

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Василега П. О.

ЕЛЕКТРОПРИВОД РОБОЧИХ МАШИН

Підручник

Рекомендовано вченою радою Сумського державного університету



Суми
Сумський державний університет
2022

УДК 62.83(075.8)

В 19

Рецензенти:

І. Л. Лебединський – кандидат технічних наук, доцент Сумського державного університету;

Б. І. Приймак – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

*Рекомендовано до видання
вченою радою Сумського державного університету
як навчальний посібник
(протокол № 9 від 10 лютого 2022 року)*

Василега П. О.

В 19 Електропривод робочих машин : підручник /
П. О. Василега. – Суми : Сумський державний університет,
2022. – 290 с.

ISBN 978-966-657-900-6

У підручнику розглянуті питання, пов'язані з електроприводом робочих машин. Загальні аспекти основ електропривода доповнені аналізом конструкції, принципу дії, технічних параметрів електричних апаратів та машин, а також електричних схем ручного й автоматичного керування робочими машинами. Наведені приклади розв'язування задач для розрахунку параметрів і вибору основного обладнання.

Підручник призначений для студентів закладів вищої освіти.

УДК 62.83(075.8)

ISBN 978-966-657-900-6

© Сумський державний університет, 2022

© Василега П. О., 2022

ЗМІСТ

	С.
Скорочення	9
Передмова	10
Вступ	13
Розділ 1 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....	23
1.1 Основні терміни та визначення.....	23
1.2 Основні види електроприводів.....	25
1.3 Види електричних схем електропривода	27
1.4 Основи механіки електропривода.....	34
1.4.1 Приведення моментів і сил	34
1.4.2 Механічні характеристики робочих машин	39
1.4.3 Механічні характеристики електродвигунів.....	41
1.4.4 Умови роботи електропривода в усталеному режимі.....	43
1.4.5 Рівняння руху електропривода	45
Контрольні запитання та завдання	47
Розділ 2 ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	48
2.1 Пускорегулювальні електричні апарати	48
2.1.1 Контактори	48
2.1.2 Реле проміжні	51
2.1.3 Реле часу	52
2.2 Електричні апарати захисту	55
2.2.1 Запобіжники плавкі.....	55
2.2.2 Реле теплові	59
2.2.3 Реле струму	60
2.2.4 Реле напруги	62
2.2.5 Мікроперемикачі	65
2.2.6 Вимикачі кінцеві	66
2.3 Комутаційні електричні апарати.....	67

2.3.1 Рубильники	68
2.3.2 Вимикачі пакетні.....	69
2.3.3 Тумблери.....	70
2.3.4 Кнопки та кнопочві пости керування.....	71
2.4 Багатофункціональні електричні апарати	72
2.4.1 Вимикачі автоматичні	73
2.4.2 Вимикачі диференційні	76
2.4.3 Автомати диференційні	79
2.4.4 Пускачі магнітні	81
Контрольні запитання та завдання	83

Розділ 3 ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ДЛЯ	
ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОБОЧИХ МАШИН .	85
3.1 Аналіз режиму роботи електродвигуна	85
3.1.1 Режим тривалого навантаження	86
3.1.2 Режим короткочасного навантаження ...	86
3.1.3 Періодичні режими навантаження	87
3.1.4 Режим роботи з неперіодичними змінами навантаження та швидкості.....	94
3.1.5 Режим роботи з дискретними наванта- женнями та швидкостями.....	95
3.2 Вибір виду електродвигуна.....	96
3.2.1 Асинхронні двигуни з короткозамкне- ним ротором.....	97
3.2.2 Асинхронні двигуни з фазним ротором	100
3.2.3 Синхронні двигуни	102
3.2.4 Двигуни постійного струму	104
3.3 Вибір номінальної напруги.....	106
3.4 Вибір номінальної швидкості	107
3.5 Вибір за конструктивним виконанням.....	109
3.5.1 Вплив кліматичних факторів навколишнього середовища	109
3.5.2 Ступінь захисту електродвигуна	110
3.5.3 Спосіб монтажу	113
3.6 Вибір електродвигуна за потужністю	114

3.6.1	Методи розрахунку необхідної потужності електродвигуна	116
3.6.2	Вибір електродвигуна й перевірка правильності вибору для роботи в режимі S1	118
3.6.3	Вибір електродвигуна й перевірка правильності вибору для роботи в режимі S2	120
3.6.4	Вибір електродвигуна й перевірка правильності вибору для роботи в режимі S3	121
3.6.5	Вибір електродвигуна й перевірка правильності вибору для роботи в режимі S4 – S10	122
3.6.6	Спрощені методи вибору електродвигуна	129
Контрольні запитання та завдання.....		131

Розділ 4 РОБОТА ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОБОЧИХ МАШИН У ПЕРЕХІДНИХ

	I СТАЛОМУ РЕЖИМАХ	133
4.1	Особливості пуску електропривода.....	133
4.1.1	Вимоги до пускового моменту електродвигуна	133
4.1.2	Вимоги до пускових струмів.....	134
4.1.3	Вимоги до часу пуску	135
4.1.4	Шляхи вирішення проблем пуску	136
4.2	Особливості гальмування електропривода	140
4.2.1	Гальмування на вибіг.....	140
4.2.2	Динамічне гальмування.....	141
4.2.3	Гальмування протivismиканням.....	142
4.3	Регулювання швидкості електропривода.....	143
4.3.1	Регулювання швидкості електропривода з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором.....	144

4.3.2 Регулювання швидкості електропривода з асинхронним двигуном із фазним ротором.....	147
4.3.3 Регулювання швидкості електропривода із синхронним двигуном.....	149
4.3.4 Регулювання швидкості електропривода із двигуном постійного струму.....	150
4.4 Реверс електропривода	152
4.5 Робота електропривода з постійною швидкістю	153
Контрольні запитання та завдання	156

Розділ 5 ЕЛЕКТРОПРИВОД РОБОЧИХ МАШИН ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ РІДИН І ГАЗІВ	158
5.1 Особливості роботи робочих машин для переміщення рідин і газів	158
5.2 Спеціальні електричні апарати	162
5.2.1 Спеціальні електричні апарати для автоматичного керування роботою компресорів	162
5.2.2 Спеціальні електричні апарати для автоматичного керування роботою насосів.....	167
5.3 Електричні схеми керування роботою робочих машин для переміщення рідин і газів.....	172
5.3.1 Принципова електрична схема керування роботою насоса з використанням поплавкового реле рівня рідини	172
5.3.2 Принципова електрична схема керування роботою насоса з використанням електродного реле рівня рідини.....	176
5.3.3 Принципова електрична схема керування роботою компресорної установки з використанням електроконтактних	

манометрів.....	179
5.3.4 Принципова електрична схема керування роботою холодильної установки.....	184
Контрольні запитання та завдання	187

Розділ 6 ЕЛЕКТРОПРИВОД РОБОЧИХ МАШИН ІЗ ВЕЛИКИМИ ІНЕРЦІЙНИМИ МОМЕНТАМИ	188
6.1 Особливості пуску.....	188
6.1.1 Проблеми пуску.....	188
6.1.2 Способи вирішення проблеми пуску	189
6.1.3 Електропривод з обмежувальною розгінною гідродинамічною муфтою...	190
6.2 Особливості гальмування	195
6.3 Особливості реверсу.....	197
6.4 Особливості вибору електродвигуна.....	202
Контрольні запитання та завдання	204

Розділ 7 ЕЛЕКТРОПРИВОД РОБОЧИХ МАШИН ДЛЯ ХІМІЧНИХ, ГАЗО- І НАФТОПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ... 	205
7.1 Вимоги до системи електропостачання.....	205
7.2 Вимоги до навколишнього середовища	207
7.3 Вимоги до електрообладнання	211
7.4 Особливості вибору складових частин електропривода.....	215
7.4.1 Особливості вибору електродвигунів ...	216
7.4.2 Особливості вибору електричних апаратів і приладів	224
7.4.3 Особливості вибору електроосвітлювального обладнання...	230
7.5 Електричні схеми керування роботою електропривода.....	233

7.5.1 Електрична схема керування роботою електропривода центрифуги.....	234
7.5.2 Електрична схема керування роботою електропривода цементного млина.....	239
Контрольні запитання та завдання	241
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	243
Додатки.....	248
Додаток А – (обов’язковий). Буквені позначення найбільш поширених видів елементів на принципових електричних схемах згідно з ГОСТ 2.710.81(2001) ЕСКД	249
Додаток Б (обов’язковий). Умовні графічні позначення	255
Додаток В (обов’язковий). Технічні дані асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором серії 4А	264
Додаток Г (обов’язковий). Технічні дані двигунів серії 4А з підвищеним ковзанням для режиму S3 і $T_B = 40$	268
Доповнення до додатка Г (обов’язкове). Значення потужності, кВт, двигунів серії 4АР з підвищеним ковзанням у режимі S3 і різних T_B	270
Додаток Д (обов’язковий). Технічні дані багатошвидкісних двигунів серії 4А	271
Додаток Е (обов’язковий). Технічні дані двигунів із фазним ротором серій 4АК, 4АНК.....	279
Додаток Є (обов’язковий). Технічні дані синхронних двигунів.....	282
Додаток Ж (обов’язковий). Технічні дані двигунів постійного струму серії 2П	283

СКОРОЧЕННЯ

- БСВ – блок струмової відсічки.
БСЗ – блок струмового захисту.
ВО – виконавчий орган.
ГГ – горючі гази.
ДІ – датчик інтенсивності.
ДСТУ – державний стандарт України.
ДЖ – джерело живлення.
ЕРС – електрорушійна сила.
ЕДП – електродвигуновий пристрій.
ККД – коефіцієнт корисної дії.
КП – керувальний пристрій.
ЛАТР – лабораторний автотрансформатор.
ЛЗР – легкозаймиста речовина.
ПЗВ – пристрої захисного вимкнення.
ПП – передавальний пристрій.
ПрП – перетворювальний пристрій.
ПУЕ – правила улаштування електроустановок.
ПМП – прохідний магнітний підсилювач.
РТЗ – реверсивний тиристорний збудник.
ТВ – тривалість вмикання.
ТПЧ – тиристорний перетворювач частоти.
ФР – фазорегулятор.

ПЕРЕДМОВА

Одним із головних напрямків підвищення продуктивності праці та якості продукції в промисловості є автоматизація промислових установок і технологічних процесів. Рівень автоматизації здебільшого залежить від використання сучасних зразків електропривода, що забезпечує перетворення електричної енергії на механічну енергію руху робочих органів або навпаки, а також керує їх рухом.

Електропривод є невід'ємною складовою частиною всіх робочих машин, і правильність його вибору здебільшого визначає ефективність і надійність їх роботи. Від електропривода залежать такі основні показники робочих машин як точність, надійність, а також швидкість і діапазон її регулювання, величина навантажень, особливо на час пуску та гальмування, тощо.

Підвищення вимог до електропривода, розширення його функцій приводить до зростання його складності. Сьогодні вартість електропривода дуже часто становить значну частину від загальної вартості робочої машини, а тому правильний вибір тієї чи іншої системи електропривода істотно впливає на собівартість.

Правильне поєднання механічних характеристик виконавчих органів робочих машин та електропривода є умовою вдалого конструктивного й технологічного рішення під час проектування робочих машин.

Актуальними є також питання, пов'язані з раціональним використанням електроенергії та енергозбереженням. Лише глибокі знання тих процесів, що відбуваються в усіх складових частинах робочої машини чи установки, зокрема в електроприводі, можуть бути запорукою успішного вирішення цього питання.

Усе зазначене обумовлює необхідність ґрунтовного вивчення студентами електротехнічних спеціальностей основ електропривода, конструкції, принципу дії та основних характеристик промислового електрообладнання, методик правильного розрахунку їх параметрів та вибору за каталогами, можливостей підвищення економічності й надійності як електропривода, так і робочої машини в цілому.

Пропонований підручник призначений для студентів електротехнічних спеціальностей. Його основу становлять матеріали лекцій, що упродовж багатьох років викладаються автором для студентів Сумського державного університету в курсі «Електропривод робочих машин». Знання, здобуті студентами під час вивчення цього курсу, допомагають їм успішно вирішувати проблеми, що виникають під час роботи над курсовими й дипломною роботами, зокрема конкретні питання вибору електрообладнання для електропривода окремих машин та апаратів, автоматизації технологічних процесів, розв'язання таких економічних задач, як розрахунок питомих втрат електроенергії, енергетичної складової в собівартості продукції тощо.

Підручник також дає відповіді на деякі питання, що пов'язані з правилами техніки безпеки під час роботи з електрообладнанням робочих машин.

Підручник може бути корисним для студентів інших спеціальностей під час вивченні курсів, у яких окремими розділами розглядають питання, пов'язані з електроприводом та електрообладнанням окремих машин і установок.

Підручник написано відповідно до навчальних планів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Автор вдячний за цінні зауваження щодо змісту підручника рецензентам:

І. Л. Лебединському – кандидату технічних наук, доценту Сумського державного університету.

Б. І. Приймаку – кандидату технічних наук, доценту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Зауваження та побажання щодо поліпшення підручника, а також його замовлення просимо надсилати на адресу: кафедра електроенергетики, Сумський державний університет, вул. Р.-Корсакова, 2, м. Суми, 40007.

E-mail: etech@etech.sumdu.edu.ua.

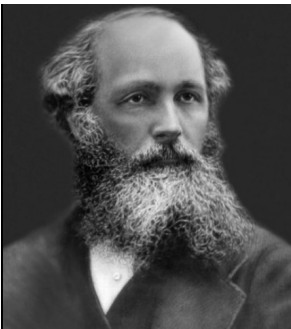
ВСТУП

Історія електропривода розпочинається з 1821 року, коли англійський учений Майкл Фарадей (рис. 1) експериментально доказав можливість перетворення електричної енергії на механічну, що є основою роботи електропривода. Учений вперше сформулював і математично описав закон електромагнітної індукції.



*Рисунок 1 – Майкл Фарадей
(Michael Faraday) (1791 – 1867 pp.)*

Шотландський вчений Джеймс Клерк Максвелл (рис. 2) продовжив учення Фарадея. У двох своїх наукових роботах («Про фізичні силові лінії» та «Динамічна теорія електромагнітного поля») він розробив теорію електромагнітного поля. Ним були сформульовані основні висновки, стосовно яких змінні електричне й магнітне поля мають тісний взаємозв'язок і створюють єдине електромагнітне поле, що рухається та може забезпечити рух провідника зі струмом.



*Рисунок 2 – Джеймс Клерк
Максвелл (James Clerk Maxwell)
(1831 – 1879 pp.)*

Нідерландський учений Гендрік Антоон Лоренц (рис. 3) продовжив учення Фарадея – Максвелла в напрямку електродинаміки. Він вивів формулу для визначення електромагнітної сили («сили Лоренца»), яку використав для рішення багатьох конкретних задач.



Рисунок 3 – Гендрік Антоон Лоренц (Hendrik Antoon Lorentz) (1853 – 1929 pp.)

Завдяки науковим працям вищеназваних учених був остаточно сформульований закон електромагнітної індукції (закон Фарадея – Максвелла – Лоренца), що є основою для пояснення принципу дії як окремих складових електропривода, так і значної частини елементів, що входять до його складу: електродвигунів, електромагнітів, трансформаторів, контакторів, реле тощо.

Наступний етап в історії розвитку електропривода відбувся в 1838 році, коли російський учений німецького походження Борис Семенович Якобі (рис. 4) використав електропривод у складі річного катера («електроходу») й тим самим уперше використав електропривод для практичного призначення. Принципово важливим є й те, що електродвигун, що був використаний у складі електропривода, теоретично обґрунтував, розробив та експериментально дослідив безпосередньо Якобі. Цей двигун потужністю в 1 к. с. забезпечив рух катера із 12 пасажирами зі швидкістю 5 км/год проти течії на річці

Неві. Такі показники були значно кращими порівняно з приводом на паровій машині.



Рисунок 4 – Борис Семенович Якобі (1801 – 1874 рр.)

Широкого використання електропривод Якобі на той час не одержав. І головною причиною того були недосконалість і недовговічність джерела живлення – гальванічної батареї.

1880 рік можна вважати роком початку відліку історії теорії електропривода. У цьому році вперше найбільш повний опис і ґрунтовний аналіз теорії електричних машин та електропривода зробив Дмитро Олександрович Лачинов (рис. 5) у своїй науковій праці «Електромеханічна робота». У ній він узагальнив і доповнив питання, пов'язані зі схемами живлення двигунів від генераторів, визначення коефіцієнта корисної дії електричних машин під час роботи як у режимі двигуна, так і в режимі генератора, класифікував електричні машини щодо способу збудження й виду механічної характеристики, вивів рівняння механічних характеристик тощо. Завдяки його теоретичним роботам були закладені умови для навчання спеціалістів і для широкого промислового використання електропривода.



Рисунок 5 – Дмитро Олександрович Лачинов (1842 – 1902 рр.)

Істотний теоретичний і практичний внесок у подальше вдосконалення складових частин електропривода зробив італійський учений Ферраріс Галілео (рис. 6). Він одним із перших створив трансформатор змінного струму, дослідив його роботу теоретично обґрунтував явища, відбуваються під час цих процесів.

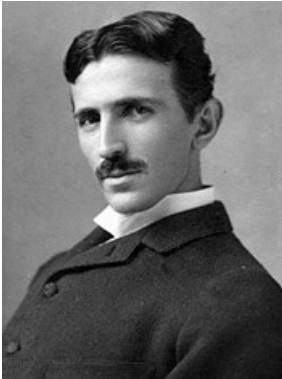


Рисунок 6 – Ферраріс Галілео (Ferraris Galileo) (1847 – 1897 рр.)

Ферраріс Галілео теоретично обґрунтував, а потім і практично одержав обертове магнітне поле. Він виготовив і дослідив роботу лабораторного зразка двофазного асинхронного двигуна, у якому на практиці було використано явище обертового магнітного поля.

У 1888 році він зробив доповідь, у якій об'єднав результати теоретичних і практичних досліджень.

Видатний учений і винахідник сербського походження Нікола Тесла (рис. 7) зробив великий вклад у справі подальшого розвитку як електропривода в цілому, так і окремих його складових частин. Серед понад 800 сотень його патентів на винахід значна частина стосується електропривода, його складових частин і системи його електропостачання. Це були патенти на винахід багатофазних електричних машин і систем передавання електричної енергії змінного струму, електропривода автомобіля тощо.



*Рисунок 7 – Нікола Тесла
(Nikola Tesla) (1856 – 1943 pp.)*

Цікавий факт. Нікола Тесла незалежно від Ферраріса Галілео проводив роботи стосовно дослідження обертового магнітного поля та створення на основі цього явища двофазного асинхронного двигуна. Як виявилось потім, вони досягли практично ідентичних результатів, але Галілео опередив його на два місяці.

Розроблений Теслою електродвигун був використаний у складі електропривода атомобіля, продемонстрованого в Парижі (Франція) на всесвітній виставці в 1889 році. Але цей винахід, як і багато інших його винаходів, випередив свій час і широкого використання набув лише півтора століття потому.

Видатний інженер-електрик, конструктор і винахідник Михайло Осипович Доліво-Добровольський (рис. 8) завдяки своїм винаходам забезпечив широке практичне використання електропривода в різних галузях промислового виробництва.



*Рисунок 8 – Михайло Осипович
Доліво-Добровольський
(1861 – 1919 рр.)*

У 1889 році він створив трифазний асинхронний двигун, конструкція якого до цього часу майже не змінилася. Цей вид електродвигуна до сьогодні є одним із найбільш поширених видів електродвигунів, що використовують в електроприводі. У цьому ж році ним був створений трифазний трансформатор, а вже в наступному 1890 році він розробив і використав на практиці систему змінного трифазного струму. Наступним кроком було винайдення синхронного генератора, у якому використовувалась як схема з'єднання обмоток «зірка», так і «трикутник». У 1891 році ним був розроблений електропривод насоса з трифазним асинхронним двигуном потужністю 100 к. с., продемонстрований на міжнародній виставці у Франкфурті-на-Майні (Німеччина). Також М. О. Доліво-Добровольським були створені різні електричні апарати та вимірювальні прилади (пускові реостати, електромагнітні амперметри та вольтметри для вимірювання як постійного, так і змінного струму тощо),

до цього часу широко використовувані в складі електропривода.

Істотний внесок для практичного використання електропривода зробив видатний російський електротехнік Володимир Миколайович Чиколєв (рис. 9).



*Рисунок 9 – Володимир
Миколайович Чиколєв
(1845 – 1898 рр.)*

До головних винаходів В. М. Чиколєва можна віднести диференціальний регулятор із сервоприводом постійного струму для дугових ламп, електричний регулятор обертів локомотива, конструкцію динамомашини, електроприводи швейної машинки та вентилятора тощо.

В. М. Чиколєв був редактором першого російського електротехнічного журналу «Електрика» (рус. «Электричество»), у якому були надруковані наукові роботи, присвячені як теоретичним питанням, так і питанням практичного використання електропривода в промисловості, на транспорті, у військовій техніці, побутових приладах.

Кінець XIX-го початок XX-го століття ознаменувалися інтенсивним розвитком електропривода, що мав істотні переваги перед паровим приводом, та приводом із двигунами внутрішнього згорання. На цей час припадають перші приклади використання електропривода

прокатних станів, папероворобних машин, ткацького обладнання, міського транспорту тощо.

Ось декілька перших прикладів практичного використання електропривода в Україні. У 1892 році була введена в експлуатацію перша лінія київського трамваю довжиною 1,5 км, живлення якої здійснювали від електростанції з установленими двома динамомашинами потужністю 60 к. с. кожна, а електричну енергію виробляли за напруги 500 В. Про зростаючі темпи використання електропривода на міському транспорті в Києві в ті роки свідчить той факт, що у 1895 році загальна довжина трамвайних ліній становила уже 36 км, а для забезпечення їх електричною енергією використовували чотири парових агрегати потужністю 150 к. с. кожен.

У 1893 році в місті Шепетівці на цукроварні вперше в Україні були використані в складі електропривода трифазні електродвигуни, кількість яких перевищувала 200 штук, а загальна потужність – понад 1500 кВт.

Використання електропривода в складі робочих машин потребувало наявності відповідних спеціалістів. У 1885 році був відкритий Харківський технологічний університет (ХТУ) – перший вищий технічний навчальний заклад в Україні на той час. У цьому університеті вперше в Україні розпочали викладати курси з теорії електрики, електродинаміки, магнетизму, електричних машин, електричних установок, техніки високих напруг та інших. У 1898 році у ХТУ (нині – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут») відбувся перший випуск інженерів електротехнічного профілю. Так було закладено основи електротехнічної школи в Україні.

У 1904 році професор Харківського технологічного університету Павло Петрович Копняєв (рис. 10) видав підручник «Електричні машини постійного струму», що упродовж наступних трьох десятиліть був основним

підручником під час підготовки інженерів-електромеханіків в Україні. А в 1921 році за ініціативи П. П. Копняєва в ХТУ був створений електротехнічний факультет.



Рисунок 10 – Павло Петрович Копняєв (1867 – 1832 рр.)

Науковець П. П. Копняєв також займався й практичними питаннями, пов'язаними з проектуванням та впровадженням трамваю з електроприводом у таких містах як Санкт-Петербург, Москва та Маріуполь.

Істотний прорив у плані практичного використання електропривода в складі робочих машин на підприємствах України припадає на 20-ті роки ХХ-го століття. Цьому сприяло затвердження в 1922 році Державного плану електрифікації Росії (*рос.* Государственного плана электрификации России – ГОЭЛРО). Понад 30 % усіх потужностей, що планували ввести в експлуатацію згідно з цим планом, знаходилися на території України. Збудували такі електростанції: у 1926 р. – Штерівську потужністю 100 МВт; у 1931 р. – Зуївську потужністю 200 МВт; у 1932 р. – Дніпровську ГЕС потужністю 200 МВт, що потім у 1933 р. збільшили до проектної потужності 560 МВт, тощо. Понад 90 % усієї електроенергії, що виробляли, використовували в електроприводі. Електропривод став домінуючим у робочих машинах в усіх без винятку галузях промисловості та транспорті. Ця тенденція зберігається

й до цього часу, що можна пояснити істотними перевагами електропривода над іншими видами приводів.

До таких переваг можна віднести:

- високі ККД та надійність у роботі;
- можливість живлення від джерел електричної енергії, як постійного, так і змінного струму, що можуть знаходитись як поряд, так і на великій відстані;
- широкий діапазон потужностей електродвигунів, що використовують у складі електропривода (від одиниць ват до десятків тисяч кіловат);
- широкий діапазон швидкості обертання (від долей обертів за хвилину до сотень тисяч обертів за хвилину);
- можливість використання електродвигунів як з обертовим, так і поступальним рухом;
- можливість порівняно просто забезпечувати рух виконавчого органу робочої машини згідно із заданою програмою;
- можливість працювати в різноманітних умовах навколишнього середовища;
- можливість забезпечити автоматизацію та роботизацію технологічних процесів;
- відсутність шкідливого впливу на навколишнє середовище;
- сприятливі умови для роботи обслуговувального персоналу.

Розділ 1 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

1.1 Основні терміни та визначення

Електропривод – електромеханічна система, що складається з перетворювального, електродвигунового, передавального та керувального пристроїв і призначена для приведення в рух виконавчого органу робочої машини й керування цим рухом.

На структурній схемі (рис. 1.1) наведені складові частини електропривода та їх взаємозв'язок.

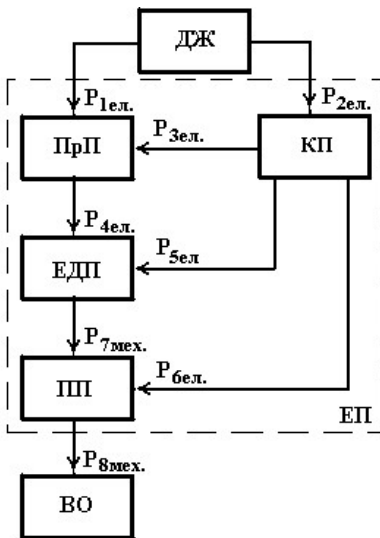


Рисунок 1.1 – Структурна схема

Згідно зі схемою живлення електричною енергією здійснюється від джерела живлення (ДЖ) (напр., генератора або мережі постійного чи змінного струму).

Перетворювальний пристрій (ПрП) може: підвищувати та (чи) знижувати напругу (напр., трансформатор, автотрансформатор), перетворювати

змінну напругу на постійну (напр., напівпровідниковий випрямляч) або постійну на змінну (напр., інвертор), змінювати частоту струму (напр., тиристорний перетворювач частоти), змінювати показники якості електричної енергії (напр., стабілізатор).

Перетворювальний пристрій не є обов'язковою складовою частиною електропривода. Він може бути відсутнім, якщо електричні параметри джерела живлення та електродвигунового пристрою узгоджені та їх не потрібно змінювати в процесі роботи електропривода.

Електродвигуновий пристрій (ЕДП) призначений для перетворення електричної енергії на механічну або механічної на електричну. Його функцію можуть виконувати, наприклад, електромагніти та електродвигуни постійного та змінного струмів, яких може бути декілька в складі одного електропривода.

Електродвигуновий пристрій є обов'язковою складовою частиною електропривода.

Передавальний пристрій (ПП) призначений для передавання механічної енергії від електродвигунового пристрою до *виконавчого органа* (ВО) робочої машини, а також узгодження виду та швидкостей їх руху. Наприклад, за необхідності зменшення чи збільшення швидкості обертання функцію передавального пристрою можуть виконувати редуктори, пасові та ланцюгові передачі тощо, а за необхідності перетворення обертового руху на поступальний цю функцію виконують передача «гвинт-гайка», кривошипно-шатунний механізм тощо.

Передавальний пристрій не є обов'язковою складовою частиною електропривода. Він може бути відсутнім, якщо швидкість і вид руху рухомої частини електродвигунового та передавального пристроїв узгоджені.

Керувальний пристрій (КП) – це електротехнічний пристрій, призначений для керування одним, частиною або всіма вищезгаданими пристроями. Мета такого керування

може бути різною. Наприклад, змінюючи сигнал керування $P_{\text{Зел}}$ можна змінювати напругу або частоту на виході перетворювального пристрою й тим самим збільшувати чи зменшувати швидкість обертання вала електродвигуна, або ж, навпаки, підтримувати швидкість постійною під час зміни навантаження. За допомогою сигналу $P_{\text{Зел}}$ можна змінювати, наприклад, кількість пар полюсів електродвигуна й тим самим ступенево змінювати швидкість його обертання. За допомогою сигналу $P_{\text{Бел}}$ змінюється, наприклад, передатне відношення передавального пристрою.

Керувальний пристрій є обов'язковою складовою частиною електропривода й може бути простим і виконувати лише функцію «ввімкнути-вимкнути» або дуже складним, виконуючи функцію автоматичного керування роботою електропривода в усіх режимах роботи, а також функції захисту, сигналізації тощо.

Механічна енергія від передавального пристрою передається *виконавчому органу (ВО) робочої машини*.

Робоча машина – це машина, що здійснює зміну форми, властивостей, стану чи положення предмету праці (напр., насоси, вентилятори, компресори, конвеєри, верстати та ін.)

Виконавчий орган робочої машини – це елемент робочої машини, що переміщується й виконує робочу операцію (напр., поршень чи робоче колесо насоса, стрічка чи ланцюг конвеєра, супорт верстата тощо).

1.2 Основні види електроприводів

Груповий електропривод – електропривод, що забезпечує рух виконавчих органів кількох робочих машин чи виконавчих органів однієї робочої машини (рис. 1.2). Обертаний рух від електродвигуна 1 із використанням

ремінної передачі 3 передається на приводний вал 4, а від нього до виконавчих органів робочих машин 2 з використанням пасової передачі 3.

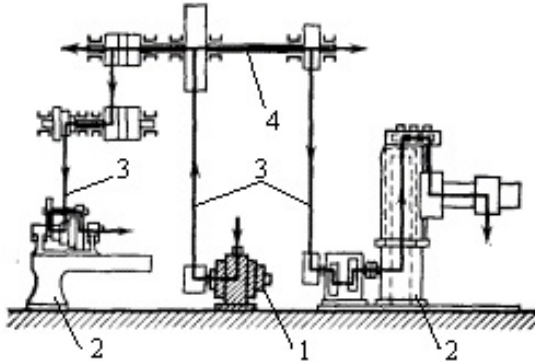


Рисунок 1.2 – Груповий електропривод: 1 – електродвигун, 2 – робочі машини, 3 – пасова передача, 4 – приводний вал

Індивідуальний електропривод – електропривод, що забезпечує рух лише одного виконавчого органу робочої машини (рис. 1.3).

Електропривод постійного струму – електропривод з електродвигуновим пристроєм постійного струму.

Електропривод змінного струму – електропривод з електродвигуновим пристроєм змінного струму.

Реверсивний електропривод – електропривод, що забезпечує рух електродвигунового пристрою в протилежних напрямках.

Нереверсивний електропривод – електропривод, що забезпечує рух електродвигунового пристрою лише в одному напрямку.

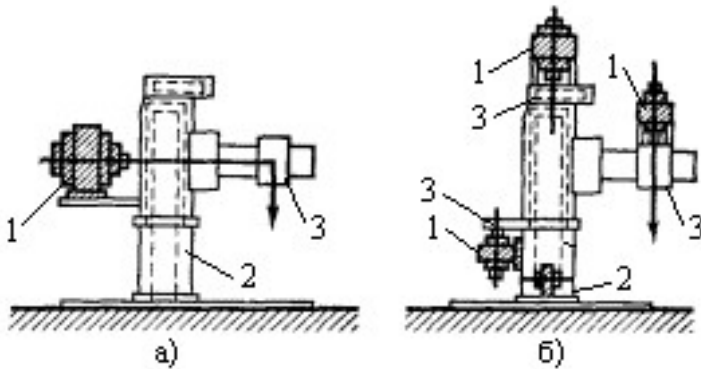


Рисунок 1.3 – Ідивідуальний електропривод:
1 – електродвигун, 2 – робочі машини, 3 – виконавчі органи робочої машини

Головний електропривод – електропривод, що забезпечує головний рух робочої машини та (або) основну операцію процесу.

Допоміжний електропривод – електропривод, що забезпечує допоміжний рух робочої машини та (або) виконання допоміжних операцій процесу.

1.3 Види електричних схем електропривода

Для пояснення роботи електропривода використовують електричні схеми різних типів.

Структурна схема визначає основні функціональні складові частини електропривода, їх призначення та взаємозв'язок між ними (приклад такої схеми наведено на рис. 1.1). Такі схеми виконують на першій стадії проектування й використовують для загального ознайомлення та погодження складу основних частин електропривода.

Функціональна схема, крім інформації, що дає структурна схема, пояснює процеси, які відбуваються в окремих складових частинах електропривода. Такі схеми використовують для вивчення принципу дії електропривода.

Розглянемо функціональну схему, що представлена на рисунку 1.4. Джерелом живлення такої схеми є мережа змінного синусоїдального струму напругою 380 В та частотою 50 Гц. Функцію перетворювального пристрою виконує тиристорний перетворювач частоти (ТПЧ), що має діапазон зміни частоти напруги на виході від 45 до 55 Гц.

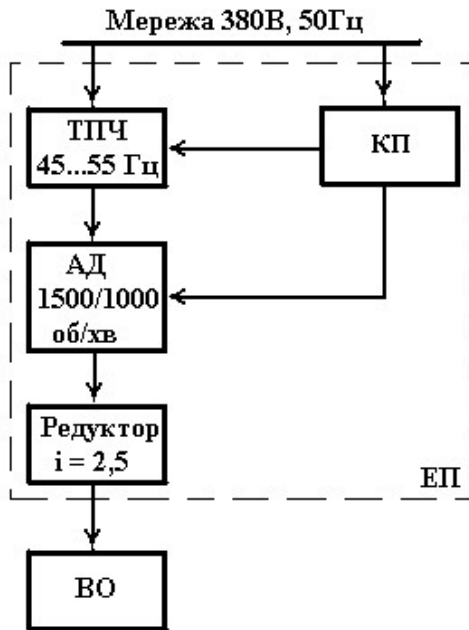


Рисунок 1.4 – Функціональна схема

Функцію електродвигунового пристрою виконує трифазний асинхронний двигун із двома ступенями синхронної швидкості: 1 500 та 1 000 об/хв.

Функцію передавального пристрою виконує редуктор із передатним відношенням $i = 2,5$.

Керувальний пристрій керує роботою перетворювального та електродвигунового пристроїв.

Принципова (повна) схема визначає повний склад елементів і зв'язків між ними й дає повне та детальне уявлення про принцип роботи електропривода в усіх без винятку режимах роботи. Такі схеми є основою для розроблення конструкторської документації на всю робочу машину.

Під час креслення принципових електричних схем використовують умовні графічні зображення елементів, основні з яких наведені в додатку Б.

Як приклад розглянемо схему, зображену на рисунку 1.5. Джерелом живлення є трифазна трипровідна мережа (А, В, С). Споживачем електричної енергії є асинхронний двигун із короткозамкненим ротором М, що виконує функцію електродвигунового пристрою електропривода.

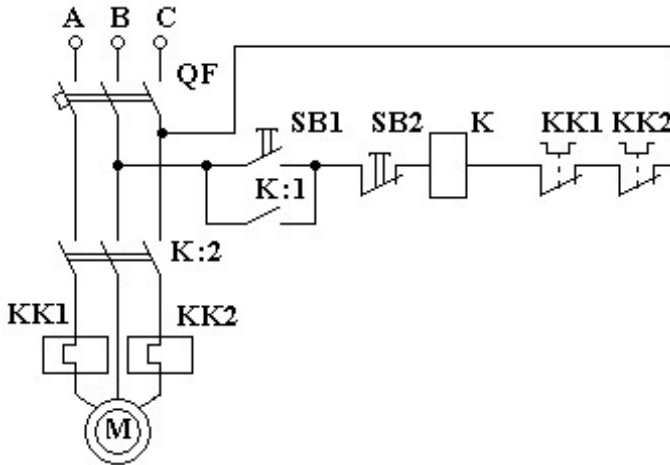


Рисунок 1.5 – Принципова схема

До складу керувального пристрою входять такі електричні апарати: вимикач автоматичний QF, контактор (на схемі показані його котушка K, допоміжний K:1 та силові K:2 контакти), кнопки «Пуск» (SB1) і «Стоп» (SB2) та реле електротеплові KK1 та KK2 (на схемі показані їх сприймальні елементи та контакти).

Основні правила креслення принципових електричних схем

1 Принципові електричні схеми складаються з окремих *елементів*, якими можуть бути як цілі вироби (резистори, конденсатори, котушки індуктивності, лампи тощо), так і окремі складові частини виробів (котушки й контакти реле, обмотки та магнітопровід трансформатора, статор і ротор електродвигуна тощо).

2 Елементи електричних схем зображають у вигляді *умовних графічних позначень*, як показано в додатку Б, або ж оберненими на кут 90° , 180° чи 270° .

3 Електричні з'єднання між елементами схеми зображають *лініями електричного зв'язку*, що розташовують у вигляді горизонтальних і вертикальних відрізків із найменшою кількістю зламів і взаємних перетинів.

4 Умовні графічні позначення елементів і лінії їх електричного зв'язку виконують на схемах лініями однакової товщини.

5 Кожний елемент електричної схеми повинен мати *літерно-цифрове позиційне позначення*. Воно складається з двох частин, що записуваних без розділових знаків і пропусків.

6 Першу частину літерно-цифрового позиційного позначення називають *літерним кодом елемента*, що має одну або кілька літер латинського алфавіту (M , K , QF, KK).

7 Другу частину літерно-цифрового позиційного

позначення називають *порядковим номером елементів* і позначають однією або кількома арабськими цифрами (наприклад, на рис. 1.5: SB1, SB2, КК1, КК2). Порядковий номер елементам одного й того самого виду присвоюють, починаючи з одиниці, а далі – згідно з розташуванням елементів на схемі в *послідовності зліва направо та зверху вниз*.

8 Якщо на схемі умовними позначеннями зображені кілька елементів одного виробу, то їм присвоюють одне й те саме літерно-цифрове позначення (наприклад, на рис. 1.5: сприймальні частини реле теплових та їх контакти мають літерно-цифрове позначення КК1, КК2).

9 Якщо на схемі умовними позначеннями зображені кілька однотипних елементів одного виробу, то після їх літерно-цифрового позначення через знак «:» пишуть порядковий номер однотипного елемента, що має одну або декілька арабських цифр. Порядковий номер однотипного елемента присвоюють розпочинаючи з одиниці, далі – згідно з розташуванням елементів на схемі в *послідовності зліва направо й зверху вниз* (наприклад, на рисунку 1.5: допоміжні К:1 та силові К:2 контакти контактора К).

10 Літеро-цифрові позначення *пишуть зверху або праворуч* від умовних графічних позначень елементів. Для них застосовують шрифт одного й того самого розміру.

Послідовність опису принципів електричних схем

- 1 Характеристика джерела живлення.
- 2 Характеристика силових приймачів електричної енергії.
- 3 Перелік і призначення електричних апаратів і вимірювальних приладів.
- 4 Робота схеми на час пуску.
- 5 Робота схеми в сталому режимі.
- 6 Робота схеми за робочого відключення.

7 Робота схеми за аварійного відключення.

Схема електричних з'єднань (монтажна) показує зв'язки між елементами, із чого вони виконані (дріт, джгут, кабель тощо), а також місця їх з'єднання та введення (рис. 1.6). Ці схеми використовують під час розроблення конструкторської документації і на сам перед конструкторських креслень, що визначають розміщення та способи кріплення дротів, джгутів, кабелів тощо. За такими схемами виконують електромонтажні роботи в робочих машинах.

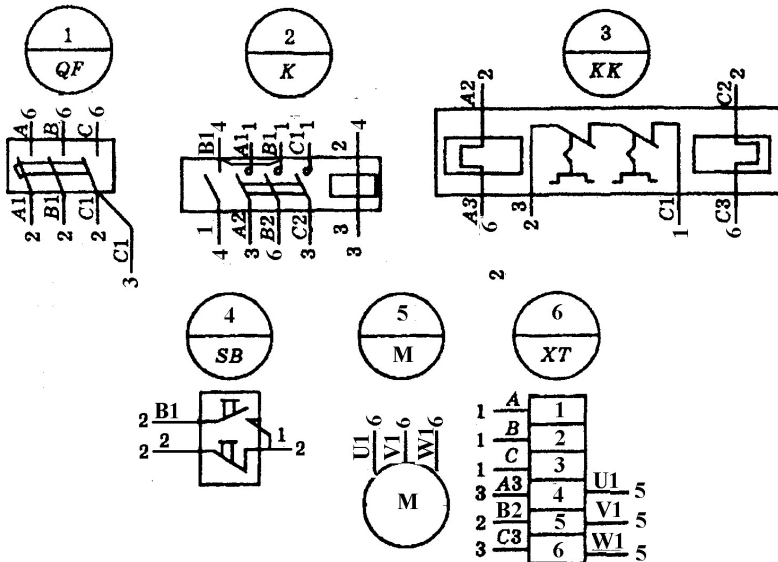


Рисунок 1.6 – Монтажна схема

На цих схемах зображують усі пристрої (електричні апарати, електричні машини, вимірювальні прилади тощо), що входять до складу електропривода. Їм надають цифровий номер (на рис. 6 – від 1 до 6) і вказують літерно-

цифрове позначення (на рис. 6 – QF, K, KK, SB, M, XT) відповідно до принципової схеми.

Для кожного пристрою вказують лише елементи, задіяні в схемі.

Для силової частини схеми над лініями, що підходять та відходять, вказують літерно-цифрове позначення ліній (на рис. 6 – наприклад, для автоматичного вимикача QF: лінії, що підходять – А, В, С, а лінії, що відходять – А1, В1, С1).

Для кола керування над лініями, що підходять та відходять, вказують цифрове позначення (на рис. 6 – наприклад, для котушки контактора К: лінія, що підходить – 2, лінія, що відходить – 3).

Перед лініями цифрами вказують номер того пристрою, куди йде провід (на рис. 6 – наприклад, для до котушки контактора К: лінія 2 підходить від кнопочкового поста SB за номером 4, а лінія 3, що відходить, іде до реле теплового за номером 3).

Схеми підключення показують зовнішнє електричне підключення робочої машини.

Загальна схема. Цю схему використовують тоді, коли робоча машина є складовою частиною комплексу й визначає складові частини цього комплексу та електричні з'єднання між ними.

Схема розташування визначає відносне розташування складових частин робочої машини, а також дротів, джгутів, кабелів, які їх з'єднують.

1.4 Основи механіки електропривода

1.4.1 Приведення моментів і сил

Механічна частина електропривода (рис. 1.7 а) більшості робочих машин становить собою доволі складний кінематичний ланцюг із великою кількістю частин, що рухаються поступово чи обертово, мають різні швидкості, пружності, масу. У місцях з'єднання таких частин існують зазори. З урахуванням цих факторів розрахункова схема механічної частини електропривода може бути подана як багатомасова механічна система з пружними зв'язками й зазорами, динамічний розрахунок якої пов'язаний із певними труднощами.

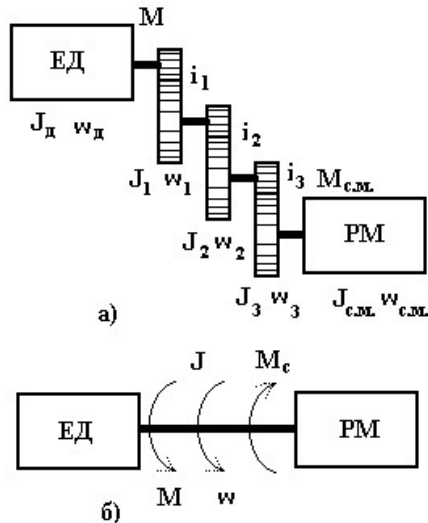


Рисунок 1.7 – Кінематична схема механічної частини електропривода: а) реальної, б) спрощеної

На практиці в інженерних розрахунках буває доцільним реально багатомасову механічну систему електропривода замінити двомасовою системою (рис.1.7 б). Та похибка, що зумовлює таке спрощення, допустима в більшості випадків, і розбіжність у розрахунках є незначною.

Спрощення реальної механічної системи досягають методом зведення параметрів усіх елементів до одного з них. Найчастіше таким елементом є вал електродвигуна. Тоді розрахункову схему механічної частини електропривода зводять до однієї узагальненої жорсткої механічної ланки, що має еквівалентну масу з моментом інерції J , та на яку діють момент електродвигуна M і сумарний, приведений до вала електродвигуна статичний момент опору M_c усіх інших складових частин привода.

Зведення моментів опору від однієї осі обертання до іншої виконують на основі збереження енергетичного балансу реальної та спрощеної систем. Водночас втрату потужності в проміжних передачах враховують методом уведення до формули відповідних коефіцієнтів корисної дії η_n

$$M_c = M_{c.m} \frac{1}{i_1 i_2 i_3 \dots i_n} \frac{1}{\eta_{n1} \eta_{n2} \eta_{n3} \dots \eta_{nn}} \quad (1.1)$$

де $M_{c.m}$ – реальний момент опору робочої машини, Н·м;

M_c – момент опору робочої машини, зведений до швидкості обертання вала двигуна, Н·м;

i – передавальні відношення.

Зведення сил опору проводять аналогічно зведенню моментів за формулою

$$M_c = F_{c.m} v / \omega_d \eta_n \quad (1.2)$$

де $F_{c.m}$ – сила опору робочої машини, Н;

v – швидкість поступального руху, м/с;

ω_d – кутова швидкість вала двигуна, рад/с.

Зведення моментів інерції до однієї осі обертання виконують з урахуванням того, що сумарний запас кінетичної енергії рухомих елементів привода залишається незмінним як для реальної, так і для зведеної систем. Його визначають за формулою

$$J = J_d + J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega_d} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_d} \right)^2 + \dots + J_n \left(\frac{\omega_n}{\omega_d} \right)^2 \quad (1.3)$$

де J_d – момент інерції ротора двигуна та інших елементів (муфти, шків, шестерні тощо), що установлені на ньому, кг·м²;

J_1, J_2, \dots, J_n – моменти інерції інших елементів привода, що обертаються з кутовими швидкостями відповідно до $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$.

Зведення мас, що рухаються поступально, до вала двигуна здійснюють також на основі незмінності кінетичної енергії. Момент інерції визначають за формулою

$$J = m(v / \omega_d)^2 \quad (1.4)$$

Якщо ж робочий механізм має обертові елементи й ті, що рухаються поступально, то сумарний зведений до вала двигуна момент інерції визначають за формулою

$$J = J_d + J_1 \frac{1}{i_1^2} + J_2 \frac{1}{i_1^2 i_2^2} + \dots + J_n \frac{1}{i_1^2 i_2^2 \dots i_n^2} + m \left(\frac{v}{\omega_d} \right)^2 + \dots \quad (1.5)$$

ПРИКЛАД

Звести до вала електродвигуна M моменти опорів і моменти інерції механізму підймання лебідки (рис. 1.8).

Вихідними параметрами для розрахунку ϵ : $n_{дв}$ – частота обертання ротора, $J_{дв}$ – момент інерції електродвигуна, $J_б$ – момент інерції барабана, $n_б$ – частота обертання барабана, $D_б$ – діаметр барабана, m – маса вантажу, коефіцієнти корисної дії: $\eta_{ш}$ – пари шестерень, $\eta_{бт}$ – пари барабан-трос.

Вихідні параметри для розрахунку вказані в таблиці 1.1.

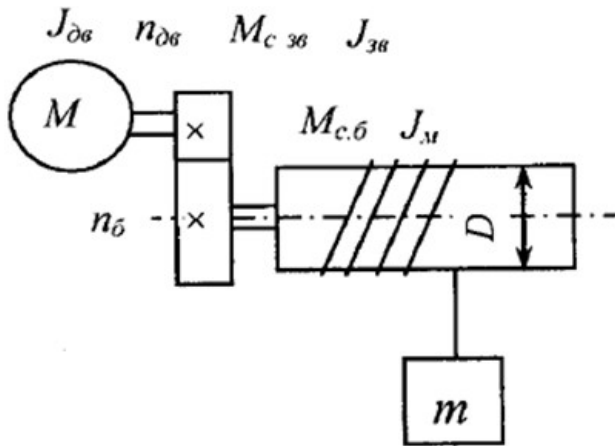


Рисунок 1.8 – Кінематична схема електропривода механізму підймання лебідки

Таблиця 1.1 – Вихідні параметри для розрахунку

$n_{дв}$	$J_{дв}$	$J_б$	$n_б$	$D_б$	m	$\eta_{ш}$	$\eta_{бт}$
об/хв	кг·м ²	кг·м ²	об/хв	м	кг	–	–
1450	0,25	0,5	50	0,6	1500	0,95	0,97

РОЗВ'ЯЗАННЯ

1 Розраховуємо лінійну швидкість підймання та опускання вантажу

$$v = \frac{\pi D n_{\bar{o}}}{60} = \frac{3,14 \cdot 0,6 \cdot 50}{60} = 1,57 \text{ м/с.}$$

2 Розраховуємо момент статичних опорів на валу барабана під час підймання вантажу

$$M_{\bar{o}.n} = \frac{mgD}{2\eta_{\bar{o}m}} = \frac{1500 \cdot 9,81 \cdot 0,6}{2 \cdot 0,97} = 4551 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3 Розраховуємо зведений до вала двигуна момент статичних опорів на валу барабана під час підймання вантажу

$$M_{c.зв.m} = \frac{M_{\bar{o}.n} n_{\bar{o}}}{n_{\bar{o}} \cdot \eta_{ui}} = \frac{4551 \cdot 50}{1450 \cdot 0,95} = 165 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

4 Розраховуємо момент статичних опорів на валу барабана під час опускання вантажу

$$M_{\bar{o}.on} = \frac{mgD\eta_{\bar{o}.m}}{2} = \frac{1500 \cdot 9,81 \cdot 0,6 \cdot 0,97}{2} = 4282 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5 Розраховуємо зведений до вала двигуна момент статичних опорів під час опускання вантажу

$$M_{c.зв.on} = \frac{M_{\bar{o}.n} n_{\bar{o}} \eta_{ui}}{n_{\bar{o}}} = \frac{4551 \cdot 50 \cdot 0,95}{1450} = 149 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6 Розраховуємо зведений до вал двигуна момент інерції за формулою

$$M_{\bar{o}.on} = J_{\bar{o}\bar{o}} + \frac{J_{\bar{o}}}{i^2} + \frac{mv^2}{w_{\bar{o}\bar{o}}^2},$$

де i – передавальне відношення пари шестерень

$$i = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{б}}} = \frac{1450}{50} = 29,$$

$\omega_{\text{дв}}$ – кутова швидкість обертання валу електродвигуна:

$$\omega_{\text{дв}} = 0,1047 \cdot n_{\text{дв}} = 0,1047 \cdot 1450 = 152 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Тоді

$$\begin{aligned} M_{\text{б.он}} &= J_{\text{дв}} + \frac{J_{\text{б}}}{i^2} + \frac{mv^2}{\omega_{\text{дв}}^2} = \\ &= 0,25 + \frac{0,5}{29^2} + \frac{1500 \cdot 1,57^2}{152^2} = 0,41 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \end{aligned}$$

1.4.2 Механічні характеристики робочих машин

Для правильного проектування й економічної експлуатації електропривода важливе значення має узгодження *механічних характеристик* робочої машини й електродвигуна.

Залежність між зведеними до вала двигуна параметрами швидкості та моменту опору робочої машини $\omega = f(M_c)$ називають *механічною характеристикою робочої машини*. Для кожної окремо взятої робочої машини залежність $\omega = f(M_c)$ математично може бути описана по-своєму, але можливе також використання єдиної формули, що дозволяє зробити узагальнювальні висновки щодо механічних характеристик усіх робочих машин:

$$M_c = M_0 + (M_{\text{с.ном}} - M_0)(\omega / \omega_{\text{ном}})^x \quad (1.6)$$

де M_c – момент опору робочої машини за швидкості ω ;

M_0 – момент опору сил тертя в рухомих частинах;

$M_{c,ном}$ – момент опору робочої машини за номінальної швидкості $\omega_{ном}$;

x – показник ступеня, що характеризує зміну моменту опору в разі зміни швидкості.

Згідно з формулою (1.6) механічні характеристики робочих машин класифікують наступним чином (рис. 1.9)

1 Незалежна від швидкості механічна характеристика (пряма 1). Для цієї характеристики: $x = 0$, а момент опору M_c не залежить від швидкості. Такі механічні характеристики мають, наприклад, ланцюгові й стрічкові конвеєри, поршневі насоси за незмінної висоти подачі, значна частина металорізальних верстатів, піднімально-транспортні механізми (крани, тельфери, лебідки тощо).

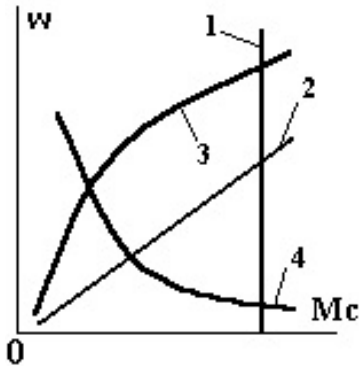


Рисунок 1.9 – Механічні характеристики робочих машин

2 Лінійно-зростаюча механічна характеристика (пряма 2). Для цієї характеристики $x = 1$, а момент опору M_c лінійно залежить від швидкості ω . Таку механічну характеристику має, наприклад, генератор постійного струму, що працює з постійним навантаженням.

3 Нелінійно-зростаюча механічна характеристика (крива 3). Для цієї характеристики $x = 2$, а момент опору M_c має квадратичну залежність від швидкості ω . Таку

механічну характеристику мають відцентрові насоси, вентилятори, гребні гвинти тощо.

4 *Нелінійно-спадна* механічна характеристика (крива 4). Для цієї характеристики $x = -1$, а момент опору M_c знаходиться в обернено пропорційній залежності від швидкості ω . Таку механічну характеристику мають деякі металорізальні верстати (токарні, фрезерні), вовнопрядильне обладнання, моталки в металургійній промисловості тощо.

Наведені чотири види механічних характеристик робочих механізмів не вичерпують усієї гама можливих характеристик, але дають уявлення про найбільш поширені серед них.

1.4.3 Механічні характеристики електродвигунів

Механічною характеристикою електродвигуна називають залежність швидкості обертання вала двигуна від електромагнітного обертового моменту $\omega = f(M)$. Для більшості видів електродвигунів характерною ознакою є зменшення швидкості обертання вала двигуна зі збільшенням моменту. Тому одним із показників для механічних характеристик електродвигунів є *жорсткість механічної характеристики* – відношення різниці електромагнітних моментів, що розвиває електродвигун, до відповідної різниці швидкостей:

$$\beta = (M_2 - M_1)/(\omega_2 - \omega_1) = \Delta M / \Delta \omega \quad (1.7)$$

Згідно з формулою (1.7) механічні характеристики електродвигунів класифікують наступним чином (рис. 1.10):

1 *Абсолютно жорстка* механічна характеристика (пряма 1). Таку характеристику мають синхронні електродвигуни. У них швидкість обертання вала не

залежить від величини моменту, якщо він не перевищує певного критичного значення.

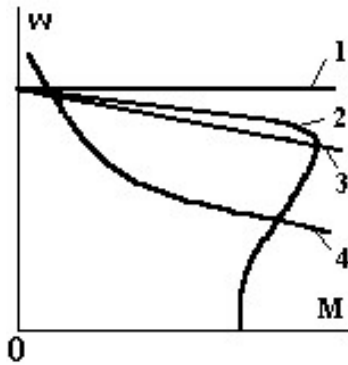


Рисунок 1.9 – Механічні характеристики електродвигунів

2 *Жорстка* механічна характеристика. Таку характеристику мають двигуни постійного струму з незалежним і паралельним збудженням (пряма 3). Асинхронні двигуни в межах робочої частини мають також жорстку механічну характеристику (прямолінійна частина кривої 2). У таких електродвигунів швидкість обертання вала зменшується зі збільшенням моменту, але це зменшення невелике.

3 *М'яка* механічна характеристика. Таку характеристику мають двигуни постійного струму з послідовним збудженням (крива 4).

Двигуни постійного струму зі змішаним збудженням можуть мати механічну характеристику як жорстку, так і м'яку, залежно від того, яку частину від сумарного магнітного потоку створює послідовна, а яку паралельна обмотки збудження.

1.4.4 Умови роботи електропривода в усталеному режимі

Головною ознакою роботи електропривода в усталеному режимі є сталість швидкості руху електродвигуна й виконавчого органа робочої машини. Це можливо лише за умови рівності зведеного до вала електродвигуна моменту опору робочої машини й обертового моменту електродвигуна: $M = M_c$.

У процесі роботи більшості робочих машин момент опору постійно змінюється. Електродвигуни мають унікальну здатність автоматично підтримувати рівновагу електромеханічної системи електропривода в разі зміни моменту опору. В електричних двигунах роль автоматичного регулятора виконує електрорушійна сила (ЕРС) двигуна.

Пояснимо це на прикладі роботи електропривода робочої машини, що має незалежну від швидкості механічну характеристику, а функцію електродвигунового пристрою в якому виконує асинхронний двигун (рис. 1.11).

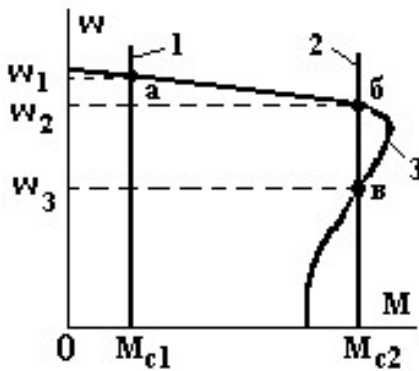


Рисунок 1.11 – До пояснення умови роботи привода в усталеному режимі

Характеристика 1 робочої машини відповідає моменту опору M_{c1} , наприклад, у режимі неробочого ходу. Умові $M = M_{c1}$, тобто усталеному режиму роботи, відповідає спільна для механічної характеристики 3 електродвигуна й для механічної характеристики 1 робочої машини, точка «а» та швидкість ω_1 .

У разі збільшення навантаження (характеристика 2 робочої машини) швидкість електродвигуна зменшується, а електромагнітний обертовий момент двигуна зростає. Зростання моменту буде відбуватися доти, доки не настане рівновага моментів $M = M_{c2}$. Цьому новому усталеному режиму роботи електропривода відповідає точка «б» і швидкість ω_2 . Завдяки цьому електропривод і надалі стійко працюватиме за інших значень швидкості й моменту.

Стан усталеного режиму роботи електропривода, коли під час зміни навантаження автоматично змінюється момент електродвигуна й швидкість обертання, називають *статичною стійкістю*. Умовою статичної стійкості електропривода є:

$$\partial M / \partial \omega - \partial M_c / \partial \omega < 0 \quad (1.8)$$

або

$$\beta - \beta_c < 0. \quad (1.9)$$

Умови (1.8) та (1.9) означають, що електропривод зберігатиме статичну стійкість, лише якщо за додатного приросту швидкості ω момент електродвигуна M буде меншим за момент опору M_c й привод завдяки цьому загальмує до попереднього значення швидкості. За від'ємного приросту швидкості ω момент електродвигуна M перевищуватиме момент опору M_c , й привод завдяки цьому розженеться до попереднього значення швидкості.

Але можливий і такий стан, коли робота електромеханічної системи електропривода буде *несталою*, якщо умови (1.8) та (1.9) не виконуються. Прикладом цього може бути робота привода в точці «в»

(рис. 1.11), коли навіть незначне відхилення швидкості призводить до того, що привод не повертається в точку усталеного режиму.

Найчастіше під час проектування електропривода механічна характеристика робочої машини є заданою. Для того щоб забезпечити усталений режим роботи електропривода в заданому діапазоні зміни моменту опору, потрібно правильно вибрати електродвигун (його механічні характеристики повинні відповідати механічним характеристикам робочої машини). Цьому питанню буде присвячено окремий розділ підручника.

1.4.5 Рівняння руху електропривода

Крім розглянутих у попередньому параграфі умов усталеного режиму роботи електропривода, актуальними є також умови роботи електропривода в *перехідних режимах*.

Перехідним режимом роботи електропривода називають режим роботи під час переходу від одного усталеного режиму до іншого. Характерними прикладами роботи електропривода в перехідних режимах є пуск електропривода, гальмування, реверс (зміна напрямку руху), зміна навантаження й швидкості тощо, які відбуваються в нормальних режимах роботи й пов'язані з технологічним процесом робочої машини.

Перехідний режим роботи може мати місце також у результаті виникнення аварій, що призводять до негайних зупинок, або в разі порушення нормальних умов електропостачання (наприклад, у разі зміни напруги або частоти, зникнення однієї з фаз живлення, несиметричності напруги тощо).

Рівняння руху електропривода в перехідному режимі повинне враховувати всі сили й моменти, що діють в електромеханічній частині електропривода.

У разі обертового руху всіх складових механічної частини електропривода й за умови, що момент інерції привода J є величиною постійної (що справедливо для значної більшості робочих механізмів), рівняння руху електропривода може бути записане формулою

$$M - M_c = J(\partial\omega/\partial t). \quad (1.10)$$

Рівняння (1.10) показує, що електромагнітний обертовий момент M , створений двигуном, урівноважується моментом опору M_c на його валу й динамічним моментом $J(\partial\omega/\partial t)$.

Проаналізуємо (1.10):

- якщо $M > M_c$, то $\partial\omega/\partial t > 0$, привод прискорюється;
- якщо $M < M_c$, то $\partial\omega/\partial t < 0$, привод уповільнюється;
- якщо $M = M_c$, то $\partial\omega/\partial t = 0$, привод працює в усталеному режимі.

Момент двигуна M вважають додатнім і у формулі (1.10) записують зі знаком «плюс», якщо він спрямований у бік руху привода. Якщо ж він спрямований у бік, зворотний до руху привода, то його вважають від'ємним і у формулі (1.10) записують зі знаком «мінус».

Знак «мінус» перед значенням моменту опору M_c у формулі (1.10) означає його гальмівну дію та зворотний напрямок щодо швидкості ω , а знак «плюс» означає, що він допомагає прискоренню привода.

Динамічний момент $J(\partial\omega/\partial t)$ діє лише під час перехідного процесу, а його величину й знак визначають алгебраїчною сумою моментів двигуна M та опору робочої машини M_c .

З урахуванням усього зазначеного *рівняння руху електропривода* в загальному випадку можна записати так:

$$\pm M \mp M_c = J(\partial\omega/\partial t) \quad (1.10 \text{ а})$$

Контрольні запитання та завдання

1 Із яких основних частин складається електропривод робочої машини та яке їх призначення?

2 Що мають спільного й чим відрізняються структурна та функціональна електричні схеми?

3 Яку інформацію дають принципові електричні схеми?

4 Проаналізуйте електричні схеми з'єднань, підключень, загальну схему та схему розміщень.

5 Що визначає літерно-цифрове позиційне позначення елемента електричної схеми?

6 Що називають літерним кодом елемента на принциповій схемі та з чого він складається?

7 Як позначають порядковий номер елементів на принциповій схемі?

8 У якій послідовності рекомендують описувати роботу принципової електричної схеми?

9 За яких умов здійснюють зведення моментів опору від однієї осі обертання до іншої?

10 За яких умов здійснюють зведення моментів інерції від однієї осі обертання до іншої?

11 Як класифікують механічні характеристики робочих машин?

12 Як класифікують механічні характеристики електродвигунів?

13 У чому полягають умови роботи електропривода в усталеному режимі?

Розділ 2

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В електроприводах робочих машин використовують електричні апарати як загального призначення, так і спеціальні.

Електричні апарати загального призначення використовують в електроприводах різних видів робочих машин. Особливості їх конструктивного виконання, виконувані функції, технічні характеристики та параметри, за якими їх вибирають, розглянуті в цьому розділі.

Спеціальні електричні апарати використовують в електроприводах лише певних видів робочих машин. Вони будуть розглянуті в 5-му розділі, пов'язаному з електроприводами робочих машин для переміщення рідин і газів.

2.1 Пускорегулювальні електричні апарати

Пускорегулювальні електричні апарати використовують для вмикання/вимикання електродвигунового пристрою та керування процесом його роботи. До цієї групи електричних апаратів можна віднести контактори, реле проміжні та реле часу.

2.1.1 Контактори

Контактори – двопозиційні електричні апарати дистанційної дії, призначені для частого замикання й розмикання силових електричних кіл під навантаженням. Сучасні конструкції контакторів витримують за термін служби більш ніж п'ять мільйонів спрацювань.

Контактори бувають постійного й змінного струму.

Контактори постійного струму призначені для комутації в силових електричних колах постійного струму з напругою до 220 В під час частих і з напругою до 660 В під час нечастих умиканнях. Їх характерною конструктивною ознакою є використання електромагніту постійного струму. Контактори постійного струму виготовляють однополюсними (один силовий контакт) або двополюсними (два силових контакти).

Прикладом однополюсного контактора постійного струму є контактор типу МК1 (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Контактор постійного струму типу МК1

Контактори змінного струму призначені для комутації електричних кіл змінного струму напругою до 660 В. У таких контакторах використовують електромагніт змінного струму. Сучасні зразки

контакторів змінного струму розраховані на велику частоту спрацювань (до 1 200 умикань за годину).

Прикладом контакторів змінного струму є контактори серії КМ-103 (рис. 2.2). Їх технічні характеристики зазначені в таблиці 2.1.



Рисунок 2.2 – Контактор типу КМ-103-012А

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики контакторів серії КМ-103

Тип	I _n , А		Кількість полюсів (N _{пол})	Допоміжні контакти	I _{max} , А
	U _n = 380В	U _n = 660В			
КМ103-009А	9	6,6	3	1р +1з	90
КМ103-012А	12	8,9	3	1р +1з	120
КМ103-018А	18	12	3	1р +1з	180
КМ103-025А	25	18	3	1р +1з	250
КМ103-032А	32	21	3	1р +1з	320
КМ103-040А	40	34	3	1р +1з	400
КМ103-050А	50	39	3	1р +1з	500
КМ103-065А	65	42	3	1р +1з	650
КМ103-080А	80	49	3	1р +1з	800
КМ103-095А	95	55	3	1р +1з	950

Контактори вибирають за такими основними параметрами: номінальною напругою котушок і контактів, номінальним струмом, струмом термічної стійкості, видом і кількістю головних та допоміжних контактів.

На електричних схемах контактори зображують умовними графічними позначеннями їх головних складових частин, як показано в пунктах 31, 32, 38, 39, 40, 57, 58 додатка Б.

2.1.2 Реле проміжні

Реле проміжні – це двопозиційні електричні апарати, призначені для частих комутацій електричних кіл із малими струмами. Їх використовують у схемах керувального пристрою електропривода для розмноження одного сигналу керування по декількох електричних колах. Такі реле також часто використовують для забезпечення електричних блокувань. Іноді реле проміжні використовують для вмикання / вимикання однофазних електродвигунів малої потужності.

В електроприводах робочих машин використовують реле проміжні як постійного, так і змінного струмів.

Прикладом є реле проміжне серії РЭК (рис. 2.3). Його з'єднують із розетковими модульними роз'ємами серії РРМ.

Реле проміжні обирають за такими параметрами: родом («пост.» – постійний, «змін.» – змінний) та значеннями номінальних напруг котушки ($U_{ном}$) й контактів ($U_{кон}$), номінальним струмом контактів ($I_{кон}$), типом і кількістю контактів ($n_{кон}$).

Технічні характеристики реле проміжних зазначені в таблиці 2.2.

На електричних схемах реле проміжні зображують умовними графічним і буквеним позначеннями, як зазначено в пунктах 31, 32, 33, 34, 57 додатка Б.

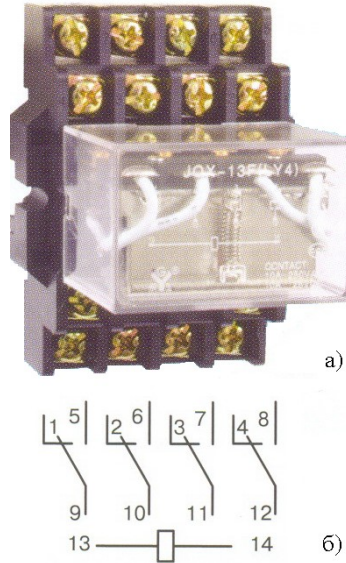


Рисунок 2.3 – Реле проміжне типу РЭК73/3 із модульним роз'ємом типу РРМ73/3:

а) вигляд зовні, б) схема підключень

2.1.3 Реле часу

Реле часу – призначені для забезпечення необхідної затримки в часі від моменту появи сигналу на вмикання/вимикання на його вході до моменту появи сигналу на його виході. Таке їх призначення зумовлене тим, що під час роботи електропривода робочих механізмів часто необхідна затримка в часі між спрацюванням двох або більше електричних апаратів, а

також необхідністю проводити операції технологічного процесу в певній часовій послідовності.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики реле проміжних серій РЭК із розетковими роз'ємами серії РРМ

Тип	U _{ном} , В		U _{кон} , В		I _{кон} , А	n _{кон} , шт	
	пост.	змін.	пост.	змін.		реле	роз'єму
РЭК77/3 РРМ77/3	12; 24	12; 24; 230	24	230	10	3	11
РЭК77/4 РРМ77/4					10	4	14
РЭК78/3 РРМ78/3					5	3	11
РЭК78/4 РРМ78/4					4	4	14

У схемах електропривода робочих механізмів зазвичай використовують реле часу з електромагнітним сповільненням та електронні.

Прикладом реле часу з електромагнітним сповільненням є реле часу серії РЭВ-81Х (РЭВ-811, РЭВ-812, РЭВ-813, РЭВ-814, РЭВ-815, РЭВ-816, РЭВ-817, РЭВ-818). Їх використовують у колах постійного струму, виготовляють на номінальні напруги 24, 48, 110 та 220 В і забезпечують затримку спрацювання до 5,5 с.

Зовнішній вигляд та складові частини реле часу з електромагнітним сповільненням типу РЭВ-813 вказані на рисунку 2.4.

Реле часу з електромагнітним сповільненням вибирають за такими параметрами: номінальною напругою котушки, тривалістю й діапазоном регулювання часу затримки спрацювання, кількістю, видом та комутаційною спроможністю контактів.

Умовні графічні позначення на електричних схемах основних елементів реле часу з електромагнітним сповільненням показані в пунктах 35, 36, 57 додатка Б.

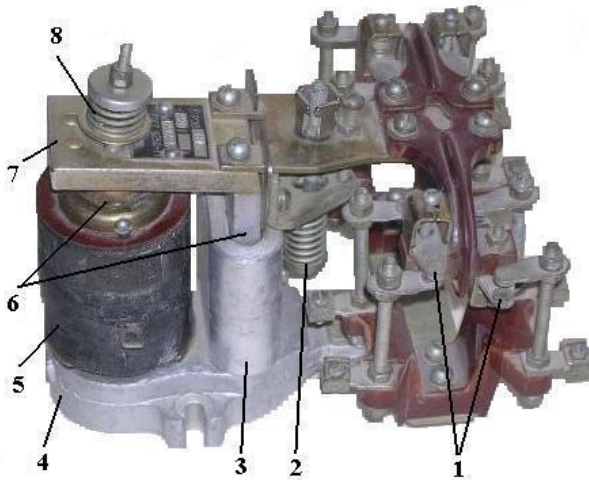


Рисунок 2.4 – Реле часу з електромагнітним сповільненням типу РЭВ-813: 1 – контакти, 2 – пружина зворотня, 3 – гільза, 4 – основа, 5 – котушка, 6 – ярмо, 7 – якір, 8 – пружина регулювальна

Прикладом електронних реле часу, що знайшли використання в схемах керування електроприводами робочих машин, є реле серії ВЛ-6Х (ВЛ-64, ВЛ-66, ВЛ-67, ВЛ-68, ВЛ-69). Вони призначені для комутації електричних кіл із певною, попередньо установленою затримкою в часі.



Рисунок 2.5 – Реле часу типу ВЛ-64

Технічні характеристики реле серії ВЛ-6Х зазначені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики реле часу серії ВЛ-6Х

Тип реле	ВЛ-64	ВЛ-66	ВЛ-67	ВЛ-68	ВЛ-69
Діапазон затримки, с	0,1 – 1,0 0,3 – 3,0 1,0 – 10,0 3,0 – 30,0	0,1– 9,9 1 – 99	0,1– 9,9 1 – 99	0,1– 9,9 1 – 99	0,1– 9,9 1 – 99
Напруга живлення, В	Постійний струм	24, 27, 110, 220			
	Змінний струм	110, 220, 230, 240			

2.2 Електричні апарати захисту

Такі електричні апарати виконують функцію захисту від недопустимих значень електричних і неелектричних параметрів у різних режимах роботи електропривода. До цієї групи електричних апаратів відносять запобіжники плавкі, реле теплові, реле струму та напруги, мікроперемикачі, вимикачі кінцеві тощо.

2.2.1 Запобіжники плавкі

Запобіжники плавкі – це електричні апарати захисту від струмів короткого замикання й тривалих перевантажень по струму. Їх назва зумовлена основним елементом цих електричних апаратів – вставкою плавкою, що виготовляють із провідникового матеріалу (міді, цинку, свинцю, алюмінію тощо) в вигляді дроту з каліброваним значенням його діаметра, однорідних пластинок із

потоншеними ділянками з каліброваними розмірами, пластинок із напайками з легкоплавкого матеріалу (наприклад, олова).

Прикладом серій запобіжників плавких, що використовують в електроприводі робочих машин є:

– ПН-2 – закритий, патрон розбірний із фарфору, з наповнювачем, вставка з міді з напайкою з олова;

– ПП-31 – закритий, патрон розбірний, із наповнювачем, вставка з алюмінію;

– НПП-2 – закритий, патрон нерозбірний скляний, із наповнювачем, вставка з міді з напайкою з олова;

– ПП-41, ПП-57, ПП-71, ПП-59 – швидкодійні запобіжники, закриті, з наповнювачем, вставка зі срібної фольги.

– ПН2П – закритий, патрон розбірний із фарфору, з наповнювачем, вставка з міді з напайкою з олова (рис. 2.6).



*Рисунок 2.6 –
Запобіжник плавкий
серії ПН2П*

Запобіжники плавкі виготовляють за такими номінальними параметрами:

– напругою змінного струму, В: 36, 220, 380, 660;

– напругою постійного струму, В: 24, 110, 220, 440;

– номінальним струмом вставки плавкої, А: від 1 до 1 000;

– номінальним струмом запобіжника, А: 6, 10, 16, 25,

63, 100, 160, 250, 400, 630, 1 000.

До переваг запобіжників плавких перед іншими електричними апаратами захисту можна віднести їх простоту конструкції та обслуговування, малі розміри, надійність, невелику вартість.

Запобіжники плавкі вибирають за такими параметрами: номінальною напругою, номінальним струмом вставки плавкої, номінальним робочим струмом вставки плавкої.

Технічні характеристики запобіжників плавких серії ПН2П наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики запобіжників плавких типу ПН2П

Тип запобіжника	Номінальний струм вставки плавкої, А
ПН2П-100	31,5
	40
	50
	63
	80
	100
ПН2П-250	80
	100
	125
	160
	200
	250
ПН2П-400	200
	250
	315
	400
ПН2П-600	315
	400
	500
	630

На електричних схемах запобіжники плавкі зображують графічним умовним позначенням, як показано в пункті 16 додатка Б.

ПРИКЛАД

Розрахувати параметри та вибрати запобіжники плавкі для захисту від надструмів асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, що входить до складу електропривода робочої машини.

Вихідні параметри для розрахунків (P_n – номінальна потужність, U_n – номінальна напруга, K_i – коефіцієнт пуску, η – ККД, $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності, K_3 – коефіцієнт завантаження) вказані в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Вихідні параметри для розрахунку

P_n , кВт	U_n , кВ	K_i	η , %	$\cos\varphi$	K_3
7,5	0,38	7,5	87,5	0,88	0,81

РОЗВ'ЯЗАННЯ

1 Визначаємо номінальний струм:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{7,5}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,875 \cdot 0,88} = 14,82 \text{ А.}$$

2 Визначаємо розрахунковий струм:

$$I_{роз} = I_n K_3 = 14,82 \cdot 0,81 = 12 \text{ А.}$$

3 Визначаємо пусковий струм двигуна:

$$I_{пус} = I_{роз} K_i = 12 \cdot 7,5 = 90 \text{ А.}$$

4 Визначаємо розрахунковий струм вставки плавкої:

$$I_{вст} \geq I_{пус} / \alpha = 90 / 2,5 = 36 \text{ А,}$$

де α – коефіцієнт перевантаження. Для асинхронного двигуна з к. з. ротором і легким пуском $\alpha = 2,5$.

5 Вибираємо згідно з таблицею 2.4 запобіжник типу ПН2П-100 з номінальним струмом вставки плавкої 40 А.

2.2.2 Реле теплові

Реле теплові призначені для захисту від перевантажень по струму. Їх використовують в електроприводі робочих машин як окремі електричні апарати, так і в складі таких електричних апаратів, як вимикачі автоматичні й пускачі магнітні, що будуть розглянуті нижче.

Прикладом реле теплових є реле серії РТЛ-100Х (рис. 2.7), призначених для захисту від перевантажень по струму та обривання фаз електричних кіл напругою до 660 В, номінальним навантаженням по струму до 80 А і діапазоном струмових уставок від 0,1 до 64 А.

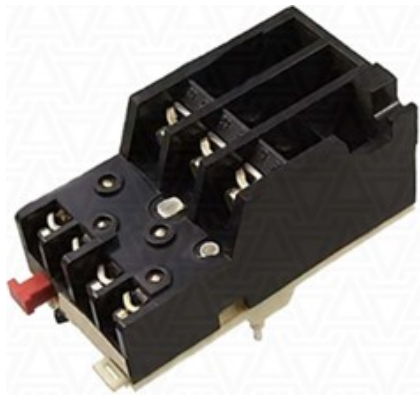


Рисунок 2.7 – Реле теплове типу РТЛ-1005

Реле теплові вибирають за такими параметрами: номінальною напругою, номінальним струмом, кількістю полюсів, кількістю контактів, діапазоном струмових уставок.

Дані про діапазон струмових уставок реле теплових серії РТЛ-100Х наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Діапазон струмових уставок реле теплових серії РТЛ-100Х

Тип	Діапазон струмових уставок, А	Тип	Діапазон струмових уставок, А
РТЛ-1001	0,1 – 0,17	РТЛ-1008	2,4 – 4,0
РТЛ-1002	0,16 – 0,26	РТЛ-1010	3,8 – 6,0
РТЛ-1003	0,25 – 0,4	РТЛ-1012	5,5 – 8,0
РТЛ-1004	0,38 – 0,65	РТЛ-1014	7,0 – 10,0
РТЛ-1005	0,61 – 1,0	РТЛ-1016	9,5 – 14,0
РТЛ-1006	0,95 – 1,6	РТЛ-1021	13,0 – 19,0
РТЛ-1007	1,5 – 2,6	РТЛ-1022	18,0 – 25,0

На електричних схемах такі елементи реле теплових, як сприймальний елемент (біметалева пластина) й контакти зображують графічними умовними позначеннями, як показано в пунктах 41, 59 додатка Б.

2.2.3 Реле струму

Реле струму – це електричні апарати захисту від недопустимих значень струмів в електричних колах. Істотною відмінністю їх від розглянутих попередньо електричних апаратів захисту є те, що вони спрацьовують майже миттєво після досягнення струмом деякого критичного значення – струму спрацювання реле.

В електроприводах робочих машин використовують як електромагнітні, так і електронні реле струму.

Зазвичай електромагнітні реле струму виконують функцію реле максимального струму, але можуть виконувати й функцію реле мінімального струму. Вони бувають як постійного, так і змінного струму.

Прикладом є електромагнітне реле струму серії РТ-40 (рис. 2.8), що використовують у колах керування

електроприводом змінного струму частотою 50–60 Гц.

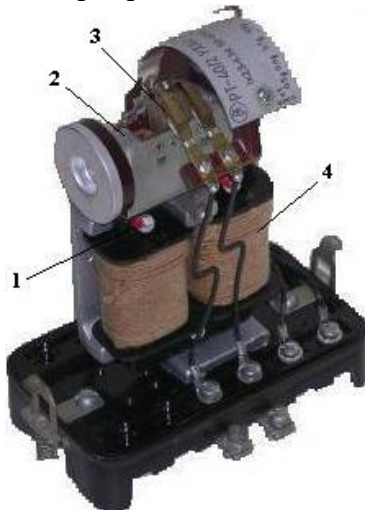


Рисунок 2.8 – Реле струму серії РТ-40: 1 – ярмо, 2 – якір, 3 – контакти, 4 – котушка

Діапазон уставок струму спрацювання для реле струму серії РТ-40 наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Діапазон уставок струму спрацювання реле струму серії РТ-40

Тип	З'єднання котушок	
	послідовне	паралельне
РТ 40/0,2	0,05–0,1	1–0,2
РТ 40/0,6	0,15–0,3	0,3–0,6
РТ 40/2	0,5–1	1–2
РТ 40/6	1,5–3	3–6
РТ 40/10	2,5–5	5–10
РТ 40/20	5–10	10–20
РТ 40/50	12,5–25	25–50
РТ 40/100	25–50	50–100
РТ 40/200	50–10	100–200

Електромагнітні реле струму вибирають за такими параметрами: номінальною напругою, номінальним

струмом, діапазоном уставок струму.

Умовні графічні позначення на електричних схемах основних елементів електромагнітних реле струму показані в пунктах 31, 32, 33, 57 додатка Б.

Прикладом електронного реле струму є реле струму серії TRM (рис. 2.9), призначені для автоматичного відключення обладнання в разі досягнення струмом граничного значення – струму спрацювання. Такі реле забезпечують програмований діапазон спрацювання й можливість завдання часу спрацювання й часу повторного ввімкнення. Крім того, у них передбачені три можливі програми повернення в «робочий» режим – ручний, напівавтоматичний та автоматичний.



Рисунок 2.9 – Електронне реле струму типу TRM-300

Технічні характеристики електронних реле струму серії TRM наведені в таблиці 2.8.

2.2.4 Реле напруги

Реле напруги – це електричні апарати захисту від недопустимих значень напруг на окремих споживачах або на окремих ділянках електричних кіл. В електроприводах робочих машин використовують як електромагнітні, так і електронні реле напруги.

Таблиця 2.8 – Технічні характеристики електронних реле струму серії TRM

Тип	Діапазон регулювання струму, А	Кількість фаз
TRM-01	0 – 20	1
TRM-10	1 – 10	3
TRM-20	8 – 20	3
TRM-50	15 – 50	3
TRM-100	40 – 100	3
TRM-200	90 – 200	3
TRM-300	190 – 300	3
TRM-400	290 – 400	3

Електромагнітні реле напруги мають такі самі складові частини, що й електромагнітні реле струму. Істотною відмінністю є те, що обмотки котушок у них підключають паралельно до джерела живлення, споживача або ділянки електричного кола, від недопустимої зміни напруги яких вони повинні захищати. Тому обмотку їх виготовляють з ізольованого дроту зі значно меншим перерізом, ніж у реле струму, що має значний електричний опір.

Такі пристрої можуть виконувати функцію як реле максимальної, так і мінімальної напруги.

Прикладом електромагнітного реле напруги є реле серії ЭН (рис. 2.10). У таких реле важіль 5 забезпечує можливість регулювати значення напруги спрацювання в діапазоні $(0,8-1,4) U_{ном}$. У разі послідовного з'єднання $U_{ном} = 200 \text{ В}$, а в разі паралельного – $U_{ном} = 400 \text{ В}$.

Електромагнітні реле напруги вибирають за такими параметрами: номінальною напругою, номінальним струмом, діапазоном напруги спрацювання.

Умовні графічні позначення на електричних схемах основних елементів реле напруги показані в пунктах 31,

32, 57 додатка Б.

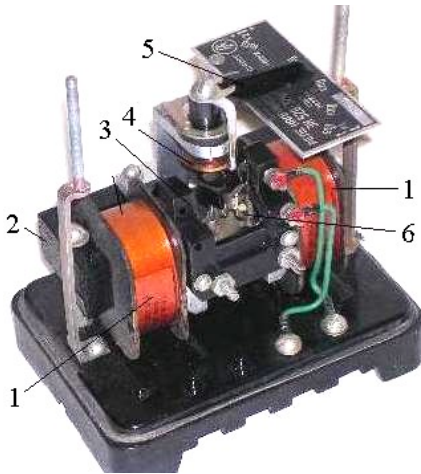


Рисунок 2.10 – Реле напруги серії ЭН:
 1 – котушка,
 2 – ярмо, 3 – якір,
 4 – пружина,
 5 – важіль,
 6 – контакти

Прикладом електронного реле напруги є реле серії Adecs (рис. 2.11). Такі реле забезпечують регульований захист (відключення) електрообладнання в разі відхилення напруги мінімальної 150–185 В й максимальної 245–270 В із часом спрацювання 0,02 с.

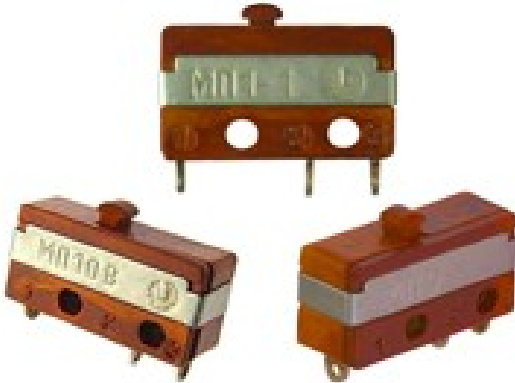


Рисунок 2.11 – Реле напруги типу ADC-0110-40

2.2.5 Мікроперемикачі

Мікроперемикачі – це електричні апарати захисту, що не допускають роботи електропривода робочих машин із порушенням правил безпеки їх експлуатації, наприклад, за умов незачинених захисних кожухів, люків, кришок, дверей тощо. Їх контактна система розрахована на малі значення струмів, а тому вони призначені для роботи в допоміжних електричних колах змінного струму напругою до 220 В і постійного струму напругою до 110 В.

Прикладом є мікроперемикачі серії МП (рис. 2.12), розраховані для комутації електричних кіл сигналізації, живлення та керування напругою 0,2 – 250 В і силою струму до 4 А.



*Рисунок 2.12 –
Мікроперемикачі
серії МП*

Мікроперемикачі вибирають за такими параметрами: номінальною напругою, номінальним струмом, кількістю та видом контактів.

Умовні графічні позначення мікроперемикачів на електричних схемах показані в пунктах 33, 34, 56 додатка Б.

2.2.6. Вимикачі кінцеві

Вимикачі кінцеві – це електричні апарати захисту, що обмежують переміщення рухомих частин електропривода робочих машин, а за умови досягнення останніми граничних положень зумовлюють гальмування, блокування, вмикання звукової або світлової сигналізації тощо. В електроприводах робочих машин використовують як механічні, так і безконтактні кінцеві вимикачі.

Спрацювання механічних вимикачів кінцевих (рис. 2.13) відбувається за рахунок механічної дії складової частини робочого механізму на сприймальний елемент кінцевого вимикача (ролик, кнопка, шток тощо), завдяки чому відбувається замикання / розмикання його електричних контактів.



Рисунок 2.13 – Механічні вимикачі кінцеві

Механічні вимикачі кінцеві вибирають за такими параметрами: номінальною напругою, номінальним

струмом, кількістю та видом контактів.

Безконтактні вимикачі кінцеві (рис. 2.14) спрацьовують під час наближення певної частини робочого механізму але без їх механічного контактування.

Умовні графічні позначення вимикачів кінцевих на електричних схемах показані в пункті 44 додатка Б.



Рисунок 2.14 – Безконтактні вимикачі кінцеві

2.3 Комутаційні електричні апарати

Комутаційні електричні апарати призначені для комутації як силових, так і допоміжних електричних кіл керування роботою електропривода робочих машин. Переважна більшість із них має ручний привод, за допомогою якого рухомі електричні контакти переміщуються під дією сили, створеної рукою оператора.

До цієї групи електричних апаратів можна віднести

рубильники, перемикачі пакетні, кнопки й пости кнопокві.

2.3.1 Рубильники

Рубильники – комутаційні електричні апарати, призначені для нечастих (зазвичай до шести вмикань/вимикань за годину) силових і допоміжних електричних кіл змінного струму напругою до 660 В і частотою 50 Гц та кіл постійного струму напругою до 440 В.

Рубильники класифікують на такі групи:

- одно-, дво- та триполюсні;
- із центральною рукояткою, з боковою рукояткою та з боковим важільним приводом;
- відкриті та захищені;
- із переднім та заднім підключенням провідників.

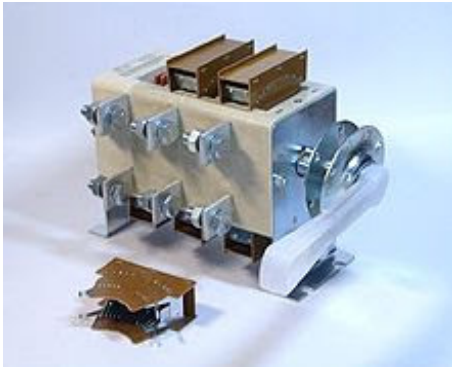


Рисунок 2.15 –
Рубильник триполюсний
із боковою рукояткою
та дугогасильними
решітками

Основними параметрами, що обумовлюють вибір рубильника, є номінальна напруга, номінальний струм, кількість полюсів, конструктивне й кліматичне виконання.

В електроприводах робочих машин використовують рубильники на номінальні струми до 630 А типів Р, РБ, РС. Але необхідно зазначити, що в сучасних зразках

електроприводів робочих машин ці комутаційні апарати використовують рідко. Їх функції все частіше виконують вимикачі автоматичні.

Умовні графічні позначення на електричних схемах рубильників показані в пунктах 31, 38, 39, 40, 47 додатка Б.

2.3.2 Вимикачі пакетні

Вимикачі пакетні – це багатоступеневі електричні апарати з ручним приводом, призначені для нечастих комутацій як у силових, так і в допоміжних електричних колах напругою до 380 В змінного струму 50 Гц та до 220 В постійного струму. На цей час виготовляють широкий асортимент пакетних вимикачів різних як за конструктивним виконанням, так і за призначенням (рис. 2.16). Їх використовують як групові комутаційні апарати на щитах керування кількох взаємопов'язаних електроприводів, як перемикачі режиму роботи електропривода, для пуску електродвигунів, реверсу, перемикання зі схеми з'єднання обмоток двигуна «зірка» на «трикутник» тощо.



Рисунок 2.16 – Вимикачі пакетні

До переваг вимикачів пакетних можна віднести їх компактність і можливість змінювати кількість пакетів, а до недоліків – низьку зносостійкість та ненадійність механізму ручного привода.

Вимикачі пакетні вибирають за такими параметрами: номінальною напругою та струмом, кількістю пакетів, кількістю позицій.

На електричних схемах вимикачі пакетні зображують графічним умовним позначенням, як показано в пунктах 46, 47 додатка Б.

2.3.3 Тумблери

Тумблери – це дво- або трипозиційні електричні апарати з ручним приводом, призначені для переключень у допоміжних електричних колах змінного струму напругою до 380 В та постійного струму напругою до 220 В. На цей час виготовляють широкий асортимент тумблерів різних як за конструктивним виконанням, так і за призначенням (рис. 2.17).



Рисунок 2.17 – Тумблери

Переваги тумблерів: компактність, простота й надійність закріплення на різного роду панелях управління.

Тумблери вибирають за такими параметрами: номінальною напругою, номінальним струмом, кількістю та видом контактів, кількістю позицій.

На електричних схемах тумблери зображують умовними графічними позначеннями, як показано в пунктах 33, 34 додатка Б.

2.3.4 Кнопки та кнопкові пости керування

Кнопки керування – це двопозиційні електричні апарати з ручним приводом та із самоповерненням або з фіксацією певного положення. Вони призначені для дистанційного керування роботою контакторів і пускачів магнітних, а також для комутації та блокування в електричних колах керування. На цей час виготовляють широкий асортимент кнопок керування різних як за конструктивним виконанням, так і за призначенням (рис. 2.18).



Рисунок 2.18 – Кнопки керування

Дві або більше кнопок керування, що змонтовані на одній панелі або ж в одному корпусі, називають кнопковими постами керування. На цей час виготовляють широкий асортимент кнопкових постів керування різних як за конструктивним виконанням, так і за призначенням (рис. 2.19).



Рисунок 2.19 – Кнопкові пости керування

Кнопки керування вибирають за такими параметрами: номінальною напругою, номінальним струмом, кількістю та видом контактів.

На електричних схемах кнопки керування зображують умовним графічним позначенням, як показано в пункті 45 додатка Б.

2.4 Багатофункціональні електричні апарати

Багатофункціональні електричні апарати – це електричні апарати, що виконують дві й більше функцій, пов'язаних із комутацією, захистом, пускорегулюванням тощо.

До таких електричних апаратів належать вимикачі автоматичні, вимикачі диференційні, автомати

диференційні, пускачі магнітні.

2.4.1 Вимикачі автоматичні

Вимикачі автоматичні – це електричні апарати з ручним приводом, що можуть виконувати всі або кілька із зазначених функцій:

- нечасті (для більшості типів до 6 за годину, а для окремих – до 30 за годину) вмикання та вимикання силових і допоміжних електричних кіл змінного струму з напругою до 660 В та постійного струму з напругою до 220 В;
- захист від тривалих перевантажень по струму;
- захист від струмів короткого замикання;
- захист від недопустимого зниження напруги в мережі живлення.

В електроприводах робочих машин використовують одно-, дво-, три- та чотирьополюсні автоматичні вимикачі (рис. 2.20).

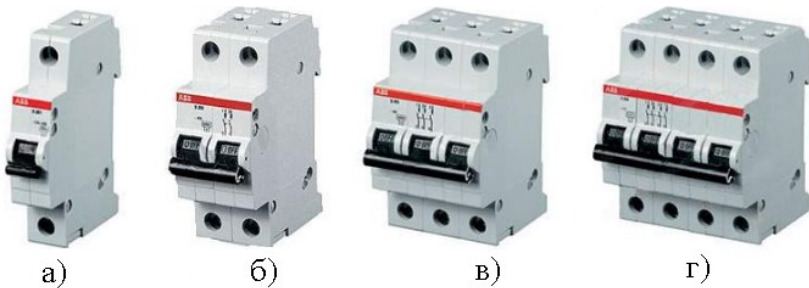


Рисунок 2.20 – Вимикачі автоматичні:

- а) – однополюсний, б) – двополюсний, в) – триполюсний,
г) – чотирьополюсний

У сучасних зразках автоматичних вимикачів для захисту від надструмів використовують розчіплювачі

таких виконань: Т – тепловий, М – електромагнітний, П – напівпровідниковий, К – комбінований.

Прикладом вимикачів автоматичних вітчизняного виробника, що широко використовують в електроприводі робочих машин є вимикачі автоматичні серії УкрЕМ ВА2000-2006, технічні характеристики яких наведені в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики вимикачів автоматичних серії УкрЕМ ВА2000-2006

Параметр	Тип вимикача				
	ВА2000	ВА2001	ВА2006	ВА2002	ВА2003
Кількість полюсів	1; 2; 3р			2 (1+N)	4 (3+N)
Номинальна напруга, В	220/380				
Частота струму, Гц	50				
Номинальний струм, А	1; 2; 3; 4; 5; 6; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63				50; 63; 80; 100
Тип захисної характеристики електромагнітного розчіплювача	В	С	Д	С	Д
Час спрацювання електромагнітного захисту, с, при кратності струму I/I_n	$3 I_n \geq 0,1$ $5 I_n \leq 0,1$	$5 I_n \geq 0,1$ $10 I_n \leq 0,1$	$8 I_n \geq 0,1$ $12 I_n \leq 0,1$	$5 I_n \geq 0,1$ $10 I_n \leq 0,1$	$10 I_n \geq 0,1$ $20 I_n \leq 0,1$
Комутаційна стійкість проти спрацювань, циклів	6000				10000
Гранична комутаційна здатність, кА	6000				
Переріз зовнішніх проводів, мм ²	1 - 25				6 - 25
Конструктивне виконання	Модульне на DIN-рейку 35x7,5 мм				
Ширина одного модуля, мм	18				27
Відповідність стандартам	ДСТУ 3025-95; ГОСТ 30325-95; МЭК 898-87				

Вимикачі автоматичні вибирають за такими

параметрами: номінальною напругою, номінальним струмом, типом захисної характеристики електромагнітного розчіплювача, кількістю полюсів.

На електричних схемах вимикачі автоматичні зображують графічними умовними позначенням, як показано в пунктах 43, 48 додатка Б.

ПРИКЛАД

Розрахувати параметри та вибрати вимикач автоматичний для захисту від надструмів асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

Вихідні параметри для розрахунків (P_n – номінальна потужність, U_n – номінальна напруга, K_i – коефіцієнт пуску, η – ККД, $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності, K_3 – коефіцієнт завантаження) вказані в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Вихідні параметри для розрахунку

P_n , кВт	U_n , кВ	K_i	η , %	$\cos\varphi$	K_3
22	0,38	7,5	89	0,89	0,85

РОЗВ'ЯЗАННЯ

1 Визначаємо номінальний струм:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{22}{1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,89 \cdot 0,89} = 42,25 \text{ А.}$$

2 Визначаємо розрахунковий струм силової мережі:

$$I_{роз} = I_n \cdot K_3 = 42,25 \cdot 0,85 = 35,91 \text{ А.}$$

3 Визначаємо пусковий струм двигуна:

$$I_{пус} = I_{роз} \cdot K_i = 36,91 \cdot 7,5 = 276,83 \text{ А.}$$

4 Визначаємо розрахунковий струм теплового розчіплювача:

$$I_{т.р} = K_{нт} \cdot I_{роз} = 1,25 \cdot 35,91 = 44,89 \text{ А.}$$

де $K_{нт} = 1,1-1,3$ – коефіцієнт надійності теплового розчіплювача.

5 Вибираємо стандартне значення струму теплового розчіплювача:

$$I_{тр} = 50 > 44,89 \text{ А.}$$

6 Виконуємо перевірку на неспрацювання електромагнітного розчіплювача на час пуску асинхронного електродвигуна:

Знаходимо діапазон струмів спрацювання електромагнітного розчіплювача з характеристикою типу С:

$$I_{e.p.} = K_k \cdot I_{тр} = (5 - 10) \cdot 50 = (250 - 500) \text{ А.}$$

де: K_k – коефіцієнта кратності струму спрацювання електромагнітного розчіплювача до номінального стандартного значення.

Перевірка незадовільна оскільки $I_{пус} = 276,83 \text{ А.}$

7 Вибираємо згідно з таблицею 2.9 автоматичний вимикач типу ВА2006 з номінальним струмом розчіплювача 50 А, номінальною напругою 380 В і характеристикою електромагнітного розчіплювача типу D.

Для цього автоматичного вимикача коефіцієнт кратності струму спрацювання електромагнітного розчіплювача $K_k = (8 - 12)$.

Тоді діапазон струмів спрацювання електромагнітного розчіплювача з характеристикою типу D:

$$I_{e.p.} = K_k \cdot I_{тр} = (8 - 12) \cdot 50 = (400 - 600) \text{ А.}$$

Перевірка задовільна оскільки $I_{пус} = 276,83 \text{ А.}$

2.4.2 Вимикачі диференційні

Вимикачі диференційні належать до пристроїв захисного вимкнення (ПЗВ) й можуть виконувати такі функції:

– робочого ввімкнення / вимкнення відповідно до навантаження в межах номінального значення струму;

– зі вставками на 10, 30 і 100 мА: захисту від ураження людини електричним струмом у разі дотику до струмопровідних частин електроустановки з пошкодженою ізоляцією;

– зі вставками 300 і 500 мА: запобігання загорань і пожеж унаслідок протікання струмів витоку на землю.

Прикладом таких електричних апаратів є вимикачі диференційні серії ВД 1-63 (рис. 2.21), що виготовляють дво- (типу ВД 1-63 2Р) і чотириполюсними (типу ВД 1-63 4Р). Вони призначені для роботи в одно- й трифазних колах змінного синусоїдного струму відповідно. Їх основні технічні характеристики наведені в таблиці 2.11.



Рисунок 2.21 –
Вимикачі диференційні
типів:
а) ВД 1-63 4Р;
б) ВД 1-63 2Р

е: Перевагами вимикачів диференційних серії ВД 1-63

- відсутність власного споживання електроенергії;
- можливість збереження функцій захисту від ураження електричним струмом і загорань за будь-яких коливань напруги в мережі й навіть у разі обривання нейтрального провідника;
- простота конструкції та надійність роботи;
- модульний принцип виконання й можливість простого й надійного кріплення на монтажну DIN-рейку.

Таблиця 2.11 – Технічні характеристики вимикачів диференційних серії ВД 1-63

Характеристика	Тип	
	ВД 1-63 2Р	ВД 1-63 4Р
Но́мінальна робоча напруга U_e , В	230	230/400
Но́мінальна частота, Гц	50	
Но́мінальний струм I_n , А	16,25,32,40,50,63,80,100	
Но́мінальний диференційний струм, що вимикає (вставка) $I_{\Delta n}$, mA	10, 30, 100, 300	30, 100, 300. 500
Кількість полюсів	2	4
Но́мінальний диференційний струм, що не вимикає	0,5 $I_{\Delta n}$	
Но́мінальна найбільша диференційна здатність умикання й вимикання $I_{\Delta m}$, А	800	
Но́мінальний умовний диференційний струм короткого замикання $I_{\Delta c}$, А	3 000	
Час вмикання за но́мінального диференційного струму T_n , не довший за, мс	40	

Недоліком вимикачів диференційних серії ВД 1-63 можна вважати те, що ці електричні апарати не можуть

виконувати функцій захисту від перенавантажень і струмів короткого замикання, а тому зазвичай послідовно з ними підключають інші електричні апарати, що виконують цю функцію, наприклад автоматичні вимикачі чи запобіжники.

На електричних схемах вимикачі диференційні зображують умовним графічним і буквеним позначеннями, як зазначено в пункті 54 додатка Б.

3.4.3 Автомати диференційні

А Автомати диференційні належать також до пристроїв захисного вимкнення (ПЗВ) й взагалі можуть виконувати всі або кілька таких функцій:

- робочого ввімкнення / вимкнення відповідно до навантаження в межах номінального значення струму;
- зі вставками на 10, 30 і 100 мА: захисту від ураження людини електричним струмом у разі дотику до струмопровідних частин електроустановки з пошкодженою ізоляцією;
- зі вставками 300 і 500 мА: запобігання загорань і пожеж унаслідок протікання струмів витоку на землю;
- захист від тривалих перевантажень по струму;
- захист від струмів короткого замикання;
- захист від імпульсних перенапруг у мережі живлення.

Прикладом таких електричних апаратів є автомати диференційні серії ІЕК АД (рис. 2.22), технічні характеристики яких наведені в таблиці 2.12.

- Перевагами автоматів диференційних серії ІЕК АД є:
- наявність трьох / чотирьох видів захисту;
 - висока швидкодія;
 - наявність індикації спрацювання (кнопка «Возврат» на лицевій панелі);
 - покращена конструкція електронного модуля.

Недоліком автоматів диференційних серії ІЕК АД можна вважати те, що ці електричні апарати мають більш складну конструкцію, порівняно з вимикачами диференційними.

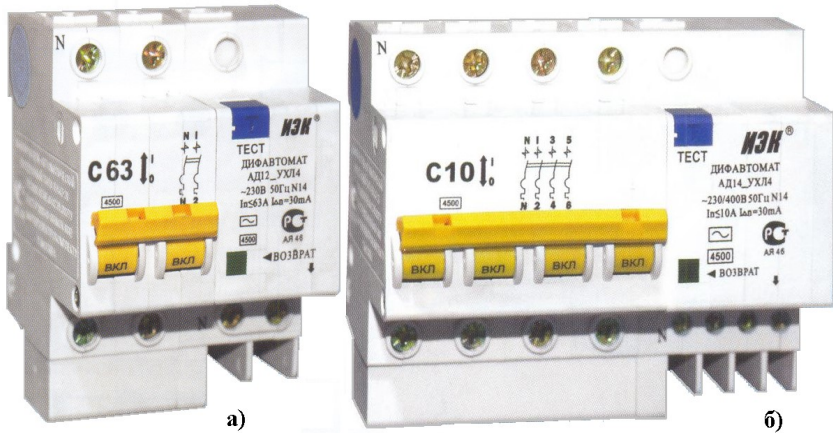


Рисунок 2.22 – Автомати диференційні:
а) АД-12; б) АД-14

Таблиця 2.12 – Технічні характеристики автоматів диференційних серії ІЕК АД

Характеристика	Тип	
	АД-12	АД-14
Номінальна робоча напруга U_e , В	230	230/400
Номінальна частота, Гц	50	
Номінальний струм I_n , А	6,10,16,20,25, 32,40,50,63	16,20,25, 32,40,50,63
Номінальний диференційний струм, що вимикає (вставка), $I_{\Delta n}$, mA	10, 30, 100, 300	30, 100, 300
Кількість полюсів	2	4
Номінальна найбільша комутаційна здатність, I_{cw} , А	4 500	

На електричних схемах автомати диференційні зображують умовним графічним і буквеним позначеннями, як зазначено в пункті 55 додатка Б.

3.4.4 Пускачі магнітні

Пускачі магнітні – це електричні апарати, що взагалі можуть виконувати всі або кілька з таких функцій:

- дистанційне керування роботою асинхронних двигунів (вмикання, вимикання, реверс);
- автоматичне відключення під час зниження напруги мережі живлення нижче від допустимого значення;
- захист від перевантажень.

Загалом до складу пускача магнітного входять контактори змінного струму (один для нереверсивного або два для реверсивного), реле теплові та пост кнопковий (рис. 2.23).

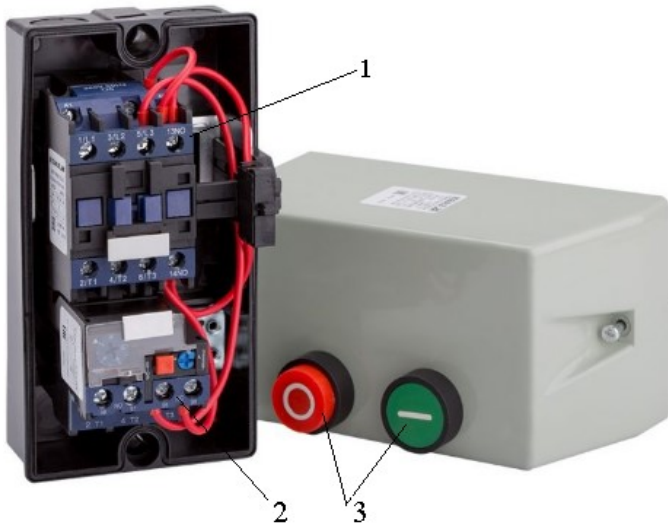


Рисунок 2.23 – Магнітний пускач: 1 – контактор, 2 – реле теплове, 3 – пост кнопковий

Прикладом таких електричних апаратів є пускачі магнітні серії ПМЛ, що виготовляють:

- нереверсивними без реле струму,
- нереверсивними з реле струму,
- нереверсивними без реле струму з механічним та електричним блокуванням,
- нереверсивними з реле струму з механічним та електричним блокуванням,
- для переключення «зірка-трикутник»,
- відкритими, захищеними, пилозахищеними та пилоблизконепроникними,
- тільки із замикаючими контактами,
- із замикаючими та розмикаючими контактами,
- із вбудованими в корпус кнопками «Реле», «Стоп» та «Пуск», або «Вперед», «Назад», «Стоп», або без них.

Захист від перевантаження в пусках магнітних здійснюють за допомогою вбудованих у корпус одно-, дво- та триполюсних реле теплових, що дозволяють регулювати величину струму вставки реле в діапазоні від 0,75 до 1,25 $I_{\text{н}}$.

Технічні характеристики пускачів магнітних серії ПМЛ наведені в таблиці 2.13.

Пускачі магнітні вибирають за такими основними параметрами: номінальною напругою котушки контактора, номінальною напругою контактів, номінальним струмом для контактів, номінальним струмом нагрівального елемента реле теплового, діапазоном регулювання струму вставки реле теплового.

На електричних схемах пускачі магнітні зображують графічними умовними позначеннями їх головних складових частин, як показано в пунктах 31, 32, 40, 57, 58, 59 додатка Б.

Таблиця 2.13 – Технічні характеристики пускачів магнітних серії ПМЛ

Тип (величина)	Номінальний струм, А	Реле теплове	
		Тип	Діапазон регулювання струму вставки, А
ПМЛ-1000	10	РТЛ-1007	1,5 – 2,6
		РТЛ-1008	2,4 – 4
		РТЛ-1010	3,8 – 6
		РТЛ-1012	5,5 – 8
		РТЛ-1014	7 – 10
ПМЛ-2000	25	РТЛ-1016	9,5 – 14
		РТЛ-1021	13 – 19
		РТЛ-1022	18 – 25
ПМЛ-3000	40	РТЛ-2053	23 – 32
		РТЛ-2055	30 – 41
ПМЛ-4000	63	РТЛ-2057	38 – 52
		РТЛ-2059	47 – 64
ПМЛ-5000	80	РТЛ-2061	54 – 74
		РТЛ-1063	63 – 80
ПМЛ-6000	125	РТЛ-3105	75 – 105
		РТЛ-3125	90 – 125
ПМЛ-7000	200	РТЛ-3160	115 – 160
		РТЛ-3200	145 – 200

Контрольні запитання та завдання

- 1 Що спільного мають і чим відрізняються за конструкцією та принципом дії контактори постійного та змінного струмів?
- 2 Чим відрізняються реле проміжні від контакторів?
- 3 Який елемент та як саме забезпечує затримку в часі в електромагнітному реле часу?
- 4 Які функції виконує та як працює запобіжник

плавкий?

5 Яке призначення та принцип дії реле теплового?

6 У чому полягають конструктивні особливості та принцип дії реле струму?

7 У чому полягають конструктивні особливості та принцип дії реле напруги?

8 Чим відрізняються мікроперемикачі та вимикачі кінцеві?

9 Які особливості приводу комутаційних електричних апаратів? Наведіть приклади.

10 Які пристрої захисного вимкнення використовують в електроприводах робочих машин?

11 Накресліть умовні графічні позначення елементів електричних апаратів, що вивчали в цьому розділі.

Розділ 3

ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОБОЧИХ МАШИН

Вибір електродвигуна здебільшого обумовлює не лише затрати на проектування, розроблення, виготовлення, монтаж, налагодження й експлуатацію електропривода, але й такі параметри, як масу, габарити, продуктивність, надійність роботи в режимах пуску, гальмування, реверсу, сталої роботи тощо. Тому питанню вибору електродвигуна для робочої машини потрібно приділяти значну увагу.

Основними завданнями вибору електродвигуна робочої машини є:

- аналіз режиму роботи;
- вибір виду електродвигуна;
- вибір номінальної напруги;
- вибір номінальної / синхронної частоти обертання;
- вибір конструктивного виконання;
- розрахунок номінальної потужності;
- вибір електродвигуна за каталогом і перевірка правильності вибору.

3.1 Аналіз режимів роботи електродвигуна

Режим роботи електродвигуна визначає співвідношення тривалості роботи й пауз, характер зміни навантаження, а також температурний режимом його основних складових. ДСТУ EN 60034-1:2016 [18] регламентує десять основних режимів роботи, що мають умовне позначення S1 – S10.

3.1.1 Режим тривалого навантаження

Режимом тривалого навантаження ($S1$) називають режим роботи, за якого електродвигун працює з навантаженням P і за час роботи температура всіх його частин досягає сталого значення ($\Theta_{\max} = \text{const}$) (рис. 3.1).

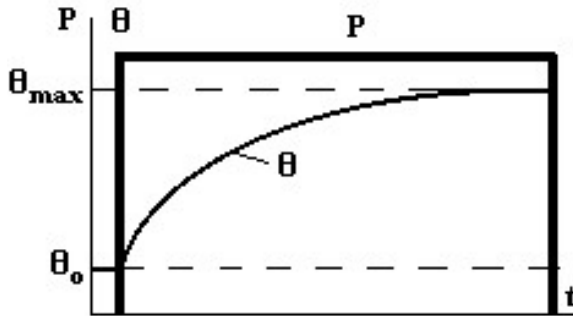


Рисунок 3.1 – До пояснення режиму роботи $S1$

Такий режим роботи є характерним для електропривода вентиляторів, насосів, компресорів, транспортерів.

3.1.2 Режим короткочасного навантаження

Режимом короткочасного навантаження ($S2$) називають режим роботи, за якого час роботи (t_p) під постійним навантаженням (P) чергується з часом пауз (t_n) (рис. 3.2). Причому за час роботи температура (Θ_{\max}) частин електродвигуна не встигає досягти сталого значення, а за час паузи електродвигун охолоджується до температури навколишнього середовища (Θ_0). Цей режим роботи є циклічним, період циклу ($t_{\text{ц}}$) визначають за формулою

$$t_y = t_p + t_n \quad (3.1)$$

Діють стандартні значення часу роботи в даному режимі: $t_p = 10, 30, 60, 90$ хв. У паспорті машини цей режим роботи вказують умовним позначенням, наприклад: S2 – 10 хв, S2 – 30 хв тощо.

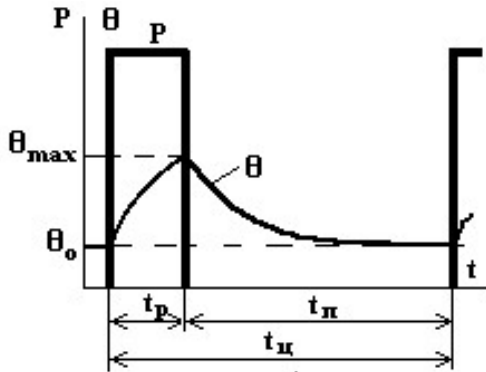


Рисунок 3.2 – До пояснення режиму роботи S2

Режим роботи S2 є характерним для електропривода засувок трубопроводів і газопроводів, шлюзів, розвідних мостів тощо.

3.1.3 Періодичні режими навантаження

ДСТУ [18] установлює шість *періодичних режимів навантаження* (S3 – S8) за яких електродвигун працює із циклічним навантаженням. Якщо окремо не вказують, то стандартне значення тривалості одного циклу дорівнює 10 хв. Однією з головних характеристик цих режимів роботи є *тривалість вмикання (ТВ)* із такими стандартними значеннями: $ТВ_{ст} = 15, 25, 40, 60$ % тривалості одного циклу.

Такі режими роботи є характерними для електроприводів значної частини підйимально-транспортних механізмів (кранів, лебідок, тельферів тощо), а також металообробних верстатів.

Для *періодичного режиму повторно-короткочасного навантаження S3* тривалість циклу розраховують за (3.1). Для цього режиму характерними є нечасті пуски, тривалість яких значно менша, ніж час роботи електродвигуна, а тому відсутній істотний вплив пускових струмів на тепловий режим машини (рис. 3.3).

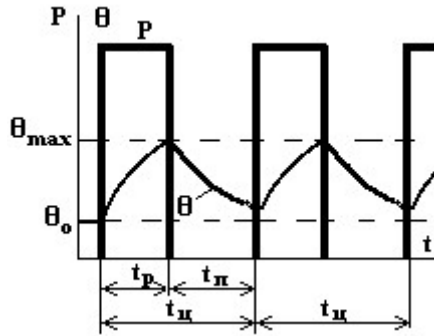


Рисунок 3.3 – До пояснення режиму роботи S3

Тривалість вмикання для режиму S3 визначають за формулою

$$TB = \frac{t_p}{t_p + t_n} 100\% \quad (3.2)$$

У паспорті машини цей режим роботи вказують умовним позначенням: S3 – 15 %, S3 – 25 % тощо.

Для *періодичного режиму повторно-короткочасного навантаження S4* характерними є часті пуски. За цього режиму роботи час пуску ($t_{пк}$) й час роботи (t_p) є величинами сумірними, а тому пускові струми

істотно впливають на нагрівання машини (рис. 3.4).

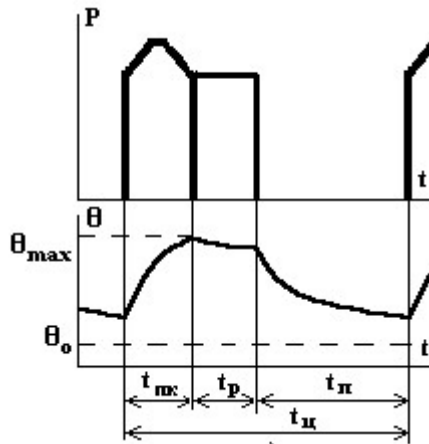


Рисунок 3.4 – До пояснення режиму роботи S4

Тривалість циклу роботи для режиму S4 розраховують за формулою

$$t_{cy} = t_{nk} + t_p + t_n \quad (3.3)$$

Режим роботи S4 характеризують *тривалістю вмикань у відсотках, кількістю вмикань за годину, стандартні значення яких становлять: 30, 60, 120 та 240, та коефіцієнтом інерції FI*, стандартні значення якого: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 6,3 або 10.

Коефіцієнт інерції FI – це відношення суми моменту інерції ротора та зведеного до вала двигуна моменту інерції інших рухомих частин привода й робочої машини до моменту інерції ротора.

В умовному позначенні такого режиму вказують *тривалість вмикання у відсотках, кількість вмикань за годину та коефіцієнт інерції*, наприклад: S4 – 25 %, 120 вмикань за годину, FI = 2,0. Це означає, що за FI = 2,0 двигун можна ввімкнути не частіше ніж 120 разів за

годину. Тривалість кожного циклу становитиме 0,5 хв, із яких час пуску ($t_{пк}$) й час роботи (t_p) становлять 25 % (7,5 с), а час паузи ($t_{п}$) – 22,5 с.

Дійсне значення *тривалості вмикання* (TB) у цьому випадку визначають за формулою

$$TB = \frac{t_{пк} + t_p}{t_{пк} + t_p + t_n} 100 \% \quad (3.4)$$

Для *періодичного режиму повторно-короткочасного навантаження з урахуванням електричного гальмування S5* характерними є часті пуски та електричне гальмуванням, що відбувається упродовж часу t_r (рис. 3.5).

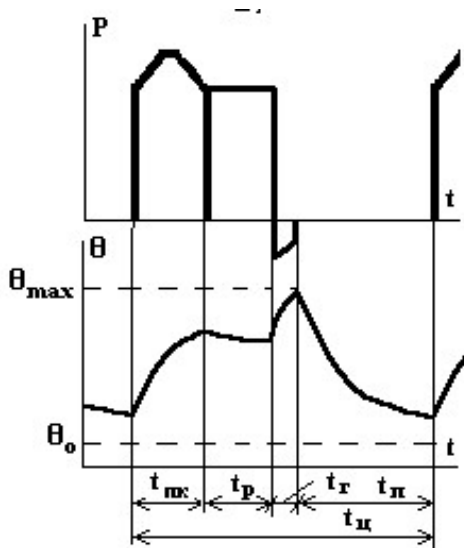


Рисунок 3.5 – До пояснення режиму роботи S5

Тривалість циклу роботи розраховують за формулою

$$t_{ц} = t_{пк} + t_p + t_r + t_{п}. \quad (3.5)$$

Стандартними значеннями *коефіцієнта інерції FI* для цього режиму є такі: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5 та 4,0.

Тривалість вмикання визначають за формулою:

$$TB = \frac{t_{нк} + t_p + t_z}{t_{нк} + t_p + t_z + t_n} 100 \% \quad (3.6)$$

Стандартна кількість вмикань за годину: 30, 60, 120, 240.

В умовному позначенні режиму роботи S5 вказують тривалість вмикання у відсотках, кількість вмикань за годину та коефіцієнт інерції, наприклад: S5 – 25 % , 240 вмикань за годину, FI = 2,5.

Для періодичного режиму тривалої роботи зі змінним навантаженням S6 характерним є те, що час роботи (t_p) під відповідним навантаженням (P) чергується з часом роботи без навантаження (t_{xx}), а вплив пускових струмів на процес нагрівання частин електродвигуна не враховують (рис. 3.6).

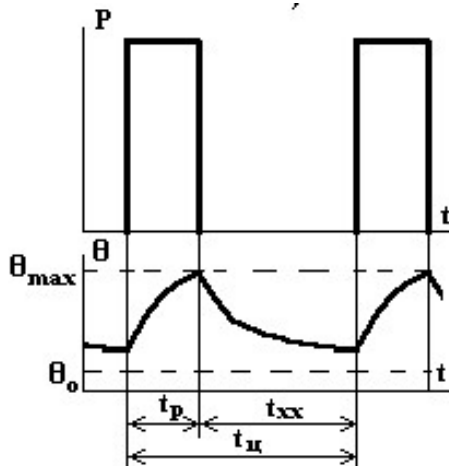


Рисунок 3.6 – До пояснення режиму роботи S6

Тривалість циклу роботи за режиму S6 розраховують за формулою

$$t_{ц} = t_p + t_{хх} \quad (3.7)$$

Для цього режиму передбачені такі стандартні значення *тривалість роботи з незмінним навантаженням (ТН)*, що визначають у відсотках до тривалості одного циклу роботи ($t_{ц}$): 15, 25, 40, 60 %.

В умовному позначенні цього режиму роботи вказують значення ТН, наприклад: S6 – 25 %.

Для *періодичного режиму тривалого навантаження з урахуванням електричного гальмування S7* характерним є наявність у циклі роботи частих реверсів з електричним гальмуванням (рис. 3.7). Цей режим роботи враховує вплив на нагрівання двигуна пускових струмів і струмів на час реверсу.

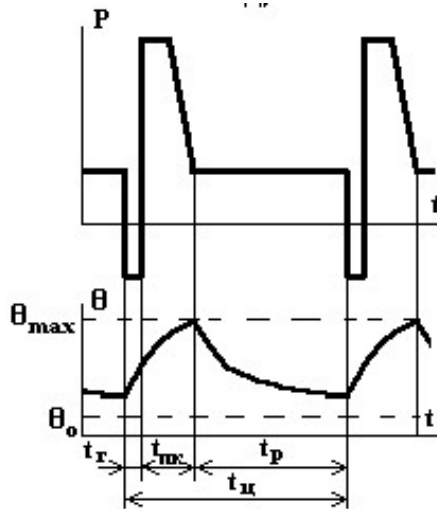


Рисунок 3.7 – До пояснення режиму роботи S7

Тривалість циклу роботи для режиму S7 розраховують за формулою

$$t_{ц} = t_z + t_{нк} + t_p. \quad (3.8)$$

Режим роботи S7 визначають кількістю вмикань за годину, стандартними значеннями яких є: 30, 60, 120 та 240 за відповідного коефіцієнта інерції FI, стандартними значеннями якого є: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0.

В умовному позначенні такого режиму вказують кількість вмикань за годину та коефіцієнт інерції, наприклад: S7 – 60 вмикань за годину, FI – 1,6.

Для періодичного режиму тривалої роботи зі зміною навантаження та швидкості S8 (рис. 3.8) характерним є наявність у циклі роботи двох і більше частот обертання електродвигуна (n_1, n_2, \dots, n_i). Цей режим має визначену послідовність зміни часу роботи (t_{p1}) з незмінним навантаженням на одній частоті обертання (n_1) на час роботи (t_{p2}) на іншій частоті обертання (n_2) з тим самим або іншим навантаженням.

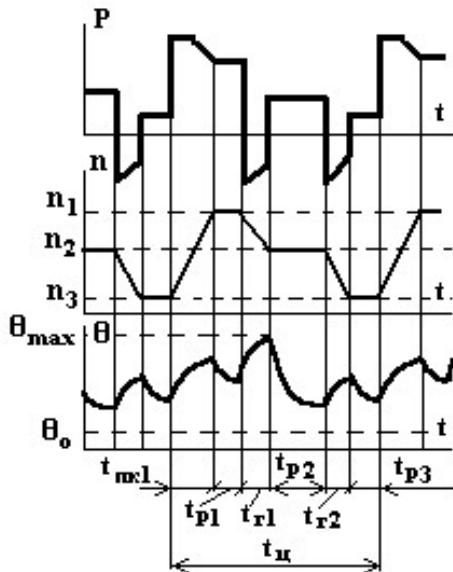


Рисунок 3.8 – До пояснення режиму роботи S8

Режим роботи S8 визначають *кількістю циклів за годину* (стандартні значення: 30, 60, 120, 240), *коефіцієнтом інерції FI* (стандартні значення: 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0) і *відносною тривалістю навантаження* на кожній із частот обертання (ТН₁, ТН₂, ТН₃...), що розраховують за формулами

$$ТН_1 = \frac{t_{\text{нукл1}} + t_{p1}}{t_{\text{нукл1}} + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}} 100\% \quad (3.9)$$

$$ТН_2 = \frac{t_{e1} + t_{p2}}{t_{\text{нукл1}} + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}} 100\% \quad (3.10)$$

$$ТН_3 = \frac{t_{e2} + t_{p3}}{t_{\text{нукл1}} + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}} 100\% \quad (3.11)$$

Тривалість циклу роботи в цьому режимі розраховують за формулою

$$t_u = t_{\text{нк1}} + t_{p1} + t_{e1} + t_{p2} + t_{e2} + t_{p3}. \quad (3.12)$$

В умовному позначенні цього режиму вказують *кількість вмикань за годину*, *коефіцієнт інерції*, *навантаження*, що відповідає кожній із частот обертання, та його *відносну тривалість*, наприклад: S8 – 120 вмикань за годину, FI – 1,6; 22 кВт; 748 об/хв; 40 %; 55 кВт; 1485 об/хв; 60%.

3.1.4 Режим роботи з неперіодичними змінами навантаження та швидкості

Для режиму роботи з неперіодичними змінами навантаження та швидкості S9 характерними є

неперіодичні зміни навантаження та швидкості обертання в допустимому робочому діапазоні (рис. 3.9). За такого режиму допустимі також перевантаження, що можуть суттєво перевищувати базове навантаження. В таких випадках постійне навантаження, що вибирають відповідним чином згідно типовому режиму S1, приймають за базове для визначення перенавантаження.

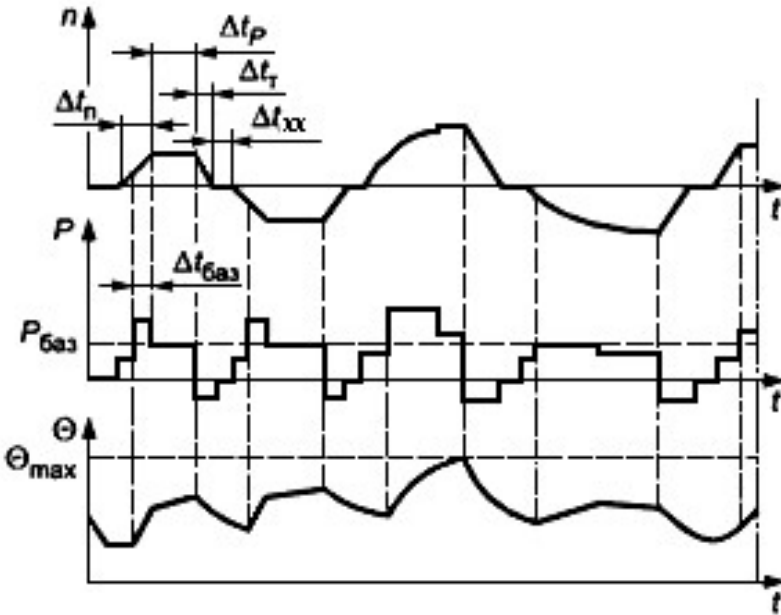


Рисунок 3.9 – До пояснення режиму роботи S9

3.1.5 Режим роботи з дискретними навантаженнями та швидкостями

Для режиму роботи з дискретними навантаженнями та швидкостями S10 характерними є наявність обмеженої кількості дискретних (або

еквівалентних) навантажень, а також швидкостей обертання (рис. 3.10). Кожна комбінація навантаження/швидкості обертання триває достатній час для того, щоб складові частини електродвигуна досягли сталого значення температури.

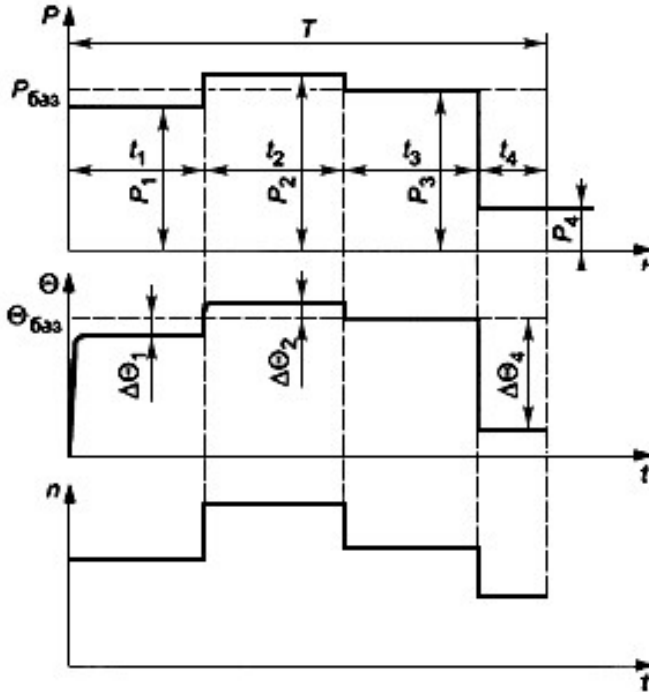


Рисунок 3.10 – До пояснення режиму роботи S10

3.2. Вибір виду електродвигуна

В основі вибору виду електродвигуна лежить принцип економічності, суть якого полягає в тому, що електродвигун повинен бути простим за конструкцією, легким в експлуатації, надійним у роботі, дешевим, мати

порівняно малі вагу й габарити. Отже, додержуючись цього принципу, електродвигуни, що використовують в електроприводі робочих машин, можна розмістити в такій послідовності: асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, асинхронні двигуни з фазним ротором, синхронні двигуни та двигуни постійного струму.

3.2.1 Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором (рис. 3.11) набули найбільшого поширення в електроприводах робочих машин.

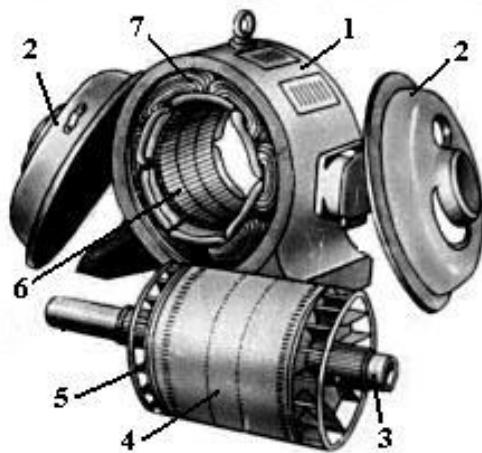


Рисунок 3.11 – Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором: 1 – станина, 2 – підшипникові щити, 3 – вал, 4 – осердя ротора, 5 – обмотка ротора, 6 – осердя статора, 7 – обмотка статора

Доцільним є використання асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором у складі такого електропривода, де:

- не потрібне регулювання швидкості в процесі роботи;
- допустиме незначне (зазвичай, не більше 10 %) зниження швидкості за зміни навантаження від нуля до номінального значення;
- пуски здійснюють не часто;
- момент опору на час запуску електропривода значно менший від його значення за номінального навантаження;
- номінальна потужність не перевищує 400 кВт для низьковольтних двигунів або 8 000 кВт для високовольтних двигунів.

Перевагами асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором є:

1. *Простота конструкції та експлуатації.* Зазвичай обслуговування таких електродвигунів полягає лише в періодичній заміні мастила в підшипникових щитах.

2. *Надійність у роботі й відносна простота ремонту.* Ці електродвигуни не мають ковзного електричного контакту – основного елемента, що знижує надійність інших видів електродвигунів. Заміна обмотки статора, найменш надійного елемента цього електродвигуна, є відносно нескладною операцією.

3. *Порівняно малі вага, габаритні розміри та вартість.*

4. *Можливість прямого пуску.* Цей вид пуску є найпростішим, оскільки відбувається за номінальної напруги й потребує мінімуму пускорегулювальної апаратури.

Недоліками асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором є:

1. *Великі пускові струми (I_n).* За прямого пуску й номінального навантаження струм може досягати значень $(5 - 7) I_{ном}$.

2. *Малі значення пускового (M_n) й мінімального (M_{min})*

моментів по відношенню до номінального ($M_{ном}$). Для значної частини електродвигунів $M_{п}/M_{ном} = 1 - 1,2$, що ускладнює або навіть унеможлиблює запуск електродвигуна за номінального навантаження.

3. *Складність регулювання швидкості.* Незважаючи на те, що швидкість асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором теоретично можна регулювати за допомогою трьох параметрів (частоти напруги живлення, кількості пар полюсів і ковзання), на практиці її регулювання потребує або дорогого обладнання (наприклад, тиристорного перетворювача частоти для зміни частоти), або спеціального конструктивного виконання асинхронного двигуна (наприклад, багатошвидкісні двигуни, у яких можна змінювати кількість пар полюсів), або взагалі є неефективним (наприклад, зміною величини напруги живлення змінювати величину ковзання).

В електроприводах робочих машин використовують великий асортимент асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Зразки асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором

Прикладами асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором є двигуни серій 4А, 4АМ,

АИР, АИМ тощо. що мають такі *граничні номінальні параметри*:

- номінальну потужність:
 - за напруг 220, 380, 660 В: від 0,025 до 400 кВт;
 - за напруг 6, 10кВ: від 500 до 8 000 кВт .
- синхронні частоти обертання: 500, 600, 750, 1 000, 1 500, 3 000 об/хв.

Технічні характеристики асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором серії 4А наведені в додатках В, Г, Д.

3.2.2 Асинхронні двигуни з фазним ротором

Асинхронні двигуни з фазним ротором (рис. 3.13) найбільш доцільно використовувати в складі такого електропривода, де:

- потрібно в широкому діапазоні регулювати швидкість виконавчого органу (зазвичай від нуля до номінального значення);
- характерні важкі пуски й електричні гальмування;
- є обмеження щодо допустимих значень пускових струмів.

Перевагами асинхронних двигунів із фазним ротором порівняно з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором є:

1. Можливість *частих пусків* за номінального навантаження.
2. Значно менші *пускові струми* (зазвичай (2–2,5) $I_{ном}$).
3. Можливість регулювати *пусковий момент* у широкому діапазоні (зазвичай від 0 до M_{max}).
4. Можливість регулювати *частоту обертання* в широкому діапазоні (зазвичай від 0 до $n_{ном}$).

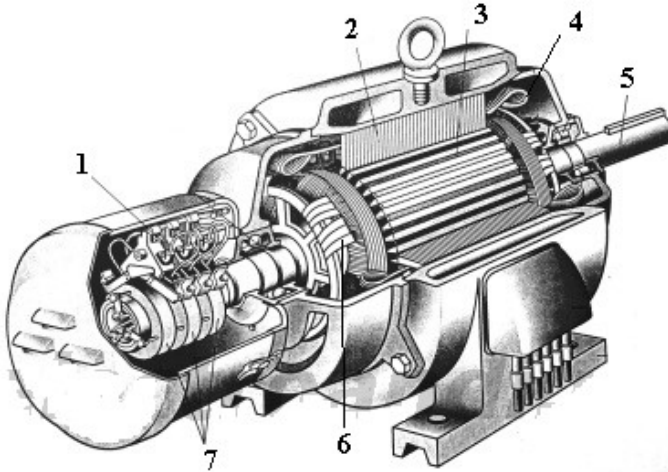


Рисунок 3.13 – Асинхронний двигун із фазним ротором: 1 – щітки, 2 – осердя статора, 3 – осердя ротора, 4 – обмотка статора, 5 – вал, 6 – обмотка ротора, 7 – кільця

Недоліками асинхронних двигунів із фазним ротором порівняно з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором є:

1. Збільшення втрат у пускових реостатах, включених в коло обмотки ротора.
2. Збільшення габаритів, маси й вартості.
3. Зниження надійності в роботі насамперед через наявність ковзного електричного контакту «контактні кільця – щітки».
4. Більш складне обслуговування в процесі експлуатації.

В електроприводах робочих машин використовують великий асортимент асинхронних двигунів із фазним ротором (рис. 3.14). Прикладом є двигуни серій 4АК, 4АНК, що мають такі *граничні номінальні параметри*:

– номінальну потужність від 5,5 до 400 кВт за напруги 220, 380, 660 В.

– синхронні частоти обертання: 500, 600, 750, 1 000, 1 500 об/хв.

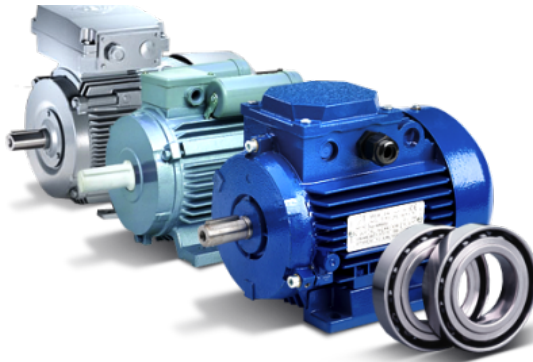


Рисунок 3.14 – Зразки асинхронних двигунів із фазним ротором

Технічні характеристики асинхронних двигунів із фазним ротором наведені в додатку Е.

3.2.3 Синхронні двигуни

Синхронні двигуни (рис. 3.15) найбільш доцільно використовувати в складі такого електропривода, де:

- потрібна стабільна частота обертання за зміни навантаження від 0 до $M_{\text{ном}}$;
- пуски здійснюють дуже рідко;
- потужність електродвигунового пристрою велика (зазвичай, не менш ніж 250 кВт, але технічно й економічно обґрунтованою нижньою межею номінальної потужності є 500 – 600 кВт).

Перевагами синхронних двигунів є:

1. Стабільна частота обертання в усьому діапазоні допустимих навантажень.
2. Високий коефіцієнт потужності.
3. Високий коефіцієнт корисної дії.

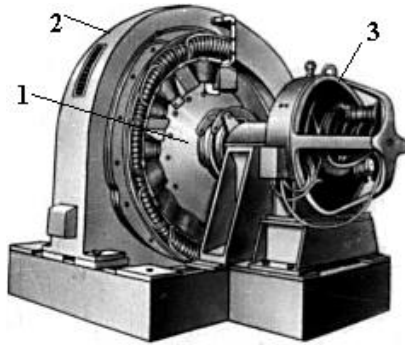


Рисунок 3.15 – Синхронний двигун:
1 – ротор, 2 – статор, 3 – збудник

Недоліками синхронних двигунів є:

1. Необхідність двох джерел живлення (постійного та змінного струмів).
2. Збільшення габаритів, маси й вартості.
3. Складність процесу запуску та обслуговування в процесі експлуатації.

В електроприводах робочих машин використовують широкий асортимент синхронних двигунів (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Зразки синхронних двигунів

Прикладом синхронних двигунів є двигуни серій СДН, СДНЗ, СДК, СДКП, СДКМ, що мають такі *граничні номінальні параметри*:

- номінальну потужність:
 - за напруг 220, 380, 660 В: від 5,5 до 400 кВт;
 - за напруг 6, 10 кВ: від 315 до 31 500 кВт
- синхронні частоти обертання: 250, 300, 375, 500, 600, 750, 1 000, 1 500, 3 000 об/хв.

Технічні характеристики синхронних двигунів наведені в додатку Є.

3.2.4 Двигуни постійного струму

Двигуни постійного струму (рис. 3.17) використовують переважно в електроприводах тих робочих машин, де потрібне глибоке регулювання частоти обертання.

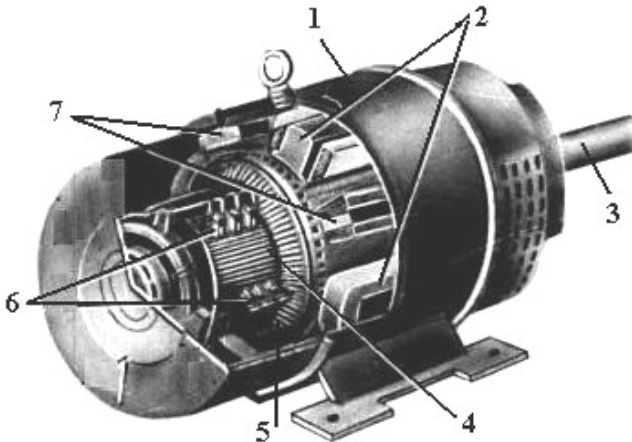


Рисунок 3.17 – Двигун постійного струму: 1 – станина, 2 – головні полюси, 3 – вал, 4 – колектор, 5 – обмотка якоря, 6 – щітки, 7 – допоміжні полюси

Перевагами двигунів постійного струму є:

1. Широкий діапазон регулювання частоти обертання (від 0 до $n_{ном}$ і вище до n_{max}).
2. Наявність трьох порівняно простих і надійних способів регулювання частоти обертання: зміною напруги на обмотці якоря, струму збудження й додаткового опору в колі обмотки якоря.
3. Великі значення пускових моментів.
4. Можливість забезпечення плавного пуску й електричного гальмування.
5. Більша, ніж для машин змінного струму, переважувальна здатність.

Недоліками двигунів постійного струму є:

1. Значно більші, ніж у машинах змінного струму, габарити, маса та вартість.
2. Жорсткі вимоги стосовно правил пуску.
3. Великі експлуатаційні витрати.
4. Порівняно низька надійність у роботі.
5. Низький ККД.

В електроприводах робочих машин використовують широкий асортимент синхронних двигунів (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Зразки двигунів постійного струму

Прикладом двигунів постійного струму є двигуни серій 2П та 4П, що мають такі *граничні номінальні параметри*:

- номінальну потужність:
 - за напруг 110, 220 В: від 0,13 до 220 кВт;
 - за напруг 440, 600 В: від 110 до 800 кВт .
- номінальні частоти обертання: від 224 до 3 150 об/хв.

Для двигунів постійного струму до нормованих параметрів відносять також і максимальну частоту обертання, що зазвичай становить: $n_{\max} = (2 - 2,5) n_{\text{ном}}$.

Технічні характеристики двигунів постійного струму серії 2П наведені в додатку Ж.

3.3 Вибір номінальної напруги

Від напруги живлення залежить сила струму, що протікає по струмопровідних частинах (насамперед – по обмотках) електродвигуна. За незмінної потужності електродвигуна зі збільшенням напруги зазвичай пропорційно зменшується сила струму, а це дозволяє зменшити витрати міді на виготовлення обмоток двигуна та зменшити переріз провідників, по яких здійснюється його живлення.

В електродвигунах змінного струму величини номінального та максимального моментів знаходяться у квадратичній залежності від напруги. Тому збільшення номінальної напруги живлення дає істотне зростання моменту і як наслідок підвищення швидкодії та переважувальної спроможності електродвигуна.

З урахуванням цих факторів, а також завдяки використанню нових ізоляційних матеріалів, сучасні зразки *електродвигунів малої та середньої потужностей*, що використовують в електроприводах робочих машин,

розраховані переважно на більші номінальні значення напруги. Так, в електроприводах постійного струму частіше використовують двигуни з номінальною напругою 440, 600 та 750 В, а не 110, 220 В, як раніше. В електроприводах змінного струму все частіше використовують двигуни з номінальною напругою 380/660 В, а не 220/380 В.

Таке підвищення напруги живлення дещо збільшує небезпеку для обслуговуючого персоналу, але використання якісних ізоляційних матеріалів та надійних систем захисту робить цю проблему несуттєвою для електродвигунів з напругою живлення до 1 000 В.

Для електропроводів, у яких використовують *електродвигуни великої потужності*, під час вирішення проблеми вибору напруги живлення постає питання вибору низьковольтного (до 1 000 В) чи високовольтного (вище 1 000 В) електродвигуна. Промисловість випускає електродвигуни змінного струму на напруги 6 та 10 кВ. Використання високовольтних двигунів, з одного боку, дає істотні переваги, зумовлені зменшенням сили струму та збільшенням моменту, але з іншого – зростає небезпека для обслуговуючого персоналу, який повинен мати спеціальну підготовку й відповідну групу допуску, а також потребує спеціальних високовольтних апаратів керування й захисту, що коштують значно більше, ніж низьковольтні.

3.4 Вибір номінальної швидкості

Під часи вибору номінальної швидкості необхідно враховувати два суперечливі фактори:

1 Електродвигуни з більшою номінальною швидкістю мають менші габарити, масу й вартість. Як видно з таблиці 3.1, асинхронні електродвигуни серії 4А

за однакової потужності $P = 45$ кВт, але з різними значеннями синхронних швидкостей мають суттєву різницю масогабаритних параметрів. Інші види електродвигунів мають співвідношення того самого порядку між номінальною швидкістю й масогабаритними параметрами.

2 Більшість робочих машин мають малі значення номінальних швидкостей виконавчих органів. Тому під час вибору компактних високошвидкісних двигунів необхідно використовувати в складі електропривода передавальні пристрої, що значно зменшує переваги використання таких двигунів.

Таблиця 3.1 – Співвідношення масогабаритних параметрів асинхронних електродвигунів серії 4А

Типорозмір	Синхронна швидкість, об/хв	Довжина, мм	Висота, мм	Діаметр станини, мм	Маса, кг
4A200L2Y3	3000	800	535	450	280
4A200L4Y3	1500	830	535	450	310
4A250S6Y3	1000	915	640	554	490
4A250M8Y3	750	955	640	554	535
4A280M10Y3	600	1210	722	660	835
4A315S12Y3	500	1255	765	690	875

Тому оптимальним рішенням під час вибору електродвигуна є той випадок, коли номінальні швидкості виконавчого органу робочої машини й електродвигуна однакові. Якщо ж ця умова не виконується, то вихід знаходять у раціональному співвідношенні маси, габаритів, вартості й надійності роботи двох складових частин електропривода – електродвигуна й передавального пристрою. Для цього здійснюють техніко-економічне оцінювання декількох можливих варіантів і вибирають кращий.

3.5 Вибір за конструктивним виконанням

Під час вибору електродвигуна за *конструктивним виконанням* ураховують такі основні фактори:

- вплив кліматичних факторів навколишнього середовища, у якому експлуатують двигун;
- ступінь захисту;
- виконання двигуна за способом монтажу.

3.5.1 Вплив кліматичних факторів навколишнього середовища

Для електродвигунів залежно від їх *кліматичного виконання* використовують такі позначення: У – для макрокліматичних районів із помірним кліматом, УХЛ – із холодним кліматом, Т – із тропічним кліматом, О – для всіх макрокліматичних районів на суходолі, М – із помірним холодним морським кліматом, ОМ – для необмеженого району плавання, В – для експлуатації в усіх макрокліматичних районах на суші й на морі, окрім макрокліматичного району з дуже холодним кліматом.

Крім кліматичних умов також враховують *категорію розміщення* електродвигуна, що позначають цифрою від 1 до 5. Умовні позначення категорії розміщення електричних машин для експлуатації такі: 1 – на відкритому повітрі; 2 – на відкритому повітрі або в приміщенні, де коливання температури й вологості повітря несуттєво відрізняються від коливання на відкритому повітрі (відсутня пряма дія сонячної радіації й атмосферних опадів), 3 – у закритому приміщенні з природною вентиляцією без штучного регулювання кліматичних умов, 4 – у приміщеннях зі штучним регулюванням кліматичних умов (закриті приміщення з

опаленням, вентиляція тощо), 5 – приміщення з підвищеною вологістю (приміщення без опалення й вентиляції).

У літерно-цифровому позначенні типорозміру електродвигуна (наприклад, 4A315M4У3) на передостанньому місці проставляють літеру, що означає кліматичне виконання («У»), а на останньому – цифру, що означає категорію розміщення («3»).

3.5.2 Ступінь захисту електродвигуна

Під поняттям *ступінь захисту електродвигуна* розуміють захист обслуговуючого персоналу від доторкання до частин, що знаходяться під напругою або до частин, які обертаються, а також захист від проникнення всередину двигуна твердих частинок і води.

Згідно з ДСТУ [19] позначення ступеня захисту складається з міжнародного знаку захисту IP й двох цифр.

Перша цифра характеризує ступінь захисту обслуговуючого персоналу від доторкання до частин, що знаходяться під напругою, або до частин, що обертаються, а також ступінь захисту від проникнення в середину двигуна твердих сторонніх тіл, а *друга цифра* – ступінь захисту від проникнення води всередину електродвигуна. Установлені стандартні значення ступенів захисту (табл. 3.2, 3.3 та 3.4).

Наведемо кілька рекомендацій щодо вибору електродвигунів за ступенем захисту. Електродвигуни, що встановлюють у приміщенні з нормальним середовищем, повинні мати виконання IP00 або IP20. Якщо двигун експлуатують на відкритому повітрі, то він повинен мати ступінь захисту не нижче ніж IP44. Під час роботи двигуна в приміщенні з хімічно активними парами чи газами, що порушують природне охолодження, ступінь захисту не

може бути нижчим ніж IP44. Електродвигуни, що працюють у сирих або особливо сирих приміщеннях, повинні мати ступінь захисту не менше ніж IP43.

Таблиця 3.2 – Ступені захисту обслуговуючого персоналу від зіткнення зі струмоведучими частинами й частинами електротехнічних виробів, що обертаються, та від проникнення твердих тіл усередину корпусу

Перша цифра умовного позначення	Ступінь захисту
0	Спеціальний захист відсутній
1	Захист від проникнення всередину оболонки великої ділянки поверхні людського тіла, наприклад руки, і від проникнення твердих тіл розміром понад 50 мм
2	Захист від проникнення всередину оболонки пальців або предметів довжиною не більше ніж 80 мм і від проникнення твердих тіл розміром понад 12 мм
3	Захист від проникнення всередину оболонки інструментів, дроту чи інших предметів діаметром або товщиною більше ніж 2,5 мм і від проникнення твердих тіл розміром більше ніж 1,0 мм
4	Захист від проникнення всередину оболонки дроту й від проникнення твердих тіл розміром більше ніж 1,0 мм
5	Проникнення всередину оболонки пилу не відвернено повністю. Однак пил не може проникати в кількості, достатній для порушення роботи виробу
6	Проникнення пилу відвернене повністю

Таблиця 3.3 – Ступені захисту електродвигунів
вiд проникнення води

Друга цифра умовного позначення	Ступiнь захисту
0	Захист вiдсутнiй
1	Захист вiд крапель води: краплi води, що вертикально падають на оболонку, не повиннi чинити шкiдливого впливу на вирiб
2	Захист вiд крапель води у разi нахилу оболонки до 15°: краплi води, що вертикально падають на оболонку, не повиннi чинити шкiдливий вплив на вироби у разi нахилу його оболонки на будь-який кут до 15° щодо нормального положення
3	Захист вiд дощу: дощ, що падає на оболонку пiд кутом 60° вiд вертикалi, не повиннi чинити шкiдливого впливу на вирiб
4	Захист вiд бризок: вода, що розприскується на оболонку в будь-якому напрямку, не повинна чинити шкiдливого впливу на вирiб
5	Захист вiд водяних струменiв: струмiнь води, що викидається в будь-якому напрямку на оболонку, не повинен спричиняти шкiдливого впливу на вирiб
6	Захист вiд хвиль води: вода пiд час хвилювання не повинна потрапляти всередину оболонки в кiлькостi, достатнiй для ушкодження виробу
7	Захист пiд час занурення у воду: вода не повинна проникати в оболонку, занурену у воду, за певних умов тиску й часу в кiлькостi, достатнiй для ушкодження виробу
8	Захист у разi тривалого занурення у воду: вироби придатнi для тривалого занурення у воду за умов, визначених виробником

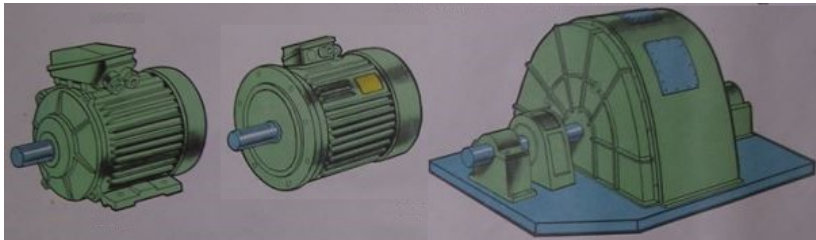
Таблиця 3.4 – Ступені захисту електричних машин

Ступінь захисту персоналу від дотикання й попадання сторонніх тіл	Ступінь захисту від проникнення води								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	IP01	-	-	-	-	-	-	-
1	IP10	IP11	IP12	IP13	-	-	-	-	-
2	IP20	IP21	IP22	IP23	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	IP43	IP44	-	-	-	-
5	-	-	-	-	IP54	IP55	IP56	IP57	IP58

3.5.3 Спосіб монтажу

Під час вибору електродвигуна за способом монтажу необхідно враховувати:

– *спосіб кріплення*: на лапах, фланцем, вмонтований, до фундаменту чи до робочої машини (рис. 3.19);



а)

б)

в)

Рисунок 3.19 – Виконання електродвигунів за способом кріплення: а) – на лапах, б) – фланцем, в) – до фундаменту чи до робочої машини

– *робоче положення*: горизонтальне або вертикальне (рис. 3.20);

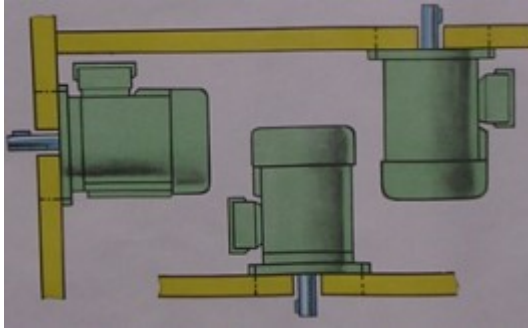


Рисунок 3.20 – Робочі положення електродвигунів

– виконання вихідного кінця вала: без кінця вала, з циліндричними, конічними чи фланцевими кінцями вала; з одним чи двома кінцями вала (рис. 3.21).



Рисунок 3.21 – Зразки кінців вала електродвигуна

3.6 Вибір електродвигуна за потужністю

Завдання вибору електродвигуна за потужністю є дуже важливим, оскільки від правильності вибору за цим параметром здебільшого залежать надійність роботи всього електропривода та його енергетичні показники в процесі експлуатації.

Вибір електродвигуна із завищеною потужністю спричинює неповне використання технічних можливостей двигуна. У такому разі ККД двигуна знижується. У машинах змінного струму знижується також коефіцієнт потужності. Ураховуючи те, що двигуни більшої

потужності мають більші масогабаритні параметри й коштують дорожче, використання електродвигунів із завищеною потужністю є економічно недоцільним.

Вибір двигуна із *заниженою потужністю* призводить до його перевантаження, що проявляється в недопустимих збільшеннях струму в його обмотках і втраті потужності. Наслідком цього є підвищення температури складових частин двигуна (насамперед, ізоляції обмоток) вище від допустимих значень, що спричинює зниження електричної міцності ізоляції та електричні пробої. Тому одним з *основних критеріїв* вибору електродвигуна за потужністю є *температура його обмоток*.

Завдання вибору електродвигуна ускладнюється ще й тим, що як величина, так і характер його навантаження в процесі роботи в складі електропривода зазвичай не є постійними. Дуже часто в процесі експлуатації двигун може працювати в різних режимах роботи, тому завдання полягає в тому, щоб вибрати найбільш характерний і найважчий із цих режимів.

Одним із найважливіших питань під час вирішення цього завдання є *розрахунок потрібної потужності електродвигуна*.

Для електропривода зі змінним навантаженням для цього будують *діаграми навантаження* – графічне зображення зміни одного з трьох параметрів: струму, моменту або потужності в часі упродовж циклу роботи електропривода. На основі діаграм навантаження визначають характер і величину втрат і, головне, температурний режим обмотки електродвигуна.

За отриманими значеннями потрібної потужності з урахуванням усіх розглянутих факторів вибирають такий електродвигун, температура ізоляції обмоток якого не перевищує допустимих значень. Ця умова є основною та обов'язковою для забезпечення надійної роботи

електродвигуна й есього електропривода.

3.6.1 Методи розрахунку необхідної потужності електродвигуна

Для розрахунку необхідної потужності електродвигуна для електропривода, що працює зі змінним навантаженням зазвичай використовують один із двох методів: метод середніх втрат або метод еквівалентних величин.

Під час використанні *методу середніх втрат* з урахуванням діаграм навантаження розраховують величину середніх втрат для попередньо вибраного електродвигуна за формулою:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}, \quad (3.13)$$

де $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ – потужності втрат попередньо вибраного електродвигуна на кожному з інтервалів навантаження;

t_1, t_2, \dots, t_n – тривалість роботи на кожному з інтервалів навантаження.

Умовою правильного вибору електродвигуна є:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном}, \quad (3.14)$$

де $\Delta P_{ном}$ – номінальні втрати попередньо вибраного електродвигуна.

Цей метод не набув широкого застосування для розрахунку потужності електродвигуна для електропривода робочих машин із таких причин:

– по суті, це метод перевірки, а не метод вибору потужності електродвигуна;

– часто він є трудомістким, оскільки для остаточного вибору електродвигуна потребує зазвичай розгляду кількох варіантів попередньо вибраних електродвигунів.

Значно частіше застосовують *метод еквівалентних величин*.

Під *еквівалентними величинами* за умови нагрівання розуміють такі умовно постійні значення потужності P , моменту M або струму I , які відповідають втратам за постійного навантаження, що дорівнюють втратам за умови роботи двигуна з реальним змінним навантаженням. Іншими словами, реальне змінне навантаження двигуна умовно замінують на постійне за умови, що втрати в першому й другому випадках є однаковими.

У загальному вигляді зв'язок між еквівалентними й реальними величинами за ступеневого графіка навантаження визначають за формулами

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 t_i}{t_u}} \quad (3.15)$$

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{t_u}}, \quad (3.16)$$

$$I_{екв} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{t_u}}, \quad (3.17)$$

де $P_{екв}$, $M_{екв}$, $I_{екв}$ – еквівалентні значення відповідно потужності, моменту та струму;

P_i , M_i , I_i – значення відповідно потужності, моменту та струму на i -му ступені навантаження;

t_i – тривалість i -го ступеня навантаження.

Вибір однієї з трьох еквівалентних величин, а відповідно й формули для її розрахунку, залежить від того, яка з діаграм навантаження електропривода відома: $P(t)$, $M(t)$ чи $I(t)$.

Умовами правильного вибору електродвигуна є такі:

$$P_{\text{екв}} \leq P_{\text{ном}}, I_{\text{екв}} \leq I_{\text{ном}}, M_{\text{екв}} \leq M_{\text{ном}}, \quad (3.18)$$

де $P_{\text{ном}}, I_{\text{ном}}, M_{\text{ном}}$ – номінальні значення відповідно до потужності, моменту та струму головного кола електродвигуна за умови його роботи в номінальному режимі.

3.6.2 Вибір електродвигуна й перевірка правильності вибору для роботи в режимі S1

Вважають, що електродвигун у складі електропривода працює в режимі S1, якщо тривалість роботи його під навантаженням перевищує $(3 - 4)T_n$, де T_n – постійна часу нагрівання електродвигуна. При цьому навантаження може бути або постійним, або ж циклічно змінюватися за умови $t_{\text{ц}} > 10$ хв.

За *постійного навантаження* впродовж усього часу роботи електродвигун вибирають за умови, якщо:

$$M_c \leq M_{\text{ном}}, P_c \leq P_{\text{ном}} \quad (3.19)$$

де M_c, P_c – момент і потужність постійного навантаження;
 $M_{\text{ном}}, P_{\text{ном}}$ – номінальні значення моменту й потужності електродвигуна в режимі S1.

Після вибору електродвигуна за каталогом виконують *перевірку в умовах пуску*:

$$M_{\text{п}} > M_{\text{с.п}}, \text{ або } P_{\text{п}} > P_{\text{с.п}} \quad (3.20)$$

де $M_{\text{п}}, P_{\text{п}}$ – пускові момент і потужність електродвигуна;

$M_{\text{с.п}}, P_{\text{с.п}}$ – пускові момент і потужність навантаження від робочої машини;

Оскільки в довідниковій літературі зазвичай не наводять значення пускових моментів двигунів, а надають значення допустимих коефіцієнтів пуску $k_{\text{п}}$, то під час виконання перевірки в умовах пуску доцільно нерівність (3.20) подати в такому вигляді:

$$k_{\text{п}} > k'_{\text{п}} \quad (3.21)$$

де $k_{\Pi} = M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}} = P_{\Pi}/P_{\text{НОМ}}$ – допустимий коефіцієнт пуску електродвигуна;

$k'_{\Pi} = M_{\text{с.п.}}/M_{\text{НОМ}} = P_{\text{с.п.}}/P_{\text{НОМ}}$ – дійсний коефіцієнт пуску електродвигуна.

За змінного навантаження (рис. 3.22) визначальною ознакою належності до режиму S1, крім $t_{\text{ц}} > 10$ хв, є те, що температура електродвигуна за час циклу роботи досягає сталого значення.

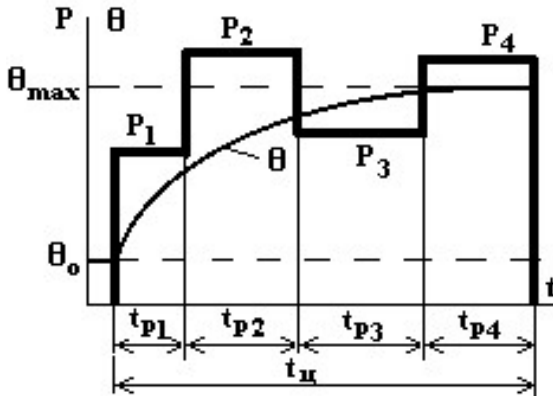


Рисунок 3.22 – До пояснення роботи електродвигуна в режимі S1 за змінного навантаження

Еквівалентну потужність розраховують за формулою

$$P_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{p1} + P_2^2 t_{p2} + \dots + P_n^2 t_{pn}}{t_{p1} + t_{p2} + \dots + t_{pn}}} \quad (3.22)$$

де P_1, P_2, \dots, P_n – потужності на кожному з інтервалів навантаження;

$t_{p1}, t_{p2}, \dots, t_{pn}$ – тривалість роботи на кожному з інтервалів навантаження.

Вибір електродвигуна виконують за каталогом для

двигунів, призначених для роботи в режимі S1 за умови:

$$P_{\text{екв}} \leq P_{\text{ном}} \quad (3.23)$$

Після цього виконують дві перевірки правильності вибору:

– *перевірку в умовах пуску*. При цьому використовують формулу (3.20) або (3.21).

– *перевірка перевантажувальної здатності*. При цьому використовують формули

$$M_{\text{max}} > M_{\text{с.мах}} \text{ або } P_{\text{max}} > P_{\text{с.мах}} \quad (3.24)$$

де M_{max} , P_{max} – максимальні (критичні) значення відповідно до моменту й потужності двигуна;

$M_{\text{с.мах}}$, $P_{\text{с.мах}}$ – максимальні значення відповідно до моменту й потужності навантаження, що визначають за діаграмою навантаження.

Оскільки в довідниковій літературі зазвичай не вказують значення максимальних моментів і потужностей двигунів, а вказують значення допустимих коефіцієнтів максимуму k_{max} , то під час виконання перевірки перевантажувальної здатності доцільно вираз (3.24) представити в такому вигляді:

$$k_{\text{max}} > k'_{\text{max}}, \quad (3.25)$$

де $k_{\text{max}} = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = P_{\text{max}}/P_{\text{ном}}$ – допустимий коефіцієнт максимуму двигуна;

$k'_{\text{max}} = M_{\text{с.мах}}/M_{\text{ном}} = P_{\text{с.мах}}/P_{\text{ном}}$ – дійсний коефіцієнт максимуму двигуна.

3.6.3 Вибір електродвигуна й перевірка правильності вибору для роботи в режимі S2

Під час вибору двигуна для роботи в режимі S2 також можливі два випадки: робота з постійним і змінним навантаженням за час циклу.

Уразі *постійного навантаження* двигун вибирають

за умовою (3.19). За діаграмою навантаження визначають дійсний час роботи (t_p) двигуна за один цикл, а потім за каталогом вибирають двигун з рівним або найближчим більшим стандартним значенням часу роботи ($t_{p.ст.}$ дорівнює 10, 30, 60 чи 90 хв), тобто за умовою:

$$t_p \leq (t_{p.ст.}). \quad (3.26)$$

За умови *змінного навантаження* двигуна розраховують еквівалентні величини, що приводять до одного зі стандартних значень тривалості часу. При цьому використовують формули

$$P_{екв.ст.} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 t_i}{t_{p.ст.}}} \leq P_{ном.ст.} \quad (3.27)$$

$$M_{екв.ст.} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{t_{p.ст.}}} \leq M_{ном.ст.} \quad (3.28)$$

де $M_{екв.ст.}$, $P_{екв.ст.}$ – еквівалентні значення моменту й потужності навантаження, зведені до стандартного значення часу роботи $t_{p.ст.}$;

$M_{ном.ст.}$, $P_{ном.ст.}$ – номінальні значення моменту й потужності двигуна, що відповідають стандартному значенню часу роботи $t_{p.ст.}$.

Двигун вибирають за каталогом для режиму S2, а потім виконують дві перевірки:

- в умовах пуску, враховуючи вимогу (3.20) або (3.21);
- за *перевантажувальною здатністю*, враховуючи вимогу (3.24) або (3.25).

3.6.4 Вибір електродвигуна й перевірка правильності вибору для роботи в режимі S3

Під час вибору електродвигуна для роботи в режимі

S3 рекомендують додержуватися такої послідовності:

- за діаграмою навантаження визначають дійсне значення тривалості циклу $t_{ц} \leq 10$ хв;
- розраховують дійсну тривалість вмикання (ТВ) за формулою (3.2);
- розраховують еквівалентну величину моменту або потужності, зведену до найближчого рівного або більшого стандартного значення $TB_{ст.}$ (15, 25, 40, 60 %):

$$P_{екв.ТВст} = \sqrt{\frac{TB \sum P_i^2 t_{pi}}{TB_{ст} \sum t_{pi}}}, \quad (3.29)$$

$$M_{екв.ТВст} = \sqrt{\frac{TB \sum M_i^2 t_{pi}}{TB_{ст} \sum t_{pi}}}, \quad (3.30)$$

- за каталогом для двигунів, призначених для роботи в режимі роботи S3 (додаток Г), вибирають електродвигун за умови:

$$P_{екв.ТВст} \leq P_{ном.ТВст.}, \quad (3.31)$$

де $P_{ном.ТВст.}$ – номінальне значення потужності двигуна, з відповідним стандартним значенням $TB_{ст.}$. Якщо дійсне значення ТВ перевищує 60 %, то вибирають двигун, призначений для роботи в режимі S1.

- вибраний двигун перевіряють в умовах пуску – за формулою (3.20) або (3.21), і за перевантажувальною здатністю за формулами (3.24) або (3.25).

3.6.5 Вибір електродвигуна та перевірка правильності вибору для роботи в режимах S4 – S10

Під час вибору електродвигуна для роботи в режимах S4 – S8 необхідно брати до уваги, що значну частину сумарних втрат становлять втрати під час

перехідних процесів, точно врахувати які можна лише для конкретного двигуна. Тому рекомендують вибір електродвигуна проводити в такій послідовності:

- 1) за діаграмою статичних навантажень визначають еквівалентні величини – момент або потужність, як для режиму S3;
- 2) одержані значення моменту перемножують на коефіцієнт запасу, що враховує додаткові втрати в перехідних режимах, і за каталогом для двигунів із режимом S3 (додаток Г) вибирають електродвигун;
- 3) для вибраного електродвигуна будують уточнену діаграму навантаження, за якою виконують уточнені розрахунки;
- 4) за уточненим значенням еквівалентних величин згідно з умовою (3.31) за каталогом для електродвигунів, призначених для роботи в режимі S3 (додаток Г), вибирають необхідний двигун;
- 5) вибраний електродвигун перевіряють *в умовах пуску* за формулами (3.20) або (3.21), і *за перевантажувальною здатністю* за формулами (3.24) або (3.25).

ПРИКЛАД

Для електропривода робочої машини, графік навантаження якої наведено на рисунку 3.23, а вихідні параметри (для варіантів А та Б) – у таблиці 3.5, виконати наступне:

- 1 Обґрунтувати вибір виду електродвигуна.
- 2 Обґрунтувати вибір номінальної/синхронної частоти обертання валу електродвигуна.
- 3 Провести розрахунок необхідної потужності електродвигуна.

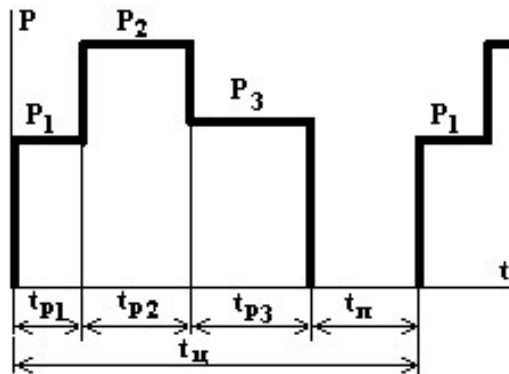


Рисунок 3.23 – Діаграма навантаження

Таблиця 3.5 – Вихідні параметри для розрахунку

Варіант	Потужність, кВт			Час, хв				Режим роботи	Регулювання частоти обертання	
	P ₁	P ₂	P ₃	t ₁	t ₂	t ₃	t _н		діапазон, об/хв	характер
А	12	340	15	5	10	35	68	S1	1475	не потрібно
Б	25	10	5	0,5	2	3	4,5	S3	810	не потрібно

РОЗВ'ЯЗАННЯ

Варіант А

Таблиця 3.6 – Вихідні параметри для розрахунку

Варіант	Потужність, кВт			Час, хв				Режим роботи	Регулювання частоти обертання	
	P ₁	P ₂	P ₃	t ₁	t ₂	t ₃	t _н		діапазон, об/хв	характер
А	12	340	15	5	10	35	68	S1	1475	не потрібно

1 Обґрунтування вибору виду електродвигуна.

Згідно з умовою задачі регулювати швидкість немає потреби, тому вибираємо асинхронний двигун із короткозамкненим ротором основного виконання як

найбільш простий, надійний і дешевий з усіх видів електродвигунів.

2 Обґрунтування вибору номінальної (синхронної) частоти обертання валу електродвигуна.

3 метою можливого вилучення зі складу електропривода передавального пристрою вибираємо електродвигун із синхронною частотою обертання 1 500 об/хв. – найближчою до заданого значення частоти обертання 1 475 об/хв.

3 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна.

Розрахунок необхідної потужності електродвигуна виконуємо методом еквівалентних величин за формулою (3.22).

Еквівалентне значення потужності:

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_{p1} + P_2^2 t_{p2} + P_3^2 t_{p3}}{t_{p1} + t_{p2} + t_{p3}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{12^2 \cdot 5 + 340^2 \cdot 10 + 15^2 \cdot 35}{5 + 10 + 35}} \approx 153 \text{ кВт} .$$

4 Вибір необхідного електродвигуна.

4.1 Згідно з додатком В і за умови $P_{екв} \leq P_{ном}$ попередньо вибираємо електродвигун, основні параметри якого наведені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Номінальні параметри електродвигуна

Типорозмір двигуна	$P_{ном}$, кВт	$n_{2ном}$, об/хв	ККД, %	k_{max}	$k_{п}$
4А315S4У3	160	1 470	93,5	1,9	1

4.2 Перевірка правильності вибору електродвигуна.

4.2.1 Перевірка правильності вибору електродвигуна в умовах пуску.

4.2.1.1 Дійсний коефіцієнт пуску електродвигуна:

$$k_{\text{п}}' = P_1/P_{\text{ном}} = 12/160 = 0,08.$$

4.2.1.2 Аналіз правильності вибору електродвигуна в умовах пуску.

Умова $k_{\text{п}} > k_{\text{п}}'$ ($1 > 0,08$) виконується.

4.3 Перевірка правильності вибору електродвигуна за переважувальною здатністю.

4.3.1 Дійсний коефіцієнт максимуму двигуна:

$$k_{\text{маx}}' = P_2/P_{\text{ном}} = 340/160 = 2,1.$$

4.3.2 Аналіз правильності вибору електродвигуна за переважувальною здатністю.

Умова $k_{\text{маx}} > k_{\text{маx}}'$ ($1,9 < 2,1$) не виконується.

За додатком В вибираємо електродвигун наступної більшої потужності, основні параметри якого наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Номінальні параметри електродвигуна

Типорозмір двигуна	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{2\text{ном}}$, об/хв	ККД, %	$k_{\text{маx}}$	$k_{\text{п}}$
4А315S4У3	200	1 475	94	1,9	1

4.3.3 Дійсний коефіцієнт переваження електродвигуна:

$$k_{\text{маx}}' = P_2/P_{\text{ном}} = 340/200 = 1,7.$$

Умова $k_{\text{маx}} > k_{\text{маx}}'$ ($1,9 > 1,7$) виконується.

4.3.4 Остаточо вибираємо асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, параметри якого наведені в таблиці 3.8.

РОЗВ'ЯЗАННЯ**Варіант Б**

Таблиця 3.9 – Вихідні параметри для розрахунку

Варіант	Потужність, кВт			Час, хв				Режим роботи	Регулювання частоти обертання	
	P ₁	P ₂	P ₃	t ₁	t ₂	t ₃	t _п		діапазон, об/хв	характер
Б	25	10	5	0,5	2	3	4,5	S3	810	не потрібно

1 Обґрунтування вибору виду електродвигуна.

1.1 Розраховуємо дійсну тривалість вмикання (ТВ) за формулою (3.2)

$$ТВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} = \frac{0,5 + 2 + 3}{0,5 + 2 + 3 + 4,5} 100\% = 55\%.$$

1.2 Вибираємо асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, призначений для роботи в режимі S3 й стандартним значенням $ТВ_{СТ} = 60\%$, найближчим більшим від дійсного значення $ТВ = 55\%$.

2 Обґрунтування вибору номінальної (синхронної) частоти обертання валу електродвигуна.

Оскільки номінальна частота обертання виконавчого органа робочої машини за умовою задачі становить 810 об/хв, вибираємо електродвигун із найближчою більшою синхронною частотою обертання 1 000 об/хв. Для забезпечення необхідної частоти обертання до складу привода повинен входити передавальний пристрій, наприклад, редуктор.

3 Розрахунок необхідної потужності електродвигуна.

Розрахунок необхідної потужності електродвигуна виконуємо за допомогою методу еквівалентних величин, використовуючи формулу (3.29).

Еквівалентне значення потужності:

$$P_{\text{екв.ТВст}} = \sqrt{\frac{ТВ \cdot (P_1^2 t_{p1} + P_2^2 t_{p2} + P_3^2 t_{p3})}{ТВ_{\text{см}} (t_{p1} + t_{p2} + t_{p3})}} =$$

$$= \sqrt{\frac{55(25^2 \cdot 0,5 + 10^2 \cdot 2 + 5^2 \cdot 3)}{60(0,5 + 2 + 3)}} = 9,9 \text{ кВт.}$$

4 Вибір необхідного електродвигуна.

Згідно з додатком Г за умови $P_{\text{еквТВст}} \leq P_{\text{ном}}$ попередньо вибираємо електродвигун з $n_1 = 1\,000$ об/хв, $ТВ_{\text{ст}} = 40\%$ потужністю $P_2 = 12$ кВт. Його типорозмір – 4АС160S6У3.

Оскільки в нашому випадку $ТВ = 55\%$, а $ТВ_{\text{ст}} = 60\%$, то згідно з доповненням до додатка Г вибираємо електродвигун типорозміру 4АС160M6У3, основні параметри якого наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Номінальні параметри електродвигуна

Типорозмір двигуна	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{2\text{ном}}$, об/хв	ТВ %	ККД, %	$k_{\text{п}}$	k_{max}
4АС160S6У3	11	940	60	82,5	1,9	2,1

5 Перевірка правильності вибору електродвигуна

5.1 Перевірка правильності вибору електродвигуна в умовах пуску.

5.1.1 Дійсний коефіцієнт пуску електродвигуна:

$$k'_{\text{п}} = P_1/P_{\text{ном}} = 25/11 = 2,27.$$

5.1.2 Аналіз правильності вибору електродвигуна в умовах пуску.

Умова $k_{\pi} > k'_{\pi}$ ($1,9 < 2,27$) не виконується.

5.1.3 За додатком Г вибираємо наступний електродвигун більшої потужності $P_2 = 16$ кВт. Його типорозмір – 4АС160М6У3.

Оскільки в нашому випадку $TВ_{ст} = 60$ %, то згідно з доповненням до додатка В вибираємо електродвигун типорозміру 4АС160М6У3, основні параметри якого наведені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Номінальні параметри електродвигуна

Типорозмір двигуна	$P_{ном},$ кВт	$n_{2ном},$ об/хв	ТВ %	ККД, %	k_{π}	k_{max}
4АС160М6У3	15	940	60	84	1,9	2,1

5.1.4 Дійсний коефіцієнт пуску електродвигуна:

$$k'_{\pi} = P_1/P_{ном} = 25/15 = 1,7.$$

5.1.5 Умова $k_{\pi} > k'_{\pi}$ ($1,9 > 1,7$) виконується.

5.2 Перевірка правильності вибору електродвигуна за перевантажувальною здатністю.

5.2.1 Дійсний коефіцієнт максимуму двигуна:

$$k'_{max} = P_1/P_{ном} = 25/15 = 1,7.$$

5.2.2 Аналіз правильності вибору електродвигуна за перевантажувальною здатністю.

Умова $k_{max} > k'_{max}$ ($1,7 < 2,1$) виконується.

Остаточо вибираємо асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, призначений для роботи в режимі S3 й параметри якого наведені в таблиці 3.11.

3.6.6 Спрощені методи вибору електродвигуна

Для електропривода деяких робочих машин (компресорів, вентиляторів, насосів, транспортерів,

металорізальних верстатів тощо), що працюють у режимі роботи S1, особливо на перших стадіях проектування, доцільно величину необхідної потужності електродвигуна знаходити за такими формулами:

– для компресорів:

$$P = K_3 \frac{Q \cdot A}{\eta_k \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3}, \quad (3.32)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу потужності ($K_3 = 1,1 - 1,2$);

Q – продуктивність компресора, $\text{м}^3/\text{с}$;

A – робота, витрачена на стискання 1 м^3 газу від $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до потрібного робочого тиску, $\text{Дж}/\text{м}^3$;

η_k, η_n – коефіцієнти корисної дії відповідно компресора й передавального пристрою;

– для вентиляторів:

$$P = K_3 \frac{Q \cdot H}{\eta_v \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3}, \quad (3.33)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу потужності ($K_3 = 1,1 - 1,6$);

Q – продуктивність вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – тиск, Па ;

η_v, η_n – коефіцієнти корисної дії відповідно вентилятора й передавального пристрою;

– для насосів:

$$P = K_3 \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{\eta_n \cdot \eta_n} \cdot 10^{-3}, \quad (3.34)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу потужності ($K_3 = 1,1 - 1,4$);

Q – продуктивність насоса, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – напір насоса, м ;

γ – густина рідини, що перекачується, $\text{Н}/\text{м}^3$;

η_v, η_n – коефіцієнти корисної дії відповідно насоса й передавального пристрою;

– для транспортерів:

$$P = K_3 \frac{Q}{\eta_n} \cdot (cL + H) \cdot 10^{-3}, \quad (3.35)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу потужності ($K_3 = 1,1 - 1,25$);

Q – продуктивність транспортера, Н/с;

L – відстань між осями кінцевих барабанів, м;

H – висота підймання вантажу, м;

$c = 1,5 - 2$ – для скребкових транспортерів;

$c = 0,14 - 3,2$ – для пластинчастих транспортерів;

η_n – коефіцієнти корисної дії передавального пристрою;

– для металорізальних верстатів:

$$P = F_c q_c v_p / (1000 \eta_c), \quad (3.36)$$

де q_c – переріз стружки, m^2 ;

v_p – швидкість різання, м/с;

F_c – питомий опір різанню, Н/м;

η_c – коефіцієнти корисної дії верстата.

Згідно з розрахованими значеннями потрібної потужності за каталогом для електродвигунів, що працюють у режимі S1, (додаток В) вибирають електродвигун за умови (3.19). Після цього виконують перевірку за умовами пуску згідно з формулами (3.20).

Контрольні запитання та завдання

1 Які завдання вирішують під час вибору електродвигуна для робочої машини?

2 Чим відрізняється режим тривалого навантаження від режиму короткочасного навантаження?

3 Для яких режимів роботи використовують характеристику “тривалість вмикання”?

4 Коли доцільно використовувати асинхронні

двигуни з короткозамкненим ротором?

5 Які переваги та недоліки мають асинхронні двигуни з фазним ротором?

6 Які переваги та недоліки мають синхронні двигуни?

7 Коли доцільно використовувати двигуни постійного струму?

8 Чим керуються під час вибору номінальної напруги двигуна?

8 Як впливає номінальна швидкість електродвигуна на його габаритні параметри?

10 Що означає поняття «ступінь захисту електродвигуна»?

11 Які методи розрахунку необхідної потужності електродвигуна ви знаєте?

12 Чим відрізняється вибір електродвигуна для роботи в режимах S1 та S2?

13 Яка послідовність вибору електродвигуна для роботи в режимі S3?

14 Яка послідовність вибору електродвигуна для роботи в режимах S4–S10?

15 Коли доцільно використовувати спрощені методи вибору електродвигуна?

Розділ 4 РОБОТА ЕЛЕКТРОПРИВОДА РОБОЧИХ МАШИН У ПЕРЕХІДНИХ І СТАЛОМУ РЕЖИМАХ

4.1 Особливості пуску електропривода

До основних проблем пуску електропривода можна віднести малі значення пускового моменту для більшості електродвигунів, обмеження за пусковим струмом, жорсткі вимоги щодо часу розгону електропривода до номінальної швидкості.

4.1.1 Вимоги до пускового моменту електродвигуна

Моменти опору значної частини робочих машин на час пуску ($M_{с.п}$) дорівнюють або близькі до їх номінальних значень. У деякої частини робочих машин пускові моменти опору значно перевищують номінальний момент. Але запуск електропривода можливий лише за умови, що пусковий момент електродвигуна ($M_{п}$) є більшим за пусковий момент опору робочої машини ($M_{с.п}$), а розгін електропривода до сталої швидкості зумовлений різницею цих моментів:

$$\Delta M = M_{п} - M_{с.п} \quad (4.1)$$

За від'ємних і навіть нульових значенн ΔM запуск електропривода неможливий.

Пускові властивості електродвигуна аналізують за значенням *коефіцієнта пуску*:

$$k_{п} = M_{п}/M_{ном.} \quad (4.2)$$

Але частина електродвигунів має порівняно незначні величини коефіцієнта пуску, що може обумовити неможливість або важкі умови пуску.

Особливо актуальна ця проблема для синхронних двигунів та асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором, для більшості яких $k_{\text{п}} = 1,0 - 1,2$. Крім того, для значної частини цих електродвигунів пускові властивості обумовлені не пусковим, а мінімальним моментом (M_{min}) (рис. 4.1), що має значення: $M_{\text{min}} = (0,9 - 1,0) M_{\text{ном}}$.

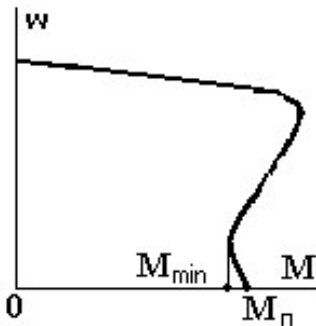


Рисунок 4.1 – До пояснення значення мінімального моменту

4.1.2 Вимоги до пускових струмів

З усіх видів електродвигунів лише конструкція асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором дозволяє значне збільшення пускового струму щодо номінального ($I_{\text{п}} \approx (5 - 7)I_{\text{ном}}$). Але й для електропривода з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором проблема пускових струмів є актуальною, оскільки від їх величини залежать потужність джерела живлення, переріз провідників, що забезпечують живлення електродвигунів; габарити електричних апаратів керувального пристрою тощо. Зменшення пускових струмів є одним з основних завдань під час проектування таких електроприводів.

Для електропривода з електродвигунами постійного струму, асинхронними двигунами з фазним ротором і для значної частини синхронних двигунів проблема пускових струмів є особливо актуальною, оскільки для них обмеження $I_{\pi} \leq (1,5 - 2,5)I_{\text{ном}}$ є обов'язковим. Невиконання цієї умови може призвести до перегорання обмотки якоря чи ротора.

4.1.3 Вимоги до часу пуску

Вирішуючи це питання необхідно брати до уваги кілька суперечливих факторів.

По-перше, зменшення часу пуску (t_{π}) дозволяє збільшити швидкодію та продуктивність електропривода.

По-друге, зменшення часу пуску можливе лише за умови збільшення різниці між обертовим моментом електродвигуна й моментом опору робочого механізму.

Але й це збільшення різниці моментів згідно з формулою (1.10) зумовлює збільшення динамічної складової моментів, що діє на окремі складові частини робочої машини, двигунового й передавального пристроїв електропривода. Це зі свого боку спричинює необхідність збільшення механічної міцності всіх елементів, на які діють пускові моменти, що призводить до збільшення масогабаритних показників і вартості.

Тому під час проектування електропривода робочих машин необхідно враховувати всі зазначені фактори й знаходити компромісне рішення, яке б найбільше задовольняло вимоги щодо електропривода.

4.1.4 Шляхи вирішення проблем пуску

У кожному конкретному випадку, внаслідок особливостей механічних характеристик робочої машини й електродвигуна, існує кілька способів вирішення цієї проблеми. Враховуючи велику різноманітність робочих машин і видів електродвигунів, що використовують у їх електроприводах, це питання буде розглянуто лише на прикладі асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором.

Першим способом вирішення цієї проблеми в електроприводі робочих машин із великими статичними й динамічними навантаженнями на час пуску є *збільшення пускового моменту* асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Для цього використовують, наприклад, асинхронні електродвигуни серії 4А з підвищеним пусковим моментом. У позначенні таких електродвигунів після серії (4А) додають літеру Р, наприклад, 4АР160S4У3. Ці двигуни випускають на синхронні частоти 1 500, 1 000 та 750 об/хв. Вони відповідають основному виконанню та уніфіковані з відповідними типорозмірами основного виконання за всіма елементами й головними розмірами висоти вала та кріплення. Збільшення пускового моменту й зменшення пускових струмів у цих двигунах досягають завдяки особливій конструкції ротора, що має залиту алюмінієм *подвійну обмотку*. Таке конструктивне рішення зумовлює певне подорожчання двигуна, але дає можливість отримати більші значення коефіцієнта пуску ($k_p = 1,8 - 2,0$) та мінімального моменту ($M_{\min} = (1,5 - 1,6) M_{\text{ном}}$).

Другим способом вирішення цієї проблеми є *правильний вибір способу пуску*. Для електропривода робочих машин з асинхронним електродвигуном із короткозамкненим ротором найчастіше використовують

такі види пуску: прямий, переключенням схеми з'єднання обмотки статора із «зірки» на «трикутник», за допомогою автотрансформатора.

Прямий пуск, або пуск безпосереднім вмиканням обмотки статора електродвигуна на номінальну напругу мережі живлення є найбільш поширеним способом пуску асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором малої та середньої потужностей.

За такого способу пуску (рис. 4.2) на обмотку статора за допомогою комутаційного апарата S відразу подають номінальну напругу, за якої й здійснюють запуск двигуна.

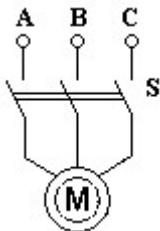


Рисунок 4.2 – Схема прямого пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Перевагою такого способу пуску є простота його виконання й мінімум електричних апаратів, необхідних для його реалізації.

До *недоліків* такого способу пуску відносять те, що пусковий струм може в 5–7 разів перевищувати номінальне значення струму, а пусковий момент може бути недостатнім для здійснення надійного запуску за номінального навантаження.

Для зменшення величини пускових струмів використовують різні способи пуску за *зниженої напруги*.

Пуск переключенням схеми з'єднання обмотки статора із «зірки» на «трикутник» (рис. 4.3) може бути використаний тоді, коли основною схемою з'єднання обмотки статора є «трикутник».

Пуск електродвигуна здійснюють у положенні «Пуск» перемикача S2. При цьому обмотки статора з'єднані в схему «зірка». За такої схеми з'єднання фазні напруга й струм будуть у $\sqrt{3}$ рази менші за їх номінальне значення, а лінійний струм у 3 рази менший, ніж за схеми з'єднання «трикутник». У разі досягнення електродвигуном швидкості обертання ротора, близької до номінального значення, перемикач S2 переводять у положення «Робота», за якого обмотки статора з'єднані в схему «трикутник». При цьому забезпечують подальшу роботу електродвигуна за номінальної напруги.

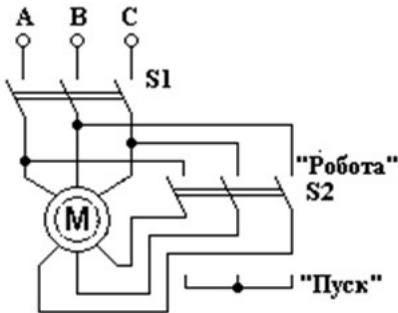


Рисунок 4.3 – Схема пуску асинхронного двигуна переключенням із «зірки» на «трикутник»

Перевагою такого способу пуску є суттєве зниження пускових струмів. Але цей спосіб має й *недоліки*:

- зростає складність процесу пуску й схеми, що потребує допоміжних комутаційних електричних апаратів і виконання певних монтажних робіт;

- зменшення фазної напруги в $\sqrt{3}$ рази спричинює трикратне зниження моменту, що зумовлює можливість використання такого способу пуску лише без навантаження або за навантаження, що значно менше за номінальне.

Пуск із допомогою автотрансформатора (рис. 4.4) здійснюють у такій послідовності:

- повзунок трифазного автотрансформатора Т переміщують у положення «Пуск»;
- вмикають комутаційний апарат S. При цьому напруга на обмотках статора двигуна дорівнює нулю;
- повзунок автотрансформатора з певною швидкістю переміщують із положення «Пуск» у положення «Робота». При цьому також із певною швидкістю змінюється напруга, що подають на обмотки статора. За таких умов швидкість вала двигуна зростає до номінального значення.

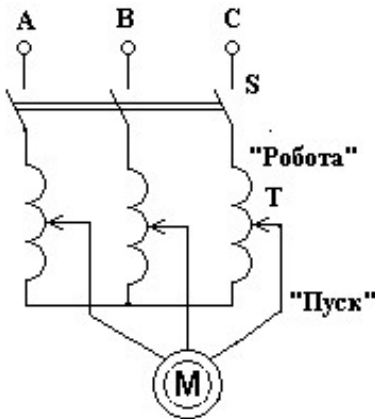


Рисунок 4.4 – Схема пуску асинхронного двигуна з допомогою автотрансформатора

Перевагами такого способу пуску є можливість змінювати величину як пускового струму, так і пускового моменту. Але за такого способу пуску ці параметри здебільшого залежать від правильності виконання процесу пуску оператором або системою автоматичного керування.

До *недоліків* цього способу можна віднести:

- він потребує використання трифазного регульованого автотрансформатора (ЛАТРа), що

за своїми масогабаритними й ціновими параметрами сумірний з електродвигуном;
– недостатній досвід оператора або неполадки автотрансформатора можуть спричинити появу пускових струмів, сумірних із пусковими струмами за прямого пуску.

4.2 Особливості гальмування електропривода

В електроприводі робочих машин зазвичай застосовують такі способи гальмування: на вибіг, динамічне та противмиканням.

4.2.1 Гальмування на вибіг

Для пояснення цього способу гальмування звернемось до рисунка 4.2. На початку гальмування вимикають комутаційний апарат S . Припинення подавання напруги на обмотки статора двигуна M зумовлює зникнення електромагнітного обертового моменту. Гальмування електропривода відбувається під дією моменту опору, спричиненого всіма рухомими частинами електропривода та виконавчого органа робочої машини.

Перевага способу: гальмування на вибіг є найпростішим за виконанням і потребує мінімуму необхідних електричних апаратів для реалізації. Його широко використовують у тих електроприводах, де немає обмежень на час гальмування.

Недолік способу: час гальмування залежить як від початкової швидкості, за якої розпочинається гальмування, так і від величини моменту опору. Отже, керувати процесом гальмування за такого способу неможливо.

4.2.2 Динамічне гальмування

Розглянемо цей режим гальмування на прикладі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (рис. 4.5).

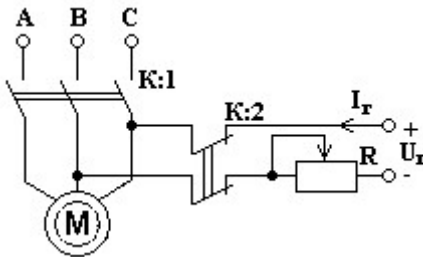


Рисунок 4.5 – Схема динамічного гальмування асинхронного двигуна

Розмикання силових контактів K:1 контактора зумовлює зникнення трифазної напруги на обмотках статора електродвигуна М. Одночасно із цим відбувається замикання контактів K:2 контактора, й на дві фазні обмотки статора подається напруга U_r від джерела постійного струму. Ротор двигуна під дією інерційних сил продовжує обертатись у постійному магнітному полі. Електрична машина переходить із режиму двигуна в режим генератора, й на її ротор розпочинає діяти електромагнітний момент, який у цьому разі виконує функцію гальмівного моменту. Величина гальмівного моменту залежить пропорційно від величини струму I_r , який зі свого боку залежить від значення напруга U_r й величини опору змінного резистора R.

Отже, розглянута схема дозволяє, змінюючи значення напруги U_r і/або величину опору R, змінювати величину гальмівного моменту й тим самим змінювати час гальмування.

Перевагою цього способу гальмування є можливість

плавно змінювати час гальмування незалежно від початкової швидкості й величини навантаження двигуна.

До *недоліків* цього способу гальмування можна віднести:

- необхідність мати два джерела живлення;
- більшу складність, зумовлену необхідністю застосування допоміжних комутаційних електричних апаратів, налагодження схеми й певного регулювання її параметрів.

4.2.3 Гальмування противмиканням

За цього способу гальмування (рис. 4.6) на час гальмування змінюється чергування двох фаз напруги, що подають на обмотки статора.

На час роботи електропривода перемикач *S* знаходиться в положенні «Робота», що забезпечує чергування фаз напруги «АВС», яку подають на обмотки статора. Обертовий момент при цьому має один напрямок, скажімо, за ходом годинникової стрілки. У цьому напрямку обертається й ротор.

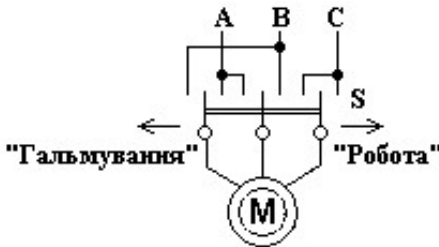


Рисунок 4.6 – Схема гальмування противмиканням асинхронного двигуна

На час гальмування перемикач *S* перемикають у положення «Гальмування». При цьому змінюють чергування фаз напруги з «АВС» на «ВАС», а обертовий

момент змінює свій напрямок на протилежний – проти ходу годинникової стрілки. Але оскільки ротор продовжує обертатися в тому самому напрямку, то в цьому випадку обертовий момент двигуна виконує функцію гальмівного моменту, під дією якого й відбувається гальмування.

Цей спосіб гальмування значно простіший від попереднього, оскільки потребує менше допоміжних комутаційних електричних апаратів і забезпечує швидке гальмування.

Але він має й ряд суттєвих *недоліків*:

- великі значення струму та моменту;
- можливий зворотній хід двигуна, якщо своєчасно не переставити перемикач у нейтральне положення;
- неможливість регулювати час гальмування.

Крім описаних способів *електричного гальмування* в електроприводі деяких робочих машин використовують також *механічне гальмування*. Суть його полягає в тому, що на валу електродвигуна встановлюють барабан, який після відключення електродвигуна від джерела живлення затискається колодками, чим і досягають гальмування вала двигуна та утримання його в нерухомому стані до повторного вмикання.

4.3 Регулювання швидкості електропривода

Використання того чи іншого способу регулювання швидкості електропривода переважно залежать від виду електродвигуна, що використовують у ньому.

4.3.1 Регулювання швидкості електропривода з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором

Частоту обертання ротора n (об/хв) асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором визначають за формулою

$$n = \frac{60f_1}{p}(1 - S), \quad (4.3)$$

де f_1 – частота напруги живлення, Гц,
 p – кількість пар полюсів електродвигуна,
 S – ковзання.

Згідно з формулою (4.3) швидкість асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором можна регулювати за допомогою трьох параметрів. Відповідно існують і три способи регулювання, зазначені нижче.

1. *Регулювання швидкості обертання зміною частоти напруги живлення (f_1).* Як відомо, у нашій країні мережі змінного струму мають стандартну частоту $f_{\text{ном}} = 50$ Гц. Зазвичай для зміни частоти напруги живлення в електроприводі робочих машин використовують тиристорні перетворювачі частоти (ТПЧ). Вони дозволяють плавно змінювати частоту як у більший, так і в менший бік від номінального значення, що зумовлює пропорційну зміну частоти обертання вала електродвигуна (рис. 4.7). Тому можливість плавного регулювання швидкості обертання зміною частоти теоретично від нуля до номінальної швидкості й вище є *перевагою* цього способу регулювання.

Але цей спосіб має також ряд істотних *недоліків*:

- ТПЧ є досить складним пристроєм, що за своїми масогабаритними та ціновими параметрами

перевищують аналогічні параметри двигуна;
– асинхронний двигун із короткозамкненим ротором у комплексі «АД-ТПЧ» втрачає ряд своїх переваг, що були описані в пункті 3.2.1.

Тому перед прийняттям рішення щодо використання такого способу регулювання швидкості доцільно виконати техніко-економічний аналіз.

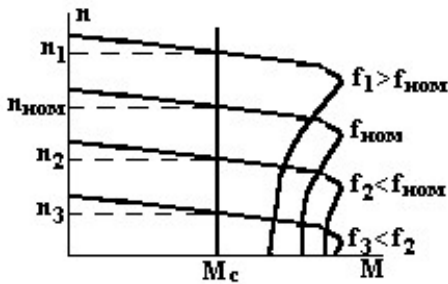


Рисунок 4.7 – Графіки залежності швидкості обертання від частоти напруги

2. Регулювання швидкості обертання зміною кількості пар полюсів (p) електродвигуна.

Цей спосіб регулювання (рис. 4.8) дозволяє лише ступеневу зміну швидкості обертання.

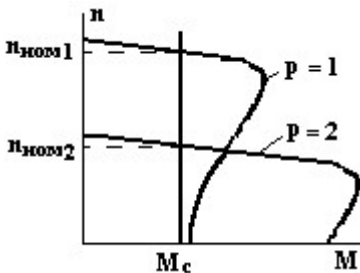


Рисунок 4.8 – Графіки залежності швидкості обертання від кількості пар полюсів

Недоліками цього способу є: масогабаритні та цінові параметри багатошвидкісних електродвигунів значно вищі, ніж одношвидкісних, і в разі їх використання необхідні додаткові електричні апарати керування.

Прикладом багатошвидкісних електродвигунів, що дозволяють регулювати швидкість обертання зміною пар полюсів є асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором серії 4А:

- двошвидкісні із синхронними частотами обертання 1 500/3 000, 1 000/1 500, 750/1 500, 750/1 000, 500/1 000 об/хв;
- тришвидкісні із синхронними частотами обертання 1 000/1 500/3 000, 750/1 500/3 000, 750/1 000/1 500 об/хв;
- чотиришвидкісні із синхронними частотами обертання 500/750/1 000/1 500 об/хв.

Технічні дані багатошвидкісних двигунів серії 4А наведені в додатку Д.

3. *Регулювання швидкості обертання зміною ковзання (S).* Для асинхронних двигунів ковзання можна змінювати методом зміни напруги живлення (рис. 4.9).

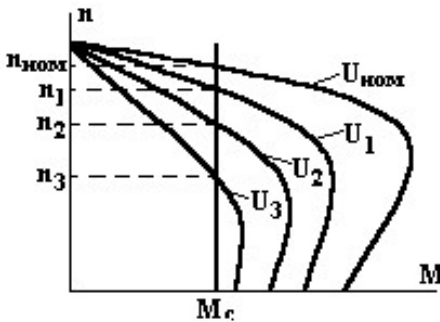


Рисунок 4.9 – Графіки залежності швидкості обертання від напруги

В електроприводі робочих машин спосіб регулювання швидкості обертання зміною ковзання використовують рідко, оскільки:

- зазвичай він забезпечує незначний діапазон регулювання швидкості;
- суттєве збільшення напруги вище від номінального значення недопустиме, а зменшення

напруги призводить до суттєвого зниження як перевантажувальної здатності електродвигуна, так і його пускового моменту.

Аналізуючи сказане, можна дійти висновку, що регулювання швидкості асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором на практиці можливе, але часто воно є складним, дорогим або неефективним. Тому виконання техніко-економічних розрахунків і порівнянь з іншими можливими способами в цьому випадку є обов'язковим.

4.3.2 Регулювання швидкості електропривода з асинхронним двигуном із фазним ротором

Частоту обертання ротора асинхронного двигуна з фазним ротором як і для двигуна з короткозамкненим ротором визначають за формулою (4.3). Для цього виду двигунів регулювати швидкість можна тими самими способами, що були описані в пункті 4.3.1 для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (змінюючи частоту напруги живлення, кількості пар полюсів і ковзання). Але на практиці для асинхронного двигуна з фазним ротором використовують лише один спосіб – зміну ковзання завдяки зміні величини опору R_d реостатів, що вмикають у коло обмотки ротора (рис. 4.10).

Зміною величини опору R_d досягають збільшення нахилу механічної характеристики двигуна, що забезпечує регулювання його швидкості від нуля до номінального значення (рис. 4.11). На практиці в електроприводах робочих машин регулювання швидкості таким способом частіше здійснюють ступенево, оскільки по обмотках ротора й по R_d проходять значні струми, тож

використовувати пристрої, які б забезпечували плавну зміну величини опору R_d , часто буває недоцільним.

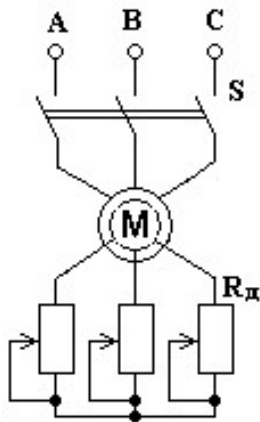


Рисунок 4.10 – Схема підключення асинхронного двигуна з фазним ротором

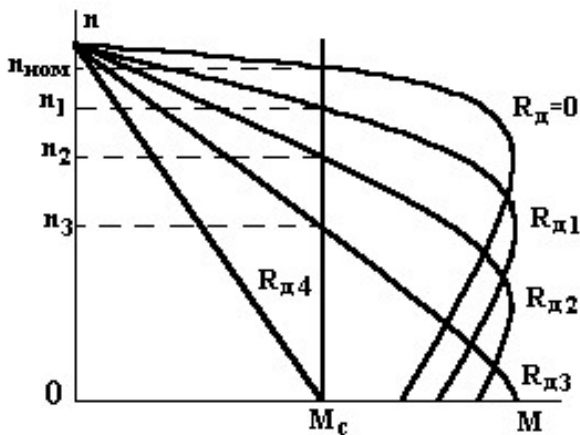


Рисунок 4.11 – Графіки залежності швидкості обертання ротора від опору в його колі

До переваг цього способу регулювання можна віднести можливість змінювати швидкість обертання від нуля до номінального значення, а також стабільність переважувальної здатності двигуна ($M_{\max} = \text{const}$).

Недоліками цього способу регулювання є великі

втрати в R_d , а також необхідність використання допоміжних комутаційних апаратів, що забезпечують зміну величини опору в колі обмотки ротора.

4.3.3 Регулювання швидкості електропривода із синхронним двигуном

Частоту обертання ротора синхронного двигуна визначають за формулою

$$n = \frac{60 f_1}{p}, \quad (4.4)$$

де p – кількість пар полюсів електродвигуна,
 f_1 – частота напруги живлення, Гц.

Згідно з (4.4) регулювати швидкість синхронного двигуна можна двома способами: зміною кількості пар полюсів і частоти напруги живлення. На практиці використовують лише другий спосіб, оскільки синхронні двигуни, що дозволяють змінювати кількість пар полюсів, не виготовляють.

Зазвичай для зміни частоти напруги живлення в електроприводі робочих машин із синхронним двигуном використовують ТПЧ. Зміною частоти досягають пропорційну зміну частоти обертання ротора синхронного двигуна (рис. 4.12).

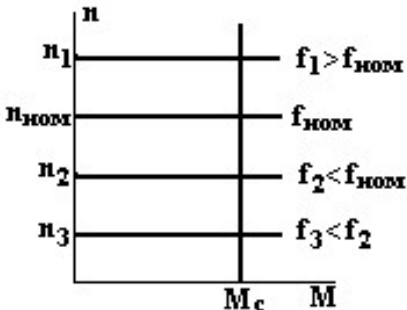


Рисунок 4.12 – Графіки залежності швидкості обертання від частоти напруги

Можливість плавного регулювання швидкості в широкому діапазоні (теоретично від нуля до номінального значення й вище) є *перевагою* цього способу. Але цей спосіб має також і ряд істотних *недоліків*, що вже розглядали в пункті 4.3.1.

4.3.4 Регулювання швидкості електропривода із двигуном постійного струму

Це питання розглянемо на прикладі двигуна постійного струму з незалежним збудженням (рис. 4.13), швидкість обертання якоря n (об/хв) якого визначають за формулою

$$n = \frac{U_{\text{я}} - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{c_e \Phi}, \quad (4.5)$$

де $U_{\text{я}}$ – напруга джерела живлення, до якого підключене коло обмотки якоря, В;

$I_{\text{я}}$ – струм, що протікає в колі обмотки якоря, А;

$R_{\text{я}}$ – опір обмотки якоря, Ом;

$R_{\text{д}}$ – додатний опір, що вводять у коло обмотки якоря, Ом;

c_e – конструктивна стала машини;

Φ – магнітний потік, Вб.

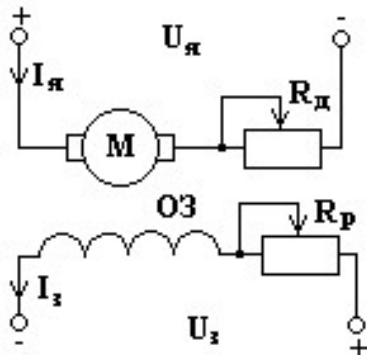


Рисунок 4.13 – Схема підключення двигуна постійного струму з незалежним збудженням

Згідно з (4.5), швидкість обертання якоря двигуна постійного струму можна регулювати за допомогою трьох параметрів, зазначених нижче.

1 *Напруги джерела живлення ($U_{я}$)*, до якого підключене коло обмотки якоря. Згідно з виразом (4.5) зміна $U_{я}$ зумовлює прямо пропорційну зміну швидкості обертання якоря n (рис. 4.14). Цей спосіб регулювання може забезпечити плавне регулювання швидкості в діапазоні від нуля до номінального значення й вище.

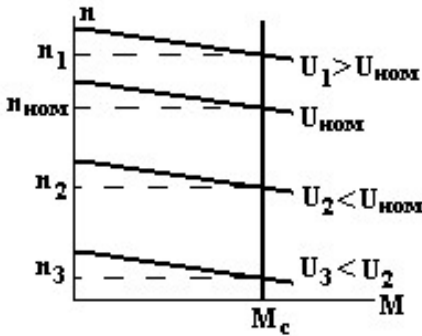


Рисунок 4.14 – Графіки залежності швидкості обертання від напруги

2 *Додатного опору R_d* , що вводять у коло обмотки якоря. Збільшення величини додатного опору зменшує жорсткість механічної характеристики (рис. 4.15) і зумовлює зниження швидкості обертання якоря. Цей параметр за умови плавної зміни дозволяє також плавно регулювати швидкість від нуля до номінального значення.

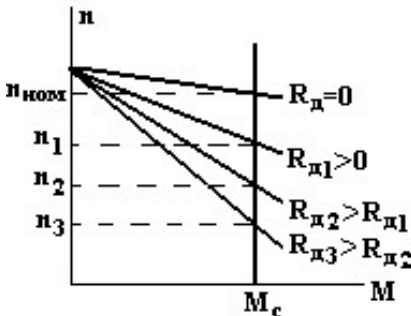


Рисунок 4.15 – Графіки залежності швидкості обертання від додатного опору

З *Магнітного потоку* Φ . На практиці магнітний потік зазвичай змінюють, регулюючи величину струму обмотки збудження I_z за допомогою додатного опору R_p в колі обмотки збудження. Оскільки за номінального значення магнітного потоку магнітна система машини знаходиться в насиченому стані, збільшувати магнітний потік вище від номінального значення неефективно. Тому на практиці використовують регулювання швидкості з допомогою магнітного потоку лише в бік його зменшення й цим згідно з (4.5) досягають збільшення швидкості від номінального значення й вище. Штучні механічні характеристики двигуна, одержані за $\Phi < \Phi_{\text{ном}}$ показані на рисунку 4.16.

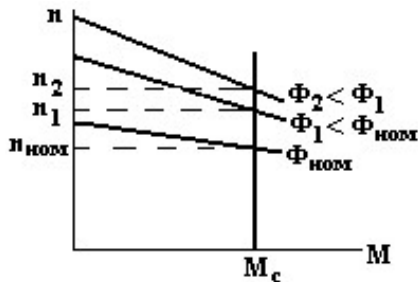


Рисунок 4.16 – Графіки залежності швидкості обертання від магнітного потоку

Аналізуючи сказане, можна дійти висновку, що електродвигуни постійного струму є найкращим видом електродвигунів щодо можливості регулювання швидкості. Вони забезпечують три простих у реалізації, ефективних і дешевих способи плавного регулювання швидкості в діапазоні від нуля до номінального значення й вище.

4.4 Реверс електропривода

Під реверсом розуміють зміну напрямку руху. В електроприводах робочих машин використовують як механічні, так і електричні способи реверсу виконавчого

органа. У цьому розділі розглянемо лише питання, пов'язані з електричним реверсом.

В електроприводі з асинхронними двигунами з короткозамкненим та фазним ротором і з синхронним двигуном реверсу досягають методом зміни чергування фаз напруги, що подають на обмотки статора, наприклад, чергування фаз «АВС» змінюють на чергування «ВАС». Це приводить до зміни напрямку обертання магнітного поля статора й відповідно до зміни напрямку обертання ротора. Електрична схема реверсивного електропривода з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором буде розглянута в розділі 6 (рис. 6.6).

В електроприводі з двигуном постійного струму реверсу можна досягти двома способами – або зміною полярності напруги джерела живлення ($U_{я}$), до якого підключене коло обмотки якоря, або зміною полярності напруги ($U_{з}$) на обмотці збудження (рис. 4.13).

4.5 Робота електропривода з постійною швидкістю

Необхідність підтримання постійної швидкості виконавчого органа робочої машини за зміни навантаження є вимогою багатьох технологічних процесів, для яких якість продукції чи їх продуктивність здебільшого залежить від стабільності швидкості. Прикладами таких робочих машин можуть бути автоматизовані лінії з нанесення різного роду покриття на вироби, фарбування, сушіння, намотування стрічкових виробів у рулони, механічного оброблення виробів із великою площею тощо.

Як приклад розглянемо роботу схеми асинхронного електропривода для автоматичної стабілізації швидкості зміною напруги живлення двигуна (рис. 4.17).

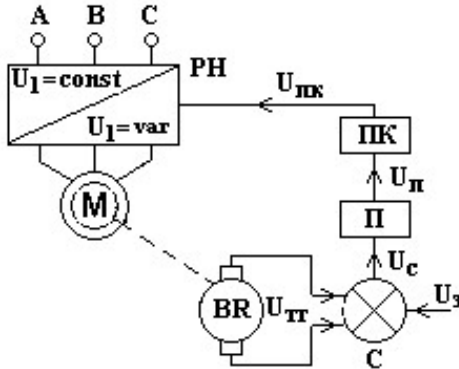


Рисунок 4.17 – Схема стабілізації швидкості електропривода

Джерелом живлення є трифазна трипровідна мережа змінного струму.

Функцію електродвигунового пристрою в цьому електроприводі виконує трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором М.

Електрична схема має такі основні складові частини:

РН – регулятор напруги. Його завдання – автоматично змінювати напругу, що подається на двигун М, відповідно до зміни навантаження двигуна. На вхід РН подається незмінна трифазна напруга ($U_1 = \text{const}$), а на виході має місце змінна трифазна напруга ($U_1 = \text{var}$), величина якої зумовлена величиною сигналу $U_{пк}$;

ВР – тахогенератор, що видає електричний сигнал $U_{тт}$, пропорційний швидкості обертання ротора двигуна;

С – суматор, що виконує такі функції: на один із його входів подається електричний сигнал завдання U_3 , величина якого зумовлює ту швидкість ($n = \text{const}$) двигуна, яку необхідно підтримувати постійною за зміни навантаження. На другий вхід суматора подають сигнал $U_{тт}$, що відповідає дійсній швидкості двигуна. У суматорі

відбувається порівняння цих сигналів, і на виході його одержують сигнал: $U_c = U_3 - U_{тг}$;

П – підсилювач, що підсилює сигнал U_c до певної величини U_p , достатньої для керування роботою наступної складової частини – ПК;

ПК – пристрій керування, видає сигнал $U_{пк}$, що своєю дією на РН зумовлює необхідну зміну сигналу $U_1 = var$.

Схема працює так: якщо електропривод працює в сталому режимі, наприклад, із моментом навантаження M_2 (рис. 4.18), то його робочою точкою на механічній характеристиці буде точка 2, що відповідає швидкості обертання $n = const$, що обумовлена відповідним значенням U_3 . При цьому сигнал на виході суматора буде дорівнювати нулю:

$$U_c = U_3 - U_{тг} = 0.$$

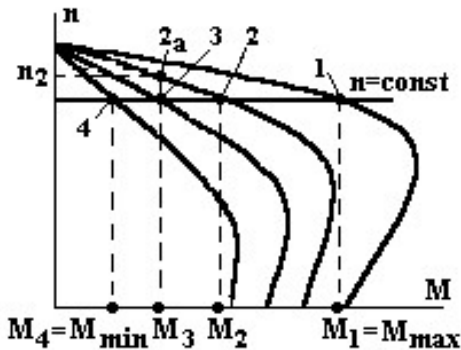


Рисунок 4.18 – До пояснення роботи хеми стабілізації швидкості електропривода

За зменшення навантаження до значення M_3 й за відсутності системи автоматичного регулювання робочою точкою була б точка 2а. Швидкість двигуна в такому разі зросла б до значення n_2 . Але завдяки системі автоматичного регулювання це не відбувається. Із початком зростання швидкості обертання ротора двигуна збільшується й сигнал $U_{тг}$. При цьому на виході суматора

з'являється сигнал U_c , що посилюється підсилювачем, а пристрій керування виробляє такий сигнал $U_{пк}$, під дією якого регулятор напруги так змінює сигнал $U_1 = var$, що робочою точкою буде точка 3, а це зі свого боку забезпечує підтримання стабільної швидкості електропривода $n = const$.

Ця схема автоматично забезпечує стабільність швидкості електропривода за зміни моменту навантаження в діапазоні від M_{min} до M_{max} .

Контрольні запитання та завдання

- 1 За яких умов можливий запуск електропривода?
- 2 Чим зумовлені вимоги до пускових струмів електродвигунів?
- 3 На що впливає час пуску електропривода?
- 4 Які способи подолання проблеми пуску електропривода ви знаєте?
- 5 Які переваги та недоліки має прямий пуск?
- 6 Дайте порівняльний аналіз способів пуску переключенням із «зірки» на «трикутник» та з допомогою автотрансформатора.
- 7 Які переваги й недоліки має гальмування на вибіг?
- 8 Як здійснюють динамічне гальмування?
- 9 Які недоліки й переваги гальмування противмиканням?
- 10 Як можна регулювати швидкість електропривода з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором?
- 11 Чому швидкість асинхронного двигуна з фазним ротором регулюють на практиці лише зміною величини опору в колі обмотки ротора?
- 12 Як можна регулювати швидкість електропривода із синхронним двигуном?

13 Чому електропривод із двигуном постійного струму забезпечує найкращі можливості для регулювання швидкості?

14 Що таке реверс електропривода? Як його здійснюють?

Розділ 5

ЕЛЕКТРОПРИВОД РОБОЧИХ МАШИН ДЛЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ РІДИН І ГАЗІВ

До цієї групи робочих машин належать насоси, вентилятори, компресори, димососи, кондиціонери, холодильні установки тощо. Кожний вид робочих машин цієї групи має свої особливості, але вони мають також багато спільного, що дозволяє розглядати роботу їх електропривода комплексно.

5.1 Особливості роботи робочих машин для переміщення рідин і газів

Робочим машинам цієї групи притаманний *режим тривалого навантаження (SI)* із нечастими пусками. Реверс для них зазвичай не застосовують. Залежно від призначення, потужності й характеру технологічного процесу, у якому використовують рідину чи газ, до електропривода цієї групи робочих машин іноді висовують вимоги щодо необхідності регулювання швидкості. Зазвичай діапазон регулювання швидкості незначний і зумовлений підтриманням стабільного тиску газу, напору рідини, продуктивності тощо.

У цьому розділі розглянемо особливості роботи електропривода робочих машин двох типів – відцентрового та поршневого.

Для електропривода робочих машин *відцентрового типу* характерною особливістю є полегшені умови пуску, що зумовлені такими факторами:

- пусковий момент опору $M_{с.п}$ робочої машини порівняно малий і становить $M_{с.п} = (0,2 - 0,3)M_{ном}$ (рис. 5.1);

– вони мають нелінійно-зростаючу (вентиляторну) механічну характеристику, що на час пуску добре узгоджується з механічною характеристикою асинхронних та синхронних (у разі асинхронного пуску) двигунів. Тому згідно з формулою (1.10) та рисунком 5.1 запуск такого електропривода відбувається майже при постійному динамічному моменті ($M_{дин}$).

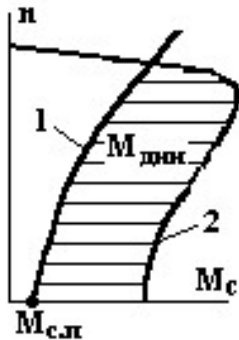


Рисунок 5.1 – До пояснення питання узгодження механічних характеристик: 1– робочої машини; 2 – електродвигуна

Номінальна швидкість таких робочих машин добре узгоджується з номінальною швидкістю електродвигуна, а тому електропривод здебільшого не має передавального пристрою, що значно спрощує та здешевлює його.

Тому в таких електроприводах *малої та середньої потужності* (до 100 кВт) використовують прості, надійні й дешеві *асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором напругою 220/380 або 380/660 В*.

В електроприводах *великих потужностей* більш доцільним є використання *синхронних двигунів або асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором напругою 6 або 10 кВ*. В електроприводах, де потрібно регулювати швидкість у широкому діапазоні (наприклад, вентилятори й димососи котельних), використовують асинхронні двигуни з фазним ротором.

Для електропривода робочих машин цієї групи *поршневого типу* характерною особливістю є те, що миттєва потужність залежить від кута повороту вала ψ й має пульсуючий характер (рис. 5.2). Для зменшення пульсацій до складу електропривода вводять маховик, що завдяки своїм інерційним властивостям суттєво згладжує пульсації. За таких умов механічну характеристику робочої машини з деяким наближенням можна вважати незалежною від швидкості.

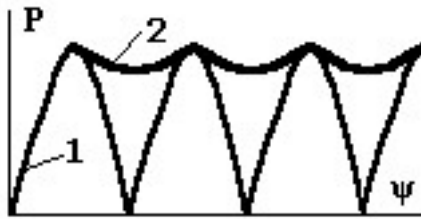


Рисунок 5.2 – Графіки зміни навантаження двохдодових робочих машин поршневого типу за відсутності (1) та наявності (2) маховика

Умови пуску таких електроприводів значно гірші, ніж у розглянутих вище електроприводах, оскільки механічна характеристика 1 робочої машини погано узгоджується з механічними характеристиками 2 електродвигуна будь-якого виду й динамічна складова моментів ($M_{дин}$) за час пуску істотно змінюється (рис. 5.3).

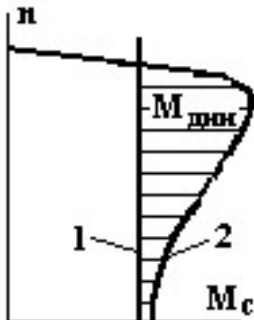


Рисунок 5.3 – До пояснення умов пуску робочих машин поршневого типу

Зазвичай у таких електроприводах малої та середньої потужності використовують *асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором із підвищеним пусковим моментом напругою 220/380 або 380/660 В.*

В електроприводах *великих потужностей* використовують *синхронні двигуни* або ж *асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором напругою 6 або 10 кВ.*

В електроприводах із порівняно великим діапазоном регулювання швидкості знайшли використання асинхронні двигуни з фазним ротором. Ці самі види двигунів використовують також в електроприводах деяких робочих машин (димососи, гребні гвинти, шахтні вентилятори тощо), сумарний момент інерції яких значно перевищує момент інерції двигуна, а час пуску є досить тривалим. Використання асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором або синхронних двигунів у таких випадках неможливе або недоцільне, оскільки супроводжується значними втратами в обмотках статора й потребує вибору електродвигуна більшої потужності, ніж це необхідно за умови довготривалої роботи в сталому режимі.

Оскільки ця група робочих машин *поршневого типу* має малі номінальні значення швидкостей, то зазвичай до складу електропривода входить передавальний пристрій у вигляді редуктора або клинопасової передачі. Промисловість випускає тихохідні синхронні двигуни на номінальні швидкості 250, 214 та 187 об/хв, що дозволяють виключити зі складу електропривода передавальний пристрій.

На цей час випускають широкий асортимент спеціальних електродвигунів, призначених для роботи в складі електропривода робочих машин для переміщення рідин і газів. Прикладом є електродвигуни таких серій:

АВШ – асинхронні двигуни, призначені для роботи в складі електропривода шахтних, підвісних, прохідницьких насосів;

СДН і СДНЗ – синхронні двигуни, призначені для роботи в складі електропривода насосів, вентиляторів і димососів;

СДК, СДКП, СДКМ – синхронні двигуни, призначені для роботи в складі електропривода компресорів;

ВДС – синхронні двигуни, призначені для роботи в складі електропривода насосних агрегатів потужних зрошувальних систем і магістральних каналів.

5.2 Спеціальні електричні апарати

5.2.1 Спеціальні електричні апарати для автоматичного керування роботою компресорів

Крім електричних апаратів загального призначення, розглянутих у розділі 2, в електричних схемах автоматичного керування роботою компресорів також використовують спеціальні електричні апарати. Забезпечення нормальної роботи компресорів потребує контролю багатьох параметрів, але найважливішими серед них є *тиск* і *температура газу*.

Підтримання постійних значень *тиску* газу в системі є однією з головних вимог, що пред'являють до систем автоматичного контролю роботи компресорів. Але споживання стиснутого газу на промислових підприємствах змінюється, а графік його зміни прогнозувати дуже важко. Він залежить як від величини

споживання стиснутого газу, так і від продуктивності компресора. Коли споживання стиснутого газу дорівнює продуктивності компресора, тоді тиск у системі залишається незмінним. Але на практиці такий стан роботи буває дуже рідко.

Зазвичай тиск газу в системі змінюється постійно: коли споживання газу збільшується, тиск знижується й навпаки. Тому в системі автоматичного контролю тиску використовують спеціальні електричні апарати, що відстежують цей параметр і забезпечують автоматичне підтримання його зміни в допустимому діапазоні.

Регулювання продуктивності компресорів здійснюють різними способами: автоматичним відкриванням чи закриванням клапанів усмоктування газу, періодичним вмиканням чи вимиканням допоміжних компресорів, зміною швидкості електродвигуна тощо. Для цього використовують спеціальні електричні апарати: поршневі та сильфонні реле тиску, електроконтактні манометри, реле потоку тощо.

Електроконтактний манометр (рис. 5.4) у своєму складі має трубчасту одновиткову пружину 1, що з одного кінця закрита, а іншим з'єднана із системою, тиск газу в якій потрібно контролювати.

Тиск газу всередині пружини та її пружна деформація знаходяться в лінійній залежності: зі збільшенням тиску закритий кінець пружини переміщується в сторону збільшення діаметра. Це переміщення з допомогою тяги 6 та зубчастого механізму 5 передається на рухомий контакт 3. Коли тиск у системі понизиться до деякого мінімального значення P_{\min} , то відбувається замикання рухомого контакту 3 з нерухомим 2. При цьому замикається електричне коло, та з'являється електричний сигнал $U_{\text{вм}}$, що може забезпечити автоматичне вмикання допоміжного компресора,

відкриття клапанів усмоктування газу, збільшення швидкості електродвигуна чи іншу операцію, що дозволить збільшити тиск у мережі.

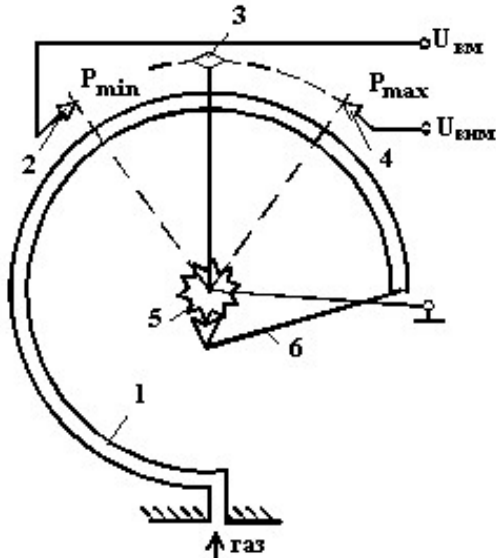


Рисунок 5.4 –
Функціональна
схема контактного
манометра

У разі збільшення тиску до деякого граничного значення P_{\max} відбувається замикання рухомого контакту 3 з нерухомим 4 й замикання електричного кола для створення сигналу $U_{\text{вим}}$, що забезпечить операцію для припинення зростання тиску в мережі.

Конструкція контактних манометрів дозволяє змінювати фіксоване положення нерухомих контактів 2 і 4, і тим самим змінювати як граничні значення мінімального й максимального тиску, так і діапазон допустимого коливання тиску в системі.

Прикладом таких апаратів є електроконтактний манометр типу МТ-4С (рис. 5.5), розрахований для роботи як у колах керування змінного струму напругою 220 або 380 В, так і колах керування постійного струму

напругою 220 В. Комутаційна спроможність електричних контактів – до 1 А, а потужність – до 30 ВА.



Рисунок 5.5 –
Електроконтактний манометр
типу МТ-4С

Підтримання *температури газу* в допустимих межах є також обов'язковою вимогою, особливо для компресорів на високі тиски. Це пов'язано з тим, що під час стискання газу виділяється тепло, яке потрібно локалізувати ще до подання його в мережу стиснутого газу.

Зазвичай використовують примусове охолодження газу водою, що пропускають через охолоджувальні сорочки робочих циліндрів компресора й проміжні холодильники, де нагрітий газ проходить через складну систему охолоджувальних трубок, по яких циркулює вода. Навіть короточасне припинення охолодження газу недопустиме, а тому до апаратів контролю пред'являють високі вимоги стосовно безперервності й надійності роботи.

У системах автоматичного контролю та захисту температури газу в компресорах використовують *реле потоку* (рис. 5.6). Робота таких реле полягає в наступному. У разі надходження води в трубопровід 5 із достатнім тиском завдяки наявності діафрагми 4 перепад тиску в камерах циліндричних мембранних сильфонів 7 і 2 буде

достатнім, щоб рухомі контакти 8 контактної групи 1 перемістилися вправо й замкнули електричне коло для створення сигналу $U_{\text{ВМ}}$, що дозволяє вмикання й подальшу роботу компресора.

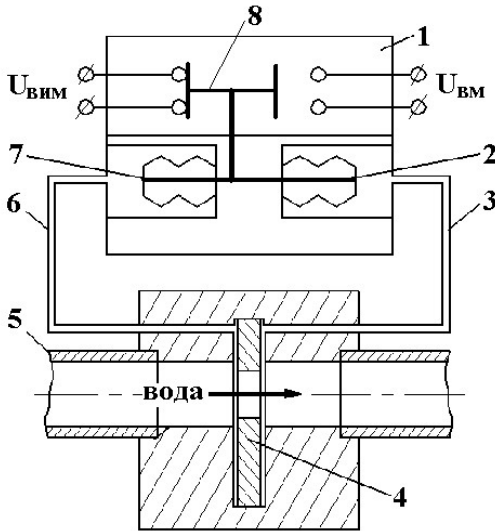


Рисунок 5.6 –
Функціональна
схема реле потоку:
1 – контактна група,
2, 7 – циліндричні
мембранні сильфони,
3, 6 – з’єднувальні
трубки,
4 – діафрагма,
5 – трубопровід,
8 – рухомі
електричні контакти

У разі припинення подавання води в трубопровід 5 системи охолодження або зменшення її тиску знижується й перепад тиску в камерах сильфонів 7 і 2. Водночас рухомі контакти 8 під дією пружних сил сильфонів переміщуються вліво. Відбувається розмикання електричного кола, що подає сигнал $U_{\text{ВМ}}$, та замикання електричного кола, що створює сигнал $U_{\text{ВММ}}$, що унеможлиблює подальшу роботу компресора до появи води в системі охолодження.

Прикладом таких апаратів є реле потоку типу Honeywell (рис. 5.7), призначене для контролю за наявністю потоку рідини (води, оливи, охолоджувальної або змащувальної рідини тощо). Електричні контакти

таких апаратів розраховані на силу струму до 15 А та напругу від 24 до 220 В змінного й постійного струму.



Рисунок 5.7 – Реле потоку типу Honeywell

5.2.2 Спеціальні електричні апарати для автоматичного керування роботою насосів

До основних параметрів, що підлягають контролю й регулюванню в системах транспортування рідин, належать рівень рідини в резервуарі, наявність потоку (струменя) рідини в трубопроводі, тиск рідини на різних ділянках магістралі. Для контролю та автоматичного регулювання цих параметрів використовують спеціальні апарати до яких можна віднести: реле тиску, потоку, рівня рідини, електродний датчик рівня рідини тощо.

Реле тиску використовують у насосних установках для контролю величини тиску рідини як на виході з насоса, так і в розгалужених мережах на певних ділянках магістралі. Прикладом такого апарата є реле тиску

вітчизняного виробника типу Aquatica (рис. 5.8), призначене для використання в автоматизованих системах водопостачання, поливальних установках, пристроях пожежогасіння тощо.

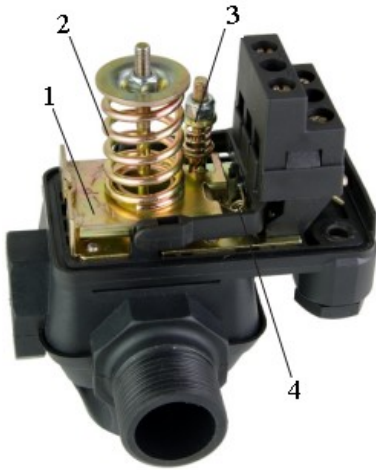


Рисунок 5.8 – Реле тиску типу Aquatica: 1 – платформа, 2 – велика пружина, 3 – мала пружина, 4 – шарнір із пружиною

Принцип дії такого реле полягає в тому, що залежно від величини тиску води, яка проходить скрізь реле, платформа 1 піднімається або опускається й діє на поршень. Велика пружина 2 створює зусилля протидії переміщенню платформи. Мала пружина 3 створює також зусилля протидії переміщенню платформи й дозволяє змінювати граничні значення тиску, за яких відбувається замикання / розмикання електричних контактів. Причому менша пружина діє на платформу не відразу, а лише після того, як відбудеться необхідне стискання великої пружини. Шарнір із пружиною 4 забезпечує різке й скачкоподібне спрацювання електричної частини реле. За певного максимального значення тиску, коли платформа досягне граничного верхнього рівня, відбувається розмикання електричних контактів і вимкнення електродвигуна. За певного мінімального значення тиску, коли платформа досягне граничного нижнього рівня, відбувається

замикання електричних контактів і вмикання електродвигуна.

Схема підключення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором із використанням реле тиску типу Aquatica, що працює в складі електропривода насоса, наведена на рисунку 5.9.

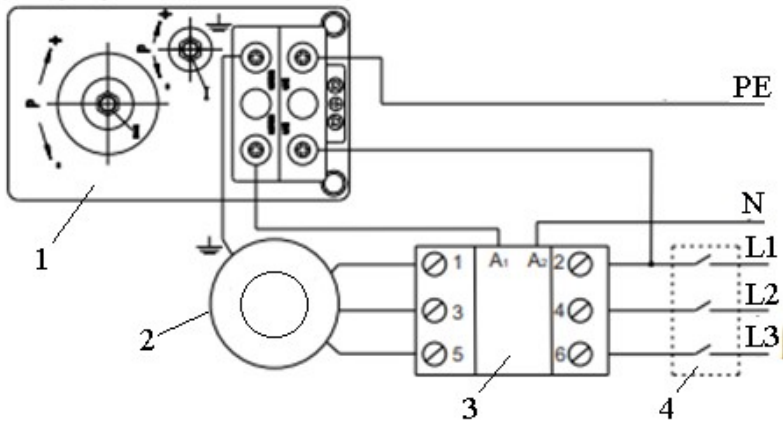


Рисунок 5.9 – Схема підключення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором з використанням реле тиску типу Aquatica:
1 – реле тиску, 2 – двигун асинхронний, 3 – пускач магнітний, 4 – вимикач автоматичний

Реле потоку використовують для контролю наявності потоку (струменя) рідини в трубопроводі або відповідності величини тиску рідини умові $P \geq P_{\min}$. На практиці використовують різні конструкції реле потоку, одна з яких описана в пункті 5.2.1. та наведена на рисунку 5.7.

В електроприводі насосів використовують різні конструктивні виконання *реле рівня рідини*, прикладами яких є поплавкові та електродні.

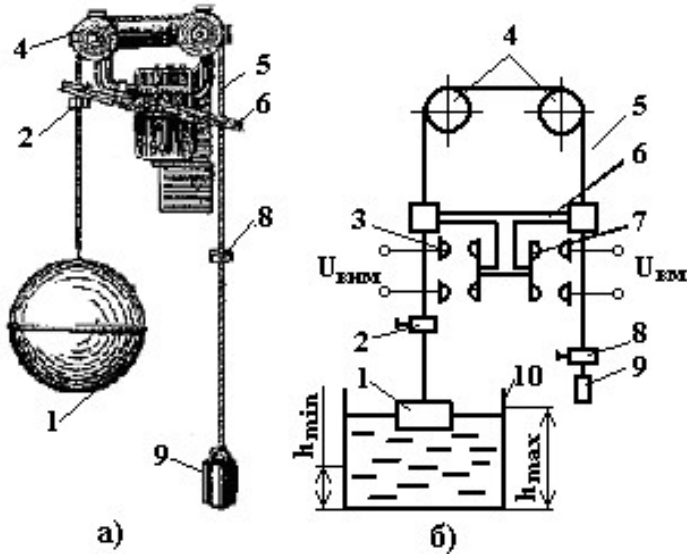


Рисунок 5.10 – Поплавкове реле рівня рідини:
а) – складові частини, б) – функціональна схема

Поплавкове реле рівня рідини (рис. 5.10) використовують для контролю рівня (h) рідини в резервуарі й автоматичного підтримання його в інтервалі $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$. Поплавок 1 знаходиться або безпосередньо в резервуарі 10, рівень рідини в якому необхідно підтримувати, або в допоміжному баці, з'єднаному з резервуаром. Через барабани 4 перекинтий трос 5, до одного кінця якого прикріплений поплавок 1, а до іншого – грузило 9. На тросі закріплені упори 2 і 8. Положення упору 2 визначає максимальний (h_{\max}), а упору 8 – мінімальний (h_{\min}) рівні води в резервуарі. Трос 5 проходить через отвори в коромислі 6. Коли рівень рідини досягає значення $h = h_{\min}$ упор 8 повертає коромисло 6 так, що замикаються електричні контакти 7, що зумовлює появу електричного сигналу на вмикання насоса ($U_{\text{вм}}$). Відбувається наповнення резервуара рідиною доти, поки

рівень рідини не досягне значення $h = h_{\max}$. У цьому випадку упор 2 повертає коромисло 6 так, що розмикаються електричні контакти 3, що зумовлює появу електричного сигналу $U_{\text{вим}}$ на вимикання насоса.

Електродне реле рівня рідини (рис. 5.11) використовують для контролю й автоматичного підтримання рівня електропровідної рідини в резервуарі.

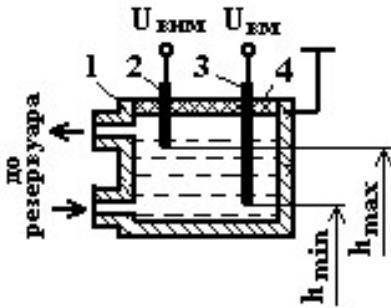


Рисунок 5.11 –
Функціональна схема
роботи електродного
датчика рівня рідини

Корпус 1 реле з'єднують трубопроводами з резервуаром, у якому знаходиться рідина. Електродні контакти 2 і 3, закріплюють на ізоляційній основі 4. За досягнення рідиною максимального рівня h_{\max} електропровідна рідина контактує з електродним контактом 2 і з'являється електричний сигнал $U_{\text{вим}}$ на вимикання електродвигуна. Поповнення води в резервуарі насосом припиняється. За досягнення мінімального рівня h_{\min} електродний контакт 3 знаходиться вище від рівня рідини в резервуарі. При цьому з'являється електричний сигнал $U_{\text{вм}}$ на вмикання електродвигуна, що приводить у рух насос, і поповнення води в резервуарі розпочинається.

Прикладом таких апаратів є датчики-реле рівня рідини типу РОС-301 (рис. 5.12), призначені для контролю до трьох рівнів електропровідних рідин і мають такі технічні характеристики:

– вихідний сигнал: струм від 0,005 до 8 А, напруга від 5 до 250 В, частота 50 Гц;

- напруга живлення: 220 В;
- потужність споживання: не більше ніж 12 ВА;
- напруга на електродах: не більше ніж 6 В змінного струму.



Рисунок 5.12 – Реле рівня рідини типу РОС-301

5.3 Електричні схеми керування роботою робочих машин для переміщення рідин і газів

5.3.1 Принципова електрична схема керування роботою насоса з використанням поплавкового реле рівня рідини

Принципова електрична схема керування роботою насоса з використанням поплавкового реле рівня рідини наведена на рисунку 5.13. Опис схеми буде здійснено в послідовності, описаній у пункті 1.3.

1 Характеристика джерела живлення.

Джерелом живлення є трифазна чотирипровідна мережа змінного синусоїдального струму (А В С 0).

2 Характеристика силових приймачів електричної енергії.

Силовим приймачем електричної енергії є трифазний асинхронний двигун М із короткозамкненим ротором, що приводить у рух насос.

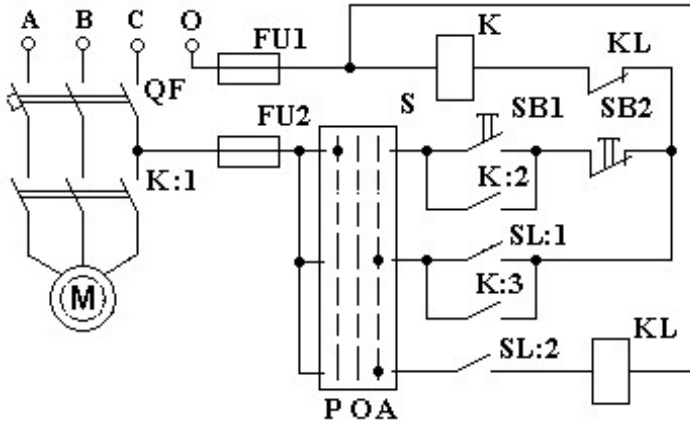


Рисунок 5.13 – Принципова електрична схема керування роботою насоса з використанням поплавкового реле рівня рідини

3 Перелік і призначення електричних апаратів і вимірювальних приладів.

Перелік і призначення електричних апаратів представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Перелік і призначення електричних апаратів

Позначення	Найменування	Призначення
FU1, FU2	Запобіжники	Захист кіл керування від струмів к.з.
K	Контактор	Комутація силових кіл і кіл керування
KL	Реле проміжне	Комутація кіл керування
QF	Вимикач автоматичний	Вмикання / вимикання в нормальному режимі й захист від надструмів
S	Перемикач пакетний	Вибір способу керування
SB1, SB2	Кнопки керування	Функції «Пуск», «Стоп» у нормальному режимі
SL	Реле поплавкове	Контроль рівня рідини в резервуарі

4 Робота схеми на час пуску.

Підключення як силової частини схеми, так і схеми керування до джерела живлення здійснюють за допомогою вимикача автоматичного QF.

За допомогою перемикача пакетного S можливий вибір ручного або автоматичного режиму керування роботою насоса.

За *ручного керування* (перемикач S у положенні «P») пуск здійснюють натисканням кнопки керування SB1, а за *автоматичного керування* (перемикач S у положенні «A») пуск відбувається під час замикання контакту поплавкового реле SL:1 (на рис. 5.10 контакт 7), що відбувається, коли рівень води в резервуарі досягне значення $h = h_{\min}$.

В обох випадках спрацьовує контактор K. Замикання силових контактів K:1 забезпечує прямий пуск двигуна M, а допоміжних контактів K:2 та K:3 – відповідно блокування SB1 та SL:1.

5 Робота схеми в сталому режимі.

Двигун M працює під навантаженням, зумовленим насосом, що забезпечує поповнення рідини в резервуарі. Ротор електродвигуна M обертається зі швидкістю, величина якої залежить від величини навантаження, зумовленого насосом.

6. Робота схеми за робочого відключення.

За *ручного керування* відключення здійснюють натисканням кнопки керування SB2, а за *автоматичного керування* – внаслідок замикання контакту реле поплавкового SL:2 (на рис. 5.10 контакт 3), що відбувається коли рівень води в резервуарі досягне значення $h = h_{\max}$. Після цього спрацьовує реле проміжне KL – розмикається його контакт KL у колі живлення котушки контактора K.

В обох випадках відключається контактор K. Розмикання його силових контактів K:1 забезпечує

гальмування на вибіг двигуна М, а розмикання допоміжних контактів К:2 та К:3 – відповідно розблокування SB1 і SL:1.

7 Робота схеми за аварійного відключення.

У разі виникнення *короткого замикання в електричних колах керування* відбувається перегорання вставки плавкої запобіжників FU та відключення контактора К і двигуна М від мережі живлення.

У разі виникнення *короткого замикання або тривалого перевантаження в силових колах* спрацьовує електромагнітний або тепловий розчіплювач вимикача автоматичного QF. Він вимикається, і вся схема відключається від джерела живлення.

ПРИКЛАД

Вибрати контактор згідно з електричною схемою керування роботою насоса з використанням поплавкового реле рівня рідини (рис. 5.13). Вихідні параметри для розрахунків (мережі живлення: U_n – номінальна напруга, двигун: P_n – номінальна потужність, K_i – коефіцієнт пуску, η – ККД, $\cos\phi$ – коефіцієнт потужності) вказані в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Вихідні параметри для розрахунку

U_n , В	P_n , кВт	K_i	η , %	$\cos\phi$
660	10	7,5	87,5	0,88

РОЗВ'ЯЗАННЯ

1 Згідно з електричною схемою та вихідними параметрами напруга, що подається на обмотки статора електродвигуна, має значення $U_{ед} = 660$ В.

Висновок: вибираємо магнітний пускач із $U_{н.пус} = 660$ В.

2 Визначаємо номінальний струм в обмотках статора електродвигуна:

$$I_{н.ед} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{10}{1,73 \cdot 0,66 \cdot 0,875 \cdot 0,88} = 11,3 \text{ А.}$$

Висновок: Вибираємо контактор за умови: $I_{н.кон} \geq I_{н.ед}$.

3 Визначаємо пусковий струм двигуна:

$$I_{пус.ед} = I_{н.ед} K_i = 11,3 \cdot 7,5 = 84,75 \text{ А.}$$

Висновок: вибираємо контактор за умови:

$$I_{\max.кон} \geq I_{пус.ед}.$$

4 Згідно з електричною схемою контактор повинен бути триполюсним (мати 3з силових контакти), а також мати два допоміжних замикаючих контакти (2з).

5 Ураховуючи вищезазначене згідно з таблицею 2.1 вибираємо контактор типу КМ103-012А з номінальними параметрами:

$$U_{н.кон} = 660 \text{ В}, \quad I_{н.кон} = 12 \text{ А} > I_{н.ед} = 11,3 \text{ А}, \\ I_{\max.кон} = 120 \text{ А} > I_{пус.ед} = 84,75 \text{ А}, \quad N_{пол} = 3, 1р + 1з.$$

Оскільки такий контактор має лише один замикаючий допоміжний контакт (1з), то необхідно буде використати ще приставку з одним замикаючим допоміжним контактом.

5.3.2 Принципова електрична схема керування роботою насоса з використанням електродного реле рівня рідини

Джерелом живлення для силової частини схеми є мережа постійного струму напругою 110 В, а для схеми керування – однофазна мережа змінного синусоїдального

струму напругою 220 В (рис. 5.14).

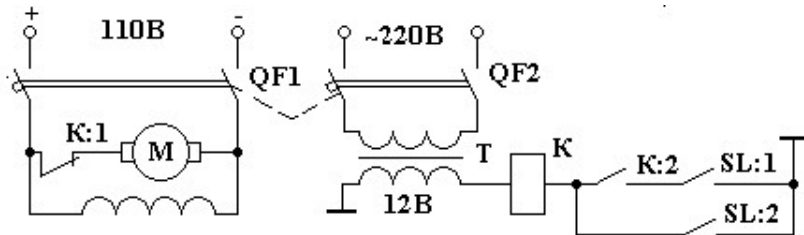


Рисунок 5.14 – Принципова електрична схема керування роботою насоса з використанням електродного реле рівня рідини

Силовим приймачем електричної енергії є двигун постійного струму з паралельним збудженням М, що приводить у рух насос.

Перелік і призначення електричних апаратів, що забезпечують керування роботою насоса, наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. – Перелік і призначення електричних апаратів

Позначення	Найменування	Призначення
К	Контактор	Комутація силових кіл і кіл керування
QF1, QF2	Вимикачі автоматичні	Вмикання / вимикання схеми в нормальному режимі та захист від струмів к. з. і тривалих перевантажень
SL	Електродний датчик рівня рідини	Контроль рівня рідини в резервуарі
Т	Трансформатор	Пониження напруги з 220 В до 12 В

Робота на час пуску. Схема забезпечує лише автоматичне керування роботою насоса.

Спочатку з допомогою автоматичного вимикача QF2 підключають схему керування до однофазної мережі змінного струму напругою 220 В. Потім із допомогою

автоматичного вимикача QF1 підключають силову частину схеми до мережі постійного струму з напругою 110 В.

Якщо рівень рідини в резервуарі має значення $h_{\min} < h < h_{\max}$, то контактор К знаходиться у відключеному положенні, а його головний контакт К:1 замкнений. Відбувається прямий пуск двигуна М.

Робота в сталому режимі. Двигун М працює під навантаженням, зумовленим насосом, що забезпечує поповнення рідини в резервуарі. Якір електродвигуна М обертається зі швидкістю, величина якої залежить від величини навантаження, зумовленого насосом.

Робота за робочого відключення. Коли рівень рідини досягає значення $h = h_{\max}$, замикається контакт SL:2 електродного реле рівня рідини (позиція 2 на рис. 5.11). При цьому спрацьовує контактор К. Розмикання його головного контакту К:1 зумовлює припинення подання напруги на двигун постійного струму М і його гальмування на вибіг. Насос припиняє постачання рідини в резервуар.

При цьому замикається також допоміжний контакт К:2 контактора, що забезпечує утримання контактора в увімкненому положенні до досягнення рівнем рідини значення $h = h_{\min}$.

Повторне вмикання електродвигуна відбувається автоматично. У міру зменшення рідини в резервуарі на момент, коли рівень рідини досягне значення $h = h_{\min}$, розмикається контакт SL:1 електродного реле рівня рідини (позиція 3 на рис. 5.11). При цьому контактор К вимикається, замикається його головний контакт К:1, що зумовлює подачу напруги на двигун постійного струму М, його пуск і подальшу роботу. Насос знову поповнює рідиною резервуар.

Робота схеми за аварійного відключення. У разі виникнення короткого замикання або довготривалого перевантаження в електричних колах керування

спрацьовує електромагнітний чи тепловий розчіплювач автоматичного вимикача QF2, і він вимикається. Аналогічно відбувається захист силових кіл у разі виникнення короткого замикання чи перевантаження, але з допомогою автоматичного вимикача QF1.

Автоматичні вимикачі QF1 та QF2 мають механічне блокування: під час вимикання одного вимикається також другий.

5.3.3 Принципова електрична схема керування роботою компресорної установки з використанням електроконтактних манометрів

У компресорних установках малої продуктивності зі змінним графіком споживання стисненого газу дуже часто використовують два компресори, підключені на паралельну роботу. Технологічна схема роботи таких компресорів (рис. 5.15) забезпечує більш ефективне й економічне їх використання. Два компресори K1 та K2 приводяться в рух окремо від електродвигунів M1 та M2.

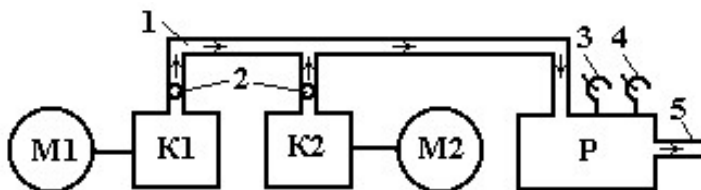


Рисунок 5.15 – Технологічна схема роботи двох компресорів

Стиснений газ по трубопроводу 1 передається спочатку до ресивера Р, що згладжує пульсації тиску газу від компресорів і підтримує його постійним у магістралі 5, по якій газ подають до споживачів.

На виході кожного з компресорів установлені зворотні клапани 2, що унеможливають роботу одного компресора на інший у разі різниці миттєвих тисків газів, що створює кожний із них.

На ресивері встановлені два електроконтактні манометри 3 та 4, що вимірюють тиск газу в ресивері й дозволяють автоматизувати роботу компресорної установки з підтримання тиску газу в магістралі в певному діапазоні.

Зазвичай обидва манометри мають однакову верхню межу тиску ($P_{\max 1} = P_{\max 2}$), за якого замикаються електричні контакти для створення електричного сигналу $U_{\text{вим}}$ для вимкнення обох компресорів.

Нижні межі тиску, за яких замикаються електричні контакти для створення електричного сигналу $U_{\text{вм}}$ для вмикання компресорів, різні (зазвичай $P_{\min 1} > P_{\min 2}$). Тому під час пониження тиску в мережі до $P_{\min 1}$ спочатку вмикається перший компресор, а якщо тиск і далі падає, то до роботи залучається й другий компресор.

Принципова електрична схема (рис. 5.16) забезпечує як *ручне*, так і *автоматичне керування* роботою двох компресорів.

Джерелом живлення для силових електричних кіл є трифазна трипровідна, а для електричних кіл керування – однофазна мережа змінного струму.

Силовими приймачами електричної енергії є два асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором: М1 і М2, що приводять в рух компресори.

Перелік електричних апаратів і їх призначення наведено в таблиці 5.4.

Робота на час пуску. Підключення силових електричних кіл двигунів М1 та М2 до джерела живлення здійснюють за допомогою автоматичних вимикачів QF1 та QF2. Електричні кола керування підключають до джерела живлення з допомогою автоматичного вимикача QF3.

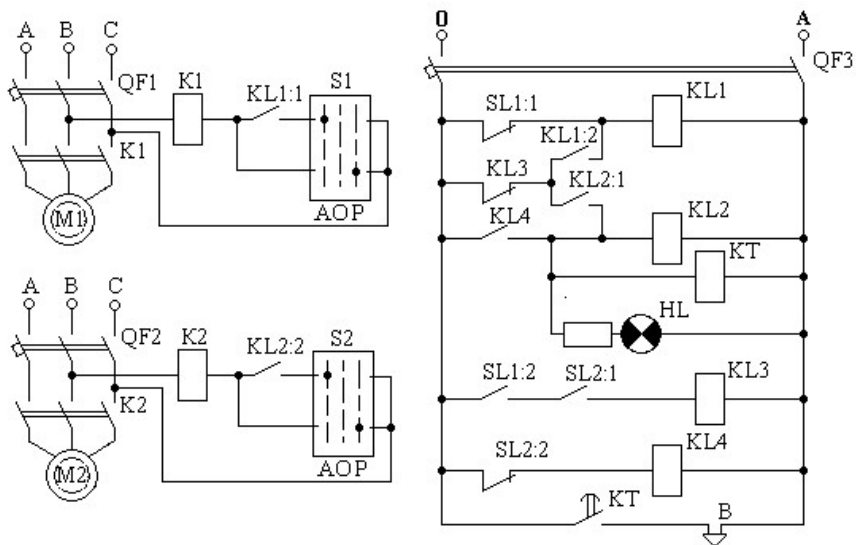


Рисунок 5.16 – Принципова електрична схема керування компресорною установкою

Таблиця 5.4 – Перелік і призначення електричних апаратів

Позначення	Найменування	Призначення
B	Сирена	Звукова сигналізація
HL	Лампа сигнальна	Світлова сигналізація
K1, K2	Контактори	Комутація силових кіл
KL1 – KL4	Реле проміжні	Комутація кіл керування
KT	Реле часу	Забезпечення затримки в часі
QF1, QF2	Вимикачі автоматичні	Вмикання / вимикання силових кіл у нормальному режимі та захист від струмів к. з. і тривалих перевантажень
QF3	Вимикач автоматичний	Вмикання / вимикання кіл керування в нормальному режимі та захист від струмів к. з. і тривалих перевантажень
S1, S2	Перемикачі	Вибір режиму керування
SL1, SL2	Манометри електроконтактні	Контроль тиску газу й комутація кіл керування

Схема забезпечує як *ручне*, так і *автоматичне керування* роботою компресорів на час пуску.

За *ручного керування* перемикачі S1 та S2 встановлюють у положення «Р». При цьому спрацьовують контактори K1 та K2, відбувається прямий пуск двигунів M1 та M2, і розпочинають працювати обидва компресори. Потрібно підкреслити, що таке керування здійснюють зазвичай лише на стадії випробування роботи компресорної установки.

За *автоматичного керування* перемикачі S1 та S2 встановлюють у положення «А». Якщо тиск газу в ресивері менше від першої нижньої межі тиску $P_{\min 1}$, то замикається контакт електроконтактного манометра SL1:1. Спрацьовує проміжне реле KL1. Його контакт KL1:1 забезпечує вмикання контактора K1 і, відповідно, двигуна M1, а контакт KL1:2 разом із контактом KL3 забезпечують створення замкненого електричного кола живлення котушки реле проміжного KL1, навіть коли тиск у ресивері буде більшим $P_{\min 1}$.

Якщо ж тиск газу в ресивері продовжуватиме знижуватися, то при досягненні другої нижньої межі тиску $P_{\min 2}$, замикається контакт електроконтактного манометра SL2:2. Спрацьовує проміжне реле KL4, контакт KL4 якого забезпечує вмикання реле проміжного KL2. Контакт KL2:2 замикає електричне коло живлення котушки контактора K2, і він вмикається. Замикаються контакти K2, і відбувається прямий пуск двигуна M2. Контакт KL2:1 разом із контактом KL3 забезпечують замкнене електричне коло живлення котушки реле проміжного KL2, навіть коли тиск у ресивері перевищує значення $P_{\min 2}$.

Робота в сталому режимі. У цьому режимі працює один двигуна M1 або також і двигун M2, нагнітаючи газ у ресивер та магістраль до того часу, коли тиск газу не досягне значення верхньої межі тиску P_{\max} .

Робота схеми за робочого відключення. У ручному режимі роботи відключення двигунів М1 та М2 відбувається переключенням перемикачів S1 та S2 в положення «О». Контактори К1 та К2 вимикаються, і відбувається гальмування на вибіг двигунів М1 та М2.

В автоматичному режимі роботи відключення відбувається в момент досягнення в ресивері верхньої межі тиску P_{\max} . При цьому замикаються контакти електроконтактних манометрів SL1:2 і SL2:1 (за умови, що обидва манометри мають однакову верхню межу тиску $P_{\max1} = P_{\max2}$). Спрацьовує проміжне реле KL3, розмикаючий контакт KL3 якого забезпечує вимикання реле проміжних KL1 і KL2. Відбувається відключення контакторів К1 і К2 і гальмування на вибіг двигунів М1 і М2.

У вимкненому положенні обидва компресори знаходяться доти, поки тиск газу не досягне нижньої межі $P_{\min1}$.

Робота схеми за аварійного відключення. Захист силових кіл від короткого замикання або тривалого перевантаження виконують вимикачі автоматичні QF1 та QF2, а електричних кіл керування – вимикач автоматичний QF3.

Після того, як тиск газу досягне другої нижньої межі $P_{\min2}$, замкнеться контакт SL2:2 електроконтактного манометра, що забезпечує створення замкненого кола живлення котушки реле проміжного KL4. Контакт реле проміжного KL4 замикається, загорасться сигнальна червона лампа HL і напруга подається на котушку реле часу КТ. Якщо тиск газу при роботі двох компресорів падатиме чи навіть не підвищуватиметься, то весь цей час буде замкненим контакт SL2:2 електроконтактного манометра, реле проміжне KL4 буде ввімкнене, й із затримкою в часі замкнеться контакт КТ реле часу. Вмикається звукова сирена В. За таких умов оператор

повинен вжити заходів для ручного вимкнення компресорної установки та усунення причин, що зумовили таке значне й довготривале пониження тиску газу.

5.3.4 Принципова електрична схема керування роботою холодильної установки

Технологічна схема холодильної установки, що працює на хладоні, зображена на рисунку 5.17. У цій установці електродвигун М1 приводить у дію компресор К, що забезпечує переміщення хладону по замкненому трубопроводу, а двигун М2 – вентилятор В, що забезпечує примусове охолодження хладону, що знаходиться в конденсаторі Р.

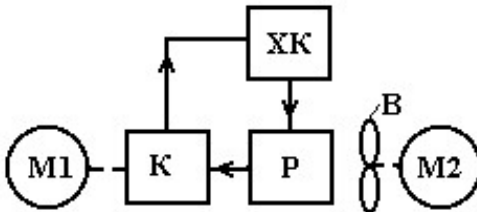


Рисунок 5.17 –
Технологічна схема роботи холодильної установки

Принципова електрична схема (рис. 5.18) забезпечує автоматичне керування роботою як компресора, так і вентилятора.

Джерелом живлення є трифазна чотирипровідна мережа змінного синусоїдального струму.

Силowymi приймачами електричної енергії є два асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором: М1 і М2.

Перелік електричних апаратів і їх призначення наведено в таблиці 5.5.

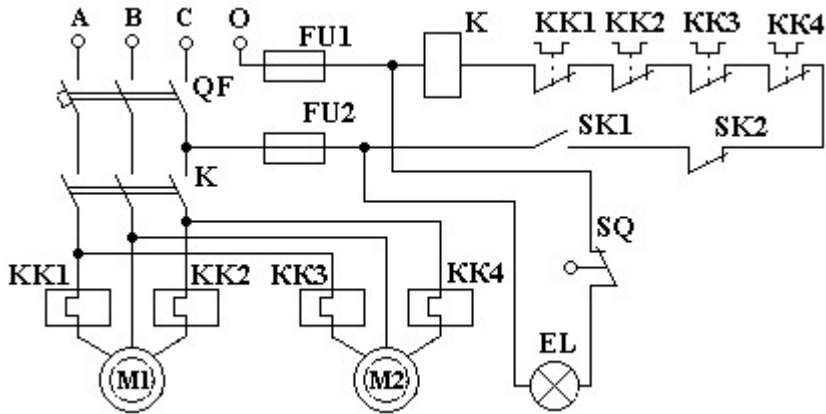


Рисунок 5.18 – Принципова електрична схема керування холодильною установкою

Таблиця 5.5. – Перелік та призначення електричних апаратів

Позначення	Найменування	Призначення
EL	Лампа освітлювальна	Освітлення всередині холодильної камери
FU1, FU2	Запобіжники	Захист від струмів к. з. у колах керування
К	Контактор	Комутація силових кіл
KK1 – KK 4	Реле теплові	Захист електродвигунів від перевантаження
QF	Вимикач автоматичний	Вмикання/вимикання електричних кіл у нормальному режимі та захист від струмів к. з.
SK1, SK2	Датчики температури	Контроль температури холодильної камери та конденсатора
SQ	Вимикач кінцевий	Вмикання освітлення всередині холодильної камери під час відкривання дверей

Робота схеми на час пуску. Підключення силових електричних кіл двигунів М1 і М2 та кіл керування до джерела живлення відбувається за допомогою вимикача автоматичного QF.

Схема забезпечує лише *автоматичне керування* роботою компресора й вентилятора.

Якщо температура всередині холодильної камери перевищує встановлене максимальне граничне значення, то контакт SK1 температурного датчика, встановленого всередині холодильної камери, буде замкненим. Це є першою умовою для вмикання компресора й вентилятора.

Другою умовою для вмикання є наявність замкненого положення контакту SK2 температурного датчика, встановленого на конденсаторі. Ця умова виконується, якщо температура хладону не перевищує 90 °С. У разі виконання цих двох умов спрацьовує контактор К, й відбувається прями́й пуск двигунів М1 та М2.

Робота в усталеному режимі. У цьому режимі працюють обидва двигуни М1 і М2, приводячи в дію відповідно компресор і вентилятор. Компресор забезпечує зниження температури в холодильній камері, а вентилятор – примусове охолодження хладону в конденсаторі. Цей режим триватиме доти, доки температура в холодильній камері не досягне значення встановленого мінімального граничного рівня.

Під час відкривання дверей холодильної камери замикається контакт SQ кінцевого вимикача, та вмикається освітлення всередині холодильної камери.

Робота схеми за робочого відключення. У разі зниження температури всередині холодильної камери до значення встановленого мінімального граничного рівня розмикається контакт SK1 температурного датчика, вимикається контактор К і відбувається гальмування на вибіг двигунів М1 та М2.

Робота схеми за аварійного відключення. Захист силових кіл від короткого замикання виконує автоматичний вимикач QF, а електричних кіл керування – запобіжники FU1 та FU2.

Якщо температура хладону в конденсаторі перевищує 90 °С, то розмикається контакт SK2 температурного датчика, контактор К вимикається, й відбувається відключення двигунів M1 та M2 від мережі живлення та гальмування на вибіг.

Контрольні запитання та завдання

1 У чому полягають особливості роботи електропривода робочих машин відцентрового типу?

2 У чому полягають особливості роботи електропривода робочих машин поршневого типу?

3 За яких умов з'являється електричний сигнал $U_{\text{вм}}$ на виході реле потоку (див. рис. 5.6)?

4 Що треба зробити, щоб збільшити допустимий верхній рівень (h_{max}) рідини в резервуарі під час його контролю за допомогою реле поплавкового (див. рис. 5.10)?

5 Чи можливий контроль рівня трансформаторного масла в резервуарі за допомогою електродного датчика рівня рідини?

6 Які правила літеро-цифрового позиційного позначення елементів на електричних схемах?

7 Яку функцію виконує в електричній схемі (див. рис. 5.13) електричний апарат з позначенням SL?

8 Які види захисту передбачені в електричній схемі рисунку 5.14?

9 Для чого в електричній схемі (див. рис. 5. 16) використовують два електроконтактні манометри?

10 Як спрацьовує електрична схема (див. рис. 5.18) у разі довготривалого перевантаження двигунів M1 та M2?

Розділ 6

ЕЛЕКТРОПРИВОД РОБОЧИХ МАШИН ІЗ ВЕЛИКИМИ ІНЕРЦІЙНИМИ МОМЕНТАМИ

До робочих машин із великими інерційними моментами належать центрифуги, мішалки, обертові печі, сепаратори, вакуум-фільтри, гранулятори, екстрактори хімічної промисловості тощо.

6.1 Особливості пуску

6.1.1 Проблеми пуску

Пуск робочих машин із великими інерційними моментами супроводжується подоланням великого початкового моменту опору, у якому, крім статичної складової, значну роль відіграє динамічна складова, що пов'язана з великими інерційними силами. Процес пуску таких робочих машин може тривати кілька хвилин і весь час супроводжуватися протіканням великих пускових струмів, що негативно впливають як на роботу електродвигуна, так і на роботу електричної мережі та джерела живлення.

Вимоги щодо умов роботи в сталому режимі більшості таких машин повністю може задовольнити нерегульований неререверсивний електропривод з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором, проте важкі умови пуску часто унеможливають використання цього простого, дешевого та надійного електродвигуна. Відбувається це з таких причин:

– більшість асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором мають відносно номінального $M_{ном}$ малі значення пускового $M_{п}$ моменту, який часто значно менший від пускового моменту опору $M_{с.п.}$:

$$M_{с.п.} \gg M_{п} < M_{ном};$$

– тривалість пуску настільки велика (у деяких робочих машин досягає кількох хвилин), що протікання пускових струмів може зумовити спрацювання системи теплового захисту або ж перегрівання обмоток електродвигуна;

– тривала робота асинхронного двигуна на ділянці нестійкої роботи механічної характеристики (від точки пускового до точки максимального моменту) супроводжується великими значеннями струмів та істотним збільшенням споживання реактивної енергії, що зумовлює зниження коефіцієнта потужності та збільшення витрат на встановлення й експлуатацію компенсувальних пристроїв.

6.1.2 Способи вирішення проблеми пуску

На практиці проблему пуску робочих машин із великими інерційними моментами вирішують різними способами з урахуванням особливостей механічних характеристик робочої машини й електродвигуна. Найбільш ефективні способи пуску таких робочих машин перелічені нижче:

1. *Використання асинхронного двигуна із фазним ротором.* Наявність асинхронного двигуна із фазним ротором у складі електропривода робочої машини з великим інерційним моментом дозволяє виконувати надійний запуск таких машин як у ручному, так і в автоматичному режимах роботи. Прикладом такого

електропривода може бути електропривод цементного млина, функціональну електричну схему якого буде розглянута в пункті 7.5.2.

Аналіз роботи схеми показує, що перевагою електропривода з асинхронним двигуном із фазним ротором є забезпечення надійного пуску робочої машини незалежно від величини її навантаження й тривалості самого процесу розгону до сталої швидкості. Але такий спосіб вирішення проблеми пуску має також і ряд недоліків, основними з яких є:

- збільшення вартості електропривода порівняно з електроприводом з асинхронним двигуном із короткозамкненими ротором;
- суттєві втрати в допоміжних реостатах, що вводять у коло обмоток ротора;
- наявність ковзного іскробезпечного контакту «щітки-кільця» на роторі, що ускладнює або унеможлиблює використання електропривода в пожежо- та вибухонебезпечних зонах.

2. *Використання обмежувальних розгінних гідродинамічних муфт.* Застосування такого способу вирішення проблеми пуску не лише суттєво зменшує проблему пуску, а й дозволяє використовувати в складі електропривода прості, надійні й дешеві асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

6.1.3 Електропривод з обмежувальною розгінною гідродинамічною муфтою

Функціональна схема електропривода робочої машини з обмежувальною розгінною гідродинамічною муфтою (далі – гідромуфта) представлена на рисунку 6.1. Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором М

з'єднують із виконавчим органом ВО робочої машини через гідромуфту ГМ.

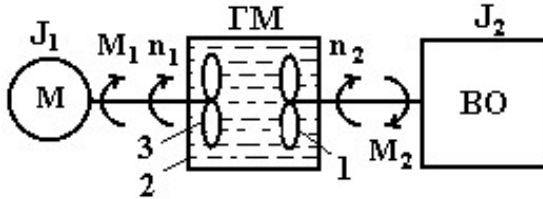


Рисунок 6.1 – Функціональна схема електропривода з гідромуфтою

Гідромуфта належить до класу машин, у яких передавання енергії здійснюється в результаті дій сил інерції та сил в'язкості. Розроблені та використовують на практиці різні типи гідромуфт, що мають певні конструктивні особливості й технічні характеристики [51]. Але, незважаючи на різноманітність конструктивних рішень, можна виділити три головні частини гідромуфт (рис. 6.1):

- насосне колесо 3, що з'єднане з валом двигуна М;
- турбінне колесо 1, що з'єднане з виконавчим органом робочої машини безпосередньо, або через передавальний пристрій;
- кожух 2, у якому знаходяться насосне та турбінне колеса.

Простір усередині кожуха між лопатками турбінного та насосного колес, що називають *робочою порожниною*, заповнюють *робочою рідиною*. Робочою рідиною може бути мінеральне масло або вода.

Сукупність деталей, механічно пов'язаних із насосним колесом називають *вхідною ланкою*, вона характеризується моментом інерції J_1 , обертовим моментом M_1 та швидкістю обертання n_1 . А сукупність

деталей, що механічно пов'язані з турбінним колесом, називають *вихідною ланкою*, яку характеризують моментом інерції J_2 , моментом опору M_2 та швидкістю обертання n_2 .

Найбільше застосування мають гідромуфти з плоскими лопатками в обох колесах, розміщені в радіальних площинах, що проходять через вісь обертання. Обертаючись, насосне колесо зумовлює переміщення робочої рідини в робочій порожнині. Енергія, що надається насосному колесу, здебільшого витрачається на надання робочій рідині прискорення, тобто кінетичної енергії. Під час попадання на турбінне колесо, робоча рідина сповільнює свій рух, віддає акумульовану кінетичну енергію турбінному колесу, приводить його в рух, створюючи на вихідній ланці обертовий момент, величину якого визначають за формулою

$$M_p = \lambda \rho \omega_1^2 D_a^5, \quad (6.1)$$

де λ – безрозмірний коефіцієнт моменту (потужності);

ρ – густина робочої рідини;

ω_1 – кутова швидкість насосного колеса;

D_a – активний діаметр гідромуфти (найбільший діаметр робочої порожнини).

Будують безрозмірну характеристику – залежність безрозмірного коефіцієнта моменту λ від передавального відношення «і» (рис. 6.2). Безрозмірна характеристика є вихідною під час аналізу роботи електропривода з гідромуфтою. За цією характеристикою зручно проводити порівняння різних конструктивних рішень гідромуфт і вибір найбільш ефективного варіанта з урахуванням механічних характеристик електродвигуна та робочої машини.

Для того щоб гідромуфта найбільш ефективно працювала в складі конкретного електропривода з

урахуванням умов навантаження, необхідно правильно вибрати її активний діаметр. Без цього гідромумфта може або перевантажувати електродвигун, або ж перевантажуватись сама.

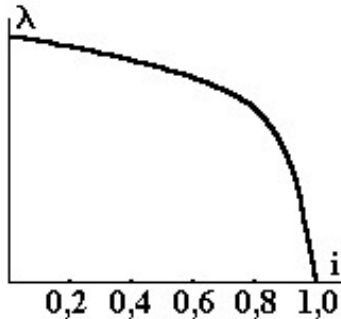


Рисунок 6.2 – Безрозмірна характеристика гідромумфти

Характерні особливості гідромумфти полягають у такому:

- їх робота пов'язана з утратами енергії;
- гідравлічний ККД гідромумфти залежно від її розмірів та величини навантаження може наближатися до одиниці.

Тому в процесі розроблення та аналізу роботи електропривода з гідромумфтою необхідно комплексно розглядати характеристики трьох основних складових частин: електродвигуна, гідромумфти й робочого механізму.

Враховуючи те, що призначення гідромумфти в складі електропривода полягає в компенсації недоліків приводного електродвигуна, гідромумфту вибирають залежно від того, яку характеристику має електродвигун і яку результуючу характеристику електродвигуна з гідромумфтою бажано одержати. Детально питання побудови результуючої характеристики з урахуванням механічної характеристики конкретного асинхронного

електродвигуна з короткозамкненим ротором, величини активного діаметра гідромуфти та її безрозмірної механічної характеристики й властивостей робочої рідини розглянуті в [51].

Аналізуючи *результуючу механічну характеристику електродвигуна й гідромуфти* (рис. 6.3), можна зробити висновки:

- відбувається значне зростання пускового моменту, що забезпечує швидкий запуск двигуна;
- значно краще використовується максимальний момент двигуна для подолання початкового статичного моменту опору й моменту інерції робочої машини на час пуску;
- результуюча механічна характеристика є більш м'якою порівняно з механічною характеристикою електродвигуна.

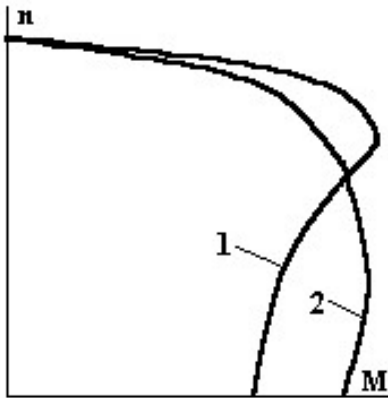


Рисунок 6.3 – Механічні характеристики:
1 – асинхронного двигуна,
2 – результуюча

Уведення до складу електропривода робочих машин із великими інерційними моментами обмежувальних розгінних гідродинамічних муфт дозволяє:

- забезпечити швидкий запуск електродвигуна за значно меншого навантаження на його валу;

- досягти плавного прискорення вихідної ланки електропривода;
- здійснювати автоматичний захист електродвигуна від перевантаження як під час пуску, так і в інших як нормальних, чи аварійних режимах роботи.

До *переваг* гідромумфт можна віднести такі їх властивості:

- відсутність потреби в ремонті та регулюванні впродовж усього періоду експлуатації;
- стабільність характеристик;
- вибухобезпечність конструкції;
- перевантаження робочої машини не призводить до перевантаження гідромумфти й не викликає пошкодження її складових частин.

Але слід зазначити й *недоліки*:

– втрати енергії в гідромумфтах. На практиці компенсується завдяки тому, що електропривод із гідромумфтою має двигун значно меншої потужності, ніж без гідромумфти. Можливість використання блокування гідромумфти в сталому режимі роботи дозволяє також усунути цей недолік;

– гідромумфти можуть лише краще використовувати момент електродвигуна, але не перетворювати його, а тому гідромумфта не може замінити таких передавальних пристроїв як редуктор, пасова передача, коробка передач тощо (рис. 6.4).

6.2 Особливості гальмування

За нормальних режимів роботи для більшості робочих машин із великими інерційними моментами найчастіше використовують гальмування на вибіг, оскільки наявність великих моментів опору забезпечує

порівняно швидке гальмування, а тривалість часу гальмування не впливає суттєво на продуктивність робочої машини.

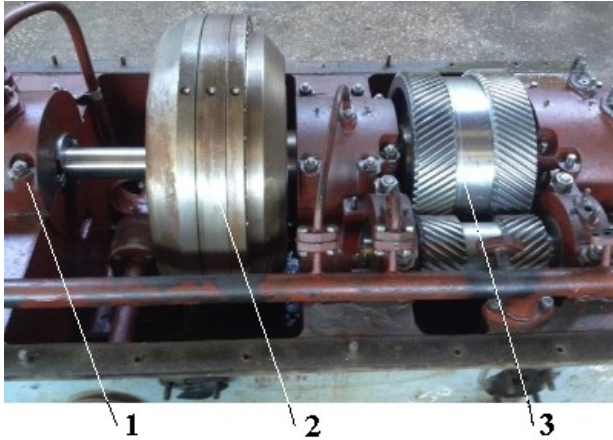


Рисунок 6.4 – Складові електропривода:

1 – електродвигун, 2 – гідромуфта, 3 – редуктор

У разі, якщо потрібно скоротити час гальмування, а особливо коли необхідно забезпечити фіксоване положення рухомих частин робочої машини за відключеного стану електропривода, використовують механічне гальмування з допомогою електромагнітного гальма, наприклад барабанного типу (рис. 6.5).

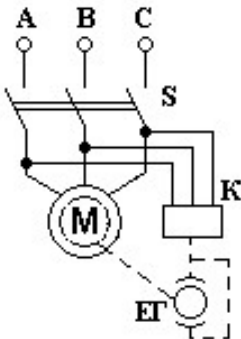


Рисунок 6.5 – Схема електропривода з електромагнітним гальмом

Котушку К електромагнітного гальма ЕГ підключають паралельно до обмоток статора, й під час роботи двигуна М гальмівні колодки розблоковують барабан, що знаходиться на валу електродвигуна. На час відключення електродвигуна від мережі живлення за допомогою вимикача S відбувається відключення електромагніта. Здійснюється гальмування привода внаслідок дії сил тертя між барабаном і гальмівними колодками й утримання у фіксованому положенні рухомі частини робочої машини.

Такий спосіб гальмування є порівняно простим і надійним. Але виділення великої кількості тепла в місці контактування барабана з колодками обмежує використання такого способу в пожежо- та вибухонебезпечних зонах.

У деяких робочих машинах із великими інерційними моментами термінове гальмування використовують в аварійних ситуаціях, коли від часу гальмування залежить цілісність обладнання та безпека обслуговуючого персоналу. У такому разі найчастіше використовують гальмування противмиканням. Особливості такого способу гальмування, його переваги й недоліки були розглянуті в пункті 4.2.3.

6.3 Особливості реверсу

Необхідність реверсу – зміни напрямку обертання робочих машин із великими інерційними моментами для технологічних цілей виникає дуже рідко та зазвичай це пов'язано з необхідністю вивантаження матеріалу після закінчення циклу його оброблення.

Іноді необхідність у тимчасовому реверсі можна пояснити тим, що після завантаження сировини

можуть виникнути заклинення, застигання, ущільнення тощо. Пуск електропривода в такому разі може бути ускладненим, неможливим або ж призвести до пошкодження робочої машини. Одним зі способів усунення такого стану є «розкачування», коли електропривод послідовно запускають то в один, то в інший бік («розкачують»), водночас порушуючи заклинення, застигання, ущільнення або іншу перешкоду, й під кінець запускають електропривод у потрібному напрямку обертання.

На рисунку 6.6 подано схему реверсивного електропривода з асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором.

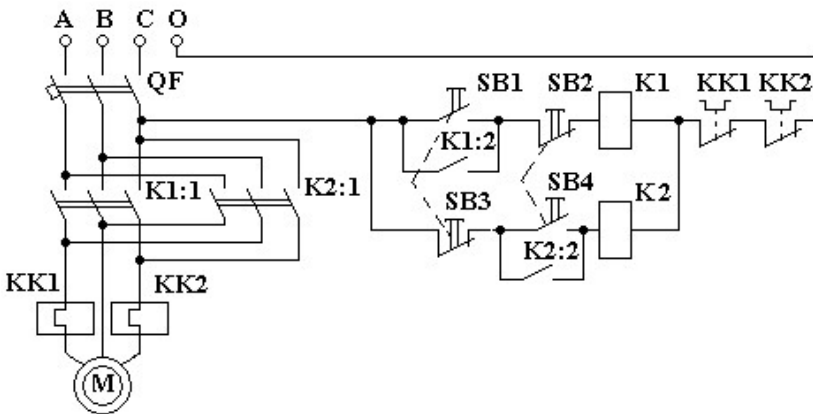


Рисунок 6.6 – Принципова електрична схема реверсивного електропривода

Джерелом живлення є трифазна чотирипровідна мережа змінного синусоїдального струму.

Силовим приймачем електричної енергії є асинхронний двигун із короткозамкненим ротором М.

Перелік і призначення електричних апаратів наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Перелік і призначення електричних апаратів

Позначення	Найменування	Призначення
QF	Вимикач автоматичний	Вмикання / вимикання в нормальному режимі й захист від струмів к. з. та довготривалих перевантажень
K1, K2	Контактори	Комутація силових кіл і кіл керування
KK1, KK2	Реле теплові	Захист від довготривалих перевантажень
SB1 – SB4	Кнопки керування	Функції «Пуск», «Стоп», «Уперед», «Назад»

Робота на час пуску. Вмикають вимикач автоматичний QF.

У разі, коли «розкачування» не потрібне, натискають на кнопку SB1 («Уперед») і відбувається прямий пуск електродвигуна М.

У разі, коли «розкачування» потрібне, пуск здійснюють короткочасним почерговим натисканням на кнопки SB1 («Уперед») і SB4 («Назад»). Наявність механічного блокування кнопок SB1 і SB3 та SB4 і SB2 унеможливорює одночасне виконання команд «Уперед» і «Назад».

За умови пуску в напрямку «Уперед» на обмотки статора двигуна подається напруга з прямою послідовністю фаз «АВС», а в разі запуску в напрямку «Назад» – зі зворотною послідовністю фаз «ВАС». Зміною чергування фаз досягають реверсу і як наслідок – «розкачування».

За досягнення певної амплітуди «розкачування» залишають електродвигун увімкненим із напрямком обертання «Уперед».

У сталому режимі роботи контактор K1 увімкнений, його силові контакти K1:1 забезпечують

живлення обмоток статора від мережі живлення, а допоміжні контакти K1:2 – блокування кнопки SB1.

За умови *робочого відключення* необхідно натиснути на кнопку SB2. Контактор K1 вимикається, його силові контакти K1:1 розривають електричне коло живлення обмоток статора електродвигуна й відбувається його гальмування на вибіг.

Захист від струмів короткого замикання, як у силових електричних колах, так і в колах керування, здійснюють за допомогою автоматичного вимикача QF.

Захист від тривалих перевантажень електродвигуна по струму забезпечують реле теплові КК1 і КК2. Розмикання їх контактів в електричному колі живлення котушок магнітних пускачів K1 та K2 забезпечує їх вимикання, а отже й відключення електродвигуна від мережі живлення та його гальмування на вибіг.

ПРИКЛАД

Вибрати пускач електромагнітний згідно з електричною схемою реверсивного електропривода (рис. 6.6). Вихідні параметри для розрахунків (мережа живлення: U_n – номінальна напруга, двигун: P_n – номінальна потужність, K_i – коефіцієнт пуску, η – ККД, $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності) вказані в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Вихідні параметри для розрахунку

U_n , В	P_n , кВт	K_i	η , %	$\cos\varphi$
660	10	7,5	87,5	0,88

РОЗВ'ЯЗАННЯ

1 Визначаємо номінальний струм в обмотках статора електродвигуна:

$$I_{н.ед} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{10}{1,73 \cdot 0,66 \cdot 0,875 \cdot 0,88} = 11,3 \text{ А.}$$

Висновок: вибираємо пускач магнітний за умови:

$$I_{н.пус} \geq I_{н.ед}.$$

2 Визначаємо пусковий струм двигуна:

$$I_{пус.ед} = I_{н.ед} K_i = 11,3 \cdot 7,5 = 84,75 \text{ А.}$$

Висновок: вибираємо пускач магнітний за умови:

$$I_{\max.кон} \geq I_{пус.ед}.$$

3 Згідно з електричною схемою та вихідними параметрами на котушки контакторів подається фазна напруга $U_\Phi = 380 \text{ В}$.

Висновок: вибираємо пускач магнітний з номінальною напругою котушки $U_{н.пус} = 380 \text{ В}$.

4 Згідно з електричною схемою кожний із двох контакторів пускача магнітного повинен бути триполюсним (мати 3 силових контакти) та один замикаючий (1 з) допоміжний контакт.

5 Ураховуючи вищесказане згідно з таблицею 2.13 вибираємо пускач магнітний типу ПМЛ-2000 з реле тепловим типу РТЛ-1016 з номінальними параметрами :

$$U_{н.кон} = 380 \text{ В}, \quad I_{н.кон} = 25 \text{ А}, \quad I_{н.тр} = (9,5 - 14) \text{ А}, \\ I_{\max.кон} = 160 \text{ А}, \quad N_{пол} = 3, 2 \text{ з} + 2 \text{ р.}$$

6.4 Особливості вибору електродвигуна

Специфічні умови роботи електропривода робочих машин із великими інерційними моментами в перехідних режимах (особливо під час пуску) зумовлюють особливі підходи до вирішення завдання вибору електродвигуна.

Мати в складі електропривода простий, надійний і дешевий *асинхронний двигун із короткозамкненим ротором* можна за таких умов:

- зменшення статичних і динамічних навантажень на час пуску робочої машини. Це можливо, наприклад, за умови пуску робочої машини без навантаження або з навантаження, значно менше номінального;
- використання допоміжних пристроїв, що забезпечують швидкий і полегшений пуск двигуна та плавний розгін робочої машини до номінальної швидкості. Прикладом такого пристрою може бути обмежувальна розгінна гідродинамічна муфта, роботу якої в складі електропривода було розглянуто в пункті 6.1.3.

Для таких електроприводів використовують асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором загального призначення серій 4А, АИ, АОЗ, АИР тощо.

Вирішити проблему пуску можна також методом використання *асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором із підвищеним пусковим моментом*, наприклад, серії 4АР. Наявність у роторі таких двигунів залитої алюмінієм подвійної короткозамкненої обмотки дозволяє суттєво збільшити пусковий момент ($k_n = 1,8 - 2,0$) і дещо зменшити величину пускового струму ($k_i = 3,5 - 5,5$).

Такі двигуни спеціально призначенні для роботи в складі електропривода робочих машин, що мають великі статичні й динамічні навантаження на час пуску.

Такі електродвигуни мають номінальні параметри:

- напруга мережі живлення: 220, 380, 660 В;
- номінальні потужності: від 7,5 до 90 кВт;
- синхронні частоти обертання: 750, 1 000, 1 500 об/хв.

За більш складних умов пуску, а також за необхідності регулювати швидкість виконавчого органа робочої машини в нормальному режимі роботи використовують *асинхронні двигуни з фазним ротором*, наприклад, серій 4АК та 4АНК. Такі електродвигуни мають номінальні параметри:

- напруга мережі живлення: 220, 380, 660 В;
- номінальні потужності: від 5,5 до 400 кВт;
- синхронні частоти обертання: 500, 600, 750, 1 000, 1 500 об/хв.

Широко використовують також спеціальні *синхронні електродвигуни*, наприклад серії СДМЗ, що призначені для роботи в складі електропривода шарових і стрижневих млинів у режимі S1. Конструкція двигуна дозволяє виконувати підряд два пуски з холодного стану або один пуск із нагрітого стану за умови, що середній статичний момент опору на валу робочої машини за час пуску не перевищує $0,8 M_{\text{ном}}$. Наступний цикл допускається не раніше ніж через 2 години. Для забезпечення надійної та тривалої роботи електродвигуна загальна кількість пусків повинна бути мінімальною й не перевищувати 500 пусків за рік. Такі електродвигуни мають номінальні параметри:

- напруга мережі живлення: 6 кВ;
- номінальні потужності: від 1 600 до 4 000 кВт;
- частоти обертання: 75 та 100 об/хв.

Контрольні запитання та завдання

1. У чому полягають особливості пуску робочих машин із великими інерційними моментами?

2. Які існують способи вирішення проблем пуску робочих машин із великими інерційними моментами?

3. Чому введення до складу електропривода обмежувальних розгінних гідromуфт дозволяє полегшити умови пуску робочих машин із великими інерційними моментами?

4. Назвіть і прокоментуйте переваги та недоліки електропривода з гідromуфтою.

5. Дайте аналіз результуючої механічної характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором і гідromуфтою.

6. У чому полягають особливості гальмування робочих машин із великими інерційними моментами?

7. Як на практиці виконують «розкачування» робочої машини з великим інерційним моментом?

8. У чому полягають особливості вибору електродвигуна для електропривода робочих машин із великими інерційними моментами?

Розділ 7

ЕЛЕКТРОПРИВОД РОБОЧИХ МАШИН ДЛЯ ХІМІЧНИХ, ГАЗО- ТА НАФТОПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Характерною ознакою сучасних хімічних, газо- та нафтопереробних підприємств є високий рівень споживання електричної енергії. Значна частина споживання електроенергії припадає на енергоємні технологічні процеси, але досить вагомими є також витрати на електропривод основного й допоміжного обладнання. Ураховуючи специфічні умови роботи обладнання на цих підприємствах, що пов'язані із наявністю хімічно-агресивних, вологих, вибухо- та пожежонебезпечних приміщень і навколишніх середовищ, до електропривода робочих машин пред'являють специфічні вимоги, особливо в питаннях надійності й безпеки.

7.1 Вимоги до системи електропостачання

Великі потужності електроприводів та електротехнологічних апаратів на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах зумовлюють велику концентрацію енергії як в окремих цехах, так і на порівняно невеликій території підприємства. Потужність трансформаторних підстанцій деяких хімічних комбінатів досягає 500 МВ·А.

Більшість таких підприємств потребує підвищеної надійності електропостачання, оскільки частина робочих машин, задіяних у технологічному процесі, належать до *першої категорії приймачів електричної енергії*. Це

означає, що переривання в електропостачанні таких робочих машин може спричинити загибель людей, аварійний вихід із ладу обладнання, розлад складного технологічного процесу, масовий брак продукції або сировини.

Електроприймачі I категорії відповідно до вимог правил улаштування електроустановок (ПУЕ) [38] повинні бути забезпеченими електроенергією від двох незалежних взаєморезервувальних джерел живлення, а переривання в їх електропостачанні в разі порушення електропостачання від одного джерела живлення можна допускати лише на час автоматичного відновлення живлення від іншого джерела.

Також на таких підприємствах використовують робочі машини, що належать до *особливої групи електроприймачів I категорії*, безперебійне функціонування яких необхідне для безаварійної зупинки виробництва з метою запобігання загрози життю людей, вибухам, пожежам і пошкодженням високовартісного дорогого обладнання, втраті важливої інформації. Відповідно до вимог ПУЕ до цієї групи передбачені більш жорсткі вимоги щодо електропостачання – обов'язкова наявність третього незалежного взаєморезервувального джерела живлення. Функцію третього незалежного джерела живлення для особливої групи електроприймачів і другого для інших електроприймачів I категорії можуть виконувати місцеві електростанції, електростанції енергосистем, спеціальні агрегати безперебійного живлення, акумуляторні батареї тощо.

Прикладами робочих машин хімічних, газо- та нафтопереробних підприємств *першої категорії* електроприймачів є: етилозмішувальні установки, компресори для подавання повітря для пневмотранспорту й циркуляції газових сумішей, сировинні насоси, санітарно-технічна вентиляція, насоси головного

водозабору, оборотного водопостачання та каналізації тощо.

Значна частина робочих машин на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах належать до *другої категорії приймачів електричної енергії*. До них відносять приймачі, переривання в електропостачанні яких може спричинити масовий недовипуск продукції, простої робітників, обладнання й транспортних засобів, але не призводить до катастроф чи аварій. До підприємств, де використовують електроприймачі другої категорії, належать: целюлозні підприємства, підприємства з виготовлення продуктів лісохімії, аміачної селітри, розбавленої азотної кислоти тощо.

Багато хімічних підприємств, і насамперед тих, де використовують електрохімічні та плазмохімічні установки, висувають підвищені вимоги щодо параметрів, що характеризують *якість електроенергії*:

- відхилення від номінального значення та коливання частоти струму не більше $\pm 0,1$ Гц;
- відхилення від номінального значення та коливання напруги на затискачах силових електроспоживачів – від -5 до $+10$ %, для освітлювальних електроспоживачів – від $-2,5$ до $+5,0$ %;
- синусоїдальність кривої напруги;
- зсув нейтралі при з'єднанні джерела й приймача за схемою «зірка»;
- несиметрія напруги по фазах трифазної мережі.

7.2 Вимоги до навколишнього середовища

Під час вибору електропривода робочих машин для хімічних, газо- та нафтопереробних підприємств значну увагу приділяють умовам навколишнього середовища, у

яких він буде працювати. Зазвичай це приміщення вибухотапожежонебезпечні, вологі та особливо вологі, запилені та загазовані.

ПУЕ визначають ступінь вибухотапожежонебезпеки зон (приміщень) залежно від їх класу.

Вибухонебезпечна зона – простір у приміщенні або навколо зовнішньої установки, у якому присутнє вибухонебезпечне середовище або воно може утворюватися внаслідок природних чи виробничих чинників у такій кількості, що вимагає спеціальних заходів у конструкції електрообладнання під час його монтажу та експлуатації.

Газо- та пароповітряні вибухонебезпечні середовища утворюють вибухонебезпечні зони класів 0, 1, 2, а пилоповітряні – вибухонебезпечні зони класів 20, 21, 22.

Вибухонебезпечна зона класу 0 – простір, у якому вибухонебезпечне середовище наявне постійно або протягом тривалого часу. Вибухонебезпечна зона класу 0 може мати місце лише в межах корпусів технологічного обладнання. Приклад: резервуар, у якому є бензин.

Вибухонебезпечна зона класу 1 – простір, у якому вибухонебезпечне середовище може утворитися під час нормальної роботи (нормальна робота – ситуація, коли установка працює відповідно до своїх розрахункових параметрів). Приклад: муловідстійник ацетиленової станції.

Вибухонебезпечна зона класу 2 – простір, у якому вибухонебезпечне середовище за нормальних умов експлуатації відсутнє, а якщо воно виникає, то рідко й триває недовго. Приклад: фарбувальне приміщення за наявності основного та резервного вентиляційних агрегатів.

Вибухонебезпечна зона класу 20 – простір, у якому під час нормальної експлуатації вибухонебезпечний пил у

вигляді хмари присутній постійно або часто в кількості, достатній для утворення небезпечної концентрації суміші з повітрям, і (або) простір, де можуть утворюватися пилові шари непередбаченої або надмірної товщини. Зазвичай це має місце всередині обладнання, де пил може формувати вибухонебезпечні суміші часто й на тривалий термін. Приклад: робочі машини, що використовують у технологічному процесі одержання цементу.

Вибухонебезпечна зона класу 21 – простір, у якому під час нормальної експлуатації ймовірна поява пилу у вигляді хмари в кількості, достатній для утворення суміші з повітрям вибухонебезпечної концентрації.

Ця зона може включати простір поблизу місця порошкового заповнення або осідання й простір, де під час нормальної експлуатації ймовірна поява пилових шарів, що можуть утворювати небезпечну концентрацію вибухонебезпечної пило-повітряної суміші. Приклад: приміщення для здрібнювання сировини на хімічних підприємствах за відсутності резервних агрегатів системи аспірації.

Вибухонебезпечна зона класу 22 – простір, у якому вибухонебезпечний пил у завислому стані може з'являтися нечасто й існувати недовго або в якому шари вибухонебезпечного пилу можуть існувати й утворювати вибухонебезпечні суміші в разі аварії. Ця зона може включати простір поблизу обладнання, що містить пил, який може вивільнюватися шляхом витoku й формувати пилові утворення. Приклад: виробничі приміщення хімічних підприємств.

Згідно з таблицею 7.1 визначають клас вибухонебезпечної зони в залежності від основних показників: місця розташування, характеристики навколишнього середовища (наявність горючих газів (ГГ),

легкозаймистих речовин (ЛЗР), горючого пи́лу або волокон) та умов виникнення вибухонебезпечних сумішей.

Таблиця 7.1 – Визначення класу вибухонебезпечної зони

Клас зони	Місце розташування		Характеристики навколишнього середовища		Умови виникнення вибухонебезпечних сумішей		
	Простір	Усередині обладнання	ГГ, пари ЛЗР	Горючий пил та волокна	Нормальні		Аварійні
					Постійно	Тимчасово	
0	+	+	+		+		
1	+		+			+	
2			+				+
20		+		+	+		
21	+			+		+	
22	+			+			+

Згідно з ПУЕ *пожежонебезпечною зоною* називають простір у приміщенні або за його межами, у якому постійно або періодично знаходяться горючі речовини як при нормальному технологічному процесі, так і при його порушенні в такій кількості, що вимагає спеціальних заходів у конструкції електрообладнання під час його монтажу та експлуатації.

Пожежонебезпечні зони класифікують на такі класи:

– *зона класу II-I* – простір у приміщенні, в якому знаходиться горюча рідина, що має температуру спалаху більше +61 °С;

– *зона класу II-II* – простір у приміщенні, в якому можуть накопичуватися й виділятися горючий пил або волокна;

– *зона класу II-III* – простір у приміщенні, в якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали;

– *зона класу II-III* – простір поза приміщенням, в якому знаходиться горюча рідина з температурою спалаху понад +61°C або тверді горючі речовини.

7.3 Вимоги до електрообладнання

Відповідно до умов захисту від дії навколишнього середовища електрообладнання може мати згідно з ДСТУ [21] такі види виконання:

- *відкрите* – не захищене оболонкою від дотикання до його частин, які знаходяться під напругою, небезпечних частин, які рухаються та (або) від попадання всередину сторонніх предметів, рідин і пилу;

- *захищене* – має оболонку для захисту від дотику до його частин, які знаходяться під напругою, небезпечних частин, які рухаються і (або) від попадання всередину сторонніх предметів, рідин і пилу;

- *краплезахищене* – виконане так, що виключається попадання всередину його оболонки крапель у кількості, що порушує його роботу;

- *бризкозахищене* – виконане так, що виключається попадання всередину його оболонки бризок, що падають під будь-яким кутом до вертикалі в кількості, що викликає порушення в роботі;

- *водозахищене* – виконане так, що при обливанні його водою виключена можливість її попадання всередину його оболонки в кількості, що порушує його роботу;

- *пилезахищене* – виконане так, що виключається попадання всередину його оболонки пилу в кількості, що порушує його роботу;

- *пилонепрникне* – виконане так, що попадання пилу всередину його оболонки виключається повністю;

- *закрите* – виконане з такою оболонкою, що можливість сполучення між його внутрішнім простором і

навколишнім середовищем може мати місце лише через нещільність з'єднань між частинами електротехнічного виробу;

- *герметичне* – виконане з такою оболонкою, що практично виключена можливість сполучення між його внутрішнім простором і навколишнім середовищем ;

- *вибухозахищене* – виконане таким чином, що усувається можливість займання навколишнього вибухонебезпечного середовища внаслідок експлуатації цього обладнання;

- *підвищеної надійності проти вибуху* – вибухозахист забезпечується тільки у визнаному нормальному режимі;

- *вибухобезпечне* – вибухозахист забезпечується як за нормального режиму роботи, так і за визваних імовірними пошкодженнях, що визначаються умовами експлуатації, крім пошкоджень засобів вибухозахисту;

- *особливо вибухобезпечне* – у якому по відношенню до вибухобезпечного електротехнічного виробу вжиті додаткові заходи вибухозахисту, що передбачені стандартом на види вибухозахисту.

Електрообладнання (електродвигуни, електричні апарати, прилади для вимірювання та контролю, освітлювальні прилади, електропроводка тощо), що працює у *вибухонебезпечних зонах*, має бути виготовлене згідно з вимогами ПУЕ.

Вмикати вибухозахищене електрообладнання необхідно в порядку, який викладений в інструкції заводу-виробника.

Згідно з ДСТУ [21], вибухозахищене електрообладнання може бути призначене для *двох видів розміщення* – *внутрішнього та зовнішнього*.

Залежно від сфери застосування вибухозахищене електрообладнання поділяють на дві групи:

- група I – рудникове вибухозахищене електрообладнання, що призначене для підземних робіт у шахтах і рудниках, небезпечних за газом чи пилом;

- група II – вибухозахищене електрообладнання для внутрішнього й зовнішнього розміщення, крім рудникового вибухозахищеного.

Вибухозахищене електрообладнання групи II, що має вибухозахищену оболонку й (чи) іскробезпечне електричне коло, поділяють на підгрупи ПА, ПВ і ПС.

Для вибухозахищеного електрообладнання групи II залежно від граничної температури ПУЕ визначають температурні класи (табл.7.2).

Таблиця 7.2. – Температурні класи для вибухозахищеного електрообладнання групи II

Температурний клас	Гранична температура, °С	Температурний клас	Гранична температура, °С
T1	450	T4	135
T2	300	T5	100
T3	200	T6	80

Вибухозахищене електрообладнання групи II для внутрішнього й зовнішнього розміщення згідно з ПУЕ може мати такі види вибухозахисту:

- вибухонепроникна оболонка (знак виду вибухозахисту – d) – захисна оболонка витримує тиск вибуху в її середині та унеможливорює його розповсюдження з оболонки в навколишнє вибухонебезпечне середовище;

- іскробезпечне електричне коло (знак виду вибухозахисту – i) – електричне коло, яке виконано так, що електрична розряд або нагрівання не

може запалити вибухонебезпечно середовище в умовах спеціальних випробувань;

- *захист виду «е»* (знак виду вибухозахисту – *e*) – в електрообладнанні або його частинах немає деталей, що нормально іскрять, і вжито низку заходів додатково до використаних в електрообладнання, які ускладнюють появу небезпечного нагрівання, електричних іскор і дуг;

- *масляне заповнення оболонки* (знак виду вибухозахисту – *o*) – оболонка електрообладнання заповнюється маслом або рідким діелектриком;

- *заповнення або продування обладнання надлишковим тиском* (знак виду вибухозахисту – *p*) – оболонка електрообладнання заповнюється або продувається надлишковим тиском повітря чи інертного газу;

- *кварцове заповнення оболонки* (знак виду вибухозахисту – *q*) – оболонка електрообладнання заповнюється кварцовим або іншим негорючим порошком;

- *герметизація компаундом* (знак виду вибухозахисту – *m*) – вид вибухозахисту електрообладнання, за якого будь-яка частина здатна запалити вибухонебезпечно середовище через іскріння або нагрівання, замкнена в компаундну оболонку;

- *спеціальний вид вибухозахисту* (знак виду – *s*) – вибухозахист, заснований на принципах, відмінних від наведених раніше, але достатній для його здійснення;

- *спеціальний вид вибухозахисту* (знак виду – *n*) – вибухозахист електрообладнання, що відповідає вимогам стандартів електричних приладів, які в нормальному режимі експлуатації не мають гарячих поверхонь, здатних до загорання, та не створюють електричних дуг або іскор.

Приклади маркування вибухозахисту електрообладнання групи II:

- 0ExidIIAT5 – особливо вибухонебезпечне обладнання, іскробезпечний електричний ланцюг та вибухонебезпечна оболонка, підгрупа ПА, температурний клас Т5;
- 1ExiIICT4 – вибухонебезпечне електрообладнання, іскробезпечний електричний ланцюг, підгрупа ПС, температурний клас Т4;
- 2ExeIIТ6 – електрообладнання підвищеної надійності проти вибуху, захист виду “е”, група II, температурний клас Т6.

Згідно з вимогами ПУЕ, все електрообладнання, а також електропроводка, що знаходяться у вибухонебезпечних зонах, повинні підлягати зовнішньому огляду не рідше ніж один раз за 3 місяці. Огляд повинен проводити відповідальний за електрогосподарство або призначена ним особа. Результати огляду заносять до оперативного або спеціального журналу.

7.4 Особливості вибору складових частин електропривода

Для забезпечення надійної та безпечної роботи електрообладнання електропривода, що використовують у вибухо- та пожежонебезпечних приміщеннях, воно повинне суворо відповідати умовам навколишнього середовища. Правила вибору електрообладнання залежно від класу вибухо- та пожежонебезпечних приміщень чи зовнішніх установок, категорії та групи вибухонебезпечних речовин детально викладені в ПУЕ. У цьому розділі будуть розглянуті лише основні положення цих правил.

У вибухо- та пожежонебезпечних приміщеннях необхідно розмішувати лише мінімум дорогого

вибухозахищеного чи пожежобезпечного електрообладнання. Усе інше обладнання повинно бути розміщеним у безпечних приміщеннях, що надійно ізолювані від небезпечних приміщень.

7.4.1 Особливості вибору електродвигунів

Зазвичай на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах у складі електропривода використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Рідше використовують асинхронні двигуни з фазним ротором та синхронні, а двигуни постійного струму – дуже рідко, оскільки використання їх у вибухо- та пожежонебезпечних приміщеннях є ускладненим насамперед через наявність електричного контакту «колектор-щітки», що зумовлює появу іскріння.

Прикладом асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором, що використовують у приміщеннях із хімічно активним середовищем є електродвигуни серій:

- АИРС (рис. 7.1) – із підвищеним ковзанням; призначені для роботи в складі електропривода робочих машин зі ступеневим регулюванням частоти обертання; живлення від мережі 220/380 В; із вмонтованим температурним захистом; види кліматичного виконання: У2, У3, У5, УХЛ2, УХЛ4, Т2; режим роботи: S1.



Рисунок 7.1 – Асинхронний двигуни серії АИРС

- АИРЖ (рис. 7.2) – призначені для роботи в складі електропривода моноблочних відцентрових насосів; живлення від мережі 220/380 В, 380/660 В, 400 В, 690 В із частотою 50 Гц та 60 Гц; види кліматичного виконання: У2, У3, У5, УХЛ2, УХЛ4, Т2; режими роботи: S1-S8.

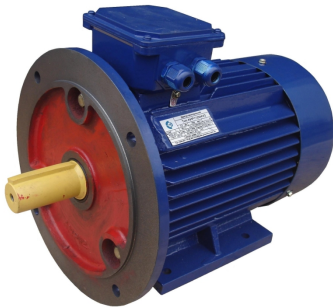


Рисунок 7.2 – Асинхронний двигуни серії АИРЖ

В електроприводах робочих машин, які працюють у *вибухонебезпечних зонах*, використовують *вибухозахищені*, з *підвищеною надійністю проти вибуху*, *вибухобезпечні та особливо вибухобезпечні електродвигуни*, що відрізняються від електричних машин загального використання конструкцією та матеріалами оболонки (кожуха) та ущільнень і забезпечують необхідну вибухобезпеку. Ступінь захисту електродвигуна визначають класом вибухонебезпеки тієї зони, де він повинен працювати, наявності в навколишньому середовищі тих чи інших газів, парів, пилу чи горючих волокон, що можуть створити вибухонебезпечні суміші з повітрям.

Прикладами електродвигунів, що використовують в електроприводі робочих машин на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах у *вибухонебезпечних зонах* є:

1. Асинхронні двигуни серій:

• *МА36* (рис. 7.3) – асинхронний електродвигун із фазним ротором, призначений для роботи в вибухонебезпечних приміщеннях усіх класів і зовнішніх установках, небезпечних по газопароповітряних сумішах (група II).



*Рисунок 7.3 –
Асинхронний двигуни
серії МА36*

• *ВАО* (рис. 7.4) – призначені для роботи в складі електропривода робочих машин внутрішнього та зовнішнього розміщення в газовій, нафтопереробній, хімічній і суміжних галузях промисловості.



*Рисунок 7.4 –
Асинхронний
двигуни серії ВАО*

• АИМ (рис. 7.5) – призначені для роботи в складі електропривода стаціонарних робочих машин у газовій, нафтопереробній, хімічній і суміжних галузях промисловості, де можуть створюватися вибухонебезпечні газо- й пароповітряні суміші.



Рисунок 7.5 – Асинхронний двигун серії АИМ

• АИММ (рис. 7.6) – призначені для роботи в складі електропривода стаціонарних робочих машин у вугільній, нафтопереробній, хімічній і суміжних галузях.



Рисунок 7.6 – Асинхронний двигун серії АИММ

• АИУМ (рис. 7.7) – призначені для роботи в складі електропривода скребкових та стрічкових конвеєрів у вугільній, хімічній і суміжних галузях.



Рисунок 7.7 –
Асинхронний
двигуни серії
АИУМ

Технічні характеристики вибухозахищених асинхронних двигунів наведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Технічні характеристики вибухозахищених асинхронних двигунів

Серія	U, В	f, Гц	P, кВт	Режим роботи	Кліматичне виконання	Ступінь захисту
МА36	220 – 660	50	40 – 400	S1	У2, У5, Т2, Т5, УХЛ, О	IP54
ВАО, ВАО2	220 – 660 та 6, 10 кВ	50, 60	0,27 – 2000	S1	У1-5, Т2	IP54
АИМ	220 – 660	50, 60	1,5 – 550	S1 та S2, S3, S4 з ТВ	У5, У5, Т2, Т5	IP53, IP55
АИММ	220 – 660	50, 60	1,5 – 550	S1 та S2, S3, S4 з ТВ	У5, У5, Т2, Т5	IP55
АИУМ	220 – 660	50, 60	22 – 75	S1 та S4 з ТВ	У5, Т5	IP54

2. Синхронні двигуни серій:

• *СТДП* (рис. 7.8) – призначені для роботи в складі електропривода нафтових насосів, газових компресорів на компресорних станціях магістральних нафто- та газопроводів, газових компресорів хімічних підприємств, водяних насосів, що підтримують пластовий тиск при видобуванні нафти, а також вентиляторів, що встановлюють у вибухонебезпечних приміщеннях;

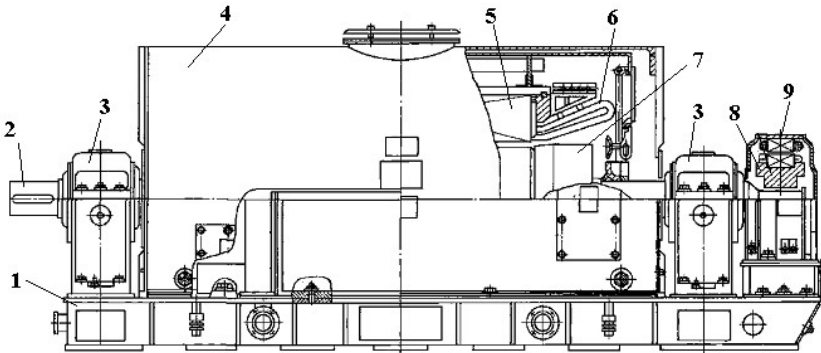


Рисунок 7.8 – Синхронний двигун серії СТДП:

- 1 – фундамента плита, 2 – вал, 3 – підшипники,
4 – станина статора двигуна, 5 – осердя статора двигуна,
6 – обмотка статора двигуна, 7 – ротор двигуна,
8 – якір збудника, 9 – статор збудника

• *СДКП2* – призначені для роботи в складі електропривода поршневих компресорів, що встановлюють у вибухонебезпечних приміщеннях;

• *СДКМ* – призначені для роботи в складі електропривода аміачних поршневих компресорів;

• *СДМП2* – призначені для роботи в складі електропривода шарових і стрижневих млинів.

Технічні характеристики вибухозахищених синхронних двигунів наведені в таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 – Технічні характеристики
вибухозахищених синхронних двигунів

Серія	U, кВ	f, Гц	P, кВт	Режим роботи	Кліматичне виконання	Ступінь захисту
СТДП	6, 10	50	1 250 – 5 000	S1	-	-
СДКП2	6, 10	50	315 – 800	S1	УХЛ4	-
СДКМ	6	50	385– 940	S1	-	-
СТДМП2	6	50	400 – 800	S1	УХЛ4	IP43

В електроприводі робочих машин, що працюють у вибухонебезпечних приміщеннях, також можна використовувати електродвигуни й у *нормальному закритому виконанні*, але за таких умов:

- електродвигуни розташовують за межами вибухонебезпечних приміщень або в інших приміщеннях, відділених від вибухонебезпечних стіною з негорючого матеріалу, мають евакуаційний вихід і знаходяться під надлишковим тиском;
- приводи механізмів повинні бути виконані за допомогою валу, пропущеного крізь стіну з сальниковим ущільненням.

Під час вибору електродвигуна для електропривода робочої машини, що працює *в пожежонебезпечній зоні*, необхідно враховувати конкретні умови навколишнього середовища й вибирати місце його розташування за можливості якнайдалі від місця знаходження горючих речовин.

Особливості вибору електродвигунів для таких приміщень (зон) обумовлені ПУЕ, згідно з якими в таких приміщеннях можуть працювати електродвигуни з напругою до 10 кВ, за умови, що їх оболонка матиме ступінь захисту не нижче, ніж указано в таблиці 7.5.

Таблиця 7.5 – Мінімальний ступінь захисту оболонок електричних машин залежно від класу пожежонебезпечної зони

Вид установки й умови роботи	Ступінь захисту оболонки для пожежної зони класу			
	П-I	П-II	П-IIa	П-III
Установки стаціонарні, які іскрять або мають частини, що іскрять за умовами роботи	IP44	IP54	IP44	IP44
Установки стаціонарні, які не іскрять і не мають частин, що іскрять за умовами роботи	IP44	IP44	IP44	IP44
Установки на пересувних механізмах (крани, тельфери тощо), що іскрять або не іскрять за умовами роботи	IP44	IP54	IP44	IP44

У пожежобезпечних зонах можливе використання електродвигунів, що продуваються чистим повітрям із вентиляцією по замкненому або незамкненому циклу. Повітря для вентиляції електричних машин не повинне містити у своєму складі парів чи пилу горючих речовин. Викидів відпрацьованого повітря при розімкненому циклі вентиляції в пожежонебезпечну зону допускати не можна.

У приміщеннях *класу П-I* електродвигуни повинні мати бризкозахищене, закрите, закрите обдувне чи продувне виконання, *класу П-IIa* – закрите, закрите обдувне чи продувне виконання, *класу П-III* – закрите або закрите обдувне виконання.

Електричні машини, у яких за нормальних умов роботи можуть з'являтися іскри (двигуни постійного струму, асинхронні двигуни з фазним ротором, синхронні двигуни тощо) необхідно розміщувати на відстані не менше 1м від місця розташування горючих речовин, або ж їх потрібно відділяти від них екраном із негорючого матеріалу.

Згідно з ПУЕ, у пожежонебезпечних зонах можливе використання електродвигунів із меншим ступенем захисту оболонки, ніж вказано в таблиці 7.5, але за таких умов:

- електродвигуни повинні бути розміщені за межами пожежонебезпечних зон;
- приводи механізмів повинні бути виконані за допомогою валу, пропущеного крізь стіну із сальниковим ущільненням.

7.4.2 Особливості вибору електричних апаратів і приладів

Вимоги до виконання електричних апаратів і приладів, що працюють у складі електроприводу робочих машин на хімічних, газо- й нафтопереробних підприємствах, залежать від навколишнього середовища, обумовлені вимогами ПУЕ та аналогічні до розглянутих у попередньому параграфі. Безпосередньо в пожежо- та вибухонебезпечних зонах потрібно розміщувати лише обмежену кількість електричних апаратів і приладів у спеціальному виконанні, а всі інші за можливості повинні мати нормальне виконання й бути розміщені в безпечних приміщеннях.

Електричні апарати та прилади, призначені для роботи у *вибухонебезпечних приміщеннях* повинні мати виконання вибухозахисту відповідно:

- для класу *B-I*: d , p або i ;
- для класу *B-II*: d , p , i , e або o ;
- для класу *B-Ia*: електричні апарати з частинами, що нормально іскрять і нагріваються вище ніж $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, повинні мати будь-яке вибухозахищене виконання для відповідних категорій і груп вибухобезпечних сумішей; апарати, які не мають частин, що нормально іскрять і

нагріваються вище ніж 80°C , повинні мати пилонапроникне виконання;

- для класу *B-Ib*: допускається закрите виконання, за винятком пускорегулювальних електричних апаратів для двигунів аварійної вентиляції, що відповідають категорії та групі вибухобезпечних сумішей.

Електричні апарати й прилади для роботи у вибухонебезпечних приміщеннях виконують як у маслонаповненій оболонці.

Прикладами електричних апаратів, призначених для роботи у вибухонебезпечних приміщеннях у складі електропривода робочих машин на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах є:

1. *Пакетно-кулачкові вимикачі та перемикачі вибухозахищені серії ExGN* (рис. 7.9), призначені для дистанційного керування електроприводом стаціонарних і рухомих робочих машин із такими технічними характеристиками:

- напруга: до 690 В;
- номінальні струми: 12, 20, 25, 32, 40, 63 А;
- ступінь захисту: IP66;
- маркування вибухозахисту: 1ExdIICT6GbX/ExtbIICT6CDbX, 1ExdeIICT6Gb/ExtbIICT6CDb.



Рисунок 7.9 – Пакетно-кулачковий перемикач на три положення серії ExGN

2. *Пости вибухозахищені кнопкові серії ПВК-ПК* (рис. 7.10), призначені для ручного керування електроприводом стаціонарних і рухомих робочих машин, а також для використання у колах сигналізації електропривода. Вони можуть використовуватись у всіх зонах виробництва, транспорту та зберігання продуктів хімічної, нафтопереробної, газової та інших галузей виробництва.



Рисунок 7.10 – Пости вибухозахищені кнопкові серії ПВК-ПК

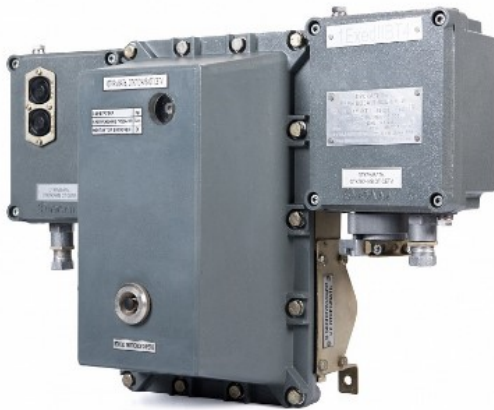
Пости виконані з п'езокнопками та мають такі технічні характеристики:

- напруга: до 24 В;
- номінальний струм: до 0,2 А;
- струм імпульсу: 120 – 150 мА;
- ступінь захисту: IP66;
- маркування вибухозахисту: 0ExiaIICT6GaX/Exia IIIС Т80⁰С Da, 1Ex d e IIC Т6 Gb/Ex tb IIIС Т80⁰С Dь.

3. *Пускачі вибухозахищені серії ПВ* (рис. 7.11), призначені для місцевого й дистанційного керування роботою трифазних асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором, а також для захисту від

струмів короткого замикання й тривалих перевантажень. Вони мають такі технічні характеристики:

- напруга:
 - силових кіл: 400 В;
 - кіл керування: 230 В;
- номінальні струми: 63, 80, 95, 125А;
- ступінь захисту: IP65;
- маркування вибухозахисту: 1ExdeІІВТ4Gb.



*Рисунок 7.11 –
Пукач
вибухозахищений
серії ПВ*

4. *Вимикачі кінцеві типу ВК* (рис. 7.12), призначені для дистанційного керування засувками трубопровідної арматури в стаціонарних робочих машинах і мають такі технічні характеристики:

- напруга:
 - змінного струму (50/60 Гц): до 380 В;
 - постійного струму: до 220 В;
- номінальний струм: до 2,5 А;
- ступінь захисту: IP65;
- маркування вибухозахисту: 1ExdeІІВТ4Gb, ExtbІІСТ130⁰CDb.



Рисунок 7.12 –
Вимикач кінцевий
типу ВК

5. Коробки з'єднувальні серії КПххС (рис. 7.13), призначені для з'єднання й розгалуження гнучких або броньованих кабелів круглого або прямокутного перерізу з мідними або алюмінієвими жилами в колах постійного та змінного струму. Вони мають такі технічні характеристики:

- напруга: до 690 В;
- номінальні струми: 20, 25 А;
- діаметр кабеля: від 4 до 40 мм;
- переріз жил кабеля: від 0,08 до 6 мм²;
- кількість клемних затискачів: 16, 24, 48, 64;
- ступінь захисту: IP65, IP66;
- маркування вибухозахисту: ExtbIICT95⁰C Db.



Рисунок 7.13 – Коробка
з'єднувальна типу
КП16С

Електричні апарати, прилади, шафи та коробки з'єднань затискачів, призначені для роботи в пожежонебезпечних зонах, згідно з вимогами ПУЕ повинні мати оболонку, ступінь захисту якої не нижче, ніж указано в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6. – Мінімальний ступінь захисту оболонок електричних апаратів, приладів, шаф та наборів затискачів залежно від класу пожежонебезпечної зони

Вид установки та умови роботи	Ступінь захисту оболонки для пожежної зони класу			
	П-I	П-II	П-IIa	П-III
Установки стаціонарні або на пересувних механізмах (крани, тельфери тощо), що іскрять за умовами роботи	IP44	IP54	IP44	IP44
Установки стаціонарні або на пересувних механізмах, що не іскрять за умовами роботи	IP44	IP44	IP44	IP44
Шафи для розміщення апаратів і приладів	IP44	IP54, IP44*	IP44	IP44
Коробки наборів затискачів силових і вторинних кіл	IP44	IP44	IP44	IP44

*У разі встановлення в них апаратів і приладів, що не іскрять в умовах роботи.

У пожежонебезпечних зонах будь-якого класу можна використовувати електричні апарати, прилади, шафи та набори затискачів, що продувають чистим повітрям з вентиляцією по замкненому або розімкненому циклу.

Електричні апарати та прилади, що іскрять в умовах роботи, вибирають за виконанням, керуючись такими правилами: для приміщень класу III – маслонаповнені або пилонепроникні; для класу III – пилонепроникні; для

класу II-IIa – закриті або маслонаповнені; для класу II-III – закриті.

Електричні апарати та прилади, *що не іскрять в умовах роботи*, для всіх класів пожежонебезпечних зон повинні мати закрите виконання.

Особливі вимоги встановлюють до електронагрівальних приладів. Для приміщень будь-якого класу пожежонебезпеки, де ці прилади необхідні за умовами технологічного процесу, робочі частини приладів, що нагріваються, повинні бути захищеними від попадання на них горючих речовин, а самі прилади мають бути встановлені на поверхні з негорючого матеріалу.

У пожежонебезпечних приміщеннях будь-якого класу, де немає необхідності використання нагрівальних приладів за умовами технологічного процесу, їх використання заборонене.

7.4.3 Особливості вибору електроосвітлювального обладнання

Для більшості вибухонебезпечних приміщень хімічних, газо- та нафтопереробних підприємств характерним є те, що обслуговуючий персонал лише здійснює нагляд за технологічним процесом, показаннями контрольно-вимірювальних приладів, станом апаратів сигналізації тощо. Тому в місцевому електроосвітленні часто немає потреби, а використовують електроосвітлювальні прилади загального освітлення приміщень та установок зовнішнього розміщення й локалізоване освітлення технологічних щитів, панелей, збірок тощо.

За необхідності виконання певних робіт у вибухонебезпечних зонах використовують переносне

електроосвітлювальне обладнання зазвичай напругою 12 або 24 В.

Прикладами електроосвітлювальних приладів виробництва ВАТ «ВАТРА», призначені для загального освітлення виробничих, складських, допоміжних та інших приміщень вибухонебезпечної зони класу 22 і пожежонебезпечних зон класів П-I, П-II, а також для зовнішнього освітлення, є:

1. *Світильники типу ДСП11* (рис. 7.14), що мають такі технічні характеристики:

- напруга джерела живлення:
 - нормальне виконання: 220 В;
 - на замовлення: 12, 24, 36 В
- джерело світла: лампа світлодіодна:
 - потужність: 9, 13 Вт;
- ступінь захисту: IP65.



*Рисунок 7.14 –
Світильники типу
ДСП11 (Модель А)*

2. *Світильники типу ДПП01* (рис. 7.15), що мають такі технічні характеристики:

- напруга джерела живлення: 220 В;
- джерело світла:
 - лампа металогенна: потужність: 70, 100 Вт;
 - лампа світлодіодна: потужність: 30 Вт;
 - лампа натрієва: потужність: 70, 100 Вт;

- лампа ртутна: потужність: 80, 125 Вт;
- лампа люмінесцентна компактна: потужність 32 Вт;
- ступінь захисту: IP55.



*Рисунок 7.15 –
Світильники
типу ДПП01*

3. Світильники типу ДПП24У (рис. 7.16), що мають такі технічні характеристики:

- напруга джерела живлення: 220 В;
- джерело світла:
 - лампа люмінесцентна лінійна (Т5): потужність 49, 80 Вт;
 - лампа люмінесцентна лінійна (Т8): потужність 18, 36, 58, 70 Вт;
 - лампа світлодіодна лінійна (Т8): потужність: 18, 36, 58, 70 Вт,
- ступінь захисту: IP65.



*Рисунок 7.16 –
Світильники
типу ДПП24У*

7.5 Електричні схеми керування роботою електропривода

Частина робочих машин, що використовують на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах, не потребує керування швидкістю, оскільки або зовсім не потребує корегування своїх параметрів, або ж їх корегування досягається неелектричними способами. До цих робочих машин можна віднести деякі насоси, компресори, вентилятори, стрічкові та ланцюгові конвеєри тощо. Для таких робочих машин доцільно використовувати *некерований за швидкістю електропривод* змінного струму на основі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором або синхронного двигуна.

Для робочих машин потужністю до 400 кВт більш доцільним є використання некерованого електропривода з асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором із номінальними значеннями напруги 380 або 660 В, оскільки він має ряд суттєвих переваг, головними з яких є простота, мала вартість, надійна тривала робота, що не потребує постійного нагляду обслуговуючого персоналу, наявність надійних систем захисту в разі виникнення аварійних ситуацій та автоматичного повторного вмикання за аварійного зникнення напруги живлення.

За більших потужностей однозначно стверджувати про доцільність використання некерованого асинхронного чи синхронного електропривода важко незважаючи на те, що є приклади використання асинхронних двигунів потужністю до 8 000 кВт, а синхронних – до 31 500 кВт із напругою 6 та 10 кВ. Переваги й недоліки цих двох видів електродвигунів були розглянуті в третьому розділі

підручника. З урахуванням специфічних умов роботи електропривода на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах загальні рекомендації полягають у тому, що використання синхронного електропривода більш доцільне в робочих машинах великої потужності в умовах неагресивного навколишнього середовища. Але остаточну відповідь на це питання може дати техніко-економічний аналіз.

Важливим чинником є також те, що синхронні двигуни, крім виконання своєї основної функції – приведення в рух робочої машини, виконують і другу, також дуже важливу функцію – регульованого засобу компенсації реактивної потужності. Тому під час вибору електропривода робочих машин на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах бажане досягнення оптимального балансу активної та реактивної потужностей, що можливо за правильного співвідношення потужностей асинхронних і синхронних двигунів.

Принципової відмінності в електричних схемах некерованого електропривода робочих машин, що працюють на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах, і тих, що були розглянуті в попередніх розділах, немає. Але певна частина таких робочих машин потребує керування швидкістю, причому часто в широкому діапазоні. Тому для більшості таких робочих машин використовують *керований за швидкістю електропривод* із двигунами як постійного, так і змінного струмів.

7.5.1 Електрична схема керування роботою електропривода центрифуги

Розглянемо функціональну електричну схему електропривода центрифуги, наведену на рисунку 7.17.

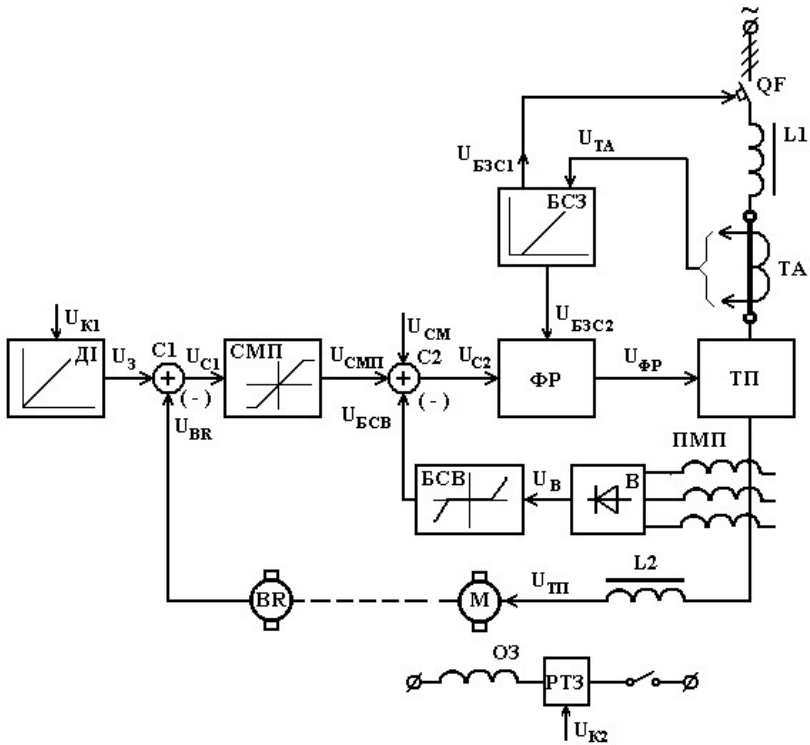


Рисунок 7.17 – Функціональна електрична схема електропривода центрифуги

Джерелом живлення є трифазна мережа змінного синусоїдального струму.

Силовим приймачем є двигун постійного струму М незалежного збудження.

Перелік і призначення складових частин наведено в таблиці 7.7

Таблиця 7.7. – Перелік і призначення складових частин електропривода центрифуги

Умовне позначення	Найменування	Призначення
QF	Вимикач автоматичний	Вмикання / вимикання, захист від надструмів
L1, L2	Дроселі	Згладжування пульсацій струму
TA	Трансформатор струму	Живлення блоку струмового захисту
BC3	Блок струмового захисту	Захист від перевантаження по струму та від струмів короткого замикання
BCB	Блок струмової відсічки	Підвищення швидкодії електроприводу
BR	Тахогенератор	Створення сигналу, пропорційного швидкості обертання
ДІ	Датчик інтенсивності	Забезпечення плавності зміни сигналу
C1, C2	Суматори	Порівняння вхідних сигналів і створення сигналу на виході
СПМ	Сумуючий магнітний підсилювач	Підсилення сигналу, що подається на вхід суматора C2
В	Випрямляч	Перетворення змінного струму на постійний для кіл керування
ТП	Тиристорний перетворювач	Перетворення змінного струму на постійний для силового кола
ПМП	Прохідний магнітний підсилювач	Підсилення сигналу, що подається на вхід випрямляча
ФР	Фазорегулятор	Керування роботою тиристорного перетворювача
РТЗ	Реверсивний тиристорний збудник	Здійснення гальмування противмиканням

Робота на час пуску.

Вмикають вимикач автоматичний QF. На вхід силової частини схеми подається трифазна напруга змінного синусоїдального струму. При цьому від системи програмного керування на вхід датчика інтенсивності ДІ поступає сигнал керування U_{K1} частотою обертання двигуна М. ДІ забезпечує плавність зміни сигналу завдання U_3 на його виході навіть у разі стрибкового характеру зміни сигналу U_{K1} .

У суматорі С1 сигнал завдання U_3 і сигнал U_{BR} від тахогенератора BR, пропорційного реальній швидкості обертання вала двигуна М, порівнюються. Вихідний сигнал ($U_{C1} = U_3 - U_{BR}$) подається на вхід сумуючого магнітного підсилювача СМП.

Оскільки за час пуску двигуна М момент опору робочої машини не залишається постійним навіть за лінійного закону зміни сигналу U_3 на виході ДІ, пусковий струм електродвигуна теж не буде постійним. Для підтримання постійного значення струму на весь час пуску доцільно, щоб пуск відбувався за постійної дії струмової відсічки. У зв'язку з цим сигнал U_3 повинен змінюватися дещо швидше, ніж сигнал U_{BR} , що є пропорційним реальній швидкості електродвигуна. Для підвищення швидкодії на суматор С2, крім сигналу $U_{СМП}$, подається сигнал $U_{БСВ}$ із виходу блока струмової відсічки БСВ та сигнал $U_{СМ}$ від системи програмного керування.

Із виходу суматора С2 сигнал U_{C2} подається на обмотку керування фазорегулятора ФР, що керує роботою тиристорного перетворювача ТП. ТП виконують за трифазною мостовою керованою схемою, неререверсивним. У ТП відбувається перетворення трифазної змінної напруги на постійну, якою й живиться двигун М.

Для вимірювання сили випрямленого струму служить прохідний магнітний підсилювач ПМП, із виходу якого через випрямляч В подається сигнал U_B на вхід БСВ.

Робота схеми в сталому режимі. Швидкість обертання вала електродвигуна залишається незмінною за умови незмінного значення сигналу завдання U_3 , або ж змінюється відповідно до графіку його зміни відповідно до програми. Для забезпечення необхідної точності підтримання швидкості двигуна, особливо за малих частотах обертання, наприклад, під час завантаження або вивантаження продукту в схемі передбачений зворотний зв'язок зі швидкістю за допомогою тахогенератора ВР.

Гальмування двигуна відбувається противмиканням, методом зміни полярності напруги живлення обмотки збудження ОЗ двигуна М. Для цього в схемі передбачений реверсивний тиристорний збудник РТЗ. Його роботою керує спеціальне реле, що своїми контактами замикає через резистори керуючий електрод з анодом тиристорів тієї чи іншої групи збудників. Керування збудником відбувається від системи програмного керування роботою центрифуги. У разі досягнення зупинки двигуна подача напруги на обмотку його якоря припиняється.

За допомогою РТЗ здійснюють і *реверс* обертання електродвигуна. Для цього також змінюють полярність на обмотках збудження ОЗ двигуна, якір якого розпочинає обертатися в іншому напрямку.

Захист від перевантаження по струму та від струмів короткого замикання забезпечує блок струмового захисту БСЗ. На його вхід подається сигнал $U_{ТА}$ від вторинних обмоток трансформаторів струму ТА, по первинних обмотках яких протікають реальні струми навантаження. У разі, коли значення струму перевищують допустимі, з'являються сигнал $U_{БЗС1}$, що зумовлює вимкнення вимикача автоматичного QF, та сигнал $U_{БЗС2}$, що подається на ФР і вимикає ТП.

Досвід експлуатації центрифуг із такою системою електропривода показав можливість зниження тривалості

циклу роботи та питомого споживання електроенергії майже на 40 %.

7.5.2 Електрична схема керування роботою електропривода цементного млина

Незважаючи на те, що електропривод із двигуном постійного струму має кращі можливості в керуванні швидкістю практично від нуля до номінальної швидкості й вище (див. розділ 4.3.4) у робочих машинах, що використовують на хімічних, газо- та нафтопереробних підприємствах, більш поширеними є електроприводи змінного струму. Як приклад розглянемо функціональну електричну схему синхронізованого асинхронного електропривода цементного млина (рис. 7.18).

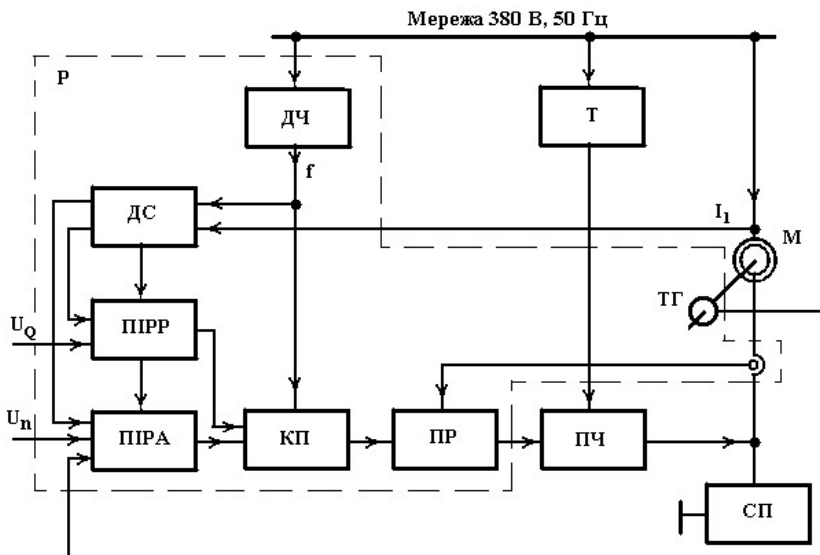


Рисунок 7.18 – Функціональна електрична схема електропривода цементного млина

Джерелом живлення є трифазна мережа змінного синусоїдального струму напругою 380 В і частотою 50 Гц.

Силовим приймачем є асинхронний двигун із фазним ротором М, обмотки ротора якого підключені до перетворювача частоти ПЧ, що зібраний за мостовою схемою та живиться від силового трансформатора Т.

Автоматичне керування роботою електропривода відбувається за допомогою регулятора Р, зібраного за схемою двокаскадного незалежного керування швидкістю робочої машини й реактивною потужністю. Регулятор Р складається з таких основних складових частин:

- пропорційно-інтегрального регулятора частоти обертання й пропорційного регулятора активної складової струму статора ПРА;
- пропорційно-інтегрального регулятора реактивної складової струму статора ППР;
- координатного перетворювача КП;
- пропорційного регулятора фазних струмів ротора ПР;
- тахогенератор ТГ;
- датчиків струму статора ДС;
- датчиків частоти напруги мережі живлення ДЧ;

Станція пуску СП забезпечує реостатний пуск електропривода методом ступеневої зміни величини додаткового опору, уведеного в коло обмотки ротора. У сталому режимі двигун працює за повністю виведеного додатного опору з кола обмотки ротора. У разі несправності в системі автоматичного керування або за необхідності перевірити роботу електропривода в некерованому режимі СП дозволяє перейти з керованого в некерований режим. СП дозволяє також дистанційно з пульта керування регулювати частоту обертання та величину реактивної потужності двигуна, виконувати сполучення із системою технологічної автоматики, а також

забезпечує керування частотою обертання в функції часу роботи млина.

На вхід ППРА надходить як сигнал завдання по швидкості U_n , так і сигнал від ДС, що враховує дійсне значення струму обмотки статора та частоти напруги мережі живлення, а також сигнал від тахогенератора ТГ, що враховує дійсне значення швидкості обертання ротора.

На вхід ППР надходять два сигнали: сигнал завдання по продуктивності U_Q та сигнал від датчика ДС, що враховує дійсне значення струму обмотки статора й частоти напруги мережі живлення.

У КП відбувається порівняння сигналів від ППРА та ППР, а в ПР до них додається ще й сигнал, пропорційний величині струму в обмотках ротора двигуна. З урахуванням усіх цих факторів створюється сигнал керування для ПЧ, що й забезпечує автоматичне керування роботою електропривода цементного млина. Регулятор забезпечує стійку роботу електропривода в усіх режимах роботи, високу точність підтримання заданої швидкості обертання й величини споживаної реактивної потужності.

Контрольні запитання та завдання

1. Які вимоги ставлять до системи електропостачання хімічних, газо- та нафтопереробних підприємств?
2. За якими параметрами визначають клас вибухо- та пожежонебезпеки зон роботи електропривода?
3. Які вимоги ставлять до електрообладнання хімічних, газо- та нафтопереробних підприємств?
4. Які види електродвигунів використовують у приміщеннях із хімічно активним середовищем?
5. Які види електродвигунів використовують у вибухонебезпечних приміщеннях?

6. Які види електродвигунів використовують у пожежонебезпечних приміщеннях?

7. У чому полягають особливості вибору електричних апаратів і приладів для хімічних, газо- та нафтопереробних підприємств?

8. Назвіть основні складові частини світильника у вибухозахищеному виконанні.

9. Які параметри враховують під час роботи електропривода центрифуги, виконаного згідно з електричною схемою на рисунку 7.17)?

10. Як відбуваються гальмування та захист від аварійних режимів електропривода центрифуги (рис. 7.17)?

11. Назвіть основні складові частини регулятора асинхронного електропривода цементного млина (рис. 7.18). Які функції вони виконують?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматичні вимикачі [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://sitemasters.com.ua/elektroobladnannja/markuvannja-avtomatichnih-vimikachiv-klas/>.
2. Автомати диференційні [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://res.ua/diferenciyniy-avtomat-iek-ad12-2r-v2530ma.html>.
3. Акимов Л. В. Автоматизированный электропривод: элементы, теория, системы управления. 3000 вопросов для самостоятельного обучения и контроля знаний / Л. В. Акимов, П. А. Качанов, А. Н. Черенов. – Харьков : Издательство «Підручник НТУУ «ХПІ», 2011. – 532 с.
4. Асинхронные двигатели серий 4А, 4АМ. Каталог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://aip.com.ua/elektrodvigateli-4a-i-4am/>.
5. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, А. Е. Соболевская. – Москва : Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
6. Асинхронные двигатели с фазным ротором [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://electroandi.ru/elektricheskie-mashiny/asdvig/asinkhronnyj-dvigatel-s-faznym-rotorom.html>.
7. Ванін В. В. Оформлення конструкторської документації : навчальний посібник / В. В. Ванін, А. В. Бліок, Г. О. Гнітецька, – Київ: Каравела, 2003. – 160 с.
8. Василега П. О. Електропостачання : підручник / П. О. Василега. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 525 с.
9. Василега П. О. Електропривод робочих машин : навчальний посібник / П. О. Василега, Д. В. Муріков. – Суми : ВТД «Університетська книга», 2006. – 228 с.

10. Василега П. О. Електротехнологічні установки : навчальний посібник / П. О. Василега. – Суми : Видавництво СумДУ, 2010. – 548 с.
11. Выключатели конечные [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.elektro.ru/articles/kontsevyevyglyuchateli-konstruktsiya-vidy-sfera-primeneniya/>.
12. Вимикачі пакетні [Електронний ресурс]. – Режим доступу <https://prom.ua/ua/Paketnye-vyglyuchateli>.
13. Взрывозащищенное электрооборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.velan.ru>.
14. Видмиш А. А. Основы электропривода. Теорія та практика. Частина 1 : навчальний посібник / А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. – Вінниця : ВНАУ, 2020. – 387 с.
15. ДСТУ 2313-93. Электроприводы. Терміни та визначення.
16. ДСТУ 2848-94. Апарати електричні комутаційні. Основні поняття. Терміни та визначення.
17. ДСТУ ІЕС 60898-1:2005. Устаткування електричне допоміжне. Автоматичні вимикачі для захисту від надструмів побутового та аналогічного застосування.
18. ДСТУ EN 60034-1:2016. Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики.
19. ДСТУ ІЕС 60529:2019 Ступені захисту, забезпечувані корпусами (ІР-код).
20. ДСТУ 2267-93. Вироби електротехнічні. Терміни та визначення.
21. ДСТУ 7113:2009 (ІСЕ 60079-0:2007, MOD) Вибухонебезпечні середовища. Частина 0. Електрообладнання. Загальні вимоги.
22. Електроконтактні манометри [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://products/manometry-vakuummetry-manovakuummetry-elektrokontaktnye-mt-4s/>.

23. Електродний датчик контролю рівня рідини [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://electrokom.kiev.ua/ua/product/datchik-rele-urovnya-ros>.
24. Запобіжники плавкі [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://energohist.com.ua/articles/131>.
25. Зеленев А. Б. Теорія електропривода. Методика проектування електроприводів : Підручник / А. Б. Зеленев. – Луганськ : Видавництво «Ноулідж», 2010. – 670 с.
26. Каталог. Двигатели постоянного тока. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://fairway.com.ua/ua/elektrodivigateli/elektrodivigateli-postoyannogo-toka>.
27. Клименко Б. В. Электричні апарати. Електро-механічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник / Б. В. Клименко – Харків: «Точка», 2012. – 340 с.
28. Контактори постійного струму. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://energomerega.com.ua/p195595621-kontaktor-40a-24v.html>.
29. Контактори змінного струму [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://axiomplus.com.ua/kontactory/>.
30. Коцюбинский В. С. Выбор мощности электродвигателя общепромышленных механизмов / В. С. Коцюбинский. – Алчевск. 2002. – 150 с.
31. Лавріненко Ю. М. Основи електропривода : підручник / Ю. М. Лавріненко, П. І. Савченко, О. Ю. Синявський, Д. Г. Войтюк, В. В. Савченко, І. М. Голодний. – Київ : Видавництво Ліра-К, 2017. – 524 с.
32. Микропереключатели [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://asenergi.com/catalog/mikropereklyuchateli/>.

33. Овсянников Е. М. Электрический привод : учебник / Е. М. Овсянников. – Москва : ФОРУМ, 2011. – 224 с.

34. Островерхов М. Я. Електричні машини та електропривод: Розрахункова робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Автоматизація хіміко-технологічних процесів і виробництв» / М. Я. Островерхов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 0,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 76 с.

35. Павленко Т. П. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / Т. П. Павленко, О. В. Донець, О. М. Петренко – Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 132 с.

36. Петухов С. В. Электропривод : учебное пособие / С. В. Петухов, М. В. Кришьянис. – Архангельск : С(А)ФУ, 2015. – 303 с.

37. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Згідно з наказом Міністерства палива та енергетики України від 25 липня 2006 року № 258. – Київ, 2006. – 181 с.

38. Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – 5-те видання, перероблене й доповнене. – Київ : Форт, 2014. – 793 с.

39. Пускачі магнітні [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://energomerega.com.ua/a168925-magnitnye-puskateli-tehnicheskie.html>.

40. Реле времени [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.110volt.ru/rele_vremeni/v164.

41. Реле тепловые РТЛ-1, РТЛ-2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://asenergi.com/catalog/rele/rtl.html>.
42. Реле тока РТ-40 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://rza.org.ua/rele/read/Rele-toka--RT-40>.
43. Реле напряжения Adecs [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://prilavok.ua/view_post.php?id=20051.
44. Реле проміжне [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.avtomats.com.ua/2908-rele_rek.html.
45. Реле тиску [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://220volt.com.ua/rele-davleniya-aquatica-sk9c-779531/>.
46. Реле потока [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://teplopro.com.ua/avtomatika-i-regulyatory/rele-potoka-vody>.
47. Рубильники [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://electricalschool.info/spravochnik/apparaty/177-kommutacionnye-apparaty-ruchnogo.html>.
48. Світильники вибухозахищені [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://vatra.ua/ukr/industrial-lighting>.
49. Синхронные двигатели. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.электродвигатель.net/catalog.php>.
50. Тумблери [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://prom.ua/ua/Tumblyery>.
51. Яременко О. В. Ограничивающие гидродинамические муфты / О. В. Яременко. – Москва : Машиностроение, 1970. – 224 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)
Буквені позначення найбільш поширених видів елементів
на принципових електричних схемах
згідно з ГОСТ 2.710.81(2001) ЕСКД

<i>Перша літера позначення (обов'язкова)</i>	<i>Група видів елементів</i>	<i>Повне позначення</i>	<i>Види елементів</i>
1	2	3	4
А	Пристрій	АА	Регулятор струму
		АК	Блок реле
		АSK	Пристрій АПВ
В	Перетворювачі неелектричних величин на електричні (крім генераторів і джерел живлення) або навпаки	ВА	Гучномовець
		ВF	Телефон
		ВК	Тепловий датчик
		ВL	Фотоелемент
		ВМ	Мікрофон
		ВS	Звукознімач
С	Конденсатори	СВ	Силова батарея конденсаторів
		СG	Блок конденсаторів зарядний
D	Інтегральні схеми, мікросбірки	DA	Інтегральна схема аналогова
		DD	Інтегральна схема цифрова, логічний елемент
Е	Елементи різні	ЕК	Нагрівальний елемент
		EL	Лампа освітлювальна
F	Розрядники, запобіжники, пристрої захисту	FA	Дискретний елемент захисту по струму миттєвої дії
		FP	Те саме, але інерційної дії
		FU	Запобіжник плавкий
		FV	Розрядник

Продовження додатка А

1	2	3	4
G	Генератори, джерела живлення	GB	Батарея акумуляторів
		GC	Синхронний компенсатор
		GE	Збудник генератора
H	Пристрої індукційні та сигнальні	HA	Прилад звукової сигналізації
		HG	Індикатор символьний
		HL	Прилад світлової сигналізації
		HLA	Табло сигнальне
		HLG	Лампа сигнальна з зеленою лінзою
		HLR	Лампа сигнальна з червоною лінзою
		HLW	Лампа сигнальна з білою лінзою
		HV	Індикатори іонні й напівпровідникові
K	Реле, контактори, пускарі	KA	Реле струму
		KH	Реле вказівне
		KK	Реле електротеплове
		KM	Контактор, магнітний пускач
		KT	Реле часу
		KV	Реле напруги
		KCC	Реле команди ввімкнення
		KCT	Реле команди вимкнення
		KL	Реле проміжне
		KQ	Реле фіксації положення вимикача
		KQC	Реле фіксації ввімкненого положення

Продовження додатка А

1	2	3	4
		KQT	Реле фіксації вимкненого положення
		KQQ	Реле фіксації команди на ввімкнення або вимкнення вимикача
		KQS	Реле фіксації положення з'єднувача
L	Котушки індуктивності, дроселі	LL	Дросель люмінесцентного освітлення
		LR	Реактор
		LG	Обмотка збудження генератора
		LE	Обмотка збудження збудника
		LM	Обмотка збудження електродвигуна
P	Прилади, вимірювальне обладнання	PA	Амперметр
		PF	Частотомір
		PI	Лічильник активної енергії
		PK	Лічильник реактивної енергії
		PR	Омметр
		PT	Годинник, вимірник часу
		PS	Прилад реєстрації
		PV	Вольтметр
		PW	Ватметр
		PC	Лічильник імпульсів
PG	Осцилограф		

Продовження додатка А

1	2	3	4
Q	Вимикачі й роз'єднувачі в силових ланцюгах (електропостачання, живлення обладнання та ін.)	QF	Вимикач автоматичний
		QK	Короткозамикач
		QS	Роз'єднувач
		QR	Віддільник
		QW	Вимикач навантаження
		QSG	Роз'єднувач- заземлювач
R	Резистори	RK	Терморезистор
		RP	Потенціометр
		RS	Шунт вимірювальний
		RU	Варистор
		RR	Реостат
S	Пристрої комунікації в ланцюгах керування й вимірювальних приладах <i>Примітка:</i> позначення застосовують для апаратів, що не мають контактів у силових ланцюгах	SA	Вимикач або перемикач
		SF	Вимикач автоматичний
		SB	Вимикач кнопковий
		SBC	Те саме, на ввімкнення
		SBT	Те саме, на вимкнення
		SL	Вимикач, що спрацьовує від рівня
		SP	Вимикач, що спрацьовує від тиску
		SQ	Вимикач, що спрацьовує від положення (шляховий)
		SR	Вимикач, що спрацьовує від частоти обертання
SK	Вимикач, що спрацьовує від температури		

Продовження додатка А

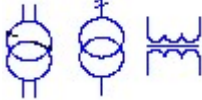

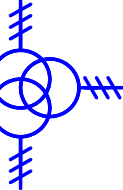

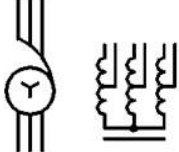

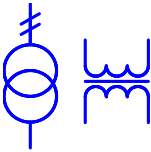

1	2	3	4
Т	Трансформатори, автотрансформатори	ТА	Трансформатор струму
		ТS	Електромагнітний стабілізатор
		ТV	Трансформатор напруги
		ТL	Проміжний трансформатор
U	Перетворювачі електричних величин на електричні, пристрої зв'язку (крім трансформаторів)	UB	Модулятор
		UR	Демодулятор
		UD UZ	Перетворювачі: – випрямний; – інвертор
		UG	Блок живлення
		UF	Перетворювач частоти
V	Прилади електровакуумні напівпровідникові	VD	Діод, стабілітрон
		VL	Прилад електрозварювальний
		VT	Транзистор
		VS	Тиристор
W	Лінії й елементи СВЧ, антени, лінії електропередавання	–	–
X	З'єднання контактні	XA	Струмознімач, контакт ковзний
		XP	Штир
		XS	Гніздо
		XW	З'єднувач високочастотний
		XT	З'єднання розбірне
		XB	Накладка, перемичка контактна
		XG	Іспитовий затискач
		XN	З'єднання нерозбірне

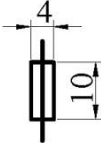
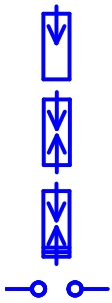
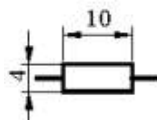
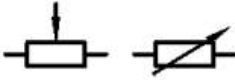
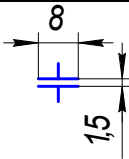

Продовження додатка А

1	2	3	4
У	Пристрої механічні з електромагнітним приводом	УА	Електромагніт
		УАВ	Замок електромагнітного блокування
		УАС	Електромагніт ввімкнення
		УАТ	Електромагніт вимкнення
		УВ	Гальмо з електромагнітним приводом
		УС	Муфта з електромагнітним приводом
		УН	Електромагнітний патрон або плита
Z	Пристрої прикінцеві	ZL	Обмежник
		ZQ	Фільтр кварцовий
		ZA	Фільтр струму
		ZV	Фільтр напруги


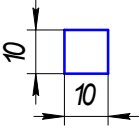
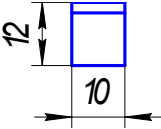
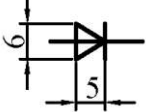


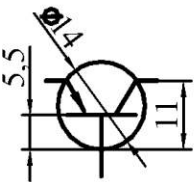
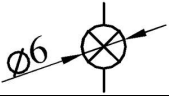
Додаток Б
(обов'язковий)
Умовні графічні позначення

<i>№ пор.</i>	<i>Назва</i>	<i>Умовне графічне позначення</i>	<i>Позначення згідно з ГОСТ 2.710-81</i>
1	2	3	4
Машини електричні. ГОСТ 2.722-68			
1	Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором		M
2	Синхронний двигун		M
3	Асинхронний двигун із фазним ротором (спрощене позначення)		M
4	Асинхронний двигун із фазним ротором (розгорнуте позначення)		M
5	Машина постійного струму з послідовним збудженням		M, G
6	Машина постійного струму з паралельним збудженням		M, G
7	Машина постійного струму зі змішаним збудженням		M, G

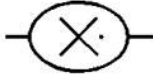
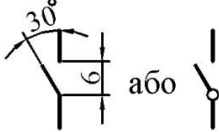
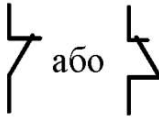
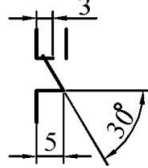


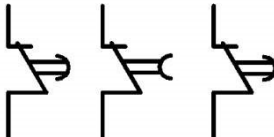
Продовження додатка Б			
1	2	3	4
Трансформатори, автотрансформатори. ГОСТ 2.723-68			
8	Трансформатор однофазний двообмотковий		T
9	Трансформатор трифазний двообмотковий		T
10	Трансформатор трифазний триобмотковий		T
11	Автотрансформатор однофазний		T
12	Автотрансформатор трифазний		T
13	Трансформатор струму з однією вторинною обмоткою		TA
14	Трансформатор напруги з однією вторинною обмоткою		TV
15	Реактор		LR

Продовження додатка Б			
1	2	3	4
Розрядники, запобіжники. ГОСТ 2.727-68			
16	Запобіжник плавкий		FU
17	Розрядники: а) загальне позначення; б) трубчатий; в) вентильний і магнітовентильний; г) шаровий		FV
Резистори, конденсатори. ГОСТ 2.728-74			
18	Резистор постійний		R
19	Резистор змінний		R
20	Конденсатор		C
21	Конденсатор змінної ємності		C





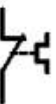
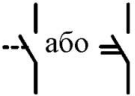
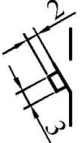
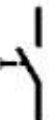
Продовження додатка Б

1	2	3	4
Прибори електровимірювальні. ГОСТ 2.729-68			
22	Прилад електровимірювальний, що показує		P
23	Прилад електровимірювальний, що реєструє		P
24	Прилад електровимірювальний, що інтегрує (наприклад, лічильник електричної енергії)		PI – активної, PK – реактивної енергії
Прибори напівпровідникові. ГОСТ 2.730-73			
25	Діод		VD
26	Стабілітрон		VD
27	Тиристор		VS
28	Транзистор (біполярний р-n-р типу)		VT
Джерела світла. ГОСТ 2.732-68			
29	Лампи розжарювання освітлювальна й сигнальна		EL, HL

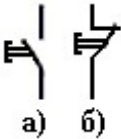

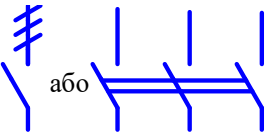






Продовження додатка Б

1	2	3	4
30	Лампа газорозрядна освітлювальна з двома виводами		EL
Пристрої комутаційні й контактні з'єднання. ГОСТ 2.755-87			
31	Контакт замикальний		S
32	Контакт розмикальний		S
33	Контакт перемикальний		S
34	Контакт перемикальний із середнім положенням		S
35	Контакти замикальні, що функціонують з уповільненням під час спрацювання, повернення та під час спрацювання й повернення		S
36	Контакти розмикальні, що функціонують з уповільненням під час повернення, спрацювання та під час спрацювання й повернення		S



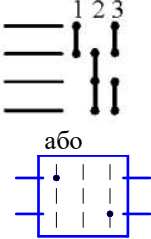
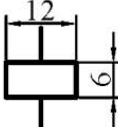




Продовження додатка Б

1	2	3	4
37	Контакт замикальний із самоповерненням		S
38	Контакт замикальний без самоповернення		S
39	Контакт замикальний силового ланцюга		S
40	Контакт замикальний із пристроєм дугогасіння		S
41	Контакт електротеплового реле		SK
42	Контакт із механічним зв'язком		SP
43	Контакт вимикача з автоматичним поверненням у разі перевантаження		SF
44	Контакт вимикача шляхового (кінцевого)		SQ

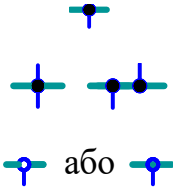



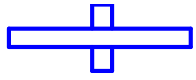

Продовження додатка Б

1	2	3	4
45	Контакти кнопоків: а) замикальний; б) розмикальний		SB
46	Вимикач однополюсний		Q
47	Вимикач триполюсний		Q
48	Вимикач триполюсний з автоматичним поверненням		QF
49	Вимикач високої напруги		Q
50	Роз'єднувач триполюсний		QS
51	Вимикач навантаження триполюсний		QW
52	Короткозамикач		QK
53	Віддільник		QR

Продовження додатка Б

1	2	3	4
54	Вимикач диференційний		Q
55	Вимикач з автоматичним поверненням (автомат) диференційний		QF
56	Багатопозиційний перемикач		SA
Сприймальна частина електромеханічних пристроїв. ГОСТ 2.756-76			
57	Котушка електромеханічного пристрою (реле, контактора, пускача) однофазного струму		K
58	Котушка електромеханічного пристрою трифазного струму		K
59	Сприймальна частина електротеплового реле		KK
Електричні зв'язки, проводи, кабелі, шини. ГОСТ 2.751-83			
60	Лінія електричного зв'язку. Провід, кабель, шина		
61	Лінія групового зв'язку		

Продовження додатка Б

1	2	3	4
62	<p>Лінія електричного зв'язку з відгалуженнями:</p> <p>а) одним;</p> <p>б) двома</p> <p><i>Примітка:</i> під час виконання схем автоматизованим способом дозволено точки відгалуження не зачорнювати</p>		
63	<p>В однолінійних позначеннях елементів або пристроїв можна використовувати позначення:</p> <ul style="list-style-type: none"> – групи з двох ліній; – групи з трьох ліній; – групи з чотирьох ліній 		
64	Шина		
65	Відгалуження від шини		
66	Шини, що графічно перетинаються, але електрично не пов'язані		
67	Відводи (відпайки) від шини		

Примітка до пп. 64–67: зображення шин за допомогою двох ліній використовують тоді, коли необхідно графічно відділити їх від зображення ліній електричного зв'язку (проводів, кабелів).

Додаток В
(обов'язковий)

Технічні дані асинхронних двигунів
із короткозамкненим ротором серії 4А

Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _{max}	k _п
Синхронна частота обертання 3 000 об/хв					
4AA50A2Y3	0,09	2 742	60	2,2	2
4AA50B2Y3	0,12	2 709	63	2,2	2
4AA56A2Y3	0,18	2 760	66	2,2	2
4AA56B2Y3	0,25	2 760	68	2,2	2
4A63A2Y3	0,37	2 751	70	2,2	2
4A63B2Y3	0,55	2 745	73	2,2	2
4A71A2Y3	0,75	2 841	77	2,2	2
4A71B2Y3	1,1	2 811	77,5	2,2	2
4A80A2Y3	1,5	2 850	81	2,2	2
4A80B2Y3	2,2	2 850	83	2,2	2
4A90L2Y3	3	2 838	84,5	2,2	2
4A100S2E3	4	2 880	86,5	2,2	2
4A100L2E3	5,5	2 880	87,5	2,2	2
4A112M2Y3	7,5	2 922	87,5	2,2	2
4A132M2Y3	11	2 907	88	2,2	1,6
4A160S2Y3	15	2 931	88	2,2	1,4
4A160M2Y3	18,5	2 931	88,5	2,2	1,4
4A180S2Y3	22	2 940	88,5	2,2	1,4
4A180M2Y3	30	2 943	90,5	2,2	1,4
4A200M2Y3	37	2 943	90	2,2	1,4
4A200L2Y3	45	2 946	91	2,2	1,4
4A225M2Y3	55	2 937	91	2,2	1,2
4A250S2Y3	75	2 958	91	2,2	1,2
4A250M2Y3	90	2 958	92	2,2	1,2
4A280S2Y3	110	2 940	91	2,2	1,2
4A280M2Y3	132	2 940	91,5	2,2	1,2
4A315S2Y3	160	2 943	92	1,9	1
4A315M2Y3	200	2 943	92,5	1,9	1
4A355S2Y3	250	2 943	92,5	1,9	1
4A355M2Y3	315	2 940	93	1,9	1
Синхронна частота обертання 1 500 об/хв					
4AA50A4Y3	0,06	1 379	50	2,2	2
4AA50B4Y3	0,09	1371	55	2,2	2

Додатки

Продовження додатка В					
Типорозмір двигуна	Р, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _{max}	k _п
4AA56A4Y3	0,12	1 380	63	2,2	2
4AA56B4Y3	0,18	1 370	64	2,2	2
4AA63A4Y3	0,25	1 380	68	2,2	2
4AA63B4Y3	0,37	1 365	68	2,2	2
4A71A4Y3	0,55	1 370	70,5	2,2	2
4A71B4Y3	0,75	1 370	72	2,2	2
4A80A4Y3	1,1	1 400	75	2,2	2
4A80B4Y3	1,5	1 400	77	2,2	2
4A90L4Y3	2,2	1 419	80	2,2	2
4A100S4Y3	3	1 421	82	2,2	2
4A100L4Y3	4	1 421	84	2,2	2
4A112M4Y3	5,5	1 425	85,5	2,2	2
4A132S4Y3	7,5	1 455	87,5	2,2	2
4A132M4Y3	11	1 458	87,5	2,2	2
4A160S4Y3	15	1 460	89	2,2	1,4
4A160M4Y3	18,5	1 460	90	2,2	1,4
4A180S4Y3	22	1 470	90	2,2	1,4
4A180M4Y3	30	1 470	91	2,2	1,4
4A200M4Y3	37	1 475	91	2,2	1,4
4A200L4Y3	45	1 473	92	2,2	1,4
4A225M4Y3	55	1 470	92,5	2,2	1,2
4A250S4Y3	75	1 479	93	2,2	1,2
4A250M4Y3	90	1 481	93	2,2	1,2
4A280S4Y3	110	1 466	92,5	2	1,2
4A280M4Y3	132	1 466	93	2	1,2
4A315S4Y3	160	1 470	93,5	1,9	1
4A315M4Y3	200	1 475	94	1,9	1
4A355S4Y3	250	1 475	94,5	1,9	1
4A355M4Y3	315	1 475	94,5	1,9	1
Синхронна частота обертання 1 000 об/хв					
4AA63A6Y3	0,18	885	56	2,2	2
4AA63B6Y3	0,25	892	59	2,2	2
4A71A6Y3	0,37	920	64,5	2,2	2
4A71B6Y3	0,55	920	67,5	2,2	2
4A80A6Y3	0,75	920	69	2,2	2
4A80B6Y3	1,1	920	74	2,2	2
4A90L6Y3	1,5	936	75	2,2	2

Продовження додатка В					
Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _{max}	k _п
4A100L6Y3	2,2	949	81	2,2	2
4A112MA6Y3	3	945	81	2,2	2
4A112MB6Y3	4	949	82	2,2	2
4A132S6Y3	5,5	959	85	2,2	2
4A132M6Y3	7,5	968	85,5	2,2	2
4A160S6Y3	11	970	86	2	1,2
4A160M6Y3	15	970	87,5	2	1,2
4A180M6Y3	18,5	973	88	2	1,2
4A200M6Y3	22	975	90	2	1,2
4A200L6Y3	30	977	90,5	2	1,2
4A225M6Y3	37	980	91	2	1,2
4A250S6Y3	45	985	91,5	2	1,2
4A250M6Y3	55	985	92	2	1,2
4A280S6Y3	75	980	92	1,9	1,2
4A280M6Y3	90	980	92,5	1,9	1,2
4A315S6Y3	110	980	93	1,9	1
4A315M6Y3	132	980	93,5	1,9	1
4A355S6Y3	160	982	93,5	1,9	1
4A355M6Y3	200	982	94	1,9	1
Синхронна частота обертання 750 об/хв					
4A71B8Y3	0,25	680	56	1,7	1,6
4A80A8Y3	0,37	675	61,5	1,7	1,6
4A80B8Y3	0,55	675	64	1,7	1,6
4A90LA8Y3	0,75	705	68	1,7	1,6
4A90LB8Y3	1,1	698	70	1,7	1,6
4A100L8Y3	1,5	698	74	1,7	1,6
4A112MA8Y3	2,2	705	76,5	2,2	1,8
4A112MB8Y3	3	701	79	2,2	1,8
4A132S8Y3	4	719	83	2,2	1,8
4A132M8Y3	5,5	716	83	2,2	1,8
4A160S8Y3	7,5	730	86	2,2	1,4
4A160M8Y3	11	730	87	2,2	1,4
4A180M8Y3	15	731	87	2	1,2
4A200M8Y3	18,5	731	88,5	2,2	1,2
4A200L8Y3	22	730	88,5	2	1,2
4A225M8Y3	30	735	90	2	1,2
4A250S8Y3	37	738	90	2	1,2

Додатки

Продовження додатка В					
Типорозмір двигуна	Р, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _{max}	k _п
4A250M8Y3	45	740	91,5	2	1,2
4A280S8Y3	55	734	92	1,9	1,2
4A280M8Y3	75	734	92,5	1,9	1,2
4A315S8Y3	90	735	93	1,9	1
4A315M8Y3	110	735	93	1,9	1
4A355S8Y3	132	737	93,5	1,9	1
4A355M8Y3	160	737	93,5	1,9	1
Синхронна частота обертання 600 об/хв					
4A250S10Y3	30	589	88	1,9	1,2
4A250M10Y3	37	589	89	1,9	1,2
4A280S10Y3	37	588	91	1,8	1
4A280M10Y3	45	588	91,5	1,8	1
4A315S10Y3	55	588	92	1,8	1
4A315M10Y3	75	588	92	1,8	1
4A355S10Y3	90	588	92,5	1,8	1
4A355M10Y3	110	588	93	1,8	1
Синхронна частота обертання 500 об/хв					
4A315S12Y3	45	488	90,5	1,8	1
4A315M12Y3	55	488	91	1,8	1
4A355S12Y3	75	490	91,5	1,8	1
4A355M12Y3	90	490	92	1,8	1

**Додаток Г
(обов'язковий)**

Технічні данні двигунів серії 4А

із підвищеним ковзанням для режиму S3 і ТВ = 40 %

Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	к _п	к _{max}
Синхронна частота обертання 3000 об/хв					
4AC71A2Y3	1	2 700	72	2	2,2
4AC71B2Y3	1,2	2 700	72	2	2,2
4AC80A2Y3	1,9	2 745	75	2	2,2
4AC80B2Y3	2,5	2 745	76	2	2,2
4AC90L2Y3	3,5	2 775	80	2	2,2
4AC100S2Y3	4,8	2 805	82	2	2,2
4AC100L2Y3	6,3	2 805	82	2	2,2
4AC112M2Y3	8	2 850	84	2	2,4
4AC132M2Y3	11	2 840	84	2	2,4
Синхронна частота обертання 1 500 об/хв					
4AC71A4Y3	0,6	1 350	68	2	2,2
4AC71B4Y3	0,8	1 350	68,5	2	2,2
4AC80A4Y3	1,3	1 358	68,5	2	2,2
4AC80B4Y3	1,7	1 335	70	2	2,2
4AC90L4Y3	2,4	1 360	76	2	2,2
4AC100S4Y3	3,2	1 395	76,5	2	2,2
4AC100L4Y3	4,25	1 395	78	2	2,2
4AC112M4Y3	5,6	1 395	79	2	2,2
4AC132S4Y3	8,5	1 395	82,5	2,6	2,8
4AC132M4Y3	11,8	1 410	84	2	2,2
4AC160S4Y3	17	1 425	84,5	2	2,2
4AC160M4Y3	20	1 432	87	2	2,2
4AC180S4Y3	21	1 418	86	2	2,2
4AC180M4Y3	26,5	1 440	88,5	2	2,2
4AC200M4Y3	31,5	1 410	87,5	2	2,2
4AC200L4Y3	40	1 410	89	2	2,2
4AC225M4Y3	50	1 395	87,5	2	2,2
4AC250S4Y3	56	1 380	87,5	2	2,2
4AC250M4Y3	63	1 365	87,0	2	2,2
Синхронна частота обертання 1 000 об/хв					
4AC71A6Y3	0,4	920	62,5	2	2,1
4AC71B6Y3	0,63	920	65	2	2,1
4AC80A6Y3	0,8	860	61	2	2,1

Додатки

Продовження додатка Г					
Типорозмір двигуна	Р, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _п	k _{max}
4AC80B6Y3	1,2	860	66,5	2	2,1
4AC90L6Y3	1,7	900	71	1,9	2,1
4AC100L6Y3	2,6	920	75	1,9	2,1
4AC112MA6Y3	3,2	910	72	1,9	2,1
4AC112MB6Y3	4,2	910	75	1,9	2,1
4AC132S6Y3	6,3	940	79	1,9	2,1
4AC132M6Y3	8,5	940	80	1,9	2,1
4AC160S6Y3	12	940	82,5	1,9	2,1
4AC160M6Y3	16	940	84	1,9	2,1
4AC180M6Y3	19	940	84,5	1,9	2,1
4AC200M6Y3	22	910	83,5	1,9	2,1
4AC200L6Y3	28	920	85,5	1,9	2,1
4AC225M6Y3	33,5	880	81	1,9	2,1
4AC250S6Y3	40	950	89	1,9	2,1
4AC250M6Y3	45	950	86,5	1,9	2,1
Синхронна частота обертання 750 об/хв					
4AC71B8Y3	0,3	670	50	1,9	2
4AC80A8Y3	0,45	660	53,5	1,9	2
4AC80B8Y3	0,6	660	58	1,9	2
4AC90LA8Y3	0,9	660	61	1,8	2
4AC90LB8Y3	1,2	660	65	1,8	2
4AC100L8Y3	1,6	675	69	1,8	2
4AC112MA8Y3	2,2	670	68	1,8	2
4AC112MB8Y3	3,2	670	72	1,8	2
4AC132S8Y3	4,5	690	76	1,8	2
4AC132M8Y3	6	690	77	1,8	2
4AC160S8Y3	9	690	81,5	1,8	2
4AC160M8Y3	12,5	688	82,5	1,8	2
4AC180M8Y3	15	700	83,5	1,8	2
4AC200M8Y3	20	690	83,5	1,8	2
4AC225M8Y3	26,5	675	83	1,8	2
4AC250S8Y3	36	694	85	1,8	2

**Доповнення до додатка Г
(обов'язкове)**

**Значення потужності, кВт, двигунів серії 4AP
із підвищеним ковзанням у режимі S3 і різних ТВ %**

Типо- розмір двигуна	Синхронна частота обертання, об/мин															
	3000				1500				1000				750			
	Тривалість вмикання ТВ %															
	15	25	60	100	15	25	60	100	15	25	60	100	15	25	60	100
4AC71A	1,2	1,06	0,95	0,85	0,8	0,65	0,6	0,6	0,45	0,4	0,4	0,4	-	-	-	-
4AC71B	1,5	1,3	1,1	0,9	1,1	0,9	0,8	0,7	0,8	0,65	0,65	0,5	0,3	0,3	0,3	0,2
4AC80A	2,4	1,9	1,7	1,5	1,6	1,3	1,1	0,95	1	0,9	0,7	0,5	0,5	0,5	0,45	0,35
4AC80B	3,2	2,7	2,2	2	2,1	1,7	1,5	1,3	1,5	1,3	1,1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
4AC90LA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	0,9	0,8	0,7
4AC90LB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,4	1,2	1	0,8
4AC90L	4,6	4	3,2	2,7	3,1	2,4	2,2	1,9	2,2	1,8	1,3	1,1	-	-	-	-
4AC100S	5,5	5	4,2	3,6	4	3,7	2,8	2,3	-	-	-	-	-	-	-	-
4AC100L	8	7	5,8	5,3	5,5	5	3,8	3,3	3,1	2,9	2,2	1,8	1,8	1,6	1,5	1,2
4AC112MA	-	-	-	-	-	-	-	-	4,5	3,8	2,8	2,5	3	2,6	1,9	1,5
4AC112MB	11	9,5	7,1	6	8	6,7	5	4,2	5,6	5	3,8	3,2	4,2	3,6	2,5	1,9
4AC132S	-	-	-	-	11,8	9,5	7,5	7,1	8,5	7,5	6	4,5	6	5	3,6	2,6
4AC132M	17	14	11	10	16	14	10,5	9	И	10	7,5	6,3	8,5	7,1	5	3,6
4AC160S	-	-	-	-	22	19	15	13	16	14	11	10	11	10	8	7
4AC160M	-	-	-	-	25	23	18,5	17	21	19	15	13	16	14	11	10
4AC180S	-	-	-	-	26,5	24	20	19	-	-	-	-	-	-	-	-
4AC180M	-	-	-	-	32	30	25	24	22	20	17	16	19	17	14	13
4AC200M	-	-	-	-	42	35	28	26	28	25	20	18	26,5	24	19	16
4AC200L	-	-	-	-	50	47,5	37,5	35	40	33	25	23	-	-	-	-
4AC225M	-	-	-	-	63	55	45	40	40	35	28	25	33,5	30	24	22
4AC250S	-	-	-	-	75	63	53	50	56	45	36	33,5	45	45	30	26,5
4AC250M	-	-	-	-	80	71	60	56	60	53	40	36	-	-	-	-

Додаток Д
(обов'язковий)
Технічні дані багатшвидкісних двигунів серії 4А

Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _п	k _{max}
Двошвидкісні двигуни					
Синхронні частоти обертання 1 500/3 000 об/хв					
4A56A4/2Y3	0,1	1 400	45	1,8	2,2
	0,14	2 800	50	1,5	2,2
4A56B4/2Y3	0,12	1 330	49	1,6	2,2
	0,18	2 660	57	1,2	2,2
4A63A4/2Y3	0,19	1 448	55	1,6	2,2
	1,265	2 880	61	1,2	2,2
4A63B4/2Y3	0,224	1 448	57	1,5	1,9
	0,37	2 880	61	1,1	1,8
4A71A4/2Y3	0,45	1 420	64	1,5	1,8
	0,75	2 880	67	1,2	1,8
4A71B4/2Y3	0,63	1 433	67	1,3	1,9
	0,95	2 865	69	1,3	1,9
4A80A4/2Y3	1,1	1 420	73	1,7	2
	1,5	2 780	72	1,5	1,8
4A90LA4/2Y3	1,5	1 420	76	1,7	2,1
	2	2 780	74	1,7	1,9
4A90LB4/2Y3	2	1 420	77	1,7	2,2
	2,5	2 850	77	1,8	2,1
4A100S4/2Y3	2,65	1 440	80	1,8	2,2
	3,3	2 820	77	1,8	2,2
4A100L4/2Y3	3,2	1 440	82	1,8	2,2
	4,2	2 850	80	1,8	2,2
4A112M4/2Y3	4,2	1 450	82	1,3	1,8
	5	2 901	77	1,1	1,8
4A132S4/2Y3	6	1 460	84	1,3	1,8
	6,7	2 910	78	1,1	1,8
4A132M4/2Y3	8,5	1 460	86	1,3	1,8
	9,5	2 910	81	1,1	1,8
4A160S4/2Y3	11	1 460	85	1,5	2,1
	14	2 940	83	1,2	2
4A160M4/2Y3	14	1 460	87	1,6	2,1
	17	2 900	84	1,2	2

Продовження додатка Д					
Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _п	k _{max}
4A180S4/2Y3	18	1 470	88,5	1,3	1,8
	21	2 920	85	1,1	1,8
4A180M4/2Y3	22	1 470	90	1,3	1,8
	26,5	2 920	86	1,1	1,8
4A200L4/2Y3	33,5	1 477	91	1,8	2
	37	2 955	87	1,8	2,2
4A225M4/2Y3	42,5	1 477	92	1,8	2
	45	2 955	86	1,8	2,2
4A250S4/2Y3	50	1 477	93	1,8	2
	60	2 955	87	1,6	2,2
4A250M4/2Y3	60	1 477	93	1,8	2
	71	2 955	88	1,6	2,2
Синхронна частота обертання 750/1 500 об/хв					
4A90L8/4Y3	0,63	720	73	1,3	1,8
	1	1 430	75	1,3	1,8
4A100S8/4Y3	1	700	68	1,2	1,8
	1,7	1 430	80	1,4	1,9
4A100L8/4Y3	1,4	700	69	1,2	1,8
	2,4	1 430	81	1,2	1,8
4A112MA8/4Y3	1,9	710	72	1,2	1,8
	3	1 420	75	1	1,8
4A112MB8/4Y3	2,2	710	75	1,2	1,8
	3,6	1 430	77	1	1,8
4A132S8/4Y3	3,2	720	77	1,2	1,8
	5,3	1 440	80	1	1,8
4A132M8/4Y3	4,2	720	80	1,2	1,8
	7,1	1 440	82	1	1,8
4A160S8/4Y3	6	740	76,5	1,5	2
	9	1 460	84	1,2	2
4A160M8/4Y3	9	730	79	1,5	2
	13	1 460	86,5	1,2	2
4A180M8/4Y3	13	730	84,5	1,2	1,8
	18	1 455	87,5	1	1,8
4A200M8/4Y3	17	735	86	1,4	1,8
	25	1 470	87	1,4	2
4A200L8/4Y3	20	735	87	1,4	1,8
	28	1 470	88	1,4	2

Додатки

Продовження додатка Д					
Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _п	k _{max}
4A225M8/4У3	22,4	739	87	2	2,2
	33,5	1 478	87	1,5	2,2
4A250S8/4У3	30	739	89,5	1,6	1,8
	45	1 478	88,5	1,4	1,9
4A250M8/4У3	37	739	89,5	1,8	1,8
	55	1 478	89,5	1,5	2
4A280M8/4У3	55	739	91,3	1,3	2,3
	75	1 475	90,6	1,3	2,5
4A315S8/4У3	75	731	90,8	1,3	1,8
	90	1 435	91,3	1,3	2,3
4A315M8/4У3	90	733	91,6	1,1	1,8
	110	1 475	91,9	1,3	2,3
4A355S8/4У3	110	740	92,6	1,4	2
	160	1 480	92,3	1,6	2,6
4A355M8/4У3	132	740	93,2	1,3	1,9
	200	1 480	92,8	1,8	2,5
Синхронні частоти обертання 1 000/1 500 об/хв					
4A90L6/4У3	1,3	950	73	1,3	1,8
	1,4	1 430	73	1,3	1,8
4A100S6/4У3	1,8	950	77	1,8	2,2
	2,1	1 440	78	1,7	1,9
4A100L6/4У3	2,5	970	80	1,8	2,2
	2,8	1 460	80	1,7	1,9
4A112M6/4У3	2,8	950	76	1,3	1,8
	3,2	1 420	76	1,3	1,8
4A132S6/4У3	4	950	80	1,3	1,8
	4,5	1 420	79	1,3	1,8
4A132M6/4У3	6	960	83	1,3	1,8
	6,2	1 440	81,5	1,3	1,8
4A160S6/4У3	7,1	980	80	1,4	2,2
	8,5	1 470	79	1,3	2,2
4A160M6/4У3	11	980	83	1,4	2,2
	13	1 470	81,5	1,3	2,2
4A180M6/4У3	13	980	85,5	1,2	2,2
	17	1470	86	1,2	2,2
4A200M6/4У3	17	990	86,5	1,5	2,2
	22	1 480	87	1,5	2,2

Продовження додатка Д					
Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _п	k _{max}
Синхронні частоти обертання 750/1 000 об/хв. Дві незалежні обмотки. Схема з'єднання обмотки У/У					
4A100S8/6У3	0,7	690	65	1,6	2
	0,9	930	74	1,2	1,8
4A100L8/6У3	1	690	65	2	2
	1,3	930	76	1,5	1,8
4A112MA8/6У3	1,1	690	65	1,2	1,8
	1,3	930	69	1,2	1,8
4A112MB8/6У3	1,4	690	66,5	1,2	1,8
	1,7	940	71	1,2	1,8
4A132S8/6У3	2,4	710	73	1,2	1,8
	2,6	970	75,5	1,2	1,8
4A132M8/6У3	2,8	720	75	1,2	1,8
	3,2	970	76,5	1,2	1,8
4A160S8/6У3	7,5	725	83,5	1,4	2,2
	8,5	975	83,5	1,3	2,2
4A160M8/6У3	10	730	85	1,7	2,3
	11	980	85,5	1,6	2,3
4A180M8/6У3	13	735	85	1,3	1,9
	15	980	88	1,5	2,2
4A200M8/6У3	15	735	85,5	1,5	2
	18,5	985	88,5	1,5	2
4A200L8/6У3	18,5	735	86,5	1,5	2
	22	985	89	1,5	2
4A225M8/6У3	22	735	86	1,7	2,2
	30	985	88,5	1,6	2,2
4A250S8/6У3	30	739	89,5	1,4	2
	37	990	91	1,5	2,2
4A250M8/6У3	44	739	89,5	1,3	1,8
	55	990	91	1,4	1,8
Синхронні частоти обертання 500/1 000 об/хв					
4A180M12/6У3	6,7	480	76	1,5	1,9
	11	975	84,5	1,3	1,9
4A200M12/6У3	9	490	77,5	1,5	1,8
	14	985	88	1,5	2
4A200L12/6У3	10	485	80	1,5	1,8
	17	980	88,5	1,5	2

Додатки

Продовження додатка Д					
Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _п	k _{max}
4A225M12/6У3	12,5	485	81,5	1,4	1,8
	22	980	88	1,3	1,8
4A250S12/6У3	16	493	83	1,7	1,8
	28	985	90	1,5	1,8
4A250M12/6У3	18,5	493	83,5	1,7	1,8
	35,5	985	89,5	1,5	1,8
4A280M12/6У3	37	490	88,6	1,2	1,9
	55	981	91	1,1	2,2
4A315S12/6У3	45	490	89,8	1,1	1,8
	75	980	91,5	1,1	2,1
4A315M12/6У3	55	490	90,1	1,2	2,1
	90	981	92,2	1,3	2,2
4A355S12/6У3	55	495	90,7	1,9	2,5
	90	990	92,1	2	2,8
4A355M12/6У3	75	490	91,1	1,2	1,7
	110	985	92,7	1,7	2,5
Тришвидкісні двигуни					
Синхронні частоти обертання 1 000/1 500/3 000 об/хв					
4A100S6/4/2У3	1	940	69	2	2,5
	1,1	1 425	66	1,3	2
	1,5	2 850	67	1,1	2
4A100L6/4/2У3	1,4	940	69	2	2,5
	1,5	1 425	71	1,3	2,5
	2,1	2 850	72	1,1	2
4A112M6/4/2У3	1,6	950	71	1,3	1,8
	2,2	1 440	76	1,3	1,8
	2,8	2 880	71	1,1	1,8
4A132S6/4/2У3	2,8	960	76,5	1,3	1,8
	3,6	1 450	79,5	1,3	1,8
	4,2	2 900	71,5	1,1	1,8
4A132M6/4/2У3	3,8	960	78,5	1,3	1,8
	5	1 450	81	1,3	1,8
	6	2 900	76	1,1	1,8
4A160S6/4/2У3	4,8	955	79,5	1,3	2
	5,3	1 460	81	1,3	2
	7,5	2 900	76	1,1	2

Продовження додатка Д					
Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _п	k _{max}
4A160M6/4/2Y3	6,7	955	81,5	1,3	2
	7,5	1 455	83	1,3	2
	10,5	2 900	78,5	1,1	2
Синхронні частоти обертання 750/1 500/3 000 об/хв					
4A100S8/4/2Y3	0,63	705	58	1,5	2
	1,1	1 425	66	1,1	2
	1,5	2 850	67	1	2
4A100L8/4/2Y3	0,9	750	66	1,5	1,8
	1,5	1 425	71	1,3	2,2
	2,1	2 850	72	1,1	2
4A112M8/4/2Y3	1,1	700	65	1,2	1,8
	1,9	1 440	72,5	1,1	1,8
	2,2	2 870	67,5	1	1,8
4A132S8/4/2Y3	1,8	710	70	1,2	1,8
	3	1 460	77,5	1,1	1,8
	3,6	2 920	69	1	1,8
4A132M8/4/2Y3	2,4	720	72,5	1,2	1,8
	4,5	1 460	79,5	1,1	1,8
	5	2 940	71,5	1	1,8
4A160S8/4/2Y3	3,8	715	76	1,2	2
	4,25	1 470	81,5	1,1	2
	6,3	2 900	76,5	1	2
4A160M8/4/2Y3	5	720	78	1,2	2
	7,1	1 470	94,5	1,1	2
	9,5	2 900	80,5	1	2
Синхронні частоти обертання 750/1 000/1 500 об/хв					
4A100S8/6/2Y3	0,71	712	59	1,4	1,9
	0,9	950	65	1,4	1,9
	1,3	1 425	69	1,4	1,9
4A100L8/6/2Y3	0,9	712	61	1,4	1,9
	1,2	950	68	1,4	2
	1,7	1 428	71	1	1,9
4A112MA8/6/2Y3	1	700	62	1,2	1,8
	1,1	950	65	1,2	1,8
	1,5	1 400	72	1	1,8
4A112MB8/6/2Y3	1,2	700	63,5	1,2	1,8
	1,4	950	68,5	1,2	1,8
	2,1	1 390	71	1	1,8

Додатки

Продовження додатка Д					
Типорозмір двигуна	P, кВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _п	k _{max}
4A132S8/6/2У3	1,9	720	69,5	1,2	1,8
	2,2	960	73,5	1,2	1,8
	3,2	1 420	74	1	1,8
4A132M8/6/2У3	2,6	720	72,5	1,2	1,
	2,8	960	75	1,2	81,8
	4,5	1 420	77,5	1	1,8
4A160S8/6/2У3	4	730	74,5	1,2	2
	4,5	980	76	1,2	2
	7,5	1 450	80,5	1	2
4A160M8/6/2У3	5	735	76,5	1,2	2
	6,3	980	77	1,2	2
	10	1 450	82	1,0	2
4A180M8/6/2У3	8,0	735	78	1,3	1,9
	10	985	83,5	1,2	2
	12,5	1 420	83	1	1,9
4A200M8/6/2У3	11	739	82	1,6	2
	12	990	82,5	1,2	2
	18,5	1 478	85	1,2	2
4A200L8/6/2У3	14	739	83	1,6	2
	15	980	85,5	1,2	2
	21	1 478	85,5	1,2	2
4A225M8/6/2У3	17	739	86	1,6	2
	18,5	990	86	1,2	2
	25	1 478	86,5	1,2	2
4A250S8/6/2У3	20	717	88	1,8	2
	22	990	85,5	1,5	2
	30	1 435	87	1,5	2
4A250M8/6/2У3	22	717	86	1,8	2,2
	30	990	88	1,5	2
	37	1 435	88	1,5	2
Чотиришвидкісні двигуни.					
Синхронні частоти обертання 500/750/1 000/1 500 об/хв					
4A160M12/8/6/2У3	1,8	490	56,5	1,4	2
	4	730	67	1,2	2
	4,25	970	76	1,1	2
	6,7	1 460	79	1	2

Продовження додатка Д					
Типорозмір двигуна	P, КВт	n ₂ , об/хв	ККД, %	k _п	k _{max}
4A180M12/8/6/2Y3	3	485	63	2	1,8
	5	735	75	1,6	1,8
	6	975	80,5	1,3	1,8
	8	1 470	81,5	1	1,8
4A200M12/8/6/2Y3	5	492	72	1,4	2
	8	742	80	1,2	2
	8,5	985	82,5	1,1	2
	12	1 35	82,5	1	2
4A200L12/8/6/2Y3	6	492	72	1,4	2
	10	742	81	1,2	2
	10,5	985	83	1,1	2
	15	1 435	83,5	1	2
4A225M12/8/6/2Y3	7,1	495	75,5	1,4	2
	12,5	742	82	1,3	2
	13	990	84,5	1,1	2
	20	1 435	83,5	1	2
4A250S12/8/6/2Y3	9	495	76	1,5	2
	17	742	84,5	1,3	1,9
	18,5	990	84	1,1	1,8
	26,5	1 435	84,5	1	1,9
4A250M12/8/6/2Y3	12	495	77	1,5	2
	22	742	85,5	1,3	1,9
	24	990	86	1,2	1,9
	30	1 435	85,5	1,2	1,9

Додаток Е
(обов'язковий)

Технічні дані двигунів із фазним ротором серій 4АК, 4АНК

Типорозмір двигуна	Р, кВт	ККД, %	k_{\max}
Синхронна частота обертання 1 500 об/хв			
4АК160S4У3	11	86,5	3
4АК160М4У3	14	88,5	3,5
4АК180М4У3	18	89	4
4АК200М4У3	22	90	4
4АК200L4У3	30	90,5	4
4АК225М4У3	37	90	3
4АК250SA4У3	45	91	3
4АК250SBУ3	55	90,5	3
4АК250М4У3	71	91,5	3
Синхронна частота обертання 1 000 об/хв			
4АК160S6У3	7,5	82,5	3,5
4АК160М6У3	10	84,5	3,8
4АК180М6У3	13	85,5	4
4АК200М6У3	18,5	88	3,5
4АК200L6У3	22	89	3,5
4АК225М6У3	30	89	2,5
4АК250S6У3	37	90,5	2,5
4АК250М6У3	45		2,5
Синхронна частота обертання 750 об/хв			
4АК160S8У3	5,5	80	2,5
4АК160М8У3	7,5	82	3
4АК180М8У3	11	85,5	3,5
4АК200М8У3	15	86	3
4АК200L8У3	18,5	86	2
4АК225М8У3	22	87	2,2
4АК250S8У3	30	88,5	2,2
4АК250М8У3	37	89	2,2
Синхронна частота обертання 1 500 об/хв			
4АНК160S4У3	14	86,5	3
4АНК160М4У3	17	88	3,5
4АНК180S4У3	22	87	3,2
4АНК180М4У3	30	88	3,2
4АНК200М4У3	37	90	3
4АНК200L4У3	45	90	3

Продовження додатка Е			
Типорозмір двигуна	Р, кВт	ККД, %	k_{max}
4АНК225М4У3	55	89,5	2,5
4АНК250SA4У3	75	90	2,3
4АНК250М4У3	110	92	2,5
4АНК250SB4У3	90	91,5	2,5
4АНК280S4У3	132	92	2
4АНК280М4У3	160	92,5	2
4АНК315S4У3	200	93	2
4АНК315М4У3	250	93	2
4АНК355S4У3	315	93,5	2
4АНК355М4У3	400	94	2
Синхронна частота обертання 1 000 об/хв			
4АНК180S6У3	13	83,5	3
4АНК180М6У3	17	85	3
4АНК200М6У3	22	88	3
4АНК200L6У3	30	88,5	3
4АНК225М6У3	37	89	1,9
4АНК250SA6У3	45	89,5	2,3
4АНК250SB6У3	55	91	2,5
4АНК250М6У3	75	91,5	2,5
4АНК280S6У3	90	90	1,9
4АНК280М6У3	110	91,5	1,9
4АНК315S6У3	132	92	1,9
4АНК315М6У3	160	92,5	1,9
4АНК355S6У3	200	93	1,8
4АНК355М6У3	250	93	1,8
Синхронна частота обертання 750 об/хв			
4АНК180S8У3	11	85	3,2
4АНК180М8У3	14	86,5	3,5
4АНК200М8У3	18,5	86	2,5
4АНК200L8У3	22	87	2,5
4АНК225М8У3	30	86,5	1,8
4АНК250SA8У3	37	87,5	2,2
4АНК250SB8У3	45	89	2,2
4АНК250М8У3	55	89,5	2,2
4АНК280S8У3	75	90,5	1,9
4АНК280М8У3	90	90,5	1,9
4АНК315S8У3	110	91,5	1,9

Додатки

Продовження додатка Е			
Типорозмір двигуна	Р, кВт	ККД, %	k_{max}
4АНК315М8У3	132	92	1,9
4АНК355S8У3	160	92,5	1,7
4АНК355М8У3	200	92,5	1,7
Синхронна частота обертання 600 об/хв			
4АНК280S10У3	45	89	1,8
4АНК280М10У3	55	89,5	1,8
4АНК315S10У3	75	90	1,8
4АНК315М10У3	90	90,5	1,8
4АНК355S10У3	110	90,5	1,7
4АНК355М10У3	132	91	1,7
Синхронна частота обертання 500 об/хв			
4АНК315S10У3	55	89	1,8
4АНК315М10У3	75	90	1,8
4АНК355S10У3	90	89,5	1,7
4АНК355М10У3	110	90	1,7

Додаток Є
(обов'язковий)

Технічні дані синхронних двигунів

Типорозмір двигуна	P_2 , кВт	U , кВ	n_2 , об/хв	ККД, %	$k_{п}$	k_{\max}
СДМП2-19-26-32-6УХЛ4	400	6	187,5	92,6	1,2	2,1
СДМП2-19-31-32-6УХЛ4	500	6	187,5	93	1,2	2,3
СДМП2-19-41-32-6УХЛ4	630	6	187,5	93,5	1,4	2,2
СДМП2-19-26-24-6УХЛ4	639	6	250	93,7	1,2	2,4
СДМП2-19-31-24-6УХЛ4	800	6	250	94	1,4	2,4
СДКП2-18-26-16УХЛ4	800	6	375	93,8	0,7	2,0
СДКП2-18-34-16УХЛ4	1 000	6	375	94,6	0,8	2,0
СДКП2-18-41-16УХЛ4	1 250	6	375	94,8	0,9	2,1
СДКП2-18-51-16МФУХЛ4	1 600	6	375	95,5	0,65	2,1
СДКП2-19-39-16УХЛ4	2 000	6	375	95,6	0,8	1,9
СДКП2-19-39-16МФУХЛ4	2 000	6	375	95,6	0,8	1,9
СДКП2-19-61-16УХЛ4	3 150	6	375	96,2	0,8	1,9
СДКП2-20-49-16ФУХЛ4	4 000	6	375	96,2	0,7	1,9
СДКП2-20-56-16ФУХЛ4	4 000	10	375	96,0	1,0	1,9
СДКП2-20-61-16ФУХЛ4	5 000	6	375	96,5	0,8	1,8
СДКП2-21-46-20ФУХЛ4	5 000	6	300	96,3	0,8	1,9
СДКП2-21-56-24ФУХЛ4	5 000	6	250	96,3	0,8	1,8
СДКП2-20-61-16МФУХЛ4	5 000	6	375	95,5	0,8	1,8
ВДС2-325/44-20	4 000	6	300	95,5	0,4	2
ВДС2-325/44-18	5 000	6	333	95,2	0,35	1,7
ВДС2-325/49-18	5 000	10	333	95	0,5	1,9
ВДС2-325/44-16	5 000	6	375	95,3	0,4	1,8
ВДС2-325/49-16	5 000	10	375	95,2	0,35	1,9
ВДС2-325/59-24	5 000	6	250	95,5	0,7	2,1
ВДС2-325/64-20	6 300	10	300	95,7	0,35	1,9
ВДС2-325/69-16	8 000	10	375	95,9	0,32	1,8
ВДС-375/89-28	8 000	10	250	96,1	0,35	2
ВДС-375/89-32	8 000	10	187	95,6	0,4	2,4
ВДС-375/89-24	10 000	10	250	96,3	0,4	2,2
ВДС-375/105-32	10 000	10	187	95,8	0,4	3
ВДС-375/105-28	10 000	10	214	96,2	0,35	2,1
ВДС-375/105-24	12 500	10	250	96,7	0,4	2
ВДС-375/125-28	12 500	10	214	96,7	0,45	2
ВДС-375/125-24	16 000	10	250	96,9	0,6	2,2

Додаток Ж
(обов'язковий)

Технічні дані двигунів постійного струму серії 2П

Р, кВт	U, В	Частота обертання		ККД, %
		номінальна	максимальна	
1	2	3	4	5
Тип 2ПН90МУХЛ4, 2ПН90МГУХЛ4				
0,17	110	750	3 000	47,5
	220	750	1 500	48,5
0,25	110	1 060	4 000	56
	120	1 120	2 000	57
0,37	110	1 500	3 000	61,5
	120	1 500	2 250	61,5
0,71	110	2 360	4 000	69,5
	120	2 360	3 540	70
1	110	3 000	4 000	71,5
	120	3 000	4 000	72,5
Тип 2ПН90ЛУХЛ4, 2ПН90ЛГУХЛ4				
0,2	110	750	3 000	54
	120	800	1 500	54,5
0,34	110	1 060	4 000	60
	120	1 000	2 000	60
0,55	110	1 500	4 000	67,5
	120	1 500	4 300	67,5
0,9	110	2 000	4 000	73
	120	2 120	4 000	73
1,3	110	3 150	4 000	76
	120	3 150	4 000	78
Тип 2ПБ90МУХЛ4, 3ПБ90МГУХЛ4				
0,13	110	800	3 000	49,5
	120	750	1 500	47,5
0,18	110	1 000	4 000	54,5
	120	1 000	2 000	55,5
0,28	110	1 600	4 000	63,5
	120	1 500	3 000	63,5
0,4	110	2 360	4 000	69,5
	120	2 200	4 000	58,5
0,55	110	3 000	4 000	71,0
	120	3 000	4 000	71,0

Продовження додатка Ж				
1	2	3	4	5
Тип 2ПН100МУХЛ4, 2ПН100МГУХЛ4				
0,37	110	750	3 000	60
	120	750	1 500	59,5
0,5	110	1 000	4 000	65
	120	1 000	2 000	66
0,75	110	1 500	4 000	71
	120	1 500	4 300	71,5
1,2	110	2 120	4 000	75
	120	2 200	4 000	76,5
2	110	3 000	4 000	78,5
	120	3 000	4 000	79
Тип 2ПН100ЛУХЛ4, 2ПН100ЛГУХЛ4				
0,42	110	750	3 000	60,5
	120	750	1 500	61,5
0,63	110	1 000	4 000	67
	120	1 060	2 000	67
1,1	110	1 500	4 000	72,5
	120	1 500	4 300	74
1,7	110	2 200	4 000	77
	120	2 200	4 000	78
2,2	110	3 000	4 000	79,5
	120	3 150	4 000	81
Тип 2ПН112ЛУХЛ4, 2ПН112ЛГУХЛ4				
0,8	110	750	3 000	62,5
	120	750	2 500	63,5
1,25	110	1 060	4 000	68,5
	120	1 000	3 500	68
2,2	110	1 500	4 000	74,5
	120	1 500	4 000	75
3,4	110	2 240	4 000	76
	120	2 200	4 000	78
5,3	110	3 350	4 000	79,5
	120	3 000	4 000	80
Тип 2ПН132МУХЛ4, 2ПН132МГУХЛ4				
1,6	110	750	3 000	68
	120	750	2 500	68,5

Додатки

Продовження додатка Ж				
1	2	3	4	5
2,5	110	1 000	4000	72
	220	1 000	3000	73,5
	440	1 000	2500	73
4	110	1 500	4000	77,5
	120	1 500	4000	79
	140	1 500	3750	79
7	110	2 200	4000	81
	220	2 240	4000	83
	440	2 240	4000	83
10,5	220	3 000	4000	84
	440	3 000	4000	85
Тип 2ПН132ЛУХЛ4, 2ПН132ЛГУХЛ4				
1,9	110	750	3 000	71
	220	750	2 500	72
	440	750	1 850	70,5
3	110	950	4 000	74,5
	220	1 000	4 000	75,5
	440	1 000	3 750	76,5
5,5	110	1 500	4 000	80
	220	1 500	4 000	80,5
	440	1 600	3 750	81
8,5	220	2 200	4 000	84
	440	2 240	4 000	84,5
14	220	3 150	4 000	86
	440	3 150	4 000	86,5
Тип 2ПФ132ЛУХЛ4, 2ПФ132ЛГУХЛ4				
2,8	110	750	3 750	66,5
	220	750	2 500	67
	440	750	1 850	69
4,2	110	950	4 000	72
	220	1 000	3 000	73
	440	1 000	2 500	73
5,5	110	1 500	4 200	79
	220	1 600	4 200	80,5
	440	1 600	3 750	80,5
7,5	110	2 200	4 000	83
	220	2 120	4 000	83,5
	440	2 200	4 000	86

Продовження додатка Ж				
1	2	3	4	5
11	220	3 000	4 000	85,5
	440	3 150	4 000	86,5
Тип 2ПН160МУХЛ4, 2ПН160МГУХЛ4				
3	110	750	3 000	75,5
	220	750	2 500	76,5
	440	750	1 850	76
4,5	110	950	4 000	78,5
	220	1 000	3 000	79,5
	440	950	2 500	79
7,5	110	1 600	4 000	83
	220	1 500	4 000	83
	440	1 500	3 750	84
13	220	2 120	4 000	85,5
	440	2 360	4 000	86,5
18	220	3 150	4 000	87
	440	3 150	4 000	87,5
Тип 2ПН160ЛУХЛ4, 2ПН160ЛГУХЛ4				
4	110	750	3 000	77,5
	220	800	2 500	78,5
	440	750	1 850	78,5
6,3	110	1 000	4 000	80,5
	220	1 000	3 000	81,5
	440	1 060	2 500	82
11	220	1 500	4 000	85,5
	440	1 600	3 750	85,5
16	220	2 360	4 000	86,5
	440	2 360	4 000	87,5
24	220	3 150	4 000	88
	440	3 150	4 000	89
Тип 2ПФ160ЛУХЛ4, 2ПФ160ЛГУХЛ4				
5,6	110	750	3 750	76
	220	800	2 500	77,5
	440	800	1 850	76,5
8	220	1 000	3 000	80
	440	1 060	2 500	81
11	110	1 500	4 200	84
	220	1 500	4 200	84,5
	440	1 500	3 750	84,5

Додатки

Продовження додатка Ж				
1	2	3	4	5
16	220	2 360	4000	87
	440	2 360	4000	88,5
18,5	220	3 150	4000	87,5
	440	3 150	4000	88,5
Тип 2ПН180МУХЛ4, 2ПН180МГУХЛ4				
5,6	110	750	3 000	78,5
	220	750	2 500	79
	440	750	1 850	79,5
8	110	1 000	3 500	81,5
	220	1 060	3 000	83
	440	1 000	2 500	82
15	110	1 500	3 500	85,5
	220	1 500	4 000	85,5
	440	1 500	3 500	86
26	220	2 240	3 500	88
	440	2 240	3 500	89
37	220	3 000	3 500	79,5
	440	3 150	3 500	89,5
Тип 2ПН180ЛУХЛ4, 2ПН180ЛГУХЛ4				
7,1	110	750	3 000	80
	220	750	2 500	80,5
	440	750	1 800	82,5
10	110	1 000	3 500	82,5
	220	1 000	3 000	82,5
	440	1 000	2 500	83,5
18,5	220	1 500	3 500	87
	440	1 600	3 500	87,5
30	440	2 200	3 500	89
42	440	3 000	3 500	90,5
Тип 2ПФ180ЛУХЛ4, 2ПФ180ЛГУХЛ4				
10	110	750	3 300	77,5
	220	750	2 500	79
	440	750	1 850	78
14	220	1 000	3 300	82
	440	1 000	2 500	83
18,5	220	1 500	3 500	87
	440	1 500	3 500	87

Продовження додатка Ж				
1	2	3	4	5
25	220	2 120	3 500	89
	440	2 200	3 500	89,5
32	440	3 150	3 500	90,5
Тип 2ПН200МУХЛ4, 2ПН200МГУХЛ4				
8,5	110	810	3 000	81
	220	800	2 500	82
	440	800	1 850	82
13	110	1 120	3 500	84
	220	1 120	3 000	85
	440	1 000	2 500	84,5
22	220	1 500	3 500	87,5
	440	1 500	3 500	87,5
36	220	2 200	3 500	88,5
	440	2 200	3 500	89,5
60	440	3 150	3 500	90,5
Тип 2ПН200ЛУХЛ4, 2ПН200ЛГУХЛ4				
11	110	800	3 000	83
	220	800	2 500	84
	440	750	1 850	83,5
16	220	1 000	3 000	86
	440	1 000	2 500	86
30	220	1 500	3 500	88,5
	440	1 600	3 500	89,5
53	440	2 360	3 500	90,5
75	440	3 150	3 500	91,5
Тип 2ПН280МУХЛ4, 2ПН280МГУХЛ4				
22	220	530	1 250	83
30	220	600	1 500	84,5
	440	600	1 500	84,5
45	220	750	2 000	86
	440	750	1 200	86,5
75	220	1 000	2 250	88,5
	440	1 180	2 400	88,5
90	220	1 320	1 500	89
	440	1 500	1 500	89
110	220	1 500	2 600	89,5
	440	1 500	2 250	89,5

Додатки

Продовження додатка Ж				
1	2	3	4	5
Тип 2ПН280ЛУХЛ4, 2ПН280ЛГУХЛ4				
30	220	500	1 250	83,5
	440	500	1 250	83,5
37	220	600	1 500	86
	440	600	1 500	86
55	220	750	2 000	87,5
85	440	1 000	2 250	88,4
90	220	1 060	2 000	88,4
132	220	1 500	2 600	90,6
	440	1 500	1 900	90,6
Тип 2ПН315МУХЛ4, 2ПН315МГУХЛ4				
45	220	600	1 500	85,5
	440	600	1 500	85,5
55	440	750	1 800	87
100	440	1 000	2 250	88
110	220	1 000	2 250	89
160	220	1 500	2 400	90
	440	1 900	2 400	90
Тип 2ПФ315ЛУХЛ4, 2ПФ315ЛГУХЛ4				
55	220	500	1 250	86
	440	500	1 250	86
75	220	630	1 500	87,5
	440	630	1 500	87,5
90	220	750	1 800	88
	440	750	1 800	88
118	440	1 000	2 000	89
220	220	1 500	2 400	91
	440	1 500	2 000	91

Навчальне видання

Василега Петро Олександрович

**ЕЛЕКТРОПРИВОД
РОБОЧИХ МАШИН**

Підручник

Художнє оформлення обкладинки О. В. Бруєвої
Редактор О. Ф. Дубровіна
Комп'ютерне верстання П. О. Василеги

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 16,86. Обл.-вид. арк. 14,06. Тираж 500 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.