



## ВСТУП

Практично всі процеси, пов'язані з механічною енергією та рухом, здійснюються електроприводом. Виняток становлять автономні транспортні засоби (автомобілі, літаки, деякі види рухомого складу, суден), що використовують неелектричні двигуни. У відносно невеликій кількості промислових установок використовується гідропривод, ще рідше - пневмопривод.

Електропривод - це електромеханічний пристрій, що здійснює керуване перетворення електричної енергії в механічну і призначений для приведення в рух робочих машин і механізмів. Електропривод є ланкою, яка пов'язує енергосистему з технологічними установками. Деякою мірою електропривод виконує роль регулятора цих зв'язків.

Електропривод взаємодіє з системою електропостачання або джерелом електричної енергії, з одного боку, з технологічною установкою або машиною, з іншого, з інформаційною системою більш високого рівня - часто з людиною - оператором, із третьої сторони.

Можна вважати, що електропривод як підсистема входить у зазначені системи, будучи їх частиною. Фахівця з електропостачання електропривод зазвичай цікавить як споживач електроенергії, технолога або конструктора машин - як джерело механічної енергії, інженера, що розробляє або експлуатує АСУ, - як розвинутий інтерфейс, що пов'язує його систему з технологічним процесом або системою електропостачання.

Електропривод, у порівнянні з іншими типами приводів, має переваги - високий ККД, робота без відходів, можливість регулювання і зворотного перетворення енергії.

Найбільш поширені електроприводи змінного струму з асинхронними двигунами (АД) та синхронними (СД). Також використовується електропривод з двигунами постійного струму (ДПС).

На сьогодні знаходять застосування електроприводи, потужність яких складає від одиниць кВт до десятків МВт (наприклад, потужність електропривода компресора на газоперекачувальній станції), тобто діапазон сучасного

електропривода за потужністю перевищує  $10^{12}$ . Такого само порядку й діапазон по частоті обертання: в установці, де витягуються кристали напівпровідників, вал двигуна повинен здійснювати один оберт за кілька десятків годин при дуже жорстких вимогах до рівномірності руху; частота обертання шліфувального круга в сучасному верстаті може сягати 150000 об/хв.

Особливо широкий діапазон застосувань сучасного електропривода - від штучного серця до крокуючого екскаватора, від вентилятора до антени радіотелескопа, від пральної машини до гнучкої виробничої системи. Але більшість електродвигунів працюють у нерегульованому режимі, а отже з низькою ефективністю. Через недоліки проектування і експлуатації електропривода коефіцієнт завантаження багатьох машин не перевищує 50%, що диктує необхідність зниження встановленої потужності двигунів.

Робота привода в недовантаженому режимі призводить до величезних втрат, не враховуючи зниженого значення коефіцієнта потужності, оскільки загальна встановлена потужність асинхронного електропривода в країні складає близько 40...50 млн кВт.

З енергетичної точки зору електропривод - головний споживач електричної енергії. На сьогодні в розвинених країнах він споживає понад 60% всієї виробленої електроенергії.

Зростаюча складність отримання енергії, поширення енергоємних технологій, необхідність безаварійної роботи машин і механізмів вимагає застосування регульованого електропривода. Перехід до регульованого електропривода змінного струму окремих механізмів дозволить заощадити до 50% електроенергії. Ще більшого значення набуває економія від ресурсозбереження та вдосконалення технологій.

Недавній прогрес у напівпровідниковій індустрії, особливо в силовій електроніці і мікроконтролерах, зробив приводи з регулюванням частоти обертання практичнішими і значно дешевшими. Сьогодні регульовані приводи потрібні як у високопрофесійних і потужних промислових застосуваннях, так і в побутовій техніці.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	3
<b>1 МЕХАНІКА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ</b> .....	5
1.1 Рівняння руху.....	5
1.2 Приведення моментів сил.....	9
1.3 Механічні характеристики.....	14
1.4 Момент статичного опору.....	17
1.5 Статична стійкість електропривода.....	20
1.7 Регулювання координат електропривода.....	21
<b>2 ПРОСТИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД</b> .....	27
2.1 Електропривод з асинхронними двигунами.....	27
2.1.1 Схеми, основні рівняння.....	27
2.1.2 Механічні характеристики.....	31
2.1.3 Регулювання координат асинхронних двигунів з коротко замкнутим ротором.....	34
2.1.4 Регулювання координат асинхронних двигунів з фазним ротором.....	41
2.1.5 Гальмівні режими.....	43
2.1.6 Особливості асинхронного електропривода.....	47
2.2 Електропривод з синхронними двигунами.....	49
2.2.1 Схеми, основні рівняння і характеристики.....	49
2.2.2 Синхронний двигун як компенсатор реактивної потужності.....	55
2.3 Електропривод з двигунами постійного струму з двигунами незалежного збудження.....	58
2.3.1 Схеми, основні рівняння.....	58
2.3.2 Статичні характеристики і режими при $U^m = \text{const}$ .....	61
2.3.3 Характеристики і режими при $I = \text{const}$ .....	66
2.3.4 Регулювання координат у розімкнутих схемах.....	68
2.3.5 Гальмівні режими.....	73
2.4 Електропривод з двигунами постійного струму послідовного збудження.....	75
2.5 Електропривод з двигунами постійного струму змішаного збудження.....	82

2.6 Особливості двигунів постійного струму .....	85
<b>3 ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД.....</b>	<b>89</b>
3.1 Електропривод з механічним сполученням валів двигунів...	89
3.2 Електропривод з електричним валом .....	94
<b>4 РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД .....</b>	<b>100</b>
4.1 Багаторівнева структура електропривода .....	100
4.2 Системи електропривода .....	102
4.3 Частотно-регульований електропривод .....	105
4.4 Електропривод з векторним регулюванням.....	113
4.5 Асинхронно-вентильні каскади.....	119
4.6 Асинхронний електропривод з фазовим керуванням .....	127
4.7 Вентильний двигун.....	130
4.8 Оптимізація параметрів електрообладнання вентильних двигунів .....	143
4.9 Вентильно-індукторний двигун .....	148
4.10 Електропривод з двигунами постійного струму.....	151
<b>5 ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....</b>	<b>158</b>
5.1 Електромагнітні перетворювачі електроенергії .....	158
5.2 Силові електронні прилади перетворювачів електросенергії .....	160
5.3 Електричні перетворювачі з напівкерованими електронними приладами .....	168
5.4 Електричні перетворювачі з керованими електронними приладами.....	177
5.5 Системи керування електричними перетворювачами .....	184
5.6 Зменшення впливу на мережу перетворювачів електропривода.....	193
<b>6 ДИНАМІЧНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	<b>210</b>
6.1 Структурна схема ДПС .....	210
6.2 Перехідні процеси двигунів з лінійною характеристикою....	214

6.2.1 Загальні положення .....	214
6.2.2 Механічні перехідні процеси.....	214
6.2.3 Електромагнітні перехідні процеси .....	216
6.2.4 Електромеханічні перехідні процеси.....	218
6.3 Перехідні процеси при пуску по одній характеристиці .....	222
6.4 Перехідні процеси при гальмуванні .....	226
<b>7 ЗАМКНУТІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....</b>	<b>232</b>
7.1 Структурні схеми замкнутих систем .....	232
7.2 Замкнута система привода постійного струму з підсумовуванням сигналів .....	233
7.3 Система підпорядкованого регулювання .....	241
7.4 Уніфікована блокова система регуляторів .....	250
7.5 Адаптивний електропривод.....	253
<b>8 ЕНЕРГЕТИЧНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	<b>260</b>
8.1 Енергетичний канал електропривода .....	260
8.1.1 Структура енергетичного каналу електропривода.....	260
8.1.2 Баланс потужностей потоків енергії енергетичного каналу .....	265
8.2 Енергетичні характеристики електропривода в статичному режимі .....	271
8.2.1 Втрати потужності в нерегульованому електроприводі .....	271
8.2.2 Втрати потужності в регульованому електроприводі .....	275
8.2.3 Коефіцієнт корисної дії.....	278
8.2.4 Коефіцієнт потужності.....	281
8.3 Втрати електроенергії в динамічних режимах.....	283
8.4 Енергозбереження засобами електропривода.....	291
8.5 Енергозберігаючі аспекти застосування регульованого електропривода.....	311
<b>9 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА.....</b>	<b>318</b>
9.1 Розрахунок потужності і вибір електродвигунів .....	318
9.2 Перевірка двигунів по нагріванню прямим методом.....	327
9.3 Перевірка двигунів по нагріванню непрямими методами .....	333

9.3.1 Метод середніх втрат .....	333
9.3.2 Методи еквівалентних величин.....	334
9.4 Особливості вибору двигунів в залежності від теплового режиму роботи.....	335
9.4.1 Тривалий режим роботи.....	335
9.4.2 Короткочасний режим роботи.....	337
9.3.4 Повторно-короткочасний режим роботи.....	340
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>346</b>
<b>ЗМІСТ .....</b>	<b>348</b>

О.М. ЗАКЛАДНИЙ В.В. ПРОКОПЕНКО О.О. ЗАКЛАДНИЙ

# ЕЛЕКТРОПРИВОД

*Навчальний посібник*

*Затверджено Методичною радою НТУУ «КПІ»*

Київ  
« Освіта України »  
2009

УДК 62-83 (075.8)  
ББК 31.291я7  
3-18

*Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПІ»  
(Протокол №3 від 22.11.2007 р.)*

**Рецензенти:**

*Ю.Г. Ковальчук*, д-р техн. наук, проф., Промислова академія України  
*Ю.І. Шумьга*, канд. техн. наук, Апарат Ради національної безпеки і оборони  
України

*В.М. Чермама*, д-р техн. наук, проф., Національний технічний університет  
України «Київський політехнічний інститут»

**Відповідальний редактор**

*С.І. Астухов*, канд. техн. наук, доц., Національний технічний університет  
України «Київський політехнічний інститут»

**Закладний О.М.**

3-18 Електропривод: Навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко,  
О.О. Закладний – К.: Видавництво «Освіта Україна», 2009. — 351 с.: іл.  
ISBN 978-966-188-042-8

Висвітлено питання механіки та динаміки електропривода, його енергетичні властивості та теплові режими. Значну увагу приділено сучасним системам електропривода і способам регулювання координат, засобам силової перетворювальної техніки. Розглянуто керування енергоефективністю (енергозбереження) в електроприводі та засобами електропривода.

Для наукових працівників, інженерів, викладачів, аспірантів і студентів вищих навчальних закладів.

УДК 62-83 (075.8)  
ББК 31.291я7  
3-18

ISBN 978-966-188-042-8

© О.М. Закладний,  
В.В. Прокопенко,  
О.О. Закладний, 2009  
© Освіта Україна 2009

О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний

## Електропривод

Підписано до друку 24.03.2009. Формат 60x84/16  
Друк офсетний. Папір офсетний.

Наклад 300 прим.

Видавництво «Освіта України»,  
04212, м. Київ, вул. Героїв Дніпра 63, к.40

Свідоктво про внесення до Державного реєстру видавців  
ДК № 1957 від 27.09.2004 р.  
Тел/факс (044) 411-43-97, 228-81-29, 237-59-92  
E-mail: osvita2005@ukr.net; www.rambook.ru.

Видавництво «Освіта України» запрошує авторів до співпраці з випуску  
видань, що стосуються питань управління, модернізації, інноваційних  
процесів, технологій, методичних і методологічних аспектів освіти  
та навчального процесу у вищих навчальних закладах.  
Надасмо усі види видавничих та поліграфічних послуг.