

Daniel Mayer

ELEKTRODYNAMIKA V ENERGETICE

Praha 2005



Publikace je určena vysokoškolským i středoškolským studentům elektrotechniky a pracovníkům v energetice, kteří se věnují teoretickým problémům. Navazuje na základní poznatky z teorie elektrických obvodů a teorie elektromagnetického pole a rozvíjí některé typické aplikace v elektroenergetice.

V první kapitole se čtenář seznámí s trojfázovými obvody, s jejich analýzou a syntézou a s numerickým řešením přechodných jevů. Obsahem druhé kapitoly je teorie přenosu elektrické energie rozvodnou soustavou, včetně vyšetření optimálního toku výkonů. Další kapitola je věnována teorii homogenního vedení, vyšetřování jeho ustálených stavů i rázových jevů a je též nastíněno řešení rázových jevů v cívce. Základní teorie silnoproudých obvodů je zakončena přehledem metod výpočtu jejich parametrů, což je obsahem čtvrté kapitoly. Další kapitola pojednává o různých způsobech vyšetření sil, které působí na součásti silových obvodů a o matematickém modelování elektromechanických soustav. Závěrečná šestá kapitola je věnována magnetické levitaci, jejíž využití zejména v trakci se v průmyslově vyspělých zemích stává silně progresivním oborem. Vyřešené úlohy a kontrolní otázky, které uzavírají každou kapitolu, poslouží čtenářům k ověření, zda dobře porozuměli probírané látce.

Daniel Mayer

Elektrodynamika v elektroenergetice

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

© Daniel Mayer, Plzeň 2005

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

Daniel Mayer: Elektrodynamika v elektroenergetice

BEN – technická literatura, Praha 2005

1. vydání

ISBN 80-7300-164-0

Obsah

PŘEDMLUVA	8
1 VÍCEFÁZOVÉ OBVODY	9
1.1 Trojfázová soustava	9
1.1.1 Základní pojmy a vztahy	9
1.1.2 Matematické vyjádření veličin souměrné trojfázové soustavy	12
1.1.3 Spojování trojfázových zdrojů	13
1.1.4 Uzemnění trojfázových soustav	19
1.2 Další typy vícefázových soustav	19
1.2.1 Šestifázová soustava	19
1.2.2 Dvojfázová soustava	21
1.3 Analýza trojfázových obvodů v harmonickém ustáleném stavu	21
1.3.1 Typické příklady na analýzu trojfázových obvodů	21
1.3.2 Vyšetření sledu fází	28
1.4 Metoda souměrných složek	30
1.5 Syntéza symetrizačního (Steinmetzova) obvodu	35
1.5.1 Analytické řešení symetrizačního obvodu	36
1.5.2 Numerický výpočet symetrizačního obvodu	38
1.6 Přechodné jevy v trojfázových obvodech	41
1.6.1 Metoda stavových proměnných	42
1.6.2 Přepětí při vypínání zkratů	44
1.6.3 Přepětí při vypínání kapacitní zátěže	45
1.6.4 Připojení trojfázového zdroje napětí k trojfázovému spotřebiči	47
PŘÍKLADY K 1. KAPITOLE	49

2	PŘENOS ELEKTRICKÉ ENERGIE	57
2.1	Elektrický výkon jednofázového harmonického proudu a napětí	57
2.1.1	Okamžitý elektrický výkon	57
2.1.2	Výkon činný, jalový a zdánlivý. Účinník	59
2.1.3	Účinnost přenosu energie. Kompenzace účinníku	63
2.1	Elektrický výkon jednofázového neharmonického (periodického) proudu a napětí	67
2.2.1	Kvalita elektrické energie	67
2.2.2	Výkon činný, jalový, zdánlivý a deformační	69
2.2.3	Fyzikální význam zavedených výkonů	72
2.3	Výkony v trojfázové soustavě	74
2.3.1	Trojfázová soustava v harmonickém ustáleném stavu	74
2.3.2	Okamžitý výkon trojfázového spotřebiče	76
2.3.3	Kompenzace jalového výkonu v trojfázové síti	79
2.3.4	Kompenzace jalového výkonu v harmonické síti kondenzátorem	80
2.3.5	Minimalizace ztrát ve vedení v neharmonickém stavu	82
2.3.6	Soudobý způsob provádění kompenzace	87
2.4	Optimální tok výkonů v elektrizační soustavě	88
2.4.1	Jednoduchý motivační příklad	88
2.4.2	Podmínky pro optimálního provoz elektrizační soustavy	89
	PŘÍKLADY KE 2. KAPITOLE	93
3	ELEKTRICKÉ OBVODY	
	S ROZPROSTŘENÝMI PARAMETRY	99
3.1	Vymezení pojmu „obvod s rozprostřenými parametry“	99
3.2	Telegrafní rovnice	100
3.2.1	Odvození telegrafních rovnic	100
3.3	Homogenní vedení v harmonickém ustáleném stavu	102
3.3.1	Telegrafní rovnice a jejich řešení	102
3.3.2	Rozbor řešení rovnic homogenního vedení	105
3.3.3	Výpočet provozních parametrů	111
3.3.4	Útlum vedení a jeho jednotky	112
3.3.5	Vedení homogenní po úsecích	113

3.3.6	Přirozený výkon	115
3.3.7	Ideální homogenní vedení	117
3.3.8	Trojfázové homogenní vedení	123
3.4	Nestacionární jevy	125
3.4.1	Rázové vlny: jejich vznik, tvar a matematický popis	125
3.4.2	Nestacionární jevy v ideálním homogenním vedení	126
3.4.3	Numerické řešení přechodných jevů v homogenním vedení	135
3.4.4	Rázové jevy v cívce	140
3.4.5	Rázové jevy ve složitějších obvodech	143

PŘÍKLADY KE 3. KAPITOLE 144

4 PARAMETRY VEDENÍ 149

4.1	Efektivní odpor a efektivní vnitřní indukčnost	149
4.1.1	Vodič kruhového průřezu	149
4.1.2	Přibližné formule	151
4.2	Indukčnost jednofázového vedení	152
4.2.1	Vzorce pro výpočet indukčnosti jednofázových vedení .	152
4.3	Indukčnost trojfázového vedení	155
4.3.1	Indukčnost smyčky a indukčnost vodiče	155
4.3.2	Trojvodičové vedení	158
4.4	Kapacita vedení	162
4.4.1	Dvouvodičové vedení	162
4.4.2	Vzorce pro výpočet kapacity dvouvodičového vedení ...	165
4.4.3	Vícevodičové vedení, vliv země	166
4.4.4	Vícevodičové kabelové vedení	172
4.4.4	Vzorce pro výpočet parciálních kapacit	178
	vícevodičového vedení	178
4.4.5	Koróna na venkovním vedení	181
4.4.6	Svazkové vodiče	182
4.4.7	Dielektrické ztráty v kabelu	187
4.5	Vztah mezi kapacitou a vnější indukčností dvojvodičového vedení	188

PŘÍKLADY KE 4. KAPITOLE 190

5	ELEKTROMECHANICKÉ OBVODY	193
5.1	Síly v magnetickém poli	193
5.1.1	Síla působící na proudovodič: síla Lorentzova, síla Kortewegova-Helmholtzova	193
5.1.2	Maxwellův magnetický tenzor pnutí	197
5.1.3	Síla Lorentzova-Kelvinova	204
5.1.4	Výpočet síly z energie magnetického pole	205
5.2	Aplikace v elektroenergetice	209
5.2.1	Síla na dva rovnoběžné vodiče. Mechanická rezonance.	209
5.2.2	Síla v odpojovači	212
5.2.3	Síla na vodič soustavy n rovnoběžných vodičů	213
5.3	Elektromagnety	218
5.3.1	Provedení elektromagnetů	218
5.3.2	Stejnoseměrný elektromagnet	219
5.3.3	Jednofázový střídavý elektromagnet	222
5.3.4	Trojfázový střídavý elektromagnet	225
5.3.5	Dynamické vlastnosti elektromagnetu	226
5.4	Magnetická separace	230
	PŘÍKLADY K 5. KAPITOLE	232
6	MAGNETICKÁ LEVITACE A JEJÍ VYUŽITÍ	237
6.1	Fyzikální principy magnetické levitace	237
6.1.1	Levitace s permanentními magnety	237
6.1.2	Levitace s použitím diamagnetika	238
6.1.3	Levitace transformační	239
6.1.4	Elektromagnetická levitace – EMS	240
6.1.5	Elektrodynamická levitace – EDS	240
6.1.6	Levitace pomocí Halbachovy soustavy permanentních magnetů	241
6.1.7	Využití magnetické levitace v soudobé technice	242
6.2	Magnetická levitace v dopravě	243
6.2.1	Charakteristické vlastnosti magneticky levitovaných dopravních systémů	243
6.2.2	Magnetické dopravní systémy na principu EMS	245

6.2.3	Magnetické dopravní systémy na principu EDS	251
6.2.4	Vyšetření levitační a brzdící síly EDS	258
6.2.5	Porovnání systémů EMS a EDS	263
6.2.6	Dopravní systémy s Halbachovými magnety – Inductrack	264
6.2.7	Další magneticky levitovaný dopravní systém	265
6.2.8	Současný stav dopravních systémů maglev	266
6.3	Magnetická ložiska	267
6.3.1	Charakteristické vlastnosti magnetických ložisek	267
6.3.2	Pasivní magnetická ložiska	268
6.3.3	Aktivní magnetická ložiska	271

LITERATURA 274

PŘEDMLUVA

Tato publikace je určena vysokoškolským i středoškolským studentům elektrotechniky a pracovníkům v energetice, kteří se věnují teoretickým problémům. Navazuje na základní poznatky z teorie elektrických obvodů a teorie elektromagnetického pole a rozvíjí některé typické aplikace v elektroenergetice. Seznamuje čtenáře s fyzikální podstatou zkoumaných jevů, s jejich matematickým modelováním a s metodami analytického a numerického řešení.

V první kapitole se čtenář seznámí s trojfázovými obvody, s jejich analýzou a syntézou a s metodami numerického řešení přechodných jevů v trojfázových soustavách. Obsahem druhé kapitoly je teorie přenosu elektrické energie v rozvodné soustavě v harmonickém i neharmonickém ustáleném stavu, dále je probána problematika kompenzace jalové energie a způsob vyšetření optimálního toku výkonů v energetické soustavě. Další kapitola je věnována teorii elektrického vedení s rozprostřenými parametry, analytickým i numerickým metodám vyšetřování ustálených stavů i rázových jevů v tomto vedení a jsou též řešeny přepětivé jevy v cívice transformátoru při vstupu rázové vlny napětí. Teorie silnoproudých obvodů je zakončena přehledem metod výpočtu parametrů venkovních a kabelových vedení, což je obsahem čtvrté kapitoly. Následující kapitola pojednává o různých způsobech vyšetřování sil působících na vodiče rozvodné soustavy, o určování statických i dynamických charakteristik různých typů elektromagnetických aktuátorů a o způsobech analýzy přechodných jevů v elektromechanických soustavách. Závěrečná šestá kapitola je věnována fyzikálním principům magnetické levitace a jejich průmyslovému využití, což se stává silně progresivním oborem, zejména v oblasti elektrické trakce. Vyřešené úlohy a kontrolní otázky, které uzavírají každou kapitolu, poslouží čtenářům k ověření, zda dobře porozuměli probírané látce.

Na některých partiích se podíleli: prof. Ing. Zděna Benešová, CSc. (kap. 4.3.1 a 4.3.2), Ing. Martin Jedlička (kap. 6.2.4), Ing. Petr Kropík (kap. 2.3.5) a doc. Ing. Bohuš Uličný, CSc. (kap. 3.4.3). Obrázky nakreslili Ing. Roman Hamar, PhD. a Ing. Daniel Vachtl. Všem jmenovaným patří můj srdečný dík.

Autor je členem řešitelského kolektivu Výzkumného záměru *Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice* (MSM 4977751310), podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR.

Daniel M a y e r

Plzeň, duben 2005