

Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů

VÁCLAV KŮS, JIŘÍ SKÁLA, JIŘÍ HAMMERBAUER

**ELEKTROMAGNETICKÁ
KOMPATIBILITA VÝKONOVÝCH
ELEKTRONICKÝCH SYSTÉMŮ**

Praha 2013



Publikace je výstupem výzkumu projektu Grantové agentury České republiky, č. 102/09/1164 „Interakce výkonových polovodičových měničů s okolím“ a projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

Václav Kůs, Jiří Skála, Jiří Hammerbauer

Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů

Bez předchozího písemného svolení nakladatelství nesmí být kterákoli část kopírována nebo rozmnožována jakoukoli formou (tisk, fotokopie, mikrofilm nebo jiný postup), zadána do informačního systému nebo přenášena v jiné formě či jinými prostředky. Autor a nakladatelství nepřijímají záruku za správnost tištěných materiálů. Předkládané informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny. Všechny registrované nebo jiné obchodní známky použité v této knize jsou majetkem jejich vlastníků. Uvedením nejsou zpochybněna z toho vyplývající vlastnická práva.

Veškerá práva vyhrazena

© Václav Kůs, Jiří Skála, Jiří Hammerbauer, Praha 2013

© Západočeská univerzita v Plzni, 2013

© Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Autorský kolektiv: Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
Doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

Václav Kůs, Jiří Skála, Jiří Hammerbauer
Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů
BEN – technická literatura, Praha 2013
1. vydání

ISBN 978-80-7300-476-7 (tištěná kniha)

ISBN 978-80-7300-477-4 (elektronická kniha v PDF)

	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 ovládnání	53
3.5.6	Vliv světelných spotřebičů	54
3.5.7	Zatížení středního vodiče	56
3.6	Literatura ke kapitole 3	57
4	IMPEDANCE SÍTĚ	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 připnutí 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	Vyrovnaní 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 induktivní 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	Dvojitý měnič – půl můstek	285
9.2.5	Dvojitý 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	Konvolutní 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 usměřovačů	339
11.3.2	Měření měničů napětí	340
11.3.3	Měření měničů kmitočtu	340
11.3.4	Měření pulzních usměřovačů	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

PŘEDMLUVA

Nároky na elektrickou energii neustále rostou. Roste a vyvíjí se zejména počet spotřebičů, které odebírají nesinusový proud. Jedná se nejen o velká a klasická zařízení (obloukové pece, velké pohony), ale též o zařízení velmi malých výkonů. Vlivem masivního nárůstu používaných elektronických zařízení, který je umožněný na jedné straně kvalitní součástkovou základnou a na straně druhé jejich cenou, stoupá i podíl spotřebičů se zkresleným odběrem proudu. Přestože normy u malých spotřebičů předepisují určité meze nelinearity, jsou celkové hodnoty odebíraných nelineárních proudů veliké. To vede ke zkreslení napětí, vzniku deformačních výkonů, přetěžování vedení a dalším nepříznivým důsledkům.

V průmyslových podnicích se neustále zvyšují počty používaných polovodičových měničů. I když jsou často výkony jednotlivých měničů malé, je jejich množství a výkon takové, že v závodových sítích jejich provozem dochází k nepříznivým jevům. Současné spolupůsobení v různých částech rozvodů pak vede nejen k deformaci napájecí křivky, ale i ke vzniku rezonančních jevů. Naopak, vlivem poruch v napájecí soustavě pak mohou mít citlivá elektronická zařízení problémy nebo dokonce může být jejich činnost zastavena, i když napájecí soustava následně pracuje normálně. Nově vyvíjené typy měničů jsou neustále sofistikovanější. Jejich konstrukce a programové vybavení není provedeno pouze s ohledem na splnění požadavků spotřebitele (pohonu), ale současně je brán zřetel i na interakci s napájecí soustavou. Za posledních 20 let došlo k doslova raketovému nárůstu měničů. Vlivem nových polovodičových prvků a s rozvojem řídicí elektroniky jsou splňovány i takové požadavky, které před několika lety byly nemožné. Vznikají rovněž nové struktury měničů. To však opět vede ke vzniku požadavků na řešení problematiky negativních vlivů měničů na síť a k návrhu opravných prostředků.

Literatura se vzájemným elektromagnetickým ovlivňováním elektrických zařízení zabývá velmi dlouho. Ve vztahu k polovodičovým zařízením byla mezi prvními vydána kniha „Zpětný vliv výkonových polovodičových měničů na napájecí síť“ [3.10], vydaná v roce 1979. Zejména vysokofrekvenční technikou v elektromagnetické kompatibilitě se zabývá kniha „Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů.“ [3.16]. Ve světě to jsou například knihy od Arrilagy [2.2], Pellyho [5.60] nebo Žezelenka [3.22]. Pouze negativními účinky měničů se zabývají knihy od Klosse [5.17], [5.18]. Od dob vydání těchto knih však pokrok výkonové polovodičové elektroniky velmi pokročil. V roce 2002 proto vychází kniha „Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu“ [5.47]. V této knize je pozornost věnována zejména klasickým polovodičovým měničům a jejich vlivu na napájecí soustavu. Jsou zde probírány i vlivy nepřímých měničů kmitočtu. Avšak malá pozornost je věnována měničům malých výkonů, spínaným napájecím zdrojům – tedy zařízením, které se v současnosti vyskytují nejvíce. Základní tezí knihy bylo vyšetřování vlivu polovodičových měničů na napájecí soustavu.

Za deset roků od vydání zmíněné knihy vzniklo velké množství nových typů měničů, jejich struktur, změnily se způsoby řízení. Obrovsky narostl podíl spotřebičů s malými výkony, jako jsou napájecí zdroje pro výpočetní techniku, domácí elektroniku a světelné zdroje. Požadavkem jsou nyní konstrukce spotřebičů s minimalizovanými vlivy na napájecí soustavu, u velkých výkonů pak komplexní dodávky včetně realizace opatření proti negativním účinkům provozu polovodičových zařízení na síť. Proto jsou v knize kapitoly věnovány i této problematice. Jsou uvedeny vlastnosti a výpočty impedance sítě s ohledem na harmonické. Na základě výpočtu zkruslení je navržena filtračně kompenzační stanice. Při návrhu zařízení nebo při jeho připojení do soustavy musí být akceptovány požadavky z elektromagnetické kompatibility jak v oblasti nízkofrekvenčního rušení, tak i vysokofrekvenčních projevů. Novým jevem je provoz měničů s nejvyšší odolností proti poklesům napětí v napájecí soustavě.

Předkládaná kniha si klade za cíl seznámit uživatele s uvedenou problematikou. Je určena širokému okruhu čtenářů. Autoři doufají, že odpovědi zde najdou jak pracovníci ze závodů, kteří musejí problematiku EMC řešit jako jeden z mnoha problémů, tak specialisté na problematiku EMC polovodičových měničů. Kniha je též určena posluchačům vysokých škol i pracovníkům ve výzkumu a vývoji. Na knize spolupracoval kolektiv pracovníků Západočeské univerzity v Plzni několik roků. V knize jsou koncentrovány mnohaleté zkušenosti práce ve výzkumu, vývoji a spolupráci s praxí. Současně jsou uvedeny nejnovější poznatky z oboru tak dynamicky se rozvíjejícího, jakým elektromagnetická kompatibilita polovodičových systémů beze sporu je. Jednotlivé kapitoly zpracovali autoři následovně: doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D. zpracoval kapitoly 2.5, 3.3, 3.4, 8, 10.5, 11.4 a 11.5, doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D. zpracoval kapitoly 8.6, 9 a 11.6. Ostatní kapitoly zpracoval prof. Ing. Václav Kůs, CSc., který autorský kolektiv vedl a vytvořil základní koncepci knihy. Autoři děkují mnohým spolupracovníkům z Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni i z dalších pracovišť v České republice za cenné podněty a rady, bez nichž by tato kniha nemohla vzniknout.

Autoři děkují Grantové agentuře České republiky za finanční podporu, poskytnutou v rámci řešení úkolu GAČR 102/09/1164 s názvem Interakce výkonových polovodičových měničů s okolím. Kniha současně vznikla s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094.

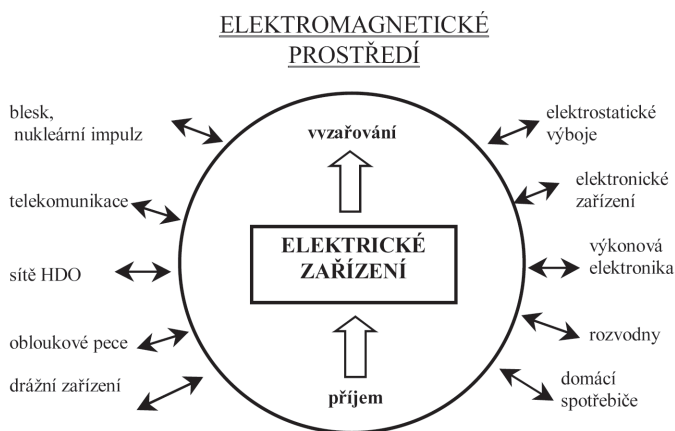
Za kolektiv autorů prof. Václav Kůs

1 ÚVOD

Neustále narůstající počet elektrických a elektronických zařízení způsobuje vzrůstající počet provozních obtíží. Jedním z faktorů, které přispívají k těmto provozním obtížím, je vzájemné ovlivňování elektrických zařízení, což je výsledkem elektromagnetických vlastností těchto přístrojů, zařízení či systémů. Na jedné straně pracuje elektronika s minimálními energiemi a proto v případě, že se do ní dostanou elektrické signály o vyšších energiích, mohou způsobit její nesprávnou funkci nebo i poškození. Na druhé straně, pro řízení výkonu hojně používané výkonové polovodičové součástky mohou zpětně působit na napájecí síť a tím i na ostatní připojená zařízení.

Celý obor, který se uvedenou problematikou zabývá, je elektromagnetická kompatibilita (EMC). Definice dle normy¹⁾ stanoví, že: „elektromagnetická kompatibilita je schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení pro cokoli v tomto prostředí“.

Již z této definice je patrná dekompozice problému na dvě části – schopnosti měniče pracovat ve svém elektromagnetickém okolí a současně co nejméně nebezpečné elektromagnetické prostředí vytvářet.



Obrázek 1.1 *Vzájemné, multilaterální působení různých zdrojů elektrických zařízení*

Měniče svým charakterem činnosti působí jako:

- a) zdroj rušení,
- b) spotřebič, na který působí vnější rušivé vlivy,
- c) zařízení, které svým provozem ruší samo sebe.

¹⁾ Jedná se o normu ČSN – IEC – 50 (161) – Mezinárodní elektrotechnický slovník – kapitola 161: Elektromagnetická kompatibilita.

Protože měnič kmitočtu v podstatě odděluje napájecí síť a spotřebič svými obvody, lze vlivy měničů dále dělit na:

- a) vlivy měniče na napájecí soustavu,
- b) vlivy měniče na napájené zařízení,
- c) vlivy měniče na okolí.

Naopak, vlivem poruch v napájecí soustavě je „ohrožena“ činnost měniče.

Základem knihy jsou nízkofrekvenční projevy interakcí mezi měničem a napájecí soustavou. Pouze v některých zřetelech je věnována pozornost i vysokofrekvenční problematice, a to zejména ve spojení s návrhy měničů.

V průmyslových závodech je obvykle velmi hustá zasmyčkováná elektrická rozvodná soustava (často o mnoha napěťových úrovních), ke které dnes přistupují mnohé řídicí, ovládací a datová vedení. To vede k tomu, že dochází k projevům vzájemného ovlivňování spotřebičů stále častěji.

Jakým způsobem tyto problémy řešit? V prvním případě je třeba se snažit vyrábět takové elektrotechnické výrobky, které ovlivňují elektromagnetické okolí co nejméně a současně tak, aby byly co nejvíce odolné proti těmto jevům. Každý výrobek je tedy určitým způsobem vždy zdrojem rušení a je současně rušen. Přípustné hodnoty pro činnost elektrických zařízení v elektromagnetickém prostředí jsou dnes obvykle dány příslušnými normami.

Výrobci těchto zařízení i výzkumné ústavy věnují této otázce velkou pozornost. Přesto jsou vlivy zařízení na síť či na napájené zařízení takového charakteru, že buď nemůže pracovat samotný spotřebič, nebo (v horším případě) je ovlivněna síť takovým způsobem, že nemohou pracovat ani další připojená zařízení. Pak je nutné přijmout další opatření, která tyto účinky odstraní, nebo alespoň minimalizují na přijatelnou úroveň.

Problematice nízkofrekvenčního rušení dominují zhruba čtyři základní okruhy:

- harmonické proudy (vyšších řádů) produkované nelineárními spotřebiči,
- impedance sítě,
- změny napětí v síti,
- zařízení pro minimalizaci harmonických proudů a kompenzaci účinníku.

Těmto bodům jsou proto věnovány hlavní části knihy.

Nejprve je uveden stručný matematický aparát, který je při výpočtech potřebný, zejména s ohledem na Fourierovu analýzu. Současně jsou zavedeny základní matematické vztahy pro neharmonické veličiny. Na rozdíl od mnohých publikací o neharmonických veličinách je zde i napájecí napětí uvažováno obecně jako nesinusové, s určitým zkreslením. To je v současnosti již nezbytné. Důraz je též kladen na definování jednotlivých výkonů a činitelů zkreslení. Všechny uvedené definice jsou v souladu s platnými normami.

Další kapitola se věnuje kvalitě elektrické energie, poruchám v napájecí soustavě, zdrojům harmonických, poruchám vznikajících v rozvodné soustavě a možnostem šíření rušení. Stěžejní část této kapitoly je věnována teoretickým aspektům šíření rušení, příslušným frekvenčním rozsahům a začleněním různých druhů rušivých signálů. Kapitola je napsána též s cílem upozornit na projevy zejména vysokofrekvenčního rušení u polovodičových zařízení.

Velká pozornost je věnována impedancím sítě. Zde jsou probrány nejen způsoby jak modelovat jednotlivé části rozvodů, ale zejména jak modelovat rozsáhlé zasmyčkované závodové sítě. Součástí kapitoly je popis typických impedancí a vznik harmonických napětí vyšších řádů. Na příkladech jsou ukázány možnosti výpočtů impedance sítě a zejména pak harmonických napětí vyšších řádů. Čtenáři jsou upozorněni na možné rezonance, které v síti vznikají, na jejich výpočty a důsledky. Jedna podkapitola je věnována zvláštnostem výpočtu impedance v trakčních soustavách.

Co do velikosti je nejrozsáhlejší pátá kapitola. Ta je věnována určení frekvence a velikosti harmonických proudů, které jsou měniči odebírány ze střídavé napájecí sítě. Nejprve je uvedeno odvození známého amplitudového zákona. Ten je pak dále rozšířen na tzv. zobecněný amplitudový zákon, platný pro odebírané proudy většiny měničů. Společně s principem superpozice průběhů pak může být provedena harmonická analýza u většiny průběhů proudů. Následně jsou probírány vlivy jednotlivých měničů na síť. Postupně jsou uvedeny způsoby výpočtu harmonických proudů klasických měničů (usměřovače), měničů napětí, cyklokonvertorů aj. Největší pozornost kapitoly je soustředěna k nepřímým měničům kmitočtu s napěťovým střídačem a možnostem snížení proudů u těchto měničů. Z nejmodernějších zařízení je věnována pozornost pulzním usměřovačům napěťového typu. U všech měničů jsou uvedeny též způsoby zjištění necharakteristických harmonických a mezharmionických. Přestože je jejich velikost ve srovnání s charakteristickými harmonickými obvykle zanedbatelná, mohou v případě rezonančních jevů vytvářet nepřijatelná napětí vyšších frekvencí. Protože v praxi samostatně pracující měnič najdeme již ojediněle, je nutné často řešit, jak postupovat při určování negativních účinků většího počtu měničů, které jsou připojovány do jednoho přípojného bodu v napájecí síti nebo v různých bodech jednoho závodu.

Obsáhlá část knihy patří návrhu opravných prostředků. Tomu se věnuje kapitola 6. Protože obvykle nejde oddělit filtrační a kompenzační účinek, je kapitola věnována nejen návrhu filtrů pro minimalizaci harmonických, ale též i problematice kompenzace účinníku. Je uveden rozsáhlý matematický aparát, který umožňuje provádět návrh filtrů s ohledem na potřeby filtrace i kompenzace účinníku. Nezbytné jsou i způsoby ladění filtrů a jejich dimenzování s ohledem na harmonické jiných frekvencí, než je rezonanční frekvence filtru. Pozornost je věnována i složitějším typům filtrů. Nezbytností jsou výpočty účinnosti filtrů v připojených částech soustavy. Součástí jsou též moderní aktivní filtry a zařízení pro dynamickou kompenzaci účinníku.

Jedna pasáž knihy je věnována i opačným jevům – vlivům poruch v síti na činnost měničů a možnostem, jak těmto projevům zabránit. Tato kapitola byla napsána na základě mnohých dotazů provozovatelů měničů v průmyslových podnicích. Zejména při krátkodobých poklesech napětí dochází často k zastavení činnosti měniče. Přestože se napětí velmi brzy vrátí na svoji nominální hodnotu, měnič je zastaven. Do obnovení jeho činnosti na výrobní parametry před poruchou může dojít k velké ekonomické ztrátě.

Nezbytnou kapitolou v této knize je popis doprovodných jevů v EMC výkonových měničů. Jedná se o vysokofrekvenční rušení. Jsou zde uvedeny zásady návrhu výkonových a řídicích obvodů polovodičových měničů z hlediska EMC. Součástí jsou též možné odrušovací prostředky. Odkazy jsou prováděny zejména na pasáže v kapitole 3.

Součástí problematiky vlivů měničů na napájecí soustavu jsou výpočty harmonických proudů klasických síťových zdrojů malého výkonu a impulzních napájecích zdrojů. V kapitole 9 pak jsou

popsány základní konfigurace výkonových obvodů impulzních zdrojů a jejich harmonické proudy, které odebírají ze sítě. Popis je dělán s ohledem na normy, které harmonické proudy uvedených měničů omezují. Srovnání je provedeno s klasickými síťovými zdroji.

Pokud existují normy, které se věnují přímo negativnímu působení na síť u jednotlivých druhů měničů, je to probráno přímo v kapitolách u jednotlivých měničů. Kromě toho je normalizaci (zejména pro energetické rušení) věnována v knize samostatná kapitola. Vzhledem k velmi častým změnám ve znění norem bude tato pasáž asi nejrychleji „stárnout“, proto je uvedena zejména základní struktura a orientace v normách. Samozřejmostí je, že jsou uváděny pouze normy EN či IEC.

V mnohých kapitolách je uveden nejenom postup pro exaktní výpočty harmonických proudů, ale též zjednodušené návody na určení harmonických proudů s přesností, která je v praxi dostačující. Většina kapitol je doplněna ukázkami časových průběhů proudů a výsledky jejich následné harmonické analýzy. Měření byla prováděna jak v laboratorních podmínkách, tak v praxi.

Kapitola 11, věnovaná měření harmonických by vzhledem ke své důležitosti a obsáhlosti jistě zasloužila větší prostor, případně samostatnou knihu. Kromě nezbytných teoretických částí, zabývajících se zákonitostmi při měření harmonických jsou uvedeny normativní požadavky pro měření a analýzu. Příklady zde uvedené doplňují průběhy z dílčích kapitol. Jejich cílem je demonstrace měřené metody, případně ukázka netypických průběhů z praxe.

Problematika, zpracovávaná v knize je velmi široká. Jsou popisovány negativní účinky mnoha zařízení, zejména výkonových polovodičových měničů. Proto jsou prováděny časté odkazy na literaturu, která je mnohdy pro pochopení principů činnosti zařízení a vzniku harmonických nepostradatelná. S ohledem na rozsah citované literatury byl zvolen princip, kdy je bezprostředně související literatura uvedena přímo na konci každé kapitoly. Většina odkazů v kapitole je až na výjimky právě v uvedeném seznamu. Výjimkou ze seznamu literatury je kapitola 10, která se věnuje normám. Zde jsou názvy norem uvedeny během jejich popisu a nejsou tedy znovu v seznamu literatury uvedeny.

Obtížné bylo uvedení seznamu značek. Zpracovávaná problematika je tak rozsáhlá, že není možné absolutně všechny značky v seznamu uvést. Jsou tedy uvedeny značky základní a zejména ty, kde není vždy jednoznačně zřejmý význam. Naopak, vzhledem k rozsáhlosti knihy, mají mnohé značky různé významy – ty jsou v seznamu uvedeny. Jejich význam je patrný z textu.

Přes rozsáhlost uvedeného materiálu si autoři uvědomují, že nemohli zdaleka uvést všechny aspekty elektromagnetické kompatibility výkonových polovodičových systémů. Pozornost by jistě zasloužily vlivy měničů na napájená zařízení, flicker a další jevy, zejména ve vysokofrekvenční oblasti. Tato témata již překračují vytýčený rámec knihy. Přesto autoři doufají, že čtenářům kniha přinese kvalitní základní orientaci v problematice.