгостроково діє по апаратурі захисту, А;

$I_{\text{макс.}}$  - максимальний струм електроустановки, що короткочасно діє по апаратурі, А;

$T_{\text{макс.}}$  - тривалість дії максимального струму по апаратурі захисту, с.

Вибір автоматичних вимикачів (АВ) виконується за наступними показниками та умовами:

1. За типом і серією.
2. За номінальною напругою:

$$U_{н\ АВ} \geq U_{\text{м}}, \quad (3.7.5)$$

де  $U_{н\ АВ}$  - номінальна напруга АВ, В;

$U_{\text{м}}$  - номінальна напруга мережі, В.

3. За номінальним струмом:

$$I_{н\ АВ} \geq I_{\text{роз.кола}}. \quad (3.7.6)$$

4. За виконанням:

- кількості головних полюсів: одно-, двох-, триполюсний.
- виду основних розчіплювачів: електромагнітний (ЕМР), комбінований (КМР) та інш.
- виду додаткових розчіплювачів: без додаткових розчіплювачів, незалежний розчіплювач, мінімальний розчіплювач, нульовий розчіплювач, напівпровідниковий розчіплювач;
- наявності вільних контактів;
- наявності регулювання струму неспрацьовування теплового розчіплювача;
- виду привода: ручний електромагнітний, ручний дистанційний;

5. За номінальним струмом теплового розчіплювача:

5.1. Для мережі з АД, при наявності регулювання струму неспрацьовування теплового розчіплювача з умови:

$$I_{н\ тр} \geq I_{н\ АД}. \quad (3.7.7)$$

з наступним регулюванням струму неспрацьовування теплового розчіплювача, що забезпечує рівність:

$$I_{н\,тр} = I_{н\,АД} \cdot \quad (3.7.8)$$

Для мережі з АД з тривалим режимом роботи і легкими умовами пуску ( $t_n = 10$  с) з умови:

$$I_{н\,тр} = I_{н\,АД} \cdot \quad (3.7.9)$$

Для мережі з АД з тривалим режимом роботи і важкими умовами пуску ( $t_n > 10$  с) з умови:

$$I_{н\,тр} = 1,25 I_{н\,АД} \cdot \quad (3.7.10)$$

6. За струмом відсічки електромагнітного розчіплювача з умови:

$$I_{відс.РМ} \geq I_{пущ.розр} \cdot \quad (3.7.11)$$

де  $I_{відс.РМ}$  - струм відсічки ЕМР, А;

$I_{пущ.розр}$  - розрахункове значення пускового струму в мережі, яку захищає АВ, А.

При цьому, для захисту електричної мережі з одним АД:

$$I_{пущ.розр} = (1,5 \dots 1,8) I_{н\,АД} \cdot \quad (3.7.12)$$

Для захисту електричної мережі з кількома АД:

$$I_{пущ.розр} = (1,5 \dots 1,8) \left[ \sum_1^n I_n + [I_n - I_n] \right], \quad (3.7.13)$$

де  $\sum_1^n I_n$  - сума номінальних струмів одночасно працюючих АД;

$(I_n - I_n)$  - різниця між значеннями пускового і номінального струмів АД, у яких ці струми найбільші.

7. За кліматичним виконанням, категорією розміщення і ступенем захисту.

Перевірка автоматичних вимикачів:

На неспрацьовування АВ при пуску АД в мережах, які захищаються АВ, за умовою:

$$I_{відс.РМ} \geq I_{пущ.розр} \cdot \quad (3.7.14)$$

На узгодження тривало допустимого струму проводів ( $I_{тр.доп.}$ ) з струмом розчіплювачів АВ.

Перевірка проводиться за нормованим в ПУЕ співвідношенням вказаних струмів.

В мережах, що захищаються тільки від струмів к.з.:

- для АВ, що мають тільки ЕМР за співвідношенням:

$$\frac{I_{mp.\partial on}}{I_{відс.РМ}} \geq 0,22 ; \quad (3.7.15)$$

- для АВ, що мають нерегульований тепловий розчіплювач (ТР) за співвідношенням:

$$\frac{I_{mp.\partial on}}{I_{НТР}} \geq 1,0 ; \quad (3.7.16)$$

- для АВ, що мають регульований ТР за співвідношенням:

$$\frac{I_{mp.\partial on}}{I_{НТР}} \geq 0,66 . \quad (3.7.17)$$

В мережах, що захищаються від струмів к.з. і перевантаження, незалежно від типу приміщення:

- для АВ, що мають тільки ЕМР за співвідношенням:

$$\frac{I_{mp.\partial on}}{I_{відс.РМ}} \geq 1,25 ; \quad (3.7.18)$$

- для АВ, що мають регульований або нерегульований ТР або комбінований за співвідношенням:

$$\frac{I_{mp.\partial on}}{I_{НТР}} \geq 1,0 . \quad (3.7.19)$$

На чутливість або надійність спрацювання при струмах однофазного к.з.:

- для АВ, що мають тільки ЕМР:

якщо  $I_{нАВ} \leq 100A$  за умовою:

$$I_{\kappa}^{(1)} \geq 1,4 I_{відс.РМ} , \quad (3.7.20)$$

якщо  $I_{нАВ} > 100A$  за умовою:

$$I_{\kappa}^{(1)} \geq 1,25 I_{відс.РМ} ; \quad (3.7.21)$$

- для АВ, що мають ТР і мереж, які розташовані у нормальному середовищі за умовою:

$$I_{\kappa}^{(1)} \geq 3 I_{нтр} ; \quad (3.7.22)$$

- для АВ, що мають ТР і мереж, які розташовані у вибухо- та пожежебезпечному середовищі за умовою:

$$I_{\kappa}^{(1)} \geq 6 I_{нтр} ; \quad (3.7.23)$$

Струм однофазного к.з. визначається за виразом:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{U_{нф}}{\frac{z_{м.к.}^{(1)}}{3} + z_n} , \quad (3.7.24)$$

де  $U_{нф}$  - номінальна фазна напруга обмоток НН трансформатора, В;

$z_{т.к.}^{(1)}$  - повний опір силового трансформатора однофазному струму к.з. на корпусі, Ом;

$z_n$  - повний опір проводів петлі “фаза-нуль”, Ом.

На гранично вимикаючу здатність струмів трифазного к.з. за умовою:

$$I_{сп.вим.АВ} \geq I_{к.у\phi}^{(3)} = I_{к}^{(3)} \sqrt{2} \kappa_{у\phi}, \quad (3.7.25)$$

де  $\kappa_{у\phi}$  - ударний коефіцієнт, що залежить від параметрів силового трансформатора  $\kappa_{у\phi} = 1, 2 \dots 1, 4$ ;

$I_{к.у\phi}^{(3)}$  - ударний струм трифазного к.з.

$I_{к}^{(3)}$  - сталі значення трифазного струму к.з.:

$$I_{к}^{(3)} = \frac{U_{нл}}{\sqrt{3} z_m}, \quad (3.7.26)$$

де  $z_m$  - повний опір трансформатора 10/0,4 кВ, який приведений до напруги 0,4 кВ:

$$z_m = \frac{u_{к\%} U_{нл}^2}{100 S_n}, \quad (3.7.27)$$

де  $u_{к\%}$  - напруга к.з. силового трансформатора, %;

$S_n$  - повна потужність трансформатора, В·А.

$U_{нл}$  - номінальна лінійна напруга трансформатора, В.

На селективність роботи розчіплювачів АВ, що включені в мережі послідовно.

Електротеплові реле серії РТЛ, РТИ, РТТ, ТРН призначені для захисту електроустановок від тривалої дії струмів перевантажень. Реле складається з нагрівального елемента з біметалічною пластиною і контакту, яка розмикає коло, з кнопкою звороту. Струм перевантаження, протікаючи по нагрівальному елементові, нагріває біметалічну пластину, що впливає на контакт, який розмикає коло. Контакт розмикає коло і виключає магнітний пускач, а, отже, і керований їм струмоприймальник. Струм спрацьовування реле визначається номінальним струмом змінного нагрівального елемента. Крім того, конструкція електротеплове реле передбачає регулювання струму вставки в межах плюс, мінус 20 % щодо номінального струму нагрівального елемента, розташованого в ньому.



При роботі теплове реле не повинно спрацьовувати при силі струму  $1,05I_n$  неспрацьовання протягом 50 хвилин і спрацьовувати при збільшенні сили струму до  $1,2I_n$  неспрацьовання протягом 20 хвилин. Повернення теплового реле у початковий (робочий) стан здійснюється кнопкою на тепловому реле

Реле мають обмежену термічну стійкість при наскрізних струмах короткого замикання і тому використовуються лише спільно із апаратами, які захищають електроустановку від струмів короткого замикання.

Вибір електротеплового реле:

1. Стандартне значення номінального струму теплового елементу  $I_y$  визначають за умовою:

$$I_y \geq I_{\text{д.тр.}}; \quad (3.7.28)$$

2. Номінальний струм реле електротеплового  $I_p$  та його тип за умовою:

$$I_p \geq I_y. \quad (3.7.29)$$

3. Для регульованого реле струм вставки:

$$I_a \geq (0,75 \dots 1,25) I_{н.е.} \quad (3.7.30)$$

де  $I_{н.е.}$  - номінальне значення струмонагрівального елемента.

Під час експлуатації сільськогосподарських електроприводів захист електродвигунів від перевантажень та інших аномальних режимів автоматичними вимикачами, запобіжниками та тепловими реле не задовольняє вимогам високої надійності.

Для ряду електроприводів з важкими умовами роботи застосовується температурний захист електродвигунів УВТЗ.

При цьому контролюється основний фактор, що може спричинити вихід із ладу двигуна - температура його обмоток. Пристрої захисного відключення є високочутливими елементами захисту, що реагують на перевищення струму, який витікає з ізоляції, понад припустимий розмір у трифазних і однофазних мережах із глухозаземленою нейтраллю.

Пристрій захисту ФУЗ-МУ призначено для захисту трифазних електродвигунів від неповно фазних режимів, перевантажень, асиметрії напруг мережі, а також захищає статорні обмотки від перегріву при наявності умонтованих датчиків температури (позисторів). Пристрій захисту ФУЗ-М(МВ) призначений для захисту електродвигунів від перевантажень, заклинювання валу ротора, незапуску з витримкою часу, яка залежить від режимів та величини перевантажень.

Пристрій захисту електродвигунів (ПЗЕ) забезпечує захист статорних обмоток електродвигунів, які працюють з пускачами 0-6 величини і індикацію причин аварії при виникненні аварійних

режимів: обрив фази 3-х фазної мережі змінного струму 220/380 В; перегрівання двигуна; тривалі технологічні перевантаження; заклинювання ротора електродвигуна; неприпустима несиметрія напруги фаз електромережі; неправильні процеси пуску і гальмування електродвигуна.

Пристрої захисного відключення виготовляються різноманітних типів (РУД-024; РУД-022; ЗОУП-25 і ін.) і конструкцій, але в основу роботи їх призначений один принцип: вимір геометричної суми струмів трифазних або однофазних струмоприймальників із нульовим проводом за допомогою диференціальних трансформаторів струму.

Вимикачі диференціальні ВД1-63, (ПЗВ-2001, ПЗВ-2002) призначені для захисту людини від ураження електричним струмом у випадку його дотику до струмопровідних частин або елементам електрообладнання, яке може потрапити під напругу у результаті ушкодження ізоляції.

### **Питання для самоконтролю**

1. Яке призначення, конструкція і принцип дії запобіжників?
2. Умови вибору запобіжників.
3. Яке призначення, конструкція і принцип дії автоматичних вимикачів.
4. Яке призначення і принцип дії диференціальні автоматичні вимикачі?
5. Умови вибору автоматичних вимикачів.
6. Яке призначення, конструкція і принцип дії теплових реле.
7. Умови вибору теплових реле.
8. Яке призначення і принцип дії захисних апаратів?

### **3.8 Загальні відомості, принцип будови і класифікація безконтактних електричних апаратів.**

**Прочитайте відповідний матеріал в літературі:** [1]; [2]; [3]; [4]; [5]; [6]; [7]; [9].

### **Теоретичні відомості**

Напівпровідникові безконтактні електричні апарати (БЕА) являють собою один з напрямків, що розвивається, в електроапаратобудуванні. В основу цих апаратів покладені силові напівпровідникові прилади (СНП) – тиристори або транзистори. На основі СНП виконуються комутаційні (пускаті), захисні апарати

постійного і змінного струму низької та високої напруги, регулятори з широким діапазоном зміни струму і напруг.

Переваги безконтактних апаратів у порівнянні з електромагнітними контактними апаратами:

- виключено багато небажаних явищ: механічний знос контактів і інших рухливих частин, вібрація, обгорання і зварювання контактів, підвищений шум при комутаційних операціях і викид розпечених газів;

- можливості НЕА по частоті спрацьовування необмежені (десятки і навіть сотні тисяч раз у годину);

- багатофункціональність. без зміни структури силової частини здатні суміщати функції комутування, швидкодіючого захисту, регулювання напруги і струму та ін.;

- здатність здійснення бездугової комутації, високі швидкодія і надійність, підвищений термін служби;

- стабільність характеристик при експлуатації в складних кліматичних умовах і при впливі механічних факторів.

Недоліки БЕА:

- на відміну від контактних апаратів здатні витримувати значно менші перевантаження за струмом у зв'язку з низькою теплостійкістю кремнієвих структур СНП;

- дуже чутливі до короточасних перенапруг і швидкості прикладення напруги;

- великі втрати електричної енергії і як наслідок – виділення великої кількості теплоти;

- існують граничні струми, нижче яких неможливе утримання у включеному стані СНП і наявність достатньо великих (десятки міліамперів) струмів втечі у відключеному стані;

- високі масогабаритні показники і вартість.

Класифікація БЕА поділяються:

Апарати з природною комутацією. Призначені для роботи у мережах змінного струму. Використовується у всіх НЕА, призначених для комутації: контакторах, пускачах, перемикачах, вимикачах навантаження і т.д.;

Апарати зі штучною комутацією. У цю групу входять всі апарати постійного струму і захисні апарати змінного струму (пристрої автоматичного включення резерву (АВР), апарати захисту від перенапруг і низьких напруг та ін.);

Комбіновані апарати. Процес відключення кола протікає в два етапи. Протягом першого етапу здійснюється примусовий перехід струму з контактного ланцюга в паралельно з'єднаний з ним напівпровідниковий ланцюг. На другому – відбувається переривання

струму напівпровідниковою частиною апарата з використанням, як правило, принципу природної комутації;

Апарати з фазовим регулювання. Виконують функцію регулювання вихідної потужності.

Перемикання тиристора в провідний стан здійснюється подачею не його вхід керуючого сигналу з визначеною тривалістю та амплітудою. Після зняття імпульсу він залишається включеним необмежено довго, якщо струм в анодному колі його не знижується до величини, меншої струму утримання  $I_{ymp}$ . Тому для комутування кіл постійного струму прибігають до штучних мір (штучної комутації), що забезпечує короткочасне переривання струму в анодному колі або зменшення його до значень  $I_A < I_{ymp}$ .

У порівнянні з комутаційними апаратами постійного струму напівпровідникові апарати змінного струму мають більш складну структуру. Однак відключення їх здійснюється за рахунок зміни полярності напруги джерела живлення, в результаті чого до тиристорів прикладається зворотна напруга і вони виключаються. Здійснення комутацій не вимагає додаткових схемних рішень, крім необхідності блокувати надходження керуючих сигналів на входи тиристорів у відповідний напівперіод.

### **Питання для самоконтролю**

1. Наведіть загальні відомості про безконтактні електричні апарати.
2. Приведіть класифікацію безконтактних електричних апаратів.
3. Безконтактні пристрої (постійного струму).
4. Безконтактні пристрої (змінного струму).

### **4. Методичні вказівки до виконання контрольних робіт**

Контрольні завдання містять контрольні питання (це питання екзаменаційних білетів з їх розподілом по варіантам, які наведені в табл. 1) та два завдання практичного характеру, що відображають основні розділи курсу. Для студентів заочної форми навчання індивідуальне завдання є контрольним завданням.

При виконанні контрольних робіт необхідно керуватися наступними вимогами:

1. Завдання має бути оформлене відповідно до нормативних документів.
2. Відповіді на питання давати чітко, коротко, вичерпно: пояснювати фізичні явища, призначення та застосування, конструкцію та принцип дії електричних апаратів, умови вибору.

3. В ході виконання завдання приводити посилання на літературу.

#### 4.1 Завдання для виконання спецпитання.

За заданою потужністю, частотою обертання з врахуванням кліматичного виконання, категорією розміщення і ступенем захисту для вказаних у табл. 4.1 приміщень вибрати та замовити типи електричних двигунів, апаратів керування і захисту, а також марки проводів чи кабелів для вмикання електродвигунів у мережу за схемою (рис. 4.1).

Обґрунтувати необхідність вибраних апаратів захисту та керування. Дати рекомендації по налагодженню автоматичного вимикача і теплових реле.

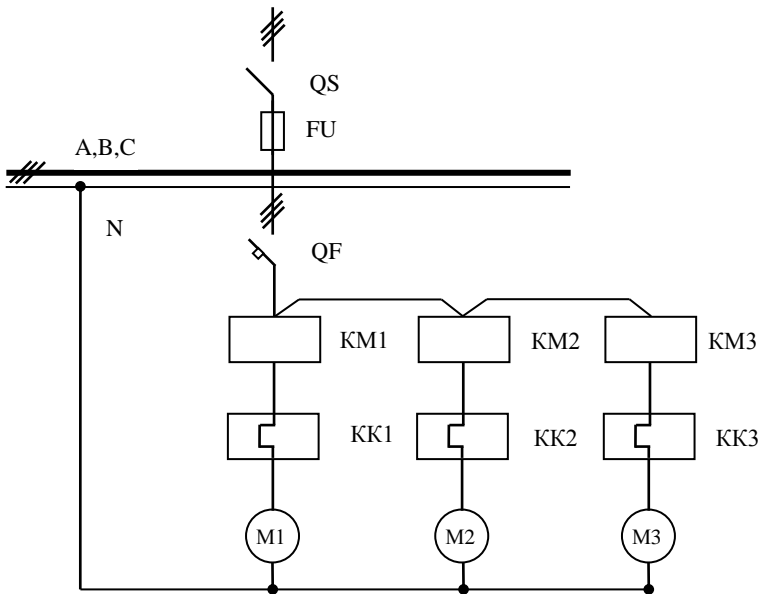


Рисунок 4.1 Розрахункова схема до задачі 1.

За варіантом у табл. 4.1 знаходять вихідні дані для його виконання.

Таблиця 4.1 Вихідні дані до завдання.

Остання цифра шифру	Типи приміщень	Передостання цифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Потужність електродвигуна, кВт									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Корівник	22 3000	11 3000	1,5 3000	2,2 1500	0,18 3000	0,55 3000	4 1000	18,5 1000	15 1000	30 3000
		1,1 1500	3 1500	18,5 1500	4 3000	5,5 1000	7,5 1000	5,5 3000	1,5 3000	11 3000	0,55 1000
		5,5 1000	2,2 3000	3 1500	7,5 1000	11 3000	2,2 1500	2,2 1000	4 1000	2,2 1500	2,2 3000
		5,5 1000	0,75 1000	2,2 1000	1,1 3000	1,5 1000	4 1000	11 1000	22 1000	0,18 1000	3 1000
2	Пташник	7,5 3000	3 1500	30 1500	2,2 1000	2,2 3000	5,5 1500	15 3000	0,18 3000	0,75 3000	4 1500
		0,18 1000	4 3000	30 1500	2,2 3000	3 1500	7,5 1500	18,5 1000	5,5 1000	0,5 1500	5,5 3000
		11 1000	1,1 1000	30 1000	0,55 1000	0,18 1000	0,37 1000	0,75 1000	5,5 1000	1,1 1000	3 1500
		5,5 1500	18,5 1000	4 1500	2,2 1500	2,2 3000	1,5 1500	7,5 1500	7,5 1500	1,5 1500	4 3000
3	Кормоцех	0,18 3000	4 1500	0,18 1000	5,5 1000	3 1500	7,5 1000	18,5 3000	5,5 1000	1,5 3000	5,5 1000

продовження табл. 4.1

4	Цех комбінова них кормів	22 1000	45 3000	11 3000	0,55 1000	2,2 1000	5,5 1000	11 1000	0,18 1000	0,12 1000	22 1000
		3 1500	4 1500	5,5 1500	7,5 1500	11 1500	15 1500	18,5 1500	22 1500	30 1500	37 1500
		2,2 3000	1,5 3000	1,1 3000	0,75 3000	0,5 3000	0,37 3000	0,25 3000	0,18 3000	0,12 3000	0,09 3000
5	Склад	5,5 1000	4 1000	5,5 1000	0,37 1000	1,1 1000	2,2 1000	11 1000	22 3000	0,75 3000	5,5 3000
		0,12 1500	1,1 1500	0,37 1500	0,55 1500	2,2 1500	7,5 1500	2,2 1500	4 1000	2,2 1000	5,5 1000
		0,18 3000	2,2 3000	0,09 3000	2,2 3000	11 3000	0,37 3000	4 1000	3 1500	3 1500	7,5 3000
6	Цех первин- ної обробки молока	3 1500	4 1500	5,5 1500	7,5 1500	11 1500	15 1500	18,5 1500	22 1500	30 1500	37 1500
		5,5 1000	5,5 3000	0,12 3000	4 1500	4 3000	11 1000	18,5 3000	2,2 3000	15 1000	37 3000
		0,09 1000	0,12 1000	0,18 1000	0,25 1000	0,37 1000	0,55 1000	0,75 1000	1,1 1000	1,5 1000	2,2 1000
7	Дерево- оброб- ний цех	11 3000	2,2 3000	3 3000	0,75 1000	18,5 1000	1,1 1000	4 1000	11 1000	5,5 1000	2,2 1000
		7,5 1000	4 1000	2,2 1000	1,1 3000	15 1500	0,55 1500	5,5 1500	1,5 1000	1,1 1500	1,5 1500
		5,5 1500	1,5 1500	0,75 1500	2,2 1000	3 1000	2,2 1500	7,5 1000	2,2 1000	2,2 1000	2,2 3000





Таблиця 4.2 Вибір електродвигунів за умовами навколишнього середовища

Характеристика приміщення	Найменування приміщення	Рекомендоване виконання
Сухі відносна вологість до 60% температура до 30 °С.	Інкубатори, котельні, гаражі, опалювані склади, допоміжні приміщення у майстернях	У3, IP44
Вологі відносна вологість 60...70%	Майстерні, підсобні приміщення, їдальні, котельні, кухня житла, склади без опалення, горище, підвали	У3, IP44
Вогкі відносна вологість тривало перевищує 75%	Овочесховища, цехи з переробки плодів і овочів та продуктів тваринництва і післяжнивної обробки зерна, приміщення для теплогенераторів, тваринницькі ферми і комплекси (корівники, свинарники, телятники, пташники, конюшні) з установками мікроклімату	У3, IP44
Запилені відносна вологість до 98%, температура - 40 ... +40 °С	Пункти післязбиральної обробки зерна і технічних культур, елеватори, комбікормові цехи, млини, склади цементу, зерносклади, деревообробні цеха	УПУ3, IP54
Особливо вогкі	Кормонриготувальні цехи для вологих кормів, доїльні зали, молочні, насосні, мийні, силосні й сінажні башти, парники і теплиці, сараї, зовнішні споруди, мийні відділення, молочні ферми, доїльні зали молочних відділень лазні, пральні, кормоцехи тваринницьких ферм і комплексів	У3, IP44
Особливо вогкі з хімічно активним середовищем відносна вологість 80....100%	Тваринницькі і птахівничі приміщення без мікроклімату, склади мінеральних добрив, приміщення для протруєння насіння	СУ3, IP54

Таблиця 4.3 Технічні характеристики електродвигунів серії АИР  
основного виконання ( $U_n = 380\text{ В}$ )

Тип двигунів	$P_n$ кВт	$n_n$ хв <sup>-1</sup>	$I_n$ А	ККД	$\cos\varphi$	$I_{\text{пуск}}/$ $I_{\text{ном}}$
1	2	3	4	5	6	7
$n_c = 3000\text{ хв}^{-1}$						
АИР50А2У3	0,09	2660	0,30	60	0,75	4,5
АИР50В2У3	0,12	2660	0,39	63	0,75	4,5
АИР56А2У3	0,18	2730	0,52	68	0,78	5,0
АИР56В2У3	0,25	2730	0,70	69	0,79	5,0
АИР63А2У3	0,37	2730	0,91	72	0,86	5,0
АИР63В2У3	0,55	2730	1,31	75	0,85	5,0
АИР71А2У3	0,75	2820	1,75	78,5	0,83	6,0
АИР71В2У3	1,1	2800	2,55	79	0,83	6,0
АИР80А2У3	1,5	2850	3,31	81	0,85	7,0
АИР80В2У3	2,2	2850	4,63	83	0,87	7,0
АИР90L2У3	3,0	2850	6,13	84,5	0,88	7,0
АИР100S2У3	4,0	2850	7,94	87	0,88	7,5
АИР100L2У3	5,5	2850	10,7	88	0,89	7,5
АИР112M2У3	7,5	2900	14,8	87,5	0,88	7,5
АИР132M2У3	11	2910	21,1	88	0,90	7,5
АИР160S2У3	15	2910	28,5	90	0,89	7,0
АИР160M2У3	18,5	2910	34,5	90,5	0,90	7,0
АИР180S2У3	22	2920	41,5	90,5	0,89	7,0
АИР180M2У3	30	2925	55,5	91,5	0,90	7,5
АИР200M2У3	37	2940	70,6	91,5	0,87	7,0
АИР200L2У3	45	2940	86,5	92	0,88	7,5
АИР225M2У3	55	2940	99,3	92,5	0,91	7,5
АИР250S2У3	75	2940	136	93	0,90	7,5
АИР250M2У3	90	2940	160	93	0,92	7,5
$n_c = 1500\text{ хв}^{-1}$						
АИР 50А4У3	0,06	1335	0,27	53	0,63	4,5
АИР 50В4У3	0,09	1335	0,37	57	0,65	4,5
АИР 56А4У3	0,12	1350	0,44	63	0,66	5,0
АИР56В4У3	0,18	1350	0,63	64	0,68	5,0
АИР63А4У3	0,25	1320	0,83	68	0,67	5,0
АИР 63В4У3	0,37	1320	1,18	68	0,70	5,0
АИР71А4У3	0,55	1360	1,69	70,5	0,70	5,0
АИР 71В4У3	0,75	1350	2,14	73	0,73	5,0
АИР80А4У3	1,1	1395	2,75	75	0,81	5,5
АИР80В4У3	1,5	1395	3,52	78	0,83	5,5
АИР 90L4У3	2,2	1400	5,0	81	0,83	6,5

продовження табл. 4.3.

1	2	3	4	5	6	7
АІР 100S4У3	3,0	1410	6,7	82	0,83	7,0
АІР100L4У3	4,0	1410	8,5	85	0,84	7,0
АІР 112М4У3	5,5	1430	11,4	85,5	0,86	7,0
АІР І32S4У3	7,5	1440	15,1	87,5	0,86	7,5
АІР І32М4У3	11	1450	22,0	87,5	0,87	7,5
АІР 160S4У3	15	1455	28,5	90	0,89	7,0
АІР 160М4У3	18,5	1455	34,9	90,5	0,89	7,0
АІР 180S4У3	22	1460	42,5	90,5	0,87	7,0
АІР 180М4У3	30	1470	56,9	92,0	0,87	7,0
АІР 200М4У3	37	1470	68,3	92,5	0,89	7,5
АІР200L4У3	45	1470	83,0	92,5	0,89	7,5
АІР225М4У3	55	1470	101	93,0	0,89	7,0
АІР250S4У3	75	1480	138	94,0	0,88	7,5
АІР250М4У3	90	1480	164	94,0	0,89	7,5
АІР280S4У3	110	1470	196	93,5	0,91	6,5
АІР280М4У3	132	1470	229	94,0	0,93	6,5
АІР315S4У3	160	1470	286	93,5	0,91	5,5
АІР315М4У3	200	1470	351	94	0,92	5,5
АІР355S4У3	250	1470	437	94,5	0,92	5,5
АІР355М4У3	315	1470,	550	94,5	0,92	7,0
$n_c = 1000 \text{ xg}^{-1}$						
АІР63А6У3	0,18	860	0,79	56,0	0,62	4,0
АІР63В6У3	0,25	860	1,04	59,0	0,62	4,0
АІР71А6У3	0,37	915	1,31	65,0	0,65	4,5
АІР71В6У3	0,55	915	1,74	68,5	0,70	4,5
АІР80А6У3	0,75	920	2,26	70,0	0,72	4,5
АІР80В6У3	1,1	920	3,05	74,0	0,74	4,5
АІР90L6У3	1,5	925	4,2	76,0	0,72	6,0
АІР100L6У3	2,2	945	5,6	81,0	0,74	6,0
АІР112МА6У3	3,0	950	7,1	81,5	0,75	6,0
АІР112МВ6У3	4,0	950	9,2	82,0	0,81	6,0
АІР І32S6У3	5,5	960	12,3	85,0	0,80	7,0
АІРІ32М6У3	7,5	960	16,5	85,5	0,81	7,0
АІР 160S6У3	11,0	970	22,9	88,0	0,83	6,5
АІР І60М6У3	15,0	970	30,1	88	0,85	6,5
АІР180М6У3	18,5	980	37,0	89,5	0,85	6,5
АІР 200М6У3	22	980	44,7	90	0,83	6,5
АІР 200L6У3	30	975	59,6	90	0,85	6,5
АІР225М6У3	37	980	72,7	91	0,85	6,5
АІР250S6У3	45	980	87,0	92,5	0,85	6,5
АІР 250М6У3	55	980	105	92,5	0,86	6,5

продовження табл. 4.3.

1	2	3	4	5	6	7
АИР 28056У3	75	980	137	92,5	0,90	6,5
АИР 280М6У3	90	975	163	93	0,90	6,5
АИР315S6У3	110	980	195	93	0,92	6,0
АИР315М6У3	132	980	238	93,5	0,90	6,5
АИР355S6У3	160	980	287	94	0,90	7,0
АИР355М6У3	200	980	357	94,5	0,90	7,0

Таблиця 4.4 Технічні характеристики електродвигунів серії 4АМ основного виконання ( $U_n = 380 \text{ В}$ )

Тип двигунів	$P_n$ $\text{кВт}$	$n_n$ $\text{хв}^{-1}$	$I_n$ $\text{А}$	ККД	$\cos\varphi$	$I_{\text{ниск}}/$ $I_{\text{ном}}$
1	2	3	4	5	6	7
$n_c = 3000 \text{ хв}^{-1}$						
4ААМ50А2У3	0,09	2640	0,31	60	0,75	5,0
4ААМ50В2У3	0,12	2640	0,39	63	0,75	5,0
4ААМ56А2У3	0,18	2760	0,55	66	0,76	5,0
4ААМ 56В2У3	0,25	2760	0,73	68	0,77	5,0
4ААМ 63А2У3	0,37	2750	0,94	70	0,86	5,0
4ААМ 63В2У3	0,55	2745	1,33	73	0,86	5,0
4АМ 71А2У3	0,75	2820	1,7	77	0,87	6,0
4АМ 71В2У3	1,1	2790	2,48	77,5	0,87	6,0
4АМ 80А2У3	1,5	2850	3,3	81	0,85	7,0
4АМ 80В2У3	2,2	2850	4,6	83	0,87	7,0
4АМ 90L2У3	3,0	2820	6,1	84,5	0,88	7,0
4АМ 100S2У3	4,0	2880	7,9	86,5	0,89	7,5
4АМ 100L2У3	5,5	2880	10,5	87,5	0,91	7,5
4АМ 112М2У3	7,5	2925	15,0	87,5	0,88	7,5
4АМ 132М2У3	11	2930	21,1	88	0,90	7,5
4АМ 160S2У3	15	2910	28,8	88	0,90	7,0
4АМ 160М2У3	18,5	2910	35,1	89	0,90	7,0
4АМ 180S2У3	22	2925	42,0	89,5	0,89	7,0
4АМ 180М2У3	30	2940	56,2	91	0,89	7,5
4АМ 200М2У3	37	2940	69,4	91	0,89	7,0
4АМ 200L2У 3	45	2940	84,4	91	0,89	7,5
4АМ 225М2У3	55	2940	100	91	0,92	7,5
4АМ 250S2У3	75	2940	141	91	0,89	7,5
4АМ 250М2У3	90	2940	166	92	0,90	7,5
$n_c = 1500 \text{ хв}^{-1}$						
4ААМ 50А4У3	0,06	1320	0,27	53	0,63	4,5
4ААМ 50В4У3	0,09	1320	0,37	57	0,65	4,5
4ААМ 56А4У3	0,12	1380	0,44	63	0,66	5,0
4ААМ 56В4У3	0,18	1370	0,67	64	0,68	5,0

продовження табл. 4.4.

1	2	3	4	5	6	7
4AAM 63A4Y3	0,25	1380	0,86	68	0,67	5,0
4AAM 63B4Y3	0,37	1365	1,2	68	0,70	5,0
4AM 71A4Y3	0,55	1365	1,7	70,5	0,70	5,0
4AM 71B4Y3	0,75	1365	2,2	72	0,73	5,0
4AM 80A4Y3	1,1	1395	2,75	75	0,81	5,5
4AM 80B4Y3	1,5	1395	3,6	77	0,83	5,5
4AM 90L4Y3	2,2	1410	5,0	81	0,83	6,5
4AM 100S4Y3	3,0	1410	6,7	82	0,83	7,0
4AM 100L4Y3	4,0	1410	8,6	85	0,84	7,0
4AM 112M4Y3	5,5	1425	11,5	84	0,86	7,0
4AM 132S4Y3	7,5	1455	15,1	85,5	0,86	7,5
4AM 132M4Y3	11	1455	22,0	87,5	0,87	7,5
4AM 160S4Y3	15	1460	29,1	89	0,89	7,0
4AM 160M4Y3	18,5	1470	35,5	90	0,89	7,0
4AM 180S4Y3	22	1470	41,5	90,5	0,87	7,0
4AM 180M4Y3	30	1470	56,8	91	0,87	7,0
4AM 200M4Y3	37	1470	69,0	91,5	0,89	7,5
4AM 200L4Y3	45	1470	83,3	92	0,89	7,5
4AM 225M4Y3	55	1470	102	92,5	0,89	7,0
4AM 250S4Y3	75	1470	138	93	0,88	7,5
4AM 250M4Y3	90	1480	165	93	0,89	7,5
$n_c = 1000 \text{ xg}^{-1}$						
4AAM 63A6Y3	0,18	885	0,79	56,0	0,62	4,0
4AAM 63B6Y3	0,25	890	1,05	59,0	0,62	4,0
4AM 71A6Y3	0,37	920	1,25	64,5	0,69	4,0
4AM 71B6Y3	0,55	920	1,75	67,5	0,71	4,0
4AM 80A6Y3	0,75	920	2,25	69,0	0,74	4,0
4AM 80B6Y3	1,1	920	3,05	74,0	0,74	4,0
4AM 90L6Y3	1,5	940	4,1	75,0	0,73	5,5
4AM 100L6Y3	2,2	950	5,65	81,0	0,76	5,5
4AM 112MA6Y3	3,0	950	7,4	81,0	0,81	6,0
4AM 112MB6Y3	4,0	945	9,15	82,0	0,80	6,0
4AM 132S6Y3	5,5	945	12,3	85,0	0,81	7,0
4AM 132M6Y3	7,5	960	16,5	85,5	0,82	7,0
4AM 160S6Y3	11,0	970	23,6	86,5	0,82	6,5
4AM 160M6Y3	15,0	975	31,6	88	0,85	6,5
4AM 180M6Y3	18,5	975	37,6	88	0,86	6,5
4AM 200M6Y3	22	975	43,2	90	0,86	6,5
4AM 200L6Y3	30	980	58,6	90,5	0,86	6,5
4AM 225M6Y3	37	980	72,0	91	0,86	6,5
4AM 250S6Y3	45	985	88,0	91,5	0,85	6,5
4AM 250M6Y3	55	985	107	92	0,85	6,5

## **4.2 Методичні рекомендації по виконанню задачі 1.**

### **4.2.1. Розрахунок і вибір апаратури керування та захисту**

Керування електроспоживачами (електроприводами, електронагрівними пристроями, освітлювальними і опромінювальними установками) і захист їх від аварійних режимів роботи здійснюється електротехнічними пристроями, які називаються апаратами керування і захисту.

Для збільшення строку служби електроспоживачів потрібно технічно грамотно вибрати необхідну апаратуру керування і захисту силових кіл розробленої принципіальної електричної схеми керування. Вибрати апарат – це означає відібрати з великої кількості однотипних апаратів найбільш досконалий, дешевий апарат, технічні дані якого відповідають умовам вибору, вимогам техніки безпеки і протипожежним правилам.

Вибирають апарати за величиною напруги, родом і величиною струму, кліматичним виконанням, умовами захисту від впливу навколишнього середовища, його відповідності технологічним вимогам та іншими показниками.

При виборі необхідно враховувати також характер і режим роботи електроприймачів.

При виборі апаратів керування і захисту доцільно користуватись структурами умовних позначень апаратів, вибираючи з них те, що потрібно для конкретного застосування апарату.

### **4.2.2 Вибір рубильників і перемикачів.**

Для ручного керування електроустановками у сільському господарстві використовують рубильники і перемикачі серії Р і РП, призначені для неавтоматичної комутації силових електричних кіл та розподілу електричної енергії. Пакетно-кулачкові перемикачі серії ПКП, пакетні вимикачі і перемикачі серії ПВ і ПП, використовуються як ввідні вимикачі, перемикачі головних кіл і як пускові апарати для асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором. Пускачі натискні вібростійкі серії ПНВ і ПНВС, призначені для пуску і зупинки трифазних і відповідно однофазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.

Вибираємо апарати ручного керування за умовами:

а) за номінальною напругою

$$U_{a. \text{ ном}} \geq U_{\text{мер. ном}} ;$$

де  $U_{a. ном}$  – номінальна напруга апарата,  $B$ ;

$U_{мер. ном}$  – напруга мережі,  $B$ ;

б) за номінальним струмом:

$$I_{a. ном} \geq I_{дов. ном};$$

де  $I_{a. ном}$  – номінальна сила струму апарата,  $A$ ;

$I_{дов. ном}$  – максимальний тривалий робочий струм електроустановки (електродвигуна),  $A$ ;

Якщо апарат ручного керування призначений для безпосереднього вмикання чи вимикання електричних кіл під навантаженням, то необхідно перевірити комутаційну здатність апарата. Комутаційні струми вказані в технічній характеристиці апарата.

Вибрати рубильник  $QS$ , що використовується як ввідний комутаційний апарат прямого пуску двигуна  $4AM180M2Y3$  ( $P_n = 30кВт$ ,  $I_p = 56,2A$ ).

Вибираємо рубильник  $QS$  за умовами:

за номінальною напругою:

$$U_{a. ном} \geq U_{мер. ном};$$

$$U_{a. ном} \geq 380B;$$

де  $U_{a. ном}$  – номінальна напруга апарата,  $B$ ;

$U_{мер. ном}$  – напруга мережі,  $B$ ;

за номінальним струмом

$$I_{a. ном} \geq I_{дов. ном};$$

$$I_{a. ном} \geq 56,2;$$

де  $I_{a. ном}$  – номінальна сила струму апарата,  $A$ ;

$I_{дов. ном}$  – максимальний тривалий робочий струм електродвигуна  $M$ ,  $A$ .

З таблиці 4.5 та іншої літератури приймаємо рубильник серії РП-3032000УЗ, що може використовуватися для ручної комутації без навантаження в мережах з номінальною напругою до  $660 B$  змінного струму частотою  $50 Гц$ . Даний рубильник з боковою незнімною рукояткою,  $I_n=80A$ , триполюсний, без дугогасильних камер, без додаткових контактів, з виконанням за ступенем захисту IP00.

Таблиця 4.5 Технічна характеристика рубильників і перемикачів

Типи	Номинальний струм, А	Комутаційна здатність при 380 В				Примітки	
		Вмикання		Вимикання			
		$I_k/I_n$	$\cos\varphi$	$I_k/I_n$	$\cos\varphi$		
Рубильники серії Р та РП	Ступінь захисту ІР00					3 дугогасильними камерами (д. к.)	
	100	1,0	0,35	1,0	0,35	із д. к.	
		0,3	0,80	0,3	0,80	без д. к.	
	250	1,0	0,55	1,0	0,65	із д. к.	
		0,3	0,80	0,3	0,80	без д. к.	
	400	1,0	0,95	1,0	0,95	із д. к.	
		0,1	0,95	0,1	0,95	без д. к.	
	630	1,0	0,95	1,0	0,95	із д.к.	
		0,1	0,95	0,1	0,95	без д. к.	
Перемикачі пакетно-кулачкові серії ПКП:						Кількість комутуваних кіл	
ПКП-25	25	10	0,35	8	0,35	1-12	
ПКП-40	40	7	0,35	7	0,35	1-6	
ПКП-63	63	9	0,35	9	0,35	1-16	
ПКП-100	100	5,7	0,35	5,7	0,35	1-6	
ПКП-160	160	3,5	0,35	3,5	0,35	1-3	
Перемикачі та вимикачі пакетні серії ПП і ПВ:	при 220 В:	при 380 В:					Кількість комутуваних кіл
ПВ-3-10	10	6	1,0	0,3-0,8	1,0	0,3-0,8	1-4
ПВ-3-25	25	16					
ПВ-3-63	63	40					
ПВ-3-100	100	63					

Розрахунковий струм для вибору рубильника при роботі групи двигунів:

$$I_{в.роз} = \kappa_0 \sum_{i=1}^{n-1} I_{\text{дв.ном}} \kappa_3 + \frac{I_{\text{дв.ном.нб}} \kappa_{i.нб}}{\alpha_{нб}}$$

де  $I_{\text{дв.ном.нб}}$  і  $\kappa_{i.нб}$  - номінальний струм, А, і кратність пускового струму двигуна, який має найбільший пусковий струм.



$$K_0 \sum_1^{n-1} I_{I_{\text{дв.ном}}} K_3 - \text{сумарний робочий струм одночасно}$$

працюючих електродвигунів, за винятком струму двигуна, який має найбільший пусковий струм,  $A$ ;

$K_0$  - коефіцієнт одночасності роботи усіх електродвигунів, що живляться від лінії електропередачі, для захисту якої вибирають запобіжники (приймаємо  $K_0=1$ );

$K_3$  і  $I_{\text{дв.ном}}$  - коефіцієнт завантаження (приймаємо  $K_3=1$ ) і номінальний струм кожного електродвигуна,  $A$ ;

### 4.2.3 Вибір запобіжників.

Плавкі запобіжники, призначені для захисту електродвигунів від коротких замикань, треба вибирати так, щоб напруга, на яку розраховані запобіжники  $U_3$ , була не меншою від номінальної напруги електромережі  $U_{\text{мер. ном}}$ , в якій вони будуть працювати, номінальний струм плавких вставок запобіжників  $I_{\text{в. ном}}$  був не менший від їх розрахункового струму  $I_{\text{в. роз}}$ , а номінальний струм запобіжників  $I_{\text{з. ном}}$  був не меншим від номінального струму вибраних плавких вставок, тобто повинні виконуватися умови:

$$U_3 \geq U_{\text{мер. ном}} ;$$

$$I_{\text{в.ном}} \geq I_{\text{в. роз}} ;$$

$$I_{\text{з. ном}} \geq I_{\text{в. ном}}$$

Розрахунковий струм плавких вставок запобіжників, призначених для захисту одного двигуна, визначають за формулою:

$$I_{\text{в.роз}} = \frac{I_{\text{дв.ном}} K_i}{\alpha}$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт, який враховує умови пуску двигуна. За нормальних (легких) умов пуску (нечасті пуски, тривалість пуску не більше 10с)  $\alpha = 2,5$ , а при важких -  $\alpha = 2,0 \dots 1,6$ .

Розрахунковий струм плавких вставок запобіжників, призначених для захисту групи двигунів:

$$I_{в.роз} = \kappa_0 \sum_1^{n-1} I_{\text{дв.ном}} \kappa_3 + \frac{I_{\text{дв.ном.нб}} \kappa_{i,\text{нб}}}{\alpha_{\text{нб}}}$$

*Приклад.* Вибрати запобіжники *FU1-3* для захисту електродвигуна *4AM180M2УЗ* ( $P_n = 30\text{кВт}$ ,  $I_n = 56,2\text{А}$ ,  $\kappa_i=7,5$ ), умови пуску легкі.

Визначаємо розрахунковий струм плавких вставок за формулою

$$I_{в.роз} = \frac{I_{\text{дв.ном}} \kappa_i}{\alpha} = \frac{56,2 \cdot 7,5}{2,5} = 168,6\text{А}$$

де  $I_{\text{дв.ном}}$  - номінальний струм електродвигуна,  $\text{А}$ ;

$\kappa_i$  - кратність пускового струму;

$\alpha$  - коефіцієнт, що враховує умови пуску двигуна.

Вибираємо запобіжники *FU1-3*:

- за номінальною напругою:

$$U_3 \geq U_{\text{мер. ном}} ;$$

$$U_3 \geq 380\text{В} ;$$

де  $U_3$  - номінальна напруга запобіжника,  $\text{В}$ ;

$U_{\text{мер. ном}}$  - напруга мережі, захищаємо запобіжниками,  $\text{В}$ .

- за номінальним струмом запобіжника:

$$I_{3. \text{ ном}} \geq I_{в. \text{ ном}}$$

де  $I_{3. \text{ ном}}$  - номінальний струм запобіжника,  $\text{А}$ ;

$I_{в. \text{ ном}}$  - номінальний струм плавкої вставки,  $\text{А}$ ;

- за номінальним струмом плавкої вставки:

$$I_{в. \text{ ном}} \geq I_{в. \text{ роз}} ;$$

$$I_{в. \text{ ном}} \geq 168,6\text{А} ;$$

де  $I_{в. \text{ роз}}$  - розрахунковий струм плавкої вставки,  $\text{А}$ .

Для захисту електродвигуна від струмів короткого замикання до вибору приймаємо запобіжних серії ПН2-250-11УЗ з плавкою вставкою на  $200\text{А}$ , який використовується в колах змінного струму напругою до  $380\text{ В}$ . Основа запобіжника розрахована на номінальну силу струму  $250\text{ А}$ .

Таблиця 4.6 Технічна характеристика запобіжників

Тип	Виконання	Номинальні величини		
		напруга, В	сила струму ножів, А	номинальний струм плавкої вставки
ПРС	Пробковий різьбовий	380	6 25 63 100	1; 2; 4; 6 4; 6; 10; 16; 20; 25 20; 25; 40; 63 40; 63; 80; 100
ПН2	Розбірний з наповнювачем	380	100 250 400 600	30; 40; 50; 60; 80; 100 80; 100; 120; 150; 200; 250 200; 250; 300; 400 300; 400; 500; 600
ПП31-29	Розбірний показуючий	380	63	4; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63
ПП31-33		380	160	50; 63; 80; 100; 125; 160
ПП31-35		380	250	125; 160; 200; 250
ПП31-39		380	630	200; 250; 320; 400; 500;
ПП31-41		380	1000	500; 630; 800; 1000

#### 4.2.4 Вибір автоматичного вимикача.

Автоматичний вимикач, необхідний для захисту електродвигунів, треба вибирати так, щоб його виконання за родом струму, кількістю полюсів, видом розчіплювачів, захищеністю від впливу оточуючого середовища та іншими даними відповідало вимогам двигунів та умовам експлуатації їх. При цьому номінальна напруга вибраного вимикача  $U_{a,ном}$  повинна дорівнювати або перевищувати номінальну напругу електромережі  $U_{мер,ном}$ , у якій він буде працювати, а номінальний струм головного вимикача  $I_{a,ном}$  та номінальний струм його теплових  $I_{т,ном}$  і електромагнітних  $I_{е,ном}$  нам розчіплювачів повинні дорівнювати або трохи перевищувати номінальний струм двигуна  $I_{дв,ном}$ . Отже, повинні виконуватись такі умови:

$$U_{a, ном} \geq U_{мер. ном} ;$$

$$I_{a,ном} \geq I_{дв. ном} ;$$

$$I_{т. ном} = I_{е. ном} \geq I_{дв. ном}$$

Для забезпечення надійного захисту двигуна від перевантаження після вибору вимикача (під час налагодження) на шкалі установок треба виставити необхідну уставку.

Щоб забезпечити надійний захист двигуна від струмів коротких замикань і не допустити вимикання його під час пуску, уставку за струмом спрацювання електромагнітних розчіплювачів треба вибрати, виходячи з умови

$$I_{y.e} \geq K_{зан} \cdot K_{p,y} \cdot K_{p,n} \cdot K_i \cdot I_{\text{дв. ном}}$$

де  $K_{зан}$  - коефіцієнт запасу, який враховує коливання напруги (беруть  $K_{зан} = 1,1$ );

$K_{p,y}$  - коефіцієнт, що враховує неточність (розкид) уставки за струмом спрацювання електромагнітних розчіплювачів (приймають за даними технічної характеристики автоматичного вимикача);

$K_{p,n}$  - коефіцієнт, який враховує можливе відхилення пускового струму ( $K_{p,n} = 1,2$ );

$K_i$  - каталожна кратність пускового струму двигуна;

$I_{\text{дв. ном}}$  - номінальний струм двигуна.

У тих випадках, коли один автоматичний вимикач застосовують для захисту від струмів короткого замикання кількох електродвигунів, його вибирають за такими умовами:

$$U_{a, \text{ ном}} \geq U_{\text{мер. ном}} ;$$

$$I_{a, \text{ ном}} \geq \sum_1^n I_{\text{дв. ном}} ;$$

$$I_{e, \text{ ном}} \geq \sum_1^n I_{\text{дв. ном}} ;$$

$$I_{y.e} \geq K_{зан} \cdot K_{p,y} \cdot \sum_1^n I_{\text{дв. ном}} + I_{\text{дв. ном. нб}} (K_{p,n} \cdot K_{i, \text{ нб}} - 1)$$

де  $\sum_1^n I_{\text{дв. ном}}$  - сума номінальних струмів одночасно працюючих електродвигунів, А;

$I_{\text{дв. ном. нб}}$  - та  $K_{i, \text{ нб}}$  - номінальний струм, А та кратність пускового струму двигуна, який має найбільший пусковий струм.

*Приклад.* Вибрати автоматичний вимикач *QF* для захисту електродвигуна від струмів короткого замикання та перевантаження. В

схемі використано електродвигун електродвигуна 4AM180M2Y3 ( $P_n = 30\text{кВт}$ ,  $I_n = 56,2\text{А}$ ,  $\kappa_i=7,5$ ).

Визначаємо струми електродвигуна.

Для окремого електродвигуна за розрахунковий струм, приймаємо його номінальний струм, тобто  $I_p = I_{\text{дв.ном}}$ , а максимальний короткочасний струм визначаємо за формулою

$$I_{\text{макс}} = K_i I_{\text{дв. ном}} = 7,5 \cdot 56,2 = 421,5\text{А}$$

де  $K_i$  - кратність пускового струму електродвигуна;

$I_{\text{дв. ном}}$  - номінальний струм електродвигуна, А.

Вибираємо автоматичний вимикач QF за умовами:

- за номінальною напругою

$$U_{\text{а. ном}} \geq U_{\text{мер. ном}} ;$$

$$U_{\text{а. ном}} \geq 380\text{В};$$

де  $U_{\text{а. ном}}$  - номінальна напруга автоматичного вимикача, В;

$U_{\text{мер.ном}}$ -напруга мережі, захищеної автоматичним вимикачем, В.

- за номінальним струмом автомата

$$I_{\text{а.ном}} \geq I_{\text{дв. ном}} ;$$

$$I_{\text{а.ном}} \geq 56,2\text{А} ;$$

де  $I_{\text{а.ном}}$  - номінальний струм автоматичного вимикача, А;

$I_p$  - розрахунковий струм електродвигуна, А,

в) за номінальним струмом розчіплювача:

$$I_{\text{ном.розч}} \geq I_{\text{дв. ном}}$$

де  $I_{\text{ном.розч}}$  - номінальний струм розчіплювача, А;

$I_p$  - розрахунковий струм електродвигуна, А.

Для захисту електродвигуна від струмів коротких замикань та перевантажень приймаємо автоматичний вимикач серії ВА51-31-34, розрахований для роботи в мережах змінного струму напругою до 660 В, з номінальним струмом  $I_{\text{а.ном}} = 100\text{А}$ , з номінальним струмом розчіплювача  $I_{\text{ном.розч}}$  триполюсний, з електромагнітним та тепловим розчіплювачем.

Визначаємо струм уставки електромагнітного розчіплювача

$$I_{\text{уст.е}} \geq K_{\text{не}} I_{\text{макс}} = 1,25 \cdot 421,5 = 526,9\text{А}$$

де  $I_{уст.е}$  - струм уставки електромагнітного розчіплювача, А;  
 $K_{не}$  - коефіцієнт надійності, враховуючий неточність по струму спрацювання електромагнітного розчіплювача (приймаємо 1,25);  
 $I_{макс}$  - максимальний короточасний струм електродвигуна (пусковий струм), А.

Приймаємо уставку по струму спрацювання в зоні короткого замикання  $I_{уст.е} = 10 I_{ном,розч}$ , тобто  $I_{уст.е} = 10 \cdot 80 = 800$  А.

Визначаємо струм уставки теплового розчіплювача:

$$I_{уст.т} \geq K_{нт} I_p = 1,25 \cdot 56,2 = 67,4 \text{ А}$$

де  $I_{уст.т}$  - струм уставки теплового розчіплювача, А;  
 $K_{нт}$  - коефіцієнт надійності, враховуючий неточність по струму спрацювання теплового розчіплювача (приймаємо 1,1... 1,3);  
 $I_p$  - розрахунковий струм електродвигуна, А.

Тепловий розчіплювач автоматичного вимикача має діапазон регулювання струму неспрацювання в межах  $(0,8-1) I_{ном,розч}$  тобто  $(0,8-1)80 = 64-80$  А. Під час наладки уставку теплового розчіплювача необхідно налагодити на струм 67,4 А.

Таблиця 4.7 Технічні характеристики автоматичних вимикачів серії ВА51

Типи вимикачів	Номінальна сила струму, А		Гранична комутаційна здатність, кА (діюче значення) при 380 В	Кількість полюсів	Сила струму відсічки, кратна номінальному струму розчіплювачів
	вимикача	розчіплювачів			
ВА51-25-84	25	6,3; 8; 10; 12,5 16; 20; 25	2(5) 2,5(5) 3,8(5)	2	$10I_{нр}$
ВА51-25-34	25	Те ж	те ж	3	$(7,10)I_{нр}$
ВА51Г-25-34	25	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0 1,25; 1,6 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8 10; 12,5 16; 20; 25	3(5) 1,5(5) 2,0(5) 3,0(5)	3	$10I_{нр}$
ВА51-29-14	63	6,3; 8; 10; 12,5 16 20; 25 31,5; 40; 50; 63	1,5 3,0 4,0 8,0	1	$(3,7,10)I_{нр}$

продовження табл. 4.7

BA51-31-24	100	6,3; 8; 10; 12,5 16 20; 25; 31,5; 40; 50; 63 80; 100	2(5) 2,5(6) 3,5(6)	2	(3,7,10)I <sub>нр</sub>
BA51-31-34	100	6,3; 8; 10; 12,5 16 20; 25; 31,5; 40 50; 63 80; 100	2(5) 2,5(5) 3,8(12) 5(12) 6(12) 7(12)	3	(3,7,10)I <sub>нр</sub>
BA51Г-31-34	100	15; 20; 25; 31,5; 40 50; 63 80; 100	3,6(12) 6(12) 7(12)	3	14I <sub>нр</sub>
BA51-33-24	160	80; 100; 125; 160	12,5	2	10I <sub>нр</sub>
BA51-33-34	160	80; 100; 125; 160	12,5	3	10I <sub>нр</sub>
BA51Г-33-34	160	80; 100; 125; 160	12,5	3	14I <sub>нр</sub>
BA51-35-34	250	160; 200; 250	15	3	12I <sub>нр</sub>
BA51-37-34	400	250; 320; 400	25	3	10I <sub>нр</sub>
BA51-39-34	630	400; 500; 630	35	3	12I <sub>нр</sub>

#### 4.2.5 Вибір електромагнітних пускачів

Автоматизоване та автоматичне керування електроустановками здійснюють за допомогою електромагнітних пускачів, контакторів. У сільськогосподарських електроустановках рекомендується застосовувати: електромагнітні пускачі серії ПМА, ПМЛ, ПБТ які призначені для дистанційного пуску безпосереднім вмиканням в електромережу і зупинки асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором та інших електроприймачів, а при наявності теплових стумових реле вони захищають також електродвигуни від перевантажень; контактори серії МК і КМИ застосовують для замикання і розмикання силових кіл установок з великими струмами навантаження [3,10].

Електромагнітні пускачі вибирають:

1. За призначенням (реверсивний, нереверсивний, для пуску асинхронних короткозамкнених двигунів з перемиканням обмоток статора з "зірки" на "трикутник") - залежно від режиму роботи і способу пуску двигуна.

2. За конструктивним виконанням (з кнопками керування, без кнопок, з сигнальною лампою, без лампи тощо) залежно від місця встановлення (окремо, в комплектному пристрої) та необхідності в сигналізації.

3. За наявністю теплових реле - залежно від потреби в тепловому захисті двигуна.

4. За захищеністю від впливу навколишнього середовища, кліматичного виконання і категорією розміщення - відповідно до умов, в яких він буде експлуатуватися. Пускачі, які встановлюються в оболонках комплектних пристроїв керування, повинні мати ступінь захисту IP00.

5. За номінальною робочою напругою - так, щоб номінальна робоча напруга пускача  $U_{ном.р}$  була не меншою від напруги електромережі  $U_{мер}$ , в якій він буде працювати, тобто повинна виконуватися умова:

$$U_{ном.р} > U_{мер}.$$

де  $U_{ном.р}$  - номінальна напруга апарата, В;

$U_{мер}$  - напруга мережі, В;

6. За величиною ( номінальним робочим струмом ) - відповідно до номінального струму електродвигуна, виходячи з умови:

$$I_{ном.р} > I_{дв.ном}.$$

де  $I_{ном.р}$  - номінальна сила струму апарата, А;

$I_{дв.ном}$  - максимальний тривалий робочий струм електроустановки, А;

7. За умовами комутації (при категорії застосування А3 і А4):

$$6I_{ном.р} > I_{дв.ном}.$$

8. За напругою втягувальної котушки пускача - відповідно до напруги кола керування , виходячи з умови:

$$U_{ном. кот} > U_{кер}.$$

де  $U_{кот.ном}$  – номінальна напруга котушки, В;

$U_{кер}$  – напруга кола керування, В;

9. За кількістю контактів допоміжного кола - відповідно до кількості їх, зазначеній на принципіальній електричній схемі. (При недостатній кількості контактів допоміжного кола необхідно вибрати контактну приставку ПКЛ).

*Приклад.* Вибрати електромагнітний пускач КМ, що



використовується для прямого пуску електродвигуна 4AM180M2У3 ( $P_n = 30\text{кВт}$ ,  $I_n = 56,2\text{А}$ ,  $\kappa_i=7,5$ ).

Вибираємо електромагнітний пускач КМ за умовами:

- за номінальною напругою:

$$U_{\text{ном.р}} > U_{\text{мер.}}$$

$$U_{\text{ном.р}} > 380\text{В.}$$

- за номінальним струмом:

$$I_{\text{ном.р}} > I_{\text{дв.ном.}}$$

$$I_{\text{ном.р}} > 56,2\text{А.}$$

- за номінальною напругою та родом струму котушки:

$$U_{\text{ном. кот}} > U_{\text{кер.}}$$

$$U_{\text{ном. кот}} > 220\text{В.}$$

- відповідність наявних контактів" принципівій електричній схемі. Принципова електрична схема вимагає від електромагнітного пускача  $I_3$ , додатковий контакт.

З таблиці 4.8 приймаємо електромагнітний пускач серії ПМЛ - 4200О4А - пускач четвертої величини з  $I_{\text{ном.р}}=63\text{А}$  при напрузі  $380\text{В}$ , розрахований для роботи при напрузі до  $660\text{ В}$ , нереверсивний з тепловим реле, з виконанням за ступенем захисту IP00, без кнопок, з номінальною напругою втягувальної котушки  $220\text{ В}$  (змінний струм), з  $I_3 + I_P$  допоміжними контактами.

Таблиця 4.8 Технічні характеристики електромагнітних пускачів ПМЛ.

Номінальна сила струму, А	Кількість контактів	Величини пускачів	Магнітні пускачі типу ПМЛ				
			IP 00	IP 54			
			без кнопок "Пуск" і "Стоп" та без теплових реле	Номінальний робочий струм, А	без кнопок "Пуск" і стоп та теплових реле	з кнопками "Пуск" і "Стоп" та тепловими реле	з кнопками "Пуск" і "Стоп", сигнальними лампами та тепловими реле
1	2	3	4	5	6	7	8
нереверсивні							
10	13	1	ПМЛ-110004	10	ПМЛ-121002	ПМЛ-122002	ПМЛ-123002

продовження табл. 4.7.

10	1p	1	ПМЛ-110104	-	-	-	-
25	1з	2	ПМЛ-210004	22	ПМЛ-221002	ПМЛ-222002	ПМЛ-223002
25	1p	2	ПМЛ-210104	-	-	-	-
40	1з+1p	3	ПМЛ-310004	36	ПМЛ-321002	ПМЛ-322002	ПМЛ-323002
63	1з+1p	4	ПМЛ-410004	60	ПМЛ-421002	ПМЛ-422002	ПМЛ-423002
80	1з+1p	5	ПМЛ-510004	80	ПМЛ-521002	-	-
80	2з+2p	5	ПМЛ-510104	80	ПМЛ-521102	-	-
80	3з+3p	5	ПМЛ-510204	80	ПМЛ-521202	-	-
80	3з+1p	5	ПМЛ-510304	80	ПМЛ-521302	-	-
80	5з+1p	5	ПМЛ-510404	80	ПМЛ-521402	-	-
125	1з+1p	6	ПМЛ-610004	100	ПМЛ-621002	-	-
125	2з+2p	6	ПМЛ-610104	100	ПМЛ-621102	-	-
125	3з+3p	6	ПМЛ-610204	100	ПМЛ-621202	-	-
125	3з+1p	6	ПМЛ-610304	100	ПМЛ-621402	-	-
125	5з+1p	6	ПМЛ-610404	100	ПМЛ-621402	-	-
200	1з+1p	7	ПМЛ-710004	160	ПМЛ-721002	-	-
200	2з+2p	7	ПМЛ-710Ю4	160	ПМЛ-721102	-	-
200	3з+3p	7	ПМЛ-710304	160	ПМЛ-721202	-	-
200	3з+1p	7	ПМЛ-710304	160	ПМЛ-721302	-	-
200	5з+1p	7	ПМЛ-710304	160	ПМЛ-721402	-	-

Таблиця 4.9 Технічні характеристики електромагнітних пускатів ПМ.

Тип	Номинальний струм, А				Потужність трифазних двигунів АСЗ, кВт				Номинальний струм, А	Контакти	
	АСЗ	АС4	220/230В	380/400В	415В	440В	500В	660/690В			
ПМ1-09	9	3,5	2,2	4	4	4	5,5	5,5	20	3P+NO 3P+NC	
ПМ1-12	12	5	3	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5	20		
ПМ1-18	18	7,7	4	7,5	9	9	10	10	32		
ПМ2-25	25	8,5	5,5	11	11	11	15	15	40		
ПМ2-32	32	12	7,5	15	15	15	18,5	18,5	50	3P+NO+NC	
ПМ3-40	40	18,5	11	18,5	22	22	22	30	60		
ПМ3-50	50	24	15	22	25	30	30	33	80		
ПМ4-65	65	28	18,5	30	37	37	37	37	80		
ПМ4-80	80	37	22	37	45	45	55	45	125	3P+NO+NC	
ПМ4-95	95	44	25	45	45	45	55	45	125		

#### 4.2.6 Вибір електротеплових реле

Теплові струмові реле призначені для захисту трифазних, асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором від струмів перевантаження недопустимої тривалості, в тому числі від перевантажень, що виникають при обриві однієї з фаз. Реле мають обмежену термічну стійкість при наскрізних струмах короткого замикання. Тому теплові струмові реле застосовують лише спільно із захисними апаратами, які захищають електроустановку від струмів короткого замикання. В сільськогосподарських електроустановках використовують теплові струмові реле типу ТРН, РТЛ, РТТ. Технічна характеристика теплових струмових реле наведена в таблиці 4.10-4.13.

Серію і тип реле, необхідного для захисту електродвигуна від перевантаження, вибирають відповідно до серії і типу магнітного пускача, в який воно вмонтовується, або залежно від характеристики станції керування електроустановкою, в якій реле буде встановлено.

Вибирають теплові струмові реле за умовами:

- за номінальною напругою

$$U_{тр.ном} \geq U_{мер},$$

де  $U_{тр.ном}$  - номінальна напруга теплового струмового реле, В;

$U_{мер}$  - напруга мережі, В;

- за номінальним струмом теплового реле:

$$I_{тр.ном} \geq I_{дв.ном},$$

де  $I_{тр.ном}$  - номінальний струм теплового реле, А;

$I_{дв.ном}$  - номінальний струм електродвигуна, А;

- за номінальним струмом нагрівного елемента

$$I_{н.е} \geq I_{дв. ном}$$

де  $I_{не}$  - номінальний струм нагрівного елемента теплового реле, А;

$I_{дв. ном}$  - номінальний струм електродвигуна, А.

Тепловий елемент реле вибирають так, щоб його номінальний струм  $I_{н.е}$  якомога менше відрізнявся від тривалого робочого струму електроустановки (номінального струму електродвигуна).

Після вибору реле (під час налагодження) регулятор уставки за струмом неспрацювання потрібно поставити в положення, при якому струм уставки дорівнює номінальному струму двигуна:

$$I_{уст} \geq I_{дв. ном.}$$

*Приклад.* Вибрати теплове струмове реле КК (враховуючи попередній вибір електромагнітного пускача) для електродвигуна 4АМ180М2У3 ( $P_n = 30\text{кВт}$ ,  $I_n = 56,2\text{А}$ ,  $\kappa_i=7,5$ ).

Вибираємо теплове струмове реле за умовами:

- за номінальною напругою:

$$\begin{aligned} U_{тр.ном} &\geq U_{мер}, \\ U_{тр.ном} &\geq 380\text{В}, \end{aligned}$$

- за номінальним струмом теплового реле:

$$\begin{aligned} I_{тр.ном} &\geq I_{дв.ном}, \\ I_{тр.ном} &\geq 56,2\text{А}, \end{aligned}$$

- за номінальним струмом нагрівного елемента:

$$\begin{aligned} I_{н.е} &\geq I_{дв. ном}, \\ I_{н.е} &= 56,2\text{А} \end{aligned}$$

Вибираємо теплове струмове реле РТЛ-2059О4 з номінальною напругою 660В, струмом реле 80А, номінальним струмом нагрівного елемента 64А. Теплове реле з номінальним струмом нагрівного елемента  $I_{не}=64\text{А}$ , має діапазон регулювання номінального струму неспрацювання 47...64А. Під час наладки регулятор уставки струму неспрацювання реле треба поставити в положення, при якому  $I_{уст} = I_{дв.ном}$  тобто 56,2 А.

Таблиця 4.10 Технічні характеристики теплових струмових реле РТЛ

Тип реле	Номінальний струм реле, А	Діапазон регулювання номінального струму неспрацювання при +40 °С, А	Максимальний струм тривалого режиму при +40°С, А
РТЛ-1001 О4	25	0,1...0,17	0,17
РТЛ-1002 О4	25	0,16...0,26	0,26
РТЛ-1003 О4	25	0,24...0,4	0,4
РТЛ-1004 О4	25	0,38...0,65	0,65
РТЛ-1005 О4	25	0,61...1,0	1,0
РТЛ-1006 О4	25	0,95...1,6	1,6
РТЛ-1007 О4	25	1,5...2,6	2,6
РТЛ-1008 О4	25	2,4...4,0	4,0

продовження табл. 4.10.

РТЛ-1010 О4	25	3,8...6,0	6,0
РТЛ-1012 О4	25	5,5...8,0	8,0
РТЛ-1014 О4	25	7,0...10,0	10,0
РТЛ-1016 О4	25	9,5...14,0	14,0
РТЛ-1021 О4	25	13...19,0	19,0
РТЛ-1022 О4	25	18...25	25
РТЛ-2053 О4	80	23...32	32
РТЛ-2055 О4	80	30...41	41
РТЛ-2057 О4	80	38...52	52
РТЛ-2059 О4	80	47...64	64
РТЛ-2061 О4	80	54...74	74
РТЛ-2063 О4	80	63...86	86
РТЛ-3105 О4	200	75...105	105
РТЛ-3125 О4	200	90...125	125
РТЛ-3160 О4	200	115...160	160
РТЛ-3200 О4	200	145...200	200

Таблиця 4.11 Технічні характеристики теплових струмових реле ТРН.

Тип реле	Номинальний струм, А	Номинальні струми нагрівальних елементів, А	Кількість полюсів	Діапазон регулювання номінального струму неспрацювання при +40 °С, А	Вид теплових елементів
ТРН-10А	4	0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2	2	0,8...1,25	Незмінні
ТРН-10	10	0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8; 10	2	0,75...1,25 0,75...1	Змінні
ТРН-25	25	5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	2	0,75...1,25 0,75...1	Змінні
ТРН-40	40	12,5; 16; 20; 25; 32 40	2	0,75...1,25 0,75...1	Змінні
ТРН-60	60	20; 25; 32; 40; 50; 60	1	0,75...1,25	Змінні
ТРН-155	110	50; 60; 80; 100; 120	1	0,75...1,25	Змінні
ТРН-155	160	100; 120; 150	1	0,75...1,25	Змінні

Таблиця 4.12 Технічні характеристики теплових струмових реле РТТ

Номінальні сили струму неспрацювання, А	Діапазон регулювання номінального струму неспрацювання при +40 °С, А	Номінальні сили струму неспрацювання, А	Діапазон регулювання номінального струму неспрацювання при +40 °С, А
<i>РТТ-0, I<sub>н</sub> = 10А</i>		2	1,7 – 2,3
0,2	0,17 – 0,23	2,5	2,1 – 2,9
0,25	0,21 – 0,29	3,2	2,7 – 3,7
0,32	0,27 – 0,37	4	3,4 – 4,6
0,4	0,34 – 0,36	5	4,25 – 5,75
0,5	0,43 – 0,58	6,3	5,35 – 7,23
0,63	0,54 – 0,72	8	6,8 – 9,2
0,8	0,68 – 0,92	10	8,5 – 11,5
1	0,85 – 1,1	12,5	10,6 – 14,3
1,25	1,1 – 1,4	16	13,6 – 18,4
1,6	1,36 – 1,8	20	17,0 – 23,0
2	1,7 – 2,3	25	21,0 – 25,0
2,5	2,1 – 2,9	<i>РТТ-2, I<sub>н</sub> = 63А</i>	
3,2	2,7 – 3,7	10	8,5 – 11,5
4	3,4 – 4,6	12,5	10,6 – 11,5
5	4,25 – 5,75	16	13,6 – 18,4
6,3	5,35 – 7,23	20	17,0 – 23,0
8	6,8 – 9,2	25	21,0 – 28,7
10	8,5 – 10	32	27,2 – 36,8
<i>РТТ-1, I<sub>н</sub> = 25А</i>		40	34,0 – 46,0
0,2	0,17 – 0,23	50	42,5 – 57,5
0,25	0,21 – 0,29	63	53,5 – 63,0
0,32	0,27 – 0,37	<i>РТТ-3, I<sub>н</sub> = 160А</i>	
0,4	0,34 – 0,36	50	42,5 – 57,5
0,5	0,43 – 0,58	63	53,5 – 72,3
0,63	0,54 – 0,72	80	68,0 – 92,0
0,8	0,68 – 0,92	100	85,0 – 115
1	0,85 – 1,15	125	106 – 143
1,25	1,1 – 1,4	160	136 – 160
1,6	1,36 – 1,8		

Таблиця 4.13 Технічні характеристики електротеплових реле РТИ і РТЛ

РТИ			Втрати в одному полюсі, Вт	Потужність електродвигуна, який захищається, кВт		
Габарити реле за струмом, А	Код виконання	Межі регулювання, А		230В	400В	660В
25	1301	0,1-0,16	2,15			
	1302	0,16-0,25	2,25			
	1303	0,25-0,4	2,05			
	1304	0,4-0,63	1,99			0,37
25	1305	0,63-1,0	2,0			0,75
	1306	1,0-1,6	2,0		0,37	1,1
	1307	1,6-2,5	1,8	0,37	0,75	1,5
	1308	2,5-4,0	1,87	0,75	1,5	3,0
	1310	4,0-6,0	1,84	1,1	2,2	4,0
	1312	5,5-8,0	1,68	1,8	3,0	5,5
	1314	7,0-10,0	1,75	2,2	4,0	7,5
	1316	9,0-13,0	3,0	3,0	5,5	10,0
	1321	12,0-18,0	3,0	4,0	7,5	15,0
	1322	17,0-25,0	3,0	5,5	11,0	18,5
93	3353	23,0-32,0	2,43	7,5	15,0	22,0
	3355	30,0-40,0	3,03	10,0	18,5	30,0
	3357	37,0-50,0	3,3	11,0	22,0	37,0
	3359	48,0-65,0	3,69	15,0	25,0	45,0
	3361	55,0-70,0	4,38	18,5	30,0	55,0
	3363	63,-80,0	5,62	22,0	37,0	55,0
	3365	80,0-93,0	6,9			

#### 4.2.7 Вибір проводів і кабелів силової проводки

Від довговічності і надійності електропроводок залежить безперебійність роботи електроспоживачів, безпека людей.

Вид електропроводки, марку та спосіб прокладання проводу або кабеля вибирають залежно від призначення, цінності та архітектурних особливостей будівлі, умов навколишнього середовища, характеристики та режиму роботи електроприймачів, вимог техніки безпеки та протипожежних правил тощо.

Ізоляція проводів і кабелів в усіх випадках повинна відповідати номінальній напрузі електроустановки, а захисні оболонки - активності навколишнього середовища та способу прокладання.

У сільськогосподарських електроустановках здебільшого використовують проводи і кабелі з алюмінієвими жилами перерізом 2,5 мм<sup>2</sup> та вище. При цьому, як правило, треба застосовувати такі види електропроводок, які не потребують сталених труб. Електропроводку в сталених трубах застосовують лише тоді, коли за умовами зовнішнього середовища або місця прокладання інша проводка недопустима або недоцільна.

Для сільськогосподарських приміщень види електропроводок, марки та способи прокладки проводів і кабелів можна вибрати з табл. 3.1-3.17 [10].

Площу поперечного перерізу струмоведучих жил проводу або кабеля в кожному випадку треба вибирати так, щоб тривало допустимий для нього за нагріванням струм навантаження  $I_{доп}$  був не меншим максимального тривалого робочого струму електричного кола  $I_{макс.р}$ , тобто:

$$I_{доп} \geq I_{макс.р}$$

Для відгалужень до окремих електроприймачів, що працюють з постійною номінальною споживаною потужністю, за максимальні тривалі робочі струми приймають їх номінальні струми, тобто:

$$I_{макс.р} = I_{ном}$$

Номінальні струми визначають:

- для однофазних споживачів:

$$I_n = \frac{10^3 P_n}{U_n \cos \varphi}$$



- для трифазних споживачів:

$$I_n = \frac{10^3 P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi}$$

- для трифазних короткозамкнених електродвигунів:

$$I_n = \frac{10^3 P_n}{\sqrt{3} U_n \eta \cos \varphi}$$

Максимальний робочий струм магістралі, від якої живиться кілька електроприймачів, визначають за формулою:

$$I_{\text{макс.р}} = K_o \sum_1^n I_{\text{ном}}$$

де  $K_o$  - коефіцієнт одночасності роботи приймачів;

$\sum_1^n I_{\text{ном}}$  - сума номінальних струмів усіх приймачів, А.

Коефіцієнти одночасності  $K_o$  наведені в табл. 4.14.

Таблиця 4.14 Значення коефіцієнта одночасності

Кількість споживачів	2...3	4...5	6...7	8...10	11... 15	16.20	21...30
$K_o$	0,85...0,8	0,75	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5

Вибраний за нагрівом провід або кабель необхідно перевірити на відповідність його перерізу апарату захисту за умовою:

$$I_{\text{доп}} \geq K_3 I_3$$

де  $K_3$  - кратність допустимого тривалого струму провідника по відношенню до номінального струму або струму спрацювання захисного апарату. (Для автоматичних вимикачів з тепловим розчіплювачем  $K_3 = 1$ , а для автоматичних вимикачів, які мають лише електромагнітний розчіплювач  $K_3 = 0,22$ );

$I_3$  - сила номінального струму або струму спрацювання захисного апарату. (Для автоматичних вимикачів з тепловим розчіплювачем  $I_3 = I_{\text{ном.розч.}}$ , а для автоматичних вимикачів, які мають

лише електромагнітний розчіплювач  $I_3 = I_{уст.е}$ ) При цьому вважається, що умови прокладання проводу (кабеля) нормальні.

Таблиця 4.15 Значення коефіцієнта  $K_3$

Значення струму захисного апарата	Кратність допустимих тривалих навантажень			
	мережі, для яких захист від перевантаження обов'язковий			мережі потребують захисту від перевантажень
	провідники з гумовою ізоляцією або аналогічною		кабелі з паперовою ізоляцією	
	вибухонебезпечні пожежонебезпечні приміщення	невибухонебезпечні і непожежо-безпечні приміщення		
Номінальний струм плавкої вставки запобіжника	1,25	1,0	1,0	0,33
Струм уставки автомата, який має лише електромагнітний розчіплювач	1,25	1,0	1,0	0,22
Номінальний струм автомата з нерегульованою характеристикою	1,0	1,0	1,0	1,0
Струм зрушення автомата з регульованою характеристикою	1,0	1,0	0,8	0,66

Визначивши площу перерізу проводу (кабеля) за двома умовами, вибирають більшу. При цьому потрібно враховувати, що ПУЕ - 86 дозволяє при виборі площі перерізу за другою умовою, приймати найближчий менший переріз.

*Приклад.* Вибрати провід чи кабель для електродвигуна 4AM180M2Y3 ( $P_n = 30\text{кВт}$ ,  $I_n = 56,2\text{А}$ ,  $\kappa_t = 7,5$ ).

Для живлення електродвигуна можна використати кабель АВРГ. Марку та спосіб його прокладки приймаємо з урахуванням умов навколишнього середовища, техніки безпеки та протипожежних правил.

Вибір площі поперечного перерізу струмопровідних жил кабелю виконуємо за умовою, щоб вони не нагрівались максимальним тривалим робочим струмом:

$$I_{доп} \geq I_{макс.р}$$

Для відгалужень для окремих електроприймачів, що працюють з постійною номінальною споживаною потужністю, за максимальні тривалі робочі струми приймають їх номінальні струми, тобто в даному випадку номінальний струм електродвигуна:

$$I_{\text{доп}} \geq 56,2 \text{ A}$$

Приймаємо кабель *АВРГ (3х16+1х10)* з  $I_{\text{доп}} = 60 \text{ A}$ , прокладений по стіні з кріпленням за допомогою скоб.

Таблиця 4.16 Проводи та кабелі для внутрішніх електропроводок

Марки	Назви і характеристики виробів	Переважає застосування	Кількість жил	Площа поперечного перерізу, мм <sup>2</sup>
1	2	3	4	5
АПРН	Провід з алюмінієвою жилою, гумовою ізоляцією, в неспалимій гумовій оболонці	Для прокладання у сухих і вологих приміщеннях, пустотних каналах неспалимих будівельних конструкцій, а також на відкритому повітрі	1	2,5-120
ПРН	Те ж, з мідною жилою	Те ж	1	1,5-120
ПРГН	Провід з мідною гнучкою жилою, гумовою ізоляцією, в неспалимій гумовій оболонці	При монтажі і для з'єднання рухомих частин електричних машин в сухих і вологих приміщеннях, а також на відкритому повітрі	1	1,5-120
АПРИ	Провід з алюмінієвими жилами, гумовою ізоляцією, що має захисні властивості	Для відкритого прокладання в сухих і вологих приміщеннях	1	2,5-120
ПРИ	Провід з мідною жилою, гумовою ізоляцією, що має захисні властивості	Для відкритого прокладання в сухих і вологих приміщеннях	1	0,75-120
ПРГИ	Те ж, з мідною гнучкою жилою	При монтажі і для з'єднання рухомих частин електричних машин в сухих і вологих приміщеннях	1	0,75-120

продовження табл. 4.16.

1	2	3	4	5
АППР	Провід з алюмінієвими жилами, гумовою ізоляцією, що не поширює горіння, з роздільною основою	Для прокладання по дерев'яних поверхнях і конструкціях жилих і виробничих с/г приміщеннях, включаючи тваринницькі та птахівницькі	2;4; 3	2,5-10
АПВ	Провід з алюмінієвою жилою, з полівініл-хлоридною ізоляцією	Для монтаж вторинних кіл , прокладання в трубах, порожнистих каналах неспалимих будівельних конструкцій і для монтажу силових та освітлювальних кіл	1	2,0-120
ПВ1	Те ж, з мідною жилою	Те ж	1	0,5- 95
ПВ2	Те ж, з мідною гнучкою жилою	Для монтажу вторинних кіл, та монтажу , що супроводжується частими згинаннями при схованому і відкритому прокладанні	1	2,0-95
ПВ-3	Провід з мідною жилою, з полівініл-хлоридною ізоляцією, підвищеної гнучкості	Те ж	1	0,5- 95
ПВ-4	Те ж, з мідною жилою, особливо гнучкий	Те ж	1	0,5- 10
АППВ	Провід з алюмінієвими жилами у полівініл-хлоридній ізоляції, плоский з розподільною основою	Для монтаж силових і освітлювальних кіл в машинах і верстатах, відкритого і схованого прокладання під штукатуркою, прокладання в трубах і пустотних каналах неспалимих будівельних конструкцій	2; 3	2-6
ППВ	Те ж, з мідною жилою	Те ж	2; 3	0,75-4
АРТ	Провід з алюмінієвими жилами, гумовою ізоляцією, несучим тросом	Для прокладання всередині приміщень, в межах, де потрібна підвищена механічна міцність	2 3 4	2,5-4 4-6 4-35

продовження табл. 4.16.

1	2	3	4	5
АВТ	Провід з алюмінієвими жилами, ізоляцією з полівініл хлоридного пластику, несучим тросом	Для прокладання зовні (для вводу в житлові будинки та господарські будівлі) в I і II районах за ожеледдю	2,3 4	2,5-4 2,5-16
АВТУ	Те ж, з підсиленням несучим тросом	Те ж, в III і IV районах за ожеледдю	2,3 4	2,5-4 2,5-16
АВТВ	Провід з алюмінієвими жилами, ізоляцією з полівініл хлоридного пластику, несучим тросом для внутрішнього прокладання	Для прокладання всередині приміщень (в том числі тваринницьких) в межах, де потрібна підвищена механічна міцність	2,3 4	2,5-4 2,5-16
АВТВ У	Те ж, з підсиленням несучим тросом	Те ж	2,3 4	2,5-4 2,5-16
АМПВ	Провід установочний з алюмінієвою жилою і полівінілхлоридною ізоляцією	Для монтажу вторинних кіл, прокладання в трубах, пустотних каналах неспалимих будівельних конструкцій і монтажу силових та освітлювальних кіл в машинах і верстатах	1	1,5-10
АМПП В	Те ж, плоский з роздільною основою	Для монтажу силових і освітлювальних кіл в машинах і верстатах і для нерухомого відкритого прокладання	2;3	1,5-6
ВПВ	Провід установочний з мідною жилою, поліетиленовою ізоляцією, в полівінілхлоридній оболонці	Для живлення водозапоблених заглиблених електродвигунів, що тривало працюють у артезіанських скважинах	1	1,5-70
ВПП	Те ж, в поліетиленовій оболонці	Те ж	1	1,5-70
КГ	Кабель з мідними жилами, гумовою ізоляцією, в гумовій оболонці	При вигинах з радіусом не менше восьми діаметрів кабеля при температурі навколишнього середовища -40— +50°C	1 основна 2 і 3 основні 2 і 3 основні 1 заземлення	2,5-120 0,75-120 0,75-120

продовження табл. 4.16.

1	2	3	4	5
КГН	Те ж, в гумовій, стійкій проти дії масла ізоляції, що не поширює горіння	При вигинах з радіусом не менше восьми діаметрів кабеля; якщо на оболонку можуть потрапити дезінфікуючі та агресивні речовини, а також масла; при температурі навколишнього середовища -40 — +50°C	1 основна 2 і 3 основні 2 і 3 основні 1 заземлення	2,5-120 0,75-120 0,75-120
КПГ	Кабель з мідними жилами, підвищеної гнучкості, з гумовою ізоляцією, в гумовій оболонці	При вигинах з радіусом не менше п'яти діаметрів кабеля; при температурі навколишнього середовища -50 — +50°C	2 основні 2 і 3 основні і 1 заземлення	0,75-70 0,75-70
КПГН	Кабель з мідними жилами підвищеної гнучкості, гумовою ізоляцією, в гумовій, стійкій проти дії масла оболонці, що не поширює горіння	При вигинах з радіусом не менше п'яти діаметрів кабеля; якщо на оболонку можуть потрапити дезінфікуючі та агресивні речовини, а також масла: при температурі навколишнього середовища -30 — +50 °C	3 основні і 1 заземлення 3 основні, 1 заземлення і 1 допоміжна	1,5-10 1,5-10
АВРГ	Кабель з алюмінієвими жилами, гумовою ізоляцією, в полівінілхлоридній оболонці	Для прокладання в приміщеннях, каналах, тунелях при відсутності механічних дій на кабель і наявності агресивних середовищ (кислот, лугів та ін.)	1 2 і 4	4-300 2,5-300
ВРГ	Те ж, з мідними жилами	Те ж	1; 2; 3; 4	1-240
АНРГ	Кабель з алюмінієвими жилами, гумовою ізоляцією, в гумовій, стійкій проти дії масла оболонці, що не поширює горіння	Для прокладання в приміщеннях, каналах, тунелях при відсутності механічних дій на кабель	1 2 і 4	4-300 2,5-300

продовження табл. 4.16.

1	2	3	4	5
НРГ	Те ж, з мідними жилами	Те ж	1; 2; 3; 4	1-240
АВРБГ	Кабель з алюмінієвими жилами, гумовою ізоляцією, в полівінілхлоридній оболонці, захисне покриття типу БГ	Для прокладання в приміщеннях, каналах, тунелях, якщо кабель не зазнає значних розтягувальних зусиль	2 3	4-240 2,5-240
ВРБГ	Те ж, з мідними жилами	Те ж	2; 3	2,5-185
АВВГ	Кабель силовий з алюмінієвими жилами, ізоляцією і оболонкою з полівінілхлоридного пластику	Для прокладання в пожежо-небезпечних приміщеннях, каналах і тунелях, у тому числі в умовах агресивного середовища, при відсутності механічних дій на кабель	1; 2; 3 і 4	2,5-50

Таблиця 4.17 Види електропроводок і способи прокладки проводів і кабелів залежно від умов навколишнього середовища

Види	Категорія приміщення					
	сухі	запилені	вологі	вогкі	особливо вогкі	Особливо вогкі з хімічно активним середовищем
Відкрито по негорючих конструкціях і безпосередньо по поверхні	АПВ, АППВ, АПРН, АВРГ, АВВГ, АНРГ, АНРГ	АПВ, АППВ, АВРГ, АВВГ, АНРГ, АПВГ	АПВ, АППВ, АПРН, АВРГ, АВВГ, АНРГ	АПВ, АППВ, АПРН, АВРГ, НПРВ, АНРГ	АПВ, АППВ, АПРН, АВРГ, АВВГ, АПРГ	АПВ, АППВ, АВРГ, АВВГ, АПВГ
У вінілпластових і сталевих трубах	АПВ, АПР, АПРВ, АПРТО, АПРН, АППВ	АПВ, АПР, АПРТО, АПВВ	АПВ, АПРН, АПРТО, АППВ	АПВ, АПРВ, АПРН, АПРТО	АПВ, АПРВ, АПРТО, АППВ	АПВ, АРТО, АПРТО, АПРН

продовження табл. 4.17.

1	2	3	4	5	6	7
На тросах із тросовими проводами	АПВ, АПРН, АПРВ, АРТ, АВТВ, АВРГ, АВВГ, АПВГ	АПВ, АПРН, АРТ, АВТВ, АВРГ, АВВГ, АПВГ	АПВ, АПРН, АРТ, АВТВ, АВРГ, АВВГ, АНРГ	АПВ, АПРВ, АВТВ, АПРН, АРТ, АВВГ, АНВГ	АПВ, АПРН, АРТ, АВТВ, АВРГ, АНРГ, АВВГ	АПВ, АРТ, АВТВ, АВРГ, АНРГ, АВВГ
Сховано по негорючих і погано горючих поверхнях	АПВ, АППВ	АПВ, АППВ	АПВ, АППВ	АПВ, АППВ	АПВ, АППВ	
У будівельних каналах	АПВ, АПР, АППВ, АПРВ	АПВ, АПР, АППВ, АПРВ	АПВ, АНР, АППВ, АПРВ	АПВ, АППВ,	АПВ, АППВ,	
У вінілпластових і сталевих трубах	АПВ, АПР, АПРН, АПРВ, АПВГ	АПВ, АПР, АПРН, АПРВ, АПВГ	АПВ, АПР, АПРВ, АПВГ	АПВ, АПРТО	АПВ, АПРТО	АПВ, АПРТО

Таблиця 4.18 Тривало допустимі сили струму для проводів і шнурів з гумовою та полівінілхлоридною ізоляцією і мідними жилами

Площі поперечного перерізу струмоведучих жил, мм <sup>2</sup>	Сили струму, А, для проводів, прокладених					
	в одній трубі					
	відкрито	двох одножильних	трьох одножильних	чотирьох одножильних	одного дво-жильного	одного трижильного
1	2	3	4	5	6	7
0,5	11	-	-	-	-	-
0,75	15	-	-	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7
1	17	16	15	14	15	14
1,2	20	18	16	15	16	14,5
1,5	23	19	17	16	18	15
2	26	24	22	20	23	19
2,5	30	27	25	25	25	21



продовження табл. 4.18.

3	34	32	28	26	28	24
4	41	38	35	30	32	27
5	46	42	39	34	37	31
6	50	46	42	40	40	34
8	62	54	51	46	48	43
10	80	70	60	50	55	50
16	100	85	80	75	80	70
25	140	115	100	90	100	85
35	170	135	125	115	125	100
50	215	185	170	150	160	135
70	270	225	210	185	195	175
95	330	275	255	225	245	215
120	385	315	290	260	295	250

Таблиця 4.19 Тривало допустимі сили струму для проводів з гумовою та полівінілхлоридною ізоляцією і алюмінієвими жилами

Площі поперечного перерізу струмоведучих жил, мм <sup>2</sup>	Сили струму, А, для проводів, прокладених					
	відкрито	в одній трубі				
		двох одножилевих	трьох одножилевих	чотирьох одножилевих	одного двожилого	одного трижильного
1	2	3	4	5	6	7
2	21	19	18	15	17	14
2,5	24	20	19	19	19	16
3	27	24	22	21	22	18
4	32	28	28	23	25	21
5	36	32	30	27	28	24
6	39	36	32	30	31	26
8	46	43	40	30	38	32
10	60	50	47	39	42	38
16	75	60	60	55	60	55
25	105	85	80	70	75	65
35	130	100	95	85	95	75
50	165	140	130	120	125	105
70	210	175	165	140	150	135
95	250	215	200	175	190	165
120	295	245	220	200	230	190

Таблиця 4.20 Тривало допустимі сили струму для проводів з мідними жилами і гумовою ізоляцією в металевих захисних оболонках та кабелів з мідними жилами і гумовою ізоляцією в свинцевій,

полівінілхлоридній, иайритовій або гумовій оболонці, броньованих і неброньованих

Площі поперечного перерізу струмоведучих жил, мм <sup>2</sup>	Сили струму, А, для проводів і кабелів.				
	одножи- льних	двожильних		трижильних	
при прокладанні					
відкрито	відкрито	в землі	відкрито	в землі	
1,5	23	19	33	19	27
2,5	30	27	44	25	38
4	41	38	55	35	49
6	50	50	70	42	60
10	80	70	105	55	90
16	100	90	135	75	115
25	140	115	175	95	150
35	170	140	210	120	180
50	215	175	265	145	225
70	270	215	320	180	275
95	325	260	385	220	330
120	385	300	445	260	385

Таблиця 4.21 Тривало допустимі сили струму для кабелів з алюмінієвими жилами і гумовою або пластмасовою ізоляцією в свинцевій, полівінілхлоридній та гумовій оболонках, броньованих і неброньованих

Площі поперечного перерізу струмоведучих жил, мм <sup>2</sup>	Сили струму, А, для проводів і кабелів.				
	одножи- льних	двожильних		трижильних	
при прокладанні					
відкрито	відкрито	в землі	відкрито	в землі	
2,5	23	21	34	19	29
4	31	29	42	27	38
6	38	38	55	32	46
10	60	55	80	42	70
16	75	70	105	60	90
25	105	90	135	75	115
35	130	105	160	90	140
50	165	135	205	110	175
70	210	165	245	140	210
95	250	200	295	170	255
120	295	230	340	200	295

### 4.3 Методичні рекомендації по виконанню задачі 2.

Обчислити струм замикання на землю, напругу дотику і величину струму, який протікає по тілу людини при її доторкуванні до електродвигуна 2 (рис. 4.2). Зробити висновок про небезпеку цього струму для людини. Визначити величину струму однофазного короткого замикання при замиканні проводки на корпус електродвигуна 1.

Перевірити, чи спрацює захист на електродвигунах 1 і 2, якщо у них однакова потужність і вони розміщені на однаковій відстані від розподільчого щита.

Дані для задачі приведені в таблиці 2. Корпус електродвигуна 1 - занулений, електродвигуна 2 - заземлений; опір землі і проводів не враховувати.

Розрахувати та вибрати згідно табл. 4.22., апарат для захисту електродвигунів.

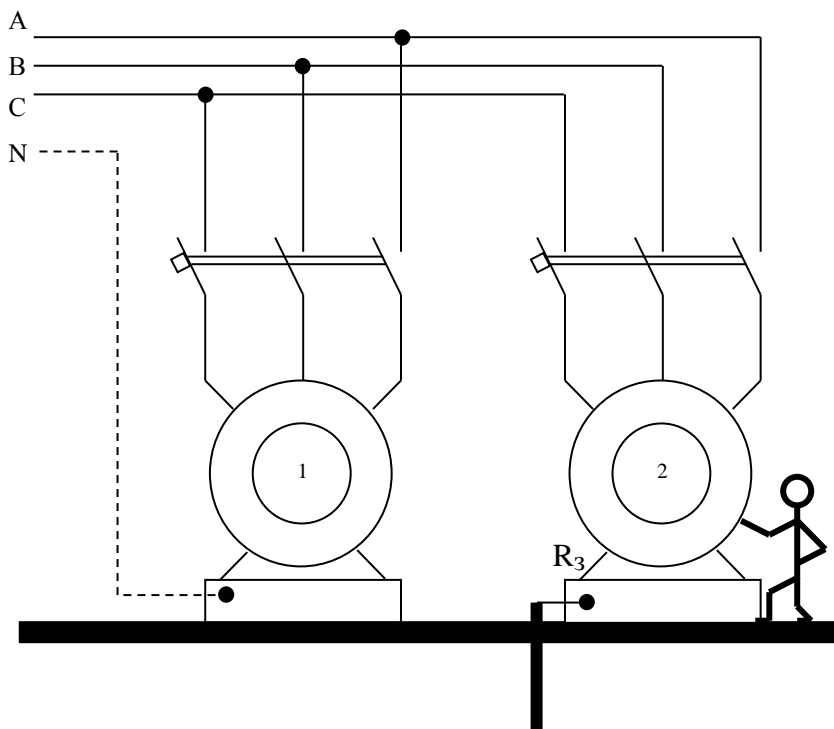


Рисунок 4.4 Схема установки.

Таблиця 4.22. Вихідні дані до задачі 2.

Дані	Номер задачі (остання цифра залікової )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\phi}$ , В	230	220	225	220	230	225	220	230	225	220
$R_o$ , Ом	2	4	2	3	4	2	4	3	2	4
$R_3$ , Ом	2	1	3	4	2	3	4	2	3	4
$R_{\text{люд}}$ , Ом	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	550
$z_{\text{тр}}$ , Ом	0,50	0,30	0,30	0,20	0,30	0,10	0,50	0,20	0,40	0,36
$z_{\phi}$ , Ом	0,40	0,35	0,32	0,30	0,40	0,30	0,25	0,35	0,40	0,30
$z_o$ , Ом	0,30	0,40	0,20	0,32	0,34	0,30	0,38	0,40	0,20	0,36
Вид захисту	Запобіжник	Авто мат	Запобіжник	Авто мат	Авто мат	Запобіжник	Авто мат	Запобіжник	Авто мат	Запобіжник

Умовні позначення:  $U_{\phi}$  - фазна напруга, В;  $R_o$  - опір заземлення нейтралі, Ом;  $R_3$  - опір заземлення електродвигуна, Ом;  $R_{\text{люд}}$  - опір тіла людини, Ом;  $z_{\text{тр}}$  - опір обмоток силового трансформатора, Ом;  $z_{\phi}$  - опір фазного проводу, Ом;  $z_o$  - опір нульового проводу, Ом.

Величину струму однофазного короткого замикання електродвигуна 1 визначають за формулою, А:

$$I_{\text{к.з.}}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{z_n + \frac{z_{\text{тр}}}{3}}$$

де,  $z_n$  - опір петлі, утвореної фазним та нульовим проводами, Ом.

$$z_n = z_{\phi} + z_o$$

$z_{\text{тр}}$  - опір обмоток трансформатора, Ом.

Величину струму замикання на землю, А, електродвигуна 2 обчислюють за формулою.

$$I_3^{(1)} = \frac{U_\phi}{R_3 + R_o}$$

Напругу дотику, тобто величину напруги,  $U_\phi$ , під яку попадає людина при доторкуванні до корпусу електродвигуна 2 знаходять за формулою.

$$U_\phi = I_3^{(1)} R_3$$

Струм,  $I_\phi$ , який протікає по тілу людини визначають.

$$I_{\text{люд}} = \frac{U_\phi}{R_{\text{люд}}}$$

#### 4.3.1. Вибір запобіжника

Для захисту кіл керування від струмів короткого замикання необхідно використовувати запобіжники.

Вибираємо запобіжник за умовами:

а) за номінальною напругою

$$U_{3,n} \geq U_m,$$

де  $U_{3,n}$  – номінальна напруга запобіжника, В;

$U_m$  – напруга мережі, захищаємої запобіжниками В.

б) за номінальним струмом запобіжника

$$I_{3,n} \geq I_{6,n},$$

де  $I_{3,n}$  – номінальний струм запобіжника, А;

$I_{6,n}$  – номінальний струм плавкої вставки, А;

в) за номінальним струмом плавкої вставки

$$I_{6,n} \geq I_{6,p}$$

$I_{6,p}$  – розрахунковий струм плавкої вставки, А.

Таблиця 4.23. Вихідні дані для вибору електродвигунів до задачі 2 .

№	Номер задачі (остання цифра залікової)									
Передостання цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	АИР100 S4Y3	АИР100 L4Y3	АИР90 L4Y3	АИР132 S4Y3	АИР112 M4Y3	АИР132 M4Y3	АИР160 S4Y3	АИР160 M4Y3	АИР80 B4Y3	АИР132 M2Y3
1	АИР71 B2Y3	АИР80 A2 Y3	АИР80 B2 Y3	АИР90 L2 Y3	АИР100 S2 Y3	АИР100 L2 Y3	АИР112 M2Y3	АИР132 M2Y3	АИР160 S2 Y3	АИР160 M2Y3
2	АИР80 A6Y3	АИР80 B6 Y3	АИР90 L6 Y3	АИР100 L6 Y3	АИР112 S6 Y3	АИР112 M6Y3	АИР132 S6 Y3	АИР132 M6Y3	АИР160 S6 Y3	АИР160 M6Y3
3	АИР71 B8 Y3	АИР80 A8 Y3	АИР80 B8 Y3	АИР90 A8 Y3	АИР90 SB8Y3	АИР100 S8 Y3	АИР112 MA8Y3	АИР112 MB8 Y3	АИР132 S8 Y3	АИР132 M8Y3
4	АИР160 S8Y3	АИР160 M8Y3	АИР180 M8Y3	АИР200 M8Y3	АИР200 L8 Y3	АИР225 M8Y3	АИР250 S8 Y3	АИР250 M8Y3	АИР280 S8 Y3	АИР280 S8 Y3
5	АИР50 A2 Y3	АИР50 B2 Y3	АИР56 A2 Y3	АИР56 B2 Y3	АИР63 A2 Y3	АИР63 B2 Y3	АИР71 A2 Y3	АИР180 S2 Y3	АИР180 M2Y3	АИР200 M2Y3
6	АИР50 A Y3	АИР50 B3 Y3	АИР56 A4 Y3	АИР56 B4 Y3	АИР63 A4 Y3	АИР63 B4 Y3	АИР71 A4 Y3	АИР71 B4 Y3	АИР80 A4 Y3	АИР80 B4 Y3
7	АИР63 A6 Y3	АИР63 B6 Y3	АИР71 A6 Y3	АИР71 B6 Y3	АИР80 A6 Y3	АИР80 B6 Y3	АИР180 M6Y3	АИР200 M6Y3	АИР200 L6 Y3	АИР225 M6Y3
8	АИР90 L4 Y3	АИР100 S4 Y3	АИР100 L4 Y3	АИР112 M4 Y3	АИР132 S4 Y3	АИР132 M4 Y3	АИР160 S4 Y3	АИР160 M4 Y3	АИР180 S4 Y3	АИР180 M4 Y3
9	АИР80 A2 Y3	АИР50 B2 Y3	АИР56 B4 Y3	АИР80 A6 Y3	АИР63 B6 Y3	АИР100 L4Y3	АИР112 S6 Y3	АИР50 B3 Y3	АИР100 S4 Y3	АИР180 M6Y3

Для запобіжників, призначених для захисту окремих асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, розрахункові струми плавких вставок визначають за формулою

$$I_{\text{в.р}} = \frac{\kappa_i I_H}{\alpha}$$

де  $I_H$  – номінальний струм електродвигуна, А, табл. 4.23.

$\kappa_i$  – кратність пускового струму;

$\alpha$  – коефіцієнт, що враховує умови пуску двигуна (нормальні умови пуску до 10 с –  $\alpha = 2,5$ ; при важких умовах пуску понад 10 с –  $\alpha = 2,0 \dots 1,6$ ).

Перевірку дії захисту апаратури від короткого замикання для плавкої вставки запобіжника

$$I_{\text{к.з}}^{(1)} \geq 3I_{\text{в.н}}$$

де  $I_{\text{в.н}}$  – номінальний струм плавкої вставки запобіжника, А.

#### 4.3.2. Вибір автоматичного вимикача

Визначаємо струми електродвигуна.

Для окремого електродвигуна за розрахунковий струм приймаємо його номінальний струм, тобто  $I_p = I_{\text{н.дв}}$ , а максимальний короткочасний струм визначаємо за формулою:

$$I_{\text{макс}} = k_i \cdot I_{\text{н.дв}}$$

де  $k_i$  – кратність пускового струму електродвигуна;

$I_{\text{н.дв}}$  – номінальний струм електродвигуна, А, який приймаємо з таблиці 4.23.

Вибираємо автоматичний вимикач за умовами:

а) за номінальною напругою:

$$U_{\text{а.ном}} \geq U_{\text{м}}$$

де  $U_{\text{а.ном}}$  – номінальна напруга автоматичного вимикача, В;

$U_{\text{м}}$  – напруга мережі, В.

б) за номінальним струмом автомата:

$$I_{\text{а.ном}} \geq I_p$$

де  $I_{a.ном}$  – номінальна сила струму автомата, А;  
 $I_p$  – розрахунковий струм електродвигуна, А.  
 в) за номінальним струмом розчіплювача:

$$I_{н.р} \geq I_p$$

де  $I_{н.р}$  – номінальна струм розчіплювача, А;  
 $I_p$  – розрахунковий струм електродвигуна, А.

Автоматичний вимикач з таким розчіплювачем здатний, не перегріваючись, як завгодно тривало пропускати розрахунковий струм навантаження.

Щоб забезпечити надійний захист електроприймача для ділянки мережі від струму короткого замикання та не допустити вимикання їх при максимальному короткочасному струмі, можливого в умовах експлуатації, електромагнітні розчіплювачі автомата треба вибирати за умови:

$$I_{уст.е} \geq k_{ке} \cdot I_{макс},$$

де  $I_{уст.е}$  – струм установки електромагнітного розчіплювача, А;  
 $k_{ке}$  – коефіцієнт надійності, враховуючий неточність по струму спрацювання електромагнітного розчіплювача (приймаємо  $k_{ке} = 1,25$  для автоматичних вимикачів номінальним струмом більше 100А; приймаємо  $k_{ке} = 1,4$  для автоматичних вимикачів номінальним струмом до 100А);

$I_{макс}$  – максимальний короткочасний струм електродвигуна (пусковий струм), А.

Теплові розчіплювачі вибирають за умовою:

$$I_{уст.т} \geq k_{не} \cdot I_p,$$

де  $I_{уст.т}$  – струм установки теплового розчіплювача, А;  
 $k_{не}$  – коефіцієнт надійності, враховуючий неточність по струму спрацювання теплового розчіплювача (приймаємо 1,1...1,3);  
 $I_p$  – розрахунковий струм електродвигуна, А.



Навчально-методичне видання

Методичні вказівки «Електротехнологічні установки»  
для виконання контрольних робіт та самостійної роботи

Автори-укладачі

*Телюта Руслан Васильович*

Редактор

Тиружування на різнографі

РВЛ, КНТУ, м. Кіровоград, пр. Університетський, т. 390-541, 390-245,  
390-551