

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва**

# **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І**

# **ТРАНСФОРМАТОРИ**

Навчальний посібник  
для студентів ВЗО, що навчаються  
за галуззю знань «Електрична інженерія»

**За ред. д-ра техн. наук,**  
**професора В.І. Мілих**

**Київ «Каравела» 2018**

**УДК 621.3**  
**О 76**

Затверджено редакційно-  
видавничою радою НТУ «ХПІ»,  
протокол № 3 від 22.12.2016 р.

***Рецензенти:***

*М. М. Заблодський*, д-р техн. наук, професор, НУБіП України;

*В. Є. Плюгін*, д-р техн. наук., доцент, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.

**Осташевський М. О.**

**О 76 Електричні машини і трансформатори:** навч. посібник /  
М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук,  
професора. В. І. Мілих. – Київ: Каравела, 2018. – 452 с.

**ISBN 978-966-222-985-1**

Розглянуто принципи дії та будову обертових електричних машин і силових трансформаторів, надано пояснення основних процесів, що відбуваються в електричних машинах і трансформаторах при перетворенні енергії. Проведено аналіз їх роботи, пояснено характеристики електричних машин і трансформаторів, наведено співвідношення між величинами, розглянуто експлуатаційні властивості різних типів електричних машин і трансформаторів.

Призначений для студентів вищих навчальних закладів.

Іл. 372. Табл. 10. Бібліогр. 11 назв

**УДК 621.3**

© М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва, 2018

ISBN 978-966-2229-85-1

© Видавництво «Каравела», 2018

## ВСТУП

Електромеханічне перетворення енергії є одним із визначних проявів закону збереження енергії в природі і реалізується в системах як природного, так і антропогенного походження. Це явище досить добре вивчено і широко використовується для різноманітних практичних цілей. Сьогодні створено величезну кількість різноманітних технічних пристроїв, які називаються *електромеханічними перетворювачами енергії*. Вони істотно відрізняються один від одного своїм функціональним призначенням, потужністю, швидкістю рухомих частин, конструктивним виконанням та іншими параметрами.

Найважливішим класом електромеханічних перетворювачів є так звані енергетичні електричні машини, призначені для ефективного перетворення механічної енергії на електричну або електричної енергії на механічну. Енергетичні електричні машини (далі просто електричні машини) є важливою складовою сучасних систем генерування і споживання електричної енергії. Практично вся електроенергія в світі створена генераторами електричної енергії, а основним її споживачем є електричні двигуни, що призводять до руху різноманітні пристрої, механізми, транспортні засоби, верстати, побутову та офісну техніку тощо.

У системах розподілу електричної енергії застосовуються електротехнічні пристрої, які отримали назву трансформаторів електричної енергії (далі просто трансформатори). Процеси перетворення електричної енергії з одними параметрами на електричну енергію з іншими параметрами, що відбуваються в трансформаторах, подібні до процесів перетворення енергії в електричних машинах, тому електричні машини і трансформатори вивчаються разом.

У процесі розвитку електромеханіки потреби практики вимагали створення теорії електричних машин і трансформаторів, яка повинна була не тільки пояснити фізичні явища, що відбуваються в цих пристроях, але й дати досить достовірні кількісні співвідношення між параметрами і характеристиками електричних машин і трансформаторів, що створювало б основу для їхнього розрахунку і проектування.

Зусиллями таких видатних вчених-електромехаників, як Р. Ріхтер, Р. Парк, О. О. Горєв, Г. Крон, М. П. Костенко, Л. М. Піотровський, Б. Адкінс, Г. М. Петров, О. І. Важнов, О. І. Вольдек, К. Ковач, І. Рац, І. М. Постніков, І. П. Копилов, А. В. Іванов-Смоленський та інших, було створено теорію, яку можна назвати класичною теорією електричних машин. У класичній теорії розглядаються найбільш поширені конструкції електричних машин і трансформаторів. Це насамперед силові трансформатори, асинхронні та синхронні машини змінного струму, колекторні машини постійного струму.

Книга призначена як навчальний посібник з дисципліни «Електричні машини» для студентів, що навчаються за галуззю знань «Електрична інженерія».

Викладення матеріалу розпочинається із загальних відомостей про електричні машини і трансформатори, далі наведено відомості з трансформаторів, асинхронних та синхронних машин, машин постійного струму. Низку загальних питань теорії електричних машин змінного струму виділено до окремого розділу. За кожним типом електричних машин та для трансформаторів спочатку розглянуто основи конструкції, потім – питання теорії та характеристики.

Автори висловлюють щире подяку рецензентам книги:

Заблудському Миколі Миколайовичу, професору, доктору технічних наук, професору кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України;

Плюгину Владиславу Євгеновичу, доценту, доктору технічних наук, професору кафедри Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	3
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ .....	5
1.1. Принципи перетворення енергії в електричних машинах .....	5
1.2. Закони електромеханіки .....	9
1.3. Класифікація електричних машин .....	10
1.4. Номінальні дані електричних машин і трансформаторів .....	11
1.5. Матеріали, що застосовуються в електричних машинах і трансформаторах .....	13
Контрольні запитання .....	16
2. ТРАНСФОРМАТОРИ .....	17
2.1. Загальні відомості .....	17
2.2. Класифікація трансформаторів .....	17
2.3. Паспортні дані трансформатора .....	19
2.4. Принцип дії трансформатора .....	20
2.5. Коефіцієнт трансформації .....	22
2.6. Конструкція трансформаторів .....	23
2.6.1. Магнітопроводи .....	23
2.6.2. Обмотки трансформаторів .....	26
2.6.3. Системи охолодження трансформаторів .....	27
2.7. Електромагнітні процеси та рівняння напруг трансформатора в режимі неробочого ходу .....	29
2.8. Магнітний розрахунок трансформаторів .....	33
2.9. Величина та форма струму неробочого ходу трансформатора .....	36
2.10. Параметри трансформатора в режимі неробочого ходу .....	39
2.11. Електромагнітні процеси та рівняння МРС і струмів у трансформаторі в режимі навантаження .....	41
2.12. Рівняння напруг трансформатора в режимі навантаження .....	43
2.13. Зведений трансформатор .....	45
2.14. Схема заміщення трансформатора в режимі навантаження .....	47

---

2.15.	Векторна діаграма трансформатора в режимі навантаження .....	50
2.16.	Визначення параметрів трансформатора за допомогою дослідів неробочого ходу та короткого замикання .....	51
2.16.1.	Дослід неробочого ходу .....	51
2.16.2.	Дослід короткого замикання.....	54
2.17.	Енергетична діаграма трансформатора .....	58
2.18.	Коефіцієнт корисної дії трансформатора .....	60
2.19.	Зміна напруги трансформатора в режимі навантаження .....	63
2.20.	Зовнішня характеристика трансформатора .....	66
2.21.	Трифазні трансформатори .....	67
2.21.1.	Магнітопроводи трифазних трансформаторів.....	67
2.21.2.	Схеми з'єднання обмоток .....	69
2.22.	Особливості неробочого ходу трифазних трансформаторів .....	70
2.23.	Групи з'єднання трансформаторів .....	74
2.24.	Паралельна робота трансформаторів .....	78
2.24.1.	Вимоги та умови паралельної роботи трансформаторів.....	78
2.24.2.	Паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації.....	78
2.24.3.	Паралельна робота трансформаторів, які належать до різних груп з'єднання .....	82
2.24.4.	Паралельна робота трансформаторів з різними напругами короткого замикання.....	83
2.25.	Спеціальні трансформатори .....	86
2.25.1.	Багатообмоткові трансформатори.....	86
2.25.2.	Автотрансформатор .....	88
2.25.3.	Вимірювальні трансформатори .....	91
	Контрольні запитання .....	92
3.	ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ .....	95
3.1.	Принципи виконання обмоток машин змінного струму .....	95
3.1.1.	Загальні положення.....	95
3.1.2.	Призначення обмоток статора.....	95
3.1.3.	Класифікація обмоток статора.....	96
3.1.4.	Маркування виведень обмоток статорів машин змінного струму.....	99

---

3.1.5.	Принципи виконання обмоток статорів машин змінного струму .....	100
3.1.6.	Електричні та геометричні градуси.....	101
3.2.	Одношарові обмотки статора.....	102
3.2.1.	Класифікація одношарових обмоток .....	102
3.2.2.	Шаблонна обмотка.....	102
3.2.3.	Концентрична одношарова двоплощинна обмотка .....	104
3.2.4.	Одношарова обмотка «врозвалку».....	106
3.3.	Двошарові обмотки статора .....	108
3.3.1.	Застосування двошарових обмоток .....	108
3.3.2.	Двошарова обмотка з цілою кількістю пазів на полюс і фазу.....	108
3.3.3.	Двошарова обмотка з дробовою кількістю пазів на полюс і фазу .....	110
3.4.	ЕРС обмотки статора.....	112
3.4.1.	ЕРС секції .....	112
3.4.2.	ЕРС секційної групи .....	116
3.4.3.	Треті та кратні трьом гармоніки ЕРС .....	119
3.4.4.	ЕРС фазної обмотки .....	120
3.4.5.	Зубцеві гармоніки ЕРС .....	123
3.4.6.	Вимоги до обмоток статора машин змінного струму .....	126
3.5.	МРС обмотки статора.....	127
3.5.1.	Умови аналізу МРС обмоток машин змінного струму.....	127
3.5.2.	МРС зосередженої обмотки.....	127
3.5.3.	МРС одношарової розподіленої фазної обмотки .....	130
3.5.4.	МРС двошарової фазної обмотки з укороченим кроком.....	132
3.5.5.	Пульсуюча та обертова хвилі МРС .....	133
3.5.6.	Обертова хвиля першої гармоніки МРС трифазної обмотки .....	136
3.5.7.	Обертові хвилі вищих гармонік МРС трифазної обмотки. ....	140
3.6.	Магнітні поля, створені обмоткою статора машин змінного струму.....	144
3.6.1.	Загальні положення.....	144
3.6.2.	Магнітне поле повітряного проміжку .....	145
3.6.3.	Головні індуктивні опори машин змінного струму .....	147

---

3.6.4.	Індуктивні опори розсіювання обмоток машин змінного струму .....	149
3.7.	Магнітний розрахунок електричних машин .....	152
3.7.1.	Загальні положення .....	152
3.7.2.	Розрахунок магнітних напруг окремих ділянок магнітного кола електричної машини .....	155
3.7.3.	Магнітна характеристика електричної машини .....	160
	Контрольні запитання .....	162
4.	АСИНХРОННІ МАШИНИ .....	165
4.1.	Загальні відомості .....	165
4.2.	Паспортні дані асинхронних машин .....	166
4.3.	Принцип дії асинхронної машини .....	166
4.4.	Конструкція асинхронних машин .....	169
4.5.	Асинхронна машина при нерухомому роторі.....	171
4.5.1.	Загальні положення .....	171
4.5.2.	Зведення обмотки ротора до обмотки статора .....	172
4.5.3.	Асинхронна машина при нерухомому роторі та замкненій накоротко обмотці ротора .....	173
4.5.4.	Особливі режими асинхронної машини при нерухомому роторі .....	178
4.6.	Енергетична діаграма та ККД асинхронної машини.....	180
4.7.	Заміна реального обертового ротора асинхронної машини еквівалентним нерухомим .....	185
4.8.	T-подібна схема заміщення асинхронної машини .....	188
4.9.	Г-подібна схема заміщення асинхронної машини.....	190
4.10.	Векторна діаграма асинхронної машини.....	193
4.11.	Електромагнітний момент асинхронної машини .....	194
4.12.	Механічна (внутрішня) характеристика асинхронної машини .....	196
4.13.	Механічна характеристика асинхронного двигуна.....	200
4.14.	Стійкість роботи електричних двигунів.....	201
4.15.	Електромагнітні моменти від вищих гармонік МРС .....	204
4.15.1.	Загальні положення .....	204
4.15.2.	Асинхронні моменти .....	205
4.15.3.	Синхронні моменти.....	206
4.16.	Робочі характеристики асинхронних двигунів .....	210



---

4.17.	Пуск асинхронного двигуна .....	212
4.17.1.	Проблеми пуску .....	212
4.17.2.	Способи пуску асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.....	213
4.17.3.	Пуск асинхронних двигунів з фазним ротором .....	215
4.17.4.	Асинхронні двигуни з поліпшеними пусковими характеристиками .....	217
4.18.	Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів.....	219
4.18.1.	Загальні положення.....	219
4.18.2.	Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна зміною частоти живлячої напруги .....	220
4.18.3.	Регулювання частоти обертання зміною кількості пар полюсів обмотки статора .....	223
4.18.4.	Регулювання частоти обертання зміною величини живлячої напруги.....	228
4.18.5.	Регулювання частоти обертання ввімкненням до кола обмотки ротора додаткового активного опору.....	229
4.19.	Однофазні асинхронні двигуни .....	230
4.19.1.	Принципи отримання однофазних асинхронних двигунів .....	230
4.19.2.	Основи робочого процесу однофазних асинхронних двигунів .....	231
4.19.3.	Пуск однофазних асинхронних двигунів .....	234
4.19.4.	Конденсаторний асинхронний двигун.....	237
4.20.	Гальмові режими асинхронних двигунів .....	239
4.21.	Асинхронні генератори.....	240
	Контрольні запитання .....	245
5.	<b>СИНХРОННІ МАШИНИ</b> .....	247
5.1.	Загальні відомості .....	247
5.2.	Паспортні дані синхронних машин.....	248
5.3.	Принцип дії синхронної машини .....	248
5.4.	Конструкція синхронних машин .....	251
5.4.1.	Статор синхронної машини.....	251
5.4.2.	Ротор синхронної машини .....	252
5.4.3.	Системи охолодження синхронних машин .....	254
5.4.4.	Збудження синхронних машин .....	254

---

5.4.5.	Приклади застосування синхронних машин.....	256
5.5.	Магнітне поле збудження синхронної машини .....	257
5.5.1.	Загальні положення.....	257
5.5.2.	Магнітне поле збудження явнополюсної синхронної машини .....	259
5.5.3.	Магнітне поле збудження неявнополюсної синхронної машини .....	261
5.6.	Реакція якоря синхронної машини .....	264
5.6.1.	Магнітне поле обмотки статора синхронної машини .....	264
5.6.2.	Реакція якоря неявнополюсної синхронної машини .....	265
5.6.3.	Реакція якоря явнополюсної синхронної машини .....	268
5.6.4.	Зведення обмотки статора до обмотки збудження синхронної машини .....	273
5.7.	Індуктивні опори синхронної машини .....	275
5.7.1.	Індуктивні опори реакції якоря синхронної машини .....	275
5.7.2.	Індуктивний опір розсіювання обмотки статора синхронної машини .....	276
5.7.3.	Синхронні індуктивні опори синхронної машини.....	276
5.8.	Векторні діаграми синхронних машин без урахування насичення .....	278
5.8.1.	Загальні зауваження .....	278
5.8.2.	Основна діаграма ЕРС (діаграма Blondеля).....	278
5.8.3.	Перетворена векторна діаграма ЕРС синхронної машини .....	281
5.9.	Система відносних одиниць синхронної машини .....	283
5.10.	Характеристика неробочого ходу .....	284
5.11.	Характеристика короткого замикання .....	286
5.12.	Визначення індуктивних опорів за допомогою характеристик синхронної машини .....	287
5.13.	Відношення короткого замикання синхронної машини .....	287
5.14.	Векторні діаграми синхронних машин з урахуванням насичення .....	289
5.14.1.	Векторна діаграма синхронної неявнополюсної машини (векторна діаграма Потье .....	289
5.14.2.	Векторна діаграма синхронної явнополюсної машини .....	291
5.15.	Енергетична діаграма та ККД синхронної машини.....	294

---

5.16.	Характеристики синхронного генератора при автономній роботі .....	295
5.16.1.	Зовнішня характеристика синхронного генератора.....	295
5.16.2.	Регульовальна характеристика синхронного генератора .....	296
5.16.3.	Навантажувальна характеристика синхронного генератора.....	298
5.16.4.	Визначення індуктивного опору розсіювання обмотки статора за допомогою характеристичного трикутника (трикутника Потьє) .....	298
5.17.	Паралельна робота синхронного генератора з мережею нескінченної потужності .....	301
5.17.1.	Вмикання синхронного генератора на паралельну роботу з мережею нескінченної потужності.....	301
5.17.2.	Регулювання активної потужності синхронного генератора при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності .....	306
5.17.3.	Кутова характеристика синхронного генератора.....	307
5.17.4.	Регулювання реактивної потужності синхронного генератора при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності .....	312
5.17.5.	U-подібні характеристики синхронної машини .....	313
5.17.6.	Кутові характеристики реактивної потужності синхронної машини при паралельній роботі з мережею нескінченної потужності .....	316
5.18.	Стійкість роботи синхронних машин .....	317
5.18.1.	Статична стійкість синхронної машини .....	317
5.18.2.	Кількісна оцінка статичної стійкості синхронної машини .....	320
5.18.3.	Динамічна стійкість синхронної машини.....	322
5.18.4.	Кількісна оцінка динамічної стійкості синхронної машини .....	324
5.19.	Синхронний двигун .....	326
5.19.1.	Галузь застосування.....	326
5.19.2.	Рівняння та векторна діаграма синхронного двигуна .....	326
5.19.3.	Режими роботи синхронного двигуна.....	327
5.19.4.	Пуск синхронних двигунів .....	331
5.19.5.	Робочі характеристики синхронного двигуна .....	335

---

5.20.	Синхронний компенсатор .....	336
	Контрольні запитання .....	338
6.	МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....	341
6.1.	Загальні відомості .....	341
6.2.	Паспортні дані машин постійного струму .....	341
6.3.	Принцип дії машин постійного струму.....	342
6.4.	Конструкція машин постійного струму.....	345
6.5.	Обмотки якоря машин постійного струму.....	349
6.5.1.	Конструкція обмотки якоря .....	349
6.5.2.	Параметри обмотки якоря .....	349
6.5.3.	Проста петльова обмотка .....	350
6.5.4.	Складна петльові обмотка .....	356
6.5.5.	Проста хвильова обмотка .....	357
6.5.6.	Складна хвильова обмотка .....	360
6.5.7.	Умови симетрії обмотки якоря .....	361
6.5.8.	Зрівняльні з'єднання обмотки якоря .....	362
6.5.9.	Комбінована обмотка якоря.....	366
6.5.10.	Межі застосування типів обмоток якоря.....	369
6.6.	ЕРС обмотки якоря машини постійного струму .....	369
6.7.	Електромагнітний момент машини постійного струму .....	370
6.8.	Реакція якоря машини постійного струму.....	371
6.8.1.	Визначення реакції якоря машини постійного струму .....	371
6.8.2.	Магнітне поле обмотки головних полюсів (магнітне поле збудження .....	372
6.8.3.	Магнітне поле обмотки якоря.....	372
6.8.4.	Результуюче магнітне поле машини постійного струму .....	375
6.8.5.	Засоби боротьби з реакцією якоря машини постійного струму .....	377
6.9.	Комутація машини постійного струму.....	379
6.9.1.	Визначення терміну «комутація.....	379
6.9.2.	Причини іскріння машин постійного струму.....	379
6.9.3.	Основне рівняння комутації.....	380
6.9.4.	Класична теорія комутації (комутація опором.....	382
6.9.5.	Рівняння комутації опором .....	384
6.9.6.	Розрахунок ЕРС комутуючої секції.....	387
6.9.7.	Засоби поліпшення комутації .....	389

---

6.10.	Енергетична діаграма та ККД машини постійного струму .....	391
6.11.	Генератори постійного струму .....	393
6.11.1.	Загальні зауваження .....	393
6.11.2.	Основні рівняння генераторів постійного струму.....	395
6.11.3.	Характеристики генераторів незалежного збудження .....	397
6.11.4.	Характеристики генераторів постійного струму паралельного збудження.....	401
6.11.5.	Характеристики генераторів постійного струму послідовного збудження.....	405
6.11.6.	Характеристики генераторів постійного струму змішаного збудження .....	405
6.12.	Двигуни постійного струму .....	406
6.12.1.	Загальні положення .....	406
6.12.2.	Основні рівняння двигунів постійного струму .....	407
6.12.3.	Стійкість роботи двигунів постійного струму.....	410
6.12.4.	Характеристики двигунів постійного струму паралельного та незалежного збудження .....	411
6.12.5.	Двигуни постійного струму послідовного збудження .....	414
6.12.6.	Робочі характеристики двигунів постійного струму паралельного збудження.....	417
6.12.7.	Робочі характеристики двигунів постійного струму послідовного збудження.....	418
6.12.8.	Порівняння двигунів постійного струму паралельного та послідовного збудження .....	419
6.12.9.	Двигуни постійного струму змішаного збудження.....	420
6.12.10.	Пуск двигунів постійного струму .....	420
6.12.11.	Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму .....	423
6.12.12.	Гальмування двигунів постійного струму.....	434
	Контрольні запитання .....	437
	Предметний покажчик .....	439
	Список літератури .....	442

---

Навчальне видання

**ОСТАШЕВСЬКИЙ Микола Олександрович**

**ЮР'ЄВА Олена Юріївна**

**За ред. д-ра техн. наук,  
професора В.І. Мілих**

# **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І ТРАНСФОРМАТОРИ**

Навчальний посібник  
для студентів, що навчаються  
за галуззю знань «Електрична інженерія»

**Керівник видавничих проектів Ю.В. Піча**

Підписано до друку 01.07.2018 р. Формат А5 (60x84 1/16)

Папір офсет. Друк цифровий. Гарнітура Georgia.

Ум. друк. арк. 26,0. Наклад – 20 прим.

Зам. № 01\07\ -01-2018

Видавництво «Каравела»,  
просп. Рокосовського, 8а, м. Київ, 04201, Україна.  
Тел. (044) 592-39-36, (050) 355-77-75.

**E-mail: [caravela@ukr.net](mailto:caravela@ukr.net)**

**[WWW.CARAVELA.KIEV.UA](http://WWW.CARAVELA.KIEV.UA)**

Свідоцтво  
про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців,  
виготівників і розповсюджувачів  
видавничої продукції:  
ДК №2035 від 16.12.2004 р.