

VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA

František Vondrášek,
Zdeněk Peroutka, Tomáš Glasberger
a kolektiv



FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

Výkonová elektronika

František Vondrášek, Zdeněk Peroutka, Tomáš Glasberger a kolektiv

Autoři a spoluautoři kapitol:

Ing. Vojtěch Blahník, Ph.D.	4, 7
doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.	2
Ing. Jiří Fořt, Ph.D.	3, 11
doc. Ing. Tomáš Glasberger, Ph.D.	2, 6, 8, 12
Ing. Martin Jára, Ph.D.	2, 3, 9
doc. Ing. Tomáš Komrská, Ph.D.	12
prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.	10
Ing. Jan Michalík, Ph.D.	7
Ing. Jan Molnár, Ph.D.	3, 7
prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.	6, 7, 8, 10, 12
doc. Ing. Martin Pittermann, Ph.D.	4, 8, 10
doc. Ing. Jakub Talla, Ph.D.	12
prof. Ing. František Vondrášek, CSc.	1, 4 až 11

Vydání publikace bylo schváleno Vědeckou redakcí Západočeské univerzity v Plzni.

Recenzenti: prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.; Ing. Jaroslav Škubal, Ph.D.

Redakce rukopisu: doc. Ing. Tomáš Glasberger, Ph.D.

Grafické zpracování obálky: MgA. Katrin Bittnerová

Typografická úprava: Mgr. Jakub Pokorný

Vydala:

Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 2732/8, 301 00 Plzeň

Vytiskla:

Prekomia s.r.o., Západní 1322/12, 323 00 Plzeň

První vydání, 598 stran

Pořadové číslo: 2371, ediční číslo: 55-053-22

Plzeň 2025

ISBN 978-80-261-1084-2

© Západočeská univerzita v Plzni, 2025

Předmluva

V průběhu uplynulého 20. století a i několika málo let 3. tisíciletí, prostoupila výkonová elektronika veškerý průmysl, dopravu a energetiku (viz kap. 12). Do předmětů technického školství začala pronikat zprvu skromně – jen jako součást některých předmětů. Například na Elektrotechnické fakultě tehdejší Vysoké školy strojní a elektrotechnické v Plzni (VŠSE) byla výkonová elektronika zavedena jako samostatný předmět na přelomu šedesátých a sedmdesátých let minulého století. Její výuka, ale i výuka jiných předmětů, zde byla úzce spjata s Elektrotechnickou továrnou Škoda v Plzni Doudlevcích (Škoda ETD), a to formou tzv. „Společného pracoviště“. Jeho členy byli vybraní výzkumní pracovníci Škoda a někteří učitelé plzeňské elektrotechnické fakulty. Klíčovou osobností Společného pracoviště byl prof. Lumír Kule. Uvedené spojení průmyslu s vysokou školou bezesporu prospělo, a to jak vývoji výkonové elektroniky v ETD, tak i úrovni vyučované výkonové elektroniky, ale i jiných předmětů na VŠSE.

V současné době je plzeňská Fakulta elektrotechnická (FEL) součástí Západočeské univerzity v Plzni (ZČU). Na této fakultě vzniklo Výzkumné centrum RICE (Research and Innovation Centre for Electrical Engineering), a to zásluhou kolektivu mladých pracovníků, vedeného, dnes již profesorem a ředitelem RICE, Zdeňkem Peroutkou. Tak jako u výše zmíněného Společného pracoviště, na jehož tradici a zkušenosti RICE navazuje, je jednou z podstatných úloh RICE spojení vysokoškolských učitelů s výzkumem a praxí.

Předkládaná publikace vychází ze série na sebe navazujících svazků skript, která byla již od začátku devadesátých let koncipována s vizí budoucí knižní publikace. Jeden ze svazků, zabývající se vlivem měničů na napájecí soustavu, se stal základem vzniku dvou již vyšších knižních publikací prof. Václava Kůse – [K.28] a [K.29]. Aktualizovaný obsah zbývajících svazků je ve formě knihy čtenářům právě nabízen. V něm je poskytován ucelený přehled všech moderních a dosud používaných výkonových polovodičových měničů. Kniha je určena především studentům vysokých škol, ale dobře poslouží i výzkumníkům, vývojářům a odborníkům z praxe.

Ke vzniku knihy přispěla, poskytnutím konzultací a výsledků mnoha experimentů, řada pracovníků z průmyslu, z RICE a z Katedry výkonové elektroniky a strojů (KEV).

Je mou milou povinností co nejsrdečněji poděkovat všem za výše uvedenou spolupráci. Zasloužené poděkování za pomoc s přípravou knihy patří i pánům recenzentům – prof. Petru Chlebišovi, významnému odborníkovi z řad akademických pracovníků a Ing. Jaroslavu Škubalovi, Ph.D., přednímu odborníkovi z firmy ŠKODA TRANSPORTATION a. s.

Za spolupráci při konečné redakci je třeba poděkovat panu Mgr. Jakubovi Pokornému, vedoucímu vydavatelství ZČU.

Protože předložená kniha vznikla v Plzni, dovolím si v závěru předmluvy uvést tři knihy, jejichž významní autoři vykazují s Plzní vzácnou spojitost:

Elektrické pohony – technický průvodce svazek 50. – [K.49], vyšel v roce 1964. Jeden z jeho dvou hlavních autorů byl **Ing. Jan Soukeník**, hlavní konstruktér Škoda ETD a první učitel Elektrických pohonů na VŠSE v Plzni. Spoluautor knihy – Ing. Lumír Kule, CSc. zpracoval pro nadepsanou knihu kapitolu o stejnosměrných regulovaných pohonech, která se již dotkla výkonové elektroniky řízenými rtuťovými usměrňovači.

Elektrické pohony s tyristory je kniha, která vyšla v roce 1970, a to jen čtyři roky po zahájení výroby tyristorů v ČKD Polovodiče. Kupodivu se jí tehdy nedostalo ocenění, a to

v souvislosti s pravidlem „kdo rychle dává, dvakrát dává“. Jedním ze čtyř jejích autorů (viz [K.1]) je pan **Ing. Josef Parlesák**. Svoji „Alma mater“, VŠSE v Plzni, opustil v roce 1959. To se oslavovalo pouhých 10 let od jejího vzniku.

Technika elektrických pohonů – technický průvodce svazek 50 – [K.27]. Uvedená kniha **vyšla v roce 1983. Pro tento rok byla vyhlášena nejlepší knihou SNTL**. Je dílem 20 autorů z celé tehdejší ČSR. Z plzeňské Škodovky jsou to např. vedoucí projektanti – Ing. Vladislav Anderle, CSc. a Ing. Jiří Fiedler, CSc. Z plzeňské VŠSE – dnes součásti ZČU v Plzni, lze jmenovat Ing. Karla Zemana, CSc. – nyní docenta ZČU, odborníka na regulované pohony s polovodičovými měniči.

Všech 20 autorů vyjmenovat nelze, ale na vedoucího autora ještě místo zbývá. Je jím – tehdy docent, dnes **emer. prof. Ing. Lumír Kule CSc.** Podstatnou měrou se zasloužil o vývoj výkonové elektroniky ve Škoda ETD a o zavedení její výuky, a to již začátkem sedmdesátých let minulého století na FEL VŠSE v Plzni. Vedle [K.27] je spoluautorem několika knih a autorem řady skript. Patří k významným nestorům výkonové elektroniky a elektrických pohonů České republiky.

A handwritten signature in blue ink, which appears to read "J. Honzáček". The signature is fluid and cursive.

V Plzni dne 10. června 2025 v zastoupení autorů

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Obsah pojmu výkonová elektronika	1
1.2 Historie výkonové elektroniky	2
1.3 Základní pojmy	4
1.3.1 Takt a komutace	4
1.3.2 Klasifikace spínačů a měničů	5
1.3.3 Elektromagnetická kompatibilita	8
1.4 Způsob výkladu a jeho podpůrné prostředky	11
1.4.1 Napěťové množství	11
1.4.2 Systém poměrných jednotek „per unit“	12
2 Výkonové polovodičové součástky (VPS)	14
2.1 Diody	15
2.1.1 PIN dioda	18
2.1.2 CAL dioda	19
2.1.3 Výkonové Schottkyho diody	19
2.2 Tranzistory	21
2.2.1 Výkonové MOSFET tranzistory	21
2.2.2 SiC MOSFET tranzistory	28
2.2.3 HEMT tranzistory	29
2.2.4 IGBT tranzistory	31
2.3 Tyristory	35
2.3.1 Triodový zpětně závěrný tyristor	35
2.3.2 GTO tyristor	38
2.3.3 IGCT tyristor	40
3 Spínací obvody výkonových polovodičových součástek	42
3.1 Budicí kanál tyristorů	43
3.1.1 Vypínatelné tyristory GTO a IGCT	46
3.2 Budicí kanál IGBT a MOSFET	47
3.3 Další funkce driveru	48
3.3.1 Rozhraní driveru	49
3.3.2 Galvanické oddělení	50
3.3.3 Ochrana proti nadproudu a zkratu	51
3.3.4 Ochrana proti větrovému zkratu	53
3.3.5 Měření a monitoring teploty	54
3.3.6 Monitoring napájecího napětí driveru UVLO	54
3.3.7 Millerův clamp	54
3.4 Budicí obvody WBG prvků	55
4 Usměrnovače s vnější komutací	57
4.1 Průběhy usměrněného napětí a proudu	57
4.1.1 Usměrněné napětí	57
4.1.2 Usměrněný proud	58

4.2	Uzlové usměrňovače při nepřerušovaném proudu	60
4.2.1	Neřízené usměrňovače	60
4.2.2	Princip fázového řízení a řídicí charakteristika	62
4.2.3	Usměrňovačový a střídačový chod	65
4.2.4	Uzlový usměrňovač s nulovou diodou	69
4.3	Můstkové usměrňovače při nepřerušovaném proudu	71
4.3.1	Můstkové spojení je sériové spojení uzlových usměrňovačů	71
4.3.2	Trojfázový plně řízený můstek	72
4.3.3	Trojfázový polořízený můstek	75
4.3.4	Jednofázový plně řízený můstek	78
4.3.5	Jednofázové polořízené můstky	80
4.4	Přerušovaný a nepřerušovaný proud p -pulsního usměrňovače	82
4.4.1	Klasická zátěž typu stejnosměrný motor nebo budící obvod	82
4.4.2	Zátěž typu střídač	96
4.5	Vliv vnitřní impedance napájecího zdroje	102
4.5.1	Průběh komutace	102
4.5.2	Zatěžovací charakteristiky	105
4.6	Měničový transformátor	114
4.6.1	Důvody použití	114
4.6.2	Proudové a napěťové poměry	115
4.6.3	Stejnoseměrná magnetizace	116
4.6.4	Typový výkon transformátoru	117
4.6.5	Hodinové číslo	118
4.7	Vzájemné porovnání základních spojení usměrňovačů	120
4.8	Sériové a paralelní kombinace usměrňovačů	120
4.8.1	Sériové spojení s omezením deformačního jalového výkonu	121
4.8.2	Sériové spojení s postupným řízením pro omezení jalového výkonu základní harmonické	126
4.8.3	Paralelní spojení	129
4.9	Regulační vlastnosti usměrňovače	135
4.9.1	Princip fázového řízení tyristorových měničů	135
4.9.2	Statické vlastnosti v oblasti nepřerušovaného proudu	136
4.9.3	Dynamické vlastnosti pro malé změny řídicího napětí	137
4.9.4	Dynamické vlastnosti pro velké změny řídicího napětí	138
4.9.5	Problém „prvního impulsu“	139
4.9.6	Proudová smyčka v oblasti nepřerušovaného proudu	140
4.9.7	Regulační vlastnosti v oblasti přerušovaného proudu	141
4.9.8	Regulátor pro oblast přerušovaného proudu PP	143
4.9.9	Rekapitulace regulačních vlastností usměrňovače	144
4.10	Simulace na počítači	144
4.11	Reverzační usměrňovačové skupiny	147
4.11.1	Střední hodnota okružového napětí a proudu	148
4.11.2	Časový průběh okružového proudu	149
4.11.3	Dynamický okružový proud	150
4.11.4	Symetrické řízení	151
4.11.5	Regulační schéma s regulovaným okružovým proudem	152
4.11.6	Regulační schéma s minimálním okružovým proudem	152
4.11.7	Řízení bez okružového proudu	153
4.11.8	Nevýhody okružového proudu	154
4.11.9	Výhody okružového proudu	154
4.11.10	Varianty silových obvodů	155

5 Stejnoseměrné spínače a pulsní měniče	158
5.1 Stejnoseměrný spínač	159
5.2 Funkce pulsních měničů	159
5.2.1 Snižování napětí	160
5.2.2 Zvyšování napětí	161
5.2.3 Snižování i zvyšování napětí	162
5.2.4 Pulsní řízení odporu	163
5.3 Řízení pulsních měničů	167
5.4 Přerušovaný a nepřerušovaný proud pulsních měničů	169
5.4.1 Analýza měniče pro snižování napětí	169
5.4.2 Analýza měniče pro zvyšování napětí	171
5.4.3 Analýza měniče pro snižování i zvyšování napětí	173
5.4.4 Analýza měničů odporu	175
5.4.5 Zatěžovací charakteristiky	176
5.5 Zvlnění proudu zátěže pulsních měničů	180
5.5.1 Poměry u měniče pro snižování nebo zvyšování napětí	181
5.5.2 Poměry u měniče pro snižování i zvyšování napětí	182
5.5.3 Poměry u měničů odporu	183
5.5.4 Poměry u měničů pro stabilizaci napětí	186
5.6 Matematické modely pulsního měniče	187
5.7 Vstupní filtr pulsního měniče	191
5.7.1 Základní vztahy pro kapacitu filtračního kondenzátoru	191
5.7.2 Analýza reálného vstupního obvodu	193
5.7.3 Syntéza vstupního filtru	198
5.8 Vícefázová spojení pulsních měničů	202
5.8.1 Vícefázová paralelní spojení	202
5.8.2 Vícefázové sériové a sérioparalelní spojení	212
5.8.3 Obraz materiálové náročnosti tlumivek a mezifázových transformátorů	217
5.9 Vícekvadrantová spojení pulsních měničů	219
5.9.1 Dvoukvadrantová spojení	219
5.9.2 Čtyřkvadrantové spojení	224
5.10 Regulační rozsah a spínací frekvence pulsních měničů	224
6 Střídače	227
6.1 Napěťové střídače	229
6.1.1 Obdélníkové řízení	234
6.1.2 Komparační ŠPM	252
6.1.3 ŠPM založená na vylučování vyšších harmonických	266
6.1.4 Vektorová ŠPM	269
6.1.4 Další způsoby řízení	281
6.1.5 Víceúrovňová spojení s upínacími diodami	288
6.1.6 Víceúrovňová spojení s plovoucími kondenzátory	296
6.1.7 Sériová spojení střídačů na vstupu, paralelní na výstupu	301
6.1.8 Paralelní spojení střídačů na vstupu, sériová na výstupu	303
6.1.9 Paralelní spojení na vstupu i výstupu	308
6.2 Proudové střídače	314
6.2.1 Vznik proudového střídače a jeho základní vlastnosti	314
6.2.2 Obdélníkové řízení	318
6.2.3 Analýza střídače s mezifázovou komutací	323
6.2.4 Lichoběžníková modulace s vypínatelnými součástkami	329
6.2.5 Důsledky využití vypínatelných součástek	332
6.2.6 Vektorová modulace	333
6.2.7 Paralelní spojení proudových střídačů	342

7 Pulsní usměrňovače	348
7.1 Napěťové pulsní usměrňovače	349
7.1.1 Jednofázové spojení	349
7.1.2 Trojfázové spojení	358
7.1.3 Ukázky oscilogramů snímaných na funkčních modelech	368
7.2 Proudové pulsní usměrňovače	370
7.2.1 Jednofázové spojení	371
7.2.2 Trojfázové spojení	385
8 Nepřímé frekvenční měniče	389
8.1 Napěťové nepřímé frekvenční měniče	389
8.1.1 Varianta bez rekuperace	390
8.1.2 Varianty umožňující rekuperaci	391
8.2 Proudové nepřímé frekvenční měniče	394
8.3 Speciální topologie nepřímých frekvenčních měničů	395
8.3.1 Víceúrovňové nepřímé frekvenční měniče	395
8.3.2 Nepřímý frekvenční měnič se středofrekvenčním transformátorem	396
8.3.3 Frekvenční měnič s kaskádně řazenými H-můstky	398
8.3.4 Modulární vícehladinový frekvenční měnič (MMC)	399
8.4 Filtry střídačů a nepřímých frekvenčních měničů	403
8.4.1 Klasifikace	403
8.4.2 Hrubý návrh vybraných druhů filtrů	404
8.5 Zvláštnosti nepřímých měničů velkých a velmi velkých výkonů	430
8.6 Vzájemné porovnání napěťových a proudových frekvenčních měničů	437
9 Měkká komutace	439
9.1 Termíny tvrdá a měkká komutace	439
9.1.1 L , C obvod – základ obvodů měkké komutace	439
9.2 Měkká komutace pulsních měničů	442
9.2.1 Měnič se spínáním ZVS	444
9.3 Měkká komutace střídačů	446
9.3.1 Klasifikace měkce komutovaných napěťových střídačů	446
9.3.2 Střídače s paralelním rezonančním meziobvodem	446
9.3.3 Střídače s kvazirezonančním meziobvodem	448
9.3.4 Střídače s pomocnými póly	452
10 Přímé frekvenční měniče	457
10.1 Přímé měniče s vnější komutací – cyklokonvertory	457
10.1.1 Použití cyklokonvertorů v praxi	458
10.1.2 Výkonové obvody	458
10.1.3 Řízení výstupního napětí cyklokonvertorů	461
10.1.4 Výstupní frekvence cyklokonvertoru	462
10.1.5 Regulace na zadaný výstupní proud cyklokonvertorů	465
10.2 Přímé maticové měniče	466
10.2.1 Základní pojmy a principy	466
10.2.2 Vybrané metody řešení ŠPM	475
10.2.3 Přímá metoda řešení skalární ŠPM	477
10.2.4 Nepřímá metoda řešení vektorové ŠPM	481
10.3 Maticové měniče nepřímé a jejich úsporná zapojení	495
10.4 Závěrem k cyklokonvertorům a maticovým měničům – včetně maticových nepřímých	498
11 Střídavé spínače a měniče napětí	499
11.1 Střídavé spínače	499
11.1.1 Jednofázový spínač	499
11.1.2 Trojfázové spínače	501

11.2	Střídavě měniče napětí	503
11.2.1	Jednofázový měnič	503
11.2.2	Trojfázový plně řízený měnič	510
11.2.3	Trojfázový polořízený měnič	517
11.2.4	Cyklicky spínaný střídavý měnič	521
12	Aplikace výkonové elektroniky	522
12.1	Dopravní technika a elektromobilita	522
12.1.1	Drážní vozidla a napájecí infrastruktura	522
12.1.2	Hybridní a elektrické autobusy	533
12.1.3	Hybridní a plně elektrická auta	536
12.1.4	Letadla a lodě	541
12.2	Energetika	544
12.2.1	Přenos a rozvod elektrické energie	544
12.2.2	Výroba elektrické energie a tepla	555
12.3	Průmysl	560
12.4	Datová centra a umělá inteligence	566
12.5	Výkonová elektronika v běžné domácnosti	566
	Seznam hlavních použitých značek a zkratk	569
	Literatura	576
	Anotace / Abstract	597