

	PŘEDMLUVA	13
1	ÚVOD	15
2	ZÁKLADNÍ VZTAHY A DEFINICE	19
2.1	Harmonická analýza	19
2.4.1	Vyjádření funkce Fourierovou řadou	19
2.4.2	Kosinová a sinová Fourierova řada	20
2.4.3	Komplexní tvar Fourierovy řady	21
2.4.4	Fourierova transformace, diskrétní Fourierova transformace	21
2.2	Výkony v obvodech s nesinusovými průběhy napětí a proudů	22
2.3	Poměrné hodnoty harmonických, definice zkreslení	26
2.4	Charakteristické a necharakteristické harmonické, meziharmonické	27
2.4.1	Základní pojmy	27
2.4.2	Meziharmonické	28
2.4.3	Harmonické a meziharmonické ve výkonové elektronice	29
2.5	Blízké a vzdálené elektromagnetické pole	32
2.6	Literatura ke kapitole 2	34
3	ZDROJE RUŠENÍ A KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	35
3.1	Kvalita elektrické energie	35
3.2	Poruchy v napájecí soustavě, vliv polovodičových zařízení	35
3.3	Možnosti šíření rušení a elektromagnetické vazby	38
3.3.1	Galvanické rušivé vlivy	38
3.3.2	Kapacitní rušivé vlivy	40
3.3.3	Induktivní rušivé vlivy	43
3.3.4	Rušivá vazba vyzařováním	44
3.4	Druhy rušivých signálů a jejich frekvenční rozsahy	46
3.4.1	Symetrická a nesymetrická rušivá napětí a proudy	50
3.5	Zdroje harmonických, vliv na napájená zařízení	51
3.5.1	Zdroje harmonických proudů	51
3.5.2	Harmonické generované obloukovými pecemi	52
3.5.3	Elektrotepelné spotřebiče s fázovou regulací výkonu	52

3.5.4	Harmonické generované středofrekvenčním ohřevem	53
3.5.5	Vlivy hromadného dálkového ovládání	53
3.5.6	Vliv světelných spotřebičů	54
3.5.7	Zatížení středního vodiče	56
3.6	Literatura ke kapitole 3	57
4	IMPEDANCE SÍŤE	59
4.1	Modely pro výpočty impedance závodové sítě	61
4.1.1	Napájecí síť	62
4.1.2	Transformátory	62
4.1.3	Reaktory	63
4.1.4	Kondenzátory	63
4.1.5	Venkovní a kabelová vedení	64
4.1.6	Asynchronní motory	64
4.1.7	Synchronní motory	65
4.1.8	Zátěže nižších napěťových hladin	65
4.2	Pravidla pro tvoření celkových modelů	67
4.3	Charakteristické impedance zařízení	68
4.4	Harmonická napětí	71
4.5	Rezonance v závodových sítích	72
4.6	Impedance v trakčních soustavách	73
4.7	Impedance sítě ve vztahu k normám	76
4.7.1	Vztažná impedance Z_{ref}	77
4.7.2	Zkušební impedance Z_{test}	77
4.8	Literatura ke kapitole 4	78
5	VLIVY POLOVODIČOVÝCH ZAŘÍZENÍ NA NAPÁJECÍ SOUSTAVU	79
5.1	Harmonická analýza odebíraných proudů	79
5.1.1	Amplitudový zákon	79
5.1.2	Zobecněný amplitudový zákon	82
5.1.3	Složitější průběhy proudů	86
5.2	Harmonické proudy usměrňovačů	89
5.2.1	Idealizované podmínky činnosti	90
5.2.2	Vliv úhlu komutace na harmonické proudy	91
5.2.3	Harmonické proudy usměrňovače při uvažování reálných parametrů	93
5.2.4	Necharakteristické harmonické usměrňovačů	97
5.2.5	Meziharmonické usměrňovačů	101

5.3	Harmonické proudy měničů napětí	104
5.3.1	Jednofázový měnič napětí s odporovou zátěží	105
5.3.2	Jednofázový střídavý měnič napětí s induktivní a odporově-induktivní zátěží	106
5.3.3	Třífázový střídavý měnič napětí s odporovou zátěží	109
5.3.4	Třífázový střídavý měnič napětí s induktivní a odporově-induktivní zátěží	110
5.3.5	Zjednodušený způsob výpočtu harmonických proudů měničů napětí	111
5.3.6	Necharakteristické harmonické a meziharmonické měničů napětí	112
5.4	Harmonické proudy přímých měničů kmitočtu	113
5.4.1	Harmonické a meziharmonické vstupního proudu přímého měniče kmitočtu ...	115
5.4.2	Amplitudy harmonických a meziharmonických vstupního proudu přímého měniče kmitočtu	117
5.5	Harmonické proudy nepřímých měničů kmitočtu s proudovým střídačem	118
5.5.1	Charakteristické harmonické proudy měničů kmitočtu s proudovým střídačem	118
5.5.2	Meziharmonické proudy měničů s proudovým střídačem	118
5.6	Harmonické proudy nepřímých měničů kmitočtu s napěťovým střídačem	119
5.6.1	Harmonické proudy měniče kmitočtu s napěťovým střídačem při zjednodušených podmínkách činnosti	120
5.6.2	Harmonické proudy měniče kmitočtu s reálnými parametry	121
5.6.3	Indukčnost v obvodu na straně usměrňovače, jednofázové spojení	123
5.6.4	Indukčnost v obvodu na straně usměrňovače, třífázové spojení	128
5.6.5	Střídač, připojený ke stejnosměrnému obvodu	131
5.6.6	Shrnutí poznatků k průběhu proudu, odebíraného měničem ze sítě	134
5.6.7	Necharakteristické harmonické měničů kmitočtu s napěťovým střídačem	134
5.6.8	Meziharmonické měničů kmitočtu s napěťovým střídačem	137
5.6.9	Vliv vlastností komponent měniče na harmonické proudy a energetické ukazatele	140
5.7	Vlivy pulzních modulací na harmonické proudy	150
5.8	Harmonické proudy pulzních usměrňovačů	153
5.8.1	Princip pulzního usměrňovače napěťového typu	154
5.8.2	Harmonické vstupního proudu pulzního usměrňovače	154
5.8.3	Vliv velikosti zátěže na velikost harmonických proudů pulzního usměrňovače	156
5.8.4	Vliv spínací frekvence na velikost harmonických proudů pulzního usměrňovače	159
5.8.5	Vliv zkreslení zdroje napětí na velikost harmonických proudů usměrňovače	160
5.8.6	Harmonické proudových pulzních usměrňovačů	161

5.9	Harmonické proudy při současné práci více měničů	163
5.9.1	Současná práce dvou měničů	164
5.9.2	Současná práce většího počtu měničů	166
5.9.3	Současná práce většího počtu měničů kmitočtu	168
5.10	Harmonické proudy polovodičových měničů a normy	169
5.10.1	Normy pro harmonické proudy usměrňovačů	170
5.10.2	Normy pro harmonické proudy přímých měničů kmitočtu	171
5.10.3	Normy pro harmonické proudy měničů napětí	172
5.10.4	Normy pro harmonické proudy měničů kmitočtu s napěťovým střídačem	172
5.10.5	Normy pro harmonické proudy pulzních usměrňovačů	173
5.10.6	Normy pro harmonické proudy současně pracujících měničů	173
5.11	Literatura ke kapitole 5	175
6	MINIMALIZACE HARMONICKÝCH, FILTRAČNĚ KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ	179
6.1	Minimalizace harmonických	179
6.1.1	Omezení harmonických bez pomoci dodatečných zařízení	179
6.1.2	Omezení harmonických instalací dodatečných zařízení	180
6.1.3	Omezení harmonických instalací aktivních filtrů	180
6.2	Kompensace účinníku	181
6.2.1	Princip kompenzace účinníku	181
6.2.2	Možnosti umístění kompenzačního zařízení	183
6.2.3	Technické prostředky pro kompenzaci účinníku	183
6.2.4	Užití kompenzace v dalších oblastech elektrických rozvodů	185
6.3	Filtračně kompenzační zařízení	186
6.3.1	Požadavky na filtry	186
6.3.2	Základní vztahy pro návrh filtru	187
6.3.3	Podmínky pro volbu kondenzátorové baterie	190
6.3.4	Výpočet z proudové podmínky	191
6.3.5	Výpočet z napěťové podmínky	192
6.3.6	Určení minimálního instalovaného výkonu	192
6.3.7	Vliv nekompenzovaných harmonických	194
6.3.8	Volba kondenzátorové baterie podle potřebného kompenzačního výkonu	195
6.3.9	Výpočet základních parametrů tlumivky filtru	196
6.3.10	Činný odpor tlumivky a vliv rozladění obvodu na účinnost filtrace	196
6.3.11	Složitější typy filtrů	197
6.4	Filtračně kompenzační zařízení jako prvek sítě	199
6.4.1	Rozdělení harmonických proudů v síti s instalovaným filtrem	199
6.4.2	Možnosti vzniku rezonance v sítích s filtry nebo s chráněnou kompenzací	200
6.4.3	Způsoby ladění filtrů a chráněné kompenzace	200
6.4.4	Zapínání a vypínání skupiny filtrů	202

6.4.5	Vliv filtračně kompenzačního zařízení na napětí sítě	202
6.4.6	Interakce filtračně – kompenzačního zařízení se signálem HDO	204
6.5	Řízení kompenzačního výkonu, spínání kondenzátorů	206
6.5.1	Pevná a proměnná kompenzace	206
6.5.2	Problematika připojení kondenzátoru	207
6.5.3	Základní způsoby proměnné kompenzace	207
6.5.4	Dynamická kompenzace účinníku	208
6.6	Aktivní filtry	210
6.6.1	Paralelní aktivní filtry	211
6.6.2	Sériové aktivní filtry	212
6.6.3	Kombinované aktivní filtry	212
6.6.4	Koncepce aktivních filtrů	213
6.6.5	Linkový kondicionér	214
6.6.6	Hybridní filtry	215
6.6.7	Principy řízení aktivních filtrů	216
6.7	Literatura ke kapitole 6	219
7	POKLESY NAPĚTÍ V NAPÁJECÍ SOUSTAVĚ A JEJICH VLIV NA ČINNOST MĚNIČŮ	221
7.1	Poruchy napětí v napájecí soustavě	221
7.1.1	Definice krátkodobého poklesu napětí	221
7.1.2	Charakter poklesů a krátkodobých přerušení napětí	224
7.1.3	Příčiny poklesů a krátkodobých přerušení napětí, šíření poklesů	224
7.1.4	Měření krátkodobých poklesů napětí	226
7.2	Možnosti eliminace krátkodobých poklesů a jejich vlivů na spotřebiče	227
7.2.1	Eliminace poklesů změnami v elektrizační soustavě	227
7.2.2	Eliminace poklesů zvýšením odolnosti napájeného zařízení	228
7.2.3	Eliminace poklesů napětí dodatečným zdrojem energie	229
7.3	Snížení krátkodobých poklesů napětí dodatečnými prostředky	230
7.3.1	Vyrovnání napěťového poklesu použitím DVR	230
7.3.2	Použití spínaných kondenzátorů	231
7.3.3	Spínání akumulované energie v indukčnosti zvyšovacím pulzním měničem ...	232
7.3.4	Použití akumulátorové baterie, superkondenzátorů a UPS	234
7.3.5	Použití energie setrvačnicku	234
7.4	Důsledky poklesů napětí na činnost měničů kmitočtu	235
7.4.1	Pokles napětí ve stejnosměrném meziobvodu	235
7.4.2	Možnost vzniku proudové špičky do kondenzátoru	236
7.4.3	Možnost vzniku přepětí vlivem opětného zapnutí	236
7.4.4	Zablokování řízení střídače	236

7.5	Vliv poklesu napětí sítě na moment motoru – principy	236
7.5.1	Rychlost poklesu napětí, vznik proudové špičky při obnově napětí	237
7.5.2	Trvalé blokování spínání tranzistorů po poklesu napětí kondenzátoru	238
7.5.3	Výrazný pokles napětí v době zablokování tranzistorů	239
7.5.4	Odblokování spínání tranzistorů po obnově napětí	240
7.5.5	Snížení napětí motoru	242
7.6	Omezení vlivu poklesů napětí prostředky výkonové a řídicí elektroniky v použitých měničích	243
7.6.1	Použití pulzních usměrňovačů	243
7.6.2	Využití řízení střídače	247
7.7	Řešení problému vlivu poklesů napětí na měniče jako celek	250
7.8	Literatura ke kapitole 7	251
8	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA VÝKONOVÝCH POLOVODIČOVÝCH SYSTÉMŮ VE VYSOKOFREKVENČNÍ OBLASTI	253
8.1	Základní poznatky	253
8.2	Zásady projektování výkonových obvodů z hlediska EMC	253
8.2.1	Propojovací kabely	254
8.3	Zásady projektování řídicích obvodů z hlediska EMC	256
8.3.1	Snížení galvanického ovlivňování	256
8.3.2	Snížení kapacitní rušivé vazby	257
8.3.3	Snížení indukční rušivé vazby	257
8.4	Eliminace vysokofrekvenčního rušení u polovodičových systémů	258
8.4.1	Snížení rušivého ovlivňování stíněním	258
8.4.2	Zemnění obvodů systému měniče	264
8.4.2.1	Jednobodové zemnění	264
8.4.2.2	Vícebodové zemnění	265
8.4.2.3	Hybridní zemnění	266
8.5	Odrušovací filtry	266
8.6	Omezení nárazových zapínacích proudů měničů	271
8.7	Přepět'ová ochrana polovodičového měniče	274
8.8	Literatura ke kapitole 8	277
9	EMC NAPÁJECÍCH ZDROJŮ	279
9.1	Rozdělení napájecích zdrojů	279
9.1.1	Lineární napájecí zdroje	279

9.1.2	Impulzní napájecí zdroje	281
9.2	Klasicky řešené síťové impulzní zdroje	282
9.2.1	Základní konfigurace síťových impulzních zdrojů	282
9.2.2	Blokující měnič	283
9.2.3	Propustný měnič	283
9.2.4	Dvojčinný měnič – půl můstek	285
9.2.5	Dvojčinný měnič – plný můstek	285
9.3	Základní konfigurace vstupního obvodu impulzních zdrojů a jejich harmonické proudy	286
9.4	Minimalizace vlivu impulzních zdrojů napájecích zdrojů na napájecí síť	289
9.4.1	Pasivní kapacitní filtr PFC	289
9.4.2	Pasivní indukční filtr PFC	293
9.4.3	Aktivní filtr PFC typu Boost	296
9.4.4	Aktivní filtr PFC typu Interleaved PFC	299
9.4.5	Aktivní filtr PFC typu Bridgeless PFC	299
9.5	Literatura ke kapitole 9	302
10	NORMY A PŘEDPISY V OBLASTI ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY	303
10.1	Základní zákony a nařízení o EMC	304
10.2	Základní dělení norem EMC	305
10.3	Normy EMC v nízkofrekvenčním rušení	306
10.3.1	ČSN IEC 1000-2-1	309
10.3.2	ČSN EN 61000-2-2	310
10.3.3	ČSN EN 61000-2-4	311
10.3.4	ČSN EN 61000-3-2	312
10.3.5	ČSN EN 61000-3-12	314
10.4	ČSN EN 61000-4	316
10.5	Normy pro vysokofrekvenční rušení	317
10.5.1	ČSN EN 55011	319
10.5.2	ČSN EN 55014	321
10.5.3	ČSN EN 55022	322
11	MĚŘENÍ EMC VÝKONOVÝCH POLOVODIČOVÝCH SYSTÉMŮ	325
11.1	Teoretický úvod do měření a analýzy harmonických	325
11.1.1	Příklad využití zpětné Fourierovy transformace	326
11.1.2	Konvolutorní součin	327

11.2	Měření v nízkofrekvenční oblasti – teoretická část	328
11.2.1	Způsoby měření a vyhodnocení harmonických	328
11.2.2	Volba doby a frekvence vzorkování	329
11.2.3	Vliv konečné doby pozorování signálu na jeho spektrum	330
11.2.4	Antialiasing filtr	334
11.2.5	Normy pro měření v oblasti nízkofrekvenčního rušení	335
11.3	Měření v nízkofrekvenční oblasti – praktické ukázky	338
11.3.1	Měření usměrňovačů	339
11.3.2	Měření měničů napětí	340
11.3.3	Měření měničů kmitočtu	340
11.3.4	Měření pulzních usměrňovačů	344
11.4	Specifika měření polovodičových zařízení ve vysokofrekvenční oblasti	346
11.4.1	Měření vysokofrekvenčního rušení šířící se vedením	349
11.4.2	Měření rušivých emisí šířících se vyzařováním	352
11.5	Měření měničů ve vysokofrekvenční oblasti – praktické ukázky	353
11.6	Měření síťových impulzních zdrojů napětí	355
11.7	Literatura ke kapitole 11	361
12	POUŽITÉ ZNAČKY	363