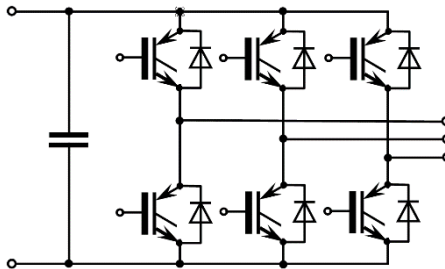


*Valeriu Blajă*

# CONVERTOARE ȘI ECHIPAMENTE ELECTRONICE AVANSATE

*Note de curs*



Chișinău  
2021

Universitatea Tehnică a Moldovei

---

Facultatea Energetică și Inginerie Electrică

Departamentul Inginerie Electrică

*Valeriu Blajă*

**CONVERTOARE ȘI  
ECHIPAMENTE ELECTRONICE  
AVANSATE**

*Note de curs*



Chișinău  
Editura "Tehnica-UTM"  
2021

**CZU 621.315(075.8)**

**B 5**

Notele de curs prezente sunt elaborate conform curriculei disciplinei *Convertoare și echipamente electronice avansate* și sunt destinate studenților (masteranzilor) ciclului II, Masterat, Facultatea Energetică și Inginerie Electrică, precum și disciplinei *Dispozitive semiconductoare de putere* destinate studenților ciclului I, Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică, programul *Microelectronică și Nanotehnologii*. Lucrarea propune prezentarea dispozitivelor semiconductoare de putere moderne și convertoarelor statice de putere aplicate în diverse domenii, sisteme și echipamente electrice și energetice moderne: convertoare cu factor de putere unitar pentru acționări electrice de curent continuu, variatoare de curent alternativ, choppere, invertoare autonome, convertoare de frecvență, compensatoare de putere reactivă și filtre electrice active (aplicate în sistemele energetice de tip FACTS). Fără a utiliza un aparat matematic prea sofisticat, în lucrare sunt explicate clar principiile de funcționare, modelele matematice, caracteristicile și parametrii dispozitivelor semiconductoare de putere și convertoarelor statice de putere moderne. Lucrarea este adresată studenților tuturor specialităților cu profil electric și electronic (atât cursuri la zi, cât și fără frecvență) și poate fi, de asemenea, utilă masteranzilor și doctoranzilor.

Referent științific: conf. univ., dr. Tudor Ciuru

Recenzent: conf. univ., dr. Nicolae Bejan

**DESCRIEREA CIP A CAMEREI NAȚIONALE A CĂRȚII DIN RM**

**Blajă, Valeriu.**

Convertoare și echipamente electronice avansate: Note de curs/  
Valeriu Blajă; referent științific: Tudor Ciuru; Universitatea  
Tehnică a Moldovei, Facultatea Energetică și Inginerie Electrică,  
Departamentul Inginerie Electrică. – Chișinău: Tehnica-UTM,  
2021. – 216 p.: fig., fig. color, tab.

Referințe bibliogr.: p. 209-211 (41 tit.). – 60 ex.

ISBN 978-9975-45-692-0

621.315(075.8)

B 5

Bun de tipar 25.05.21

Coli de tipar 13,5

Comanda nr. 38

Hârtie ofset.

Tipar RISO

Formatul hârtiei 60x84 1/16

2004, UTM, Chișinău, bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, 168

Editura "Tehnica-UTM"

2045, Chișinău, str. Studenților, 9/9

**ISBN 978-9975-45-692-0**

**© UTM, 2021**

C U P R I N S

1.	CONVERTOARE STATICE DE PUTERE	3
1.1.	Noțiuni generale	3
1.2.	Convertoare statice în electroenergetică	6
2.	DISPOZITIVE SEMICONDUCTOARE DE PUTERE	8
2.1.	Nivelul actual și perspectivele dezvoltării DSP	8
2.2.	Diode semiconductoare de putere	10
2.2.1.	Joncțiunea <i>p-s-n</i>	11
2.2.2.	Regimul dinamic	12
2.2.2.1.	Comutație directă	12
2.2.2.2.	Comutație în invers	12
2.2.3.	Puterea disipată în diodă	15
2.2.4.	Dioda Schottky	17
2.3.	Regimul termic al diodei	20
2.3.1.	Încălzire în regim permanent	20
2.3.2.	Evitarea ambalării termice	23
2.3.3.	Încălzire în regim tranzitoriu	24
2.4.	Tiristoare	28
2.4.1.	Noțiuni generale	28
2.4.2.	Principiul de funcționare și caracteristicile tiristorului	29
2.4.3.	Modelul tiristorului “cu două tranzistoare”	32
2.4.4.	Parametrii tiristorului	35
2.4.5.	Modificările principale ale tiristoarelor	36
2.4.5.1.	Fototiristor	36
2.4.5.2.	Tiristoare GTO	37
2.4.5.3.	Diacul și triacul	37
2.4.6.	Regimul dinamic de comutație al tiristorului	39
2.4.6.1.	Comutație în direct	39
2.4.6.2.	Comutație în invers	41
2.5.	Tranzistoare bipolare de putere	42
2.5.1.	Noțiuni generale	42
2.5.2.	Structura tranzistorului bipolar de putere	43
2.5.3.	Tranzistorul Darlington	45
2.5.4.	Caracteristicile statice ale BT	47
2.5.5.	Funcționarea tranzistorului bipolar de putere	49
2.5.6.	Procese tranzitorii în BT	56
2.5.7.	Regimul termic	61

2.6.	Tranzistoare cu efect de câmp	63
2.6.1.	Noțiuni generale	63
2.6.2.	Parametrii de bază ai MOS FET	66
2.6.3.	Structuri MOS FET de putere	66
2.6.4.	Caracteristicile statice ale MOS FET de putere	73
2.6.5.	Funcționarea MOS FET de putere	74
2.6.6.	Caracteristicile dinamice ale MOS FET de putere	77
2.4.6.1.	Comutare în direct ( <i>turn-on</i> )	79
2.4.6.2.	Comutare în invers ( <i>turn-off</i> )	81
2.6.7.	Comparația MOS FET vs PBT	81
2.7.	Transistoare bipolare cu grilă izolată	82
2.7.1.	Noțiuni generale	82
2.7.2.	Parametrii de bază ai IGBT	83
2.7.3.	Structura IGBT	83
2.7.4.	Caracteristicile statice ale IGBT	87
2.7.5.	Funcționarea IGBT	88
2.7.6.	Caracteristicile dinamice ale IGBT	92
2.7.6.1.	Comutație în direct ( <i>turn-on</i> )	97
2.7.6.2.	Comutație în invers ( <i>turn-off</i> )	99
2.8.	Căile de dezvoltare a DSP	100
2.9.	Module IGBT de putere inteligente	103
3.	REDRESOARE CU FACTOR DE PUTERE AVANSAT	105
3.1.	Redresoare cu ventile complet comandate	105
3.2.	Redresor cu comandă impuls-fază anticipată	106
3.3.	Redresor cu comandă PWM a tensiunii redresate	108
3.4.	Redresor cu formare forțată a formei curentului primar	110
4.	CHOPPERE	113
4.1.	Noțiuni generale	113
4.2.	Chopper step down	116
4.3.	Choppere step down cu modulare bipolară	119
4.4.	Choppere step down în 4 cadrane	121
4.5.	Caracteristicile chopperelor reale	121
4.6.	Choppere step up	122
4.7.	Chopper buck-boost	124
4.8.	Chopper <i>Čuk</i>	126
4.9.	Chopper cu separare galvanică	128
5.	INVERTOARE AUTONOME	130
5.1.	Noțiuni generale	130
5.2.	Invertoare de curent	132
5.2.1.	IAC monofazat în punte cu condensator paralel	132
5.2.2.	IAC monofazat semipunte cu condensator paralel	134
5.2.3.	IAC monofazat în punte paralel-serie	135
5.2.4.	IAC monofazat cu redresor de curent invers	136

## CUPRINS

---

5.2.5. IAC monofazat cu variator reactiv	138
5.2.6. IAC trifazat cu condensatoare de comutare în paralel	139
5.2.7. IAC trifazat serie	142
5.2.8. IAC trifazat cu PWM	143
5.3. Invertoare de tensiune	145
5.3.1. IAT monofazat semipunte	145
5.3.2. IAT monofazat în punte	148
5.3.3. Metoda de comandă PWM în IAT	151
5.3.4. IAT monofazat cu priză mediană	158
5.3.5. IAT trifazate	160
5.3.6. IAT trifazat format în baza IAT monofazate în punte	164
5.3.7. IAT trifazat cu 3 niveluri	166
5.3.8. IAT trifazat cu PWM	167
5.4. Invertoare de rezonanță	169
5.4.1. IR cu intrare închisă	170
5.4.2. IR cu intrare deschisă	172
5.4.3. IR cu diode de curent invers	176
5.4.3.1. Regimul de curent intermitent	178
5.4.3.2. Regimul de curent limită	179
5.4.3.3. Regimul de curent neîntrerupt	180
5.4.4. IR cu diode de curent invers cu dublarea frecvenței	183
5.4.5. IR cu tranzistoare	186
5.4.6. IR clasa E	187
5.4.7. Note finale	188
6. COMPENSAREA PUTERII REACTIVE	190
6.1. Noțiuni generale	190
6.2. Compensarea necontrolată a puterii reactive	194
6.3. Compensatoare statice de putere reactivă	196
6.3.1. Condensatoare comutate prin tiristoare	197
6.3.2. Reactoare comandate prin tiristoare	198
6.3.3. Compensatoare capacitativ-inductive	201
6.3.4. Compensatoare cu sursă statică de tensiune reactivă	202
6.4. Compensatoare de distorsiuni – filtre active	205
BIBLIOGRAFIE	209
ABREVIERI	212

## BIBLIOGRAFIE

1. Fl. Ionescu, D. Floricău, S. Nițu, J.P. Six, Ph. Delarue, C. Boguș. Electronica de putere. Convertoare statice. București: Editura Tehnica, 1998.
2. Bitoleanu A., Ivanov S., Popescu M. Convertoare statice. Craiova, 1997.
3. Diaconescu M., Graur Iu. Convertoare statice. Baze teoretice, elemente de proiectare, aplicații. Iași, 1996.
4. С.Н. Флоренцев. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий. Анализ рынка//Электротехника. 1999, No 4, с. 210.
5. Blajă V. Electronica. Dispozitive și circuite electronice. Ciclu de prelegeri. Chișinău: UTM, 2005. - 200 p.
6. Ionescu F. Diode semiconductoare și redresoare de putere. București, 1995.
7. SEMIKRON. Application Manual. Power Semiconductors. English, EN-2015.
8. Основы силовой электроники. Силовые полупроводниковые приборы: учеб. Пособие/[А.А. Богомяков и др.]; под ред. Ф. И. Ковалёва, В. А. Усачёва. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. -247с.
9. А.Бормотов, А.Гришанин, В.Мартыненко В.Мускатиньев, В.Чибиркин. Современные силовые полупроводниковые приборы для энергоэффективных технологий. Электроника: Наука, Технология, Бизнес 4/2010.
10. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. Москва, 1982.
11. В.И. Мелешин. Транзисторная преобразовательная техника. Москва: Техносфера, 2005. -632 с.
12. Blajă V., Gherțescu C. Electronica de putere. Îndrumar de laborator. Chișinău: UTM, 2000. - 88 p.
13. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. Ч.1. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999.
14. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000, ч.2. -197 с.

15. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И. Преобразовательная техника. Москва, 1974.
16. Томашевский Д.Н. Автономные инверторы: учебное пособие/Д.Н. Томашевский. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. -120 с.
17. Кулик В.Д. Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи: учебное пособие/ГОУВПО СПбГТУРП. -СПб., 2010. -90 с.
18. Геворкян М.В. Современные компоненты компенсации реактивной мощности (для низковольтных сетей). Москва: Издательский дом «Додэка-XXI», 2003. - 64 с.
19. Силовая электроника. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
20. Cziker A., Chindris M. Compensarea regimului permanent dezechilibrat la consumator. Teorie. Aplicații. Cluj-Napoca: Editura Mediamira, 2003.
21. Mohan N., Undeland T., Robbins W., Power Electronics: Converters, Applications and Design, Third Edition, Published by John Willey & Sons Inc., USA, 2003.
22. Albu M. Electronica de putere. Vol 1: Noțiuni introductive, dispozitive, conversia statică alternativ-continuu a energiei electrice. Iași: Casa de Editură „Venus”, 2007.
23. Kelemen A., Imecs M. Electronica industrială. Mutatoare. Îndrumar de laborator. București, 1982.
24. Erickson R., Maksimovic D. Fundamentals of Power Electronics. University of Colorado, Boulder, Colorado, Published by Kluwer Academic Publishers, USA, 2001.
25. Alexander B. Lostetter. Miniaturization, Packaging, and Thermal Analysis of Power Electronics Modules. Blacksburg, Virginia, 1998.
26. Unified constant-frequency integration control of active power filters / Luowei Zhou and Keyue M. Smedley. University of California, 2002.
27. Open loop and closed loop spectral frequency active filtering / Sebactien Mariethoz and Alfred C. Rufer // IEEE transactions on Power Electronics, vol. 17, no. 4, July 2002.



28. Active filters. ABB - 2002.
29. Carmen Golovanov, Mihaela Albu. Probleme moderne de măsurare în electroenergetică. București: Editura Tehnică, 2001.
30. Gh. Georgescu, M. Gavrițaș, D. Rădășanu. Calculul și reducerea pierderilor de putere și energie în rețelele electrice. Iași: Editura „Spectrum”, 1997.
31. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения / Ю.М. Кулинич. Хабаровск, 2001.
32. Jamal A. Baroudi, Venkata Dinavahi, Andrew M. Knight, „A review of power converter topologies for wind generators”, Edmonton, AB., decembrie 2006.
33. Marcel Adam, Adrian Baraboi, Cătălin Pancu: Statcom, dispozitiv al rețelelor electrice inteligente.
34. Arthit Sode-Yome and N. Mithulanathan: Comparison of shunt capacitor, SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement.
35. Raimonds Cimbals, Oskars Krievs, Leonids Ribickis: A Static Synchronous Compensator for Reactive Power Compensation under Distorted Mains Voltage Conditions.
36. Juan M. Ramírez and J.L. Murillo Pérez: Application of the Three-Phase STATCOM in Voltage Stability.
37. European Journal of Scientific Research: Construction of a Prototype D-Statcom for Voltage Sag Mitigation.
38. Arrillaga J. High voltage direct current transmission. The Institution of Engineering and Technology, 1998.
39. Carlos A.C. Cavaliere, Edson H. Watanabe, Maurício Aredes: Analysis and Operation of STATCOM in Unbalanced Systems.
40. Bică D. Sisteme informatice moderne în electroenergetică. Tg.Mureș: Ed. UPM, 2005.
41. Diaconescu M., Graur Iu. Convertoare statice. Baze teoretice, elemente de proiectare, aplicații, Iași, 1996.