

Ota Roubíček

ELEKTRICKÉ MOTORY A POHONY

příručka techniky, volby a užití vybraných druhů

Praha 2004



Ota Roubíček

ELEKTRICKÉ MOTORY A POHONY – příručka techniky, volby a užití vybraných druhů

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. Předkládaná zapojení a informace jsou zveřejněny bez ohledu na případné patenty třetích osob. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Veškerá práva vyhrazena.

© Ing. Ota Roubíček, DrSc., 2004

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

Ota Roubíček: Elektrické motory a pohony – příručka techniky, volby a užití vybraných druhů

BEN – technická literatura, Praha 2004

1. vydání

ISBN 80-7300-092-X

OBSAH

1	PRINCIPY STAVBY A PŮSOBNÍ VYBRANÝCH DRUHŮ MOTORŮ	13
1.1	VŠEOBECNĚ	13
1.2	INDUKČNÍ MOTORY	15
1.2.1	Princip působení	15
1.2.2	Konstrukční uspořádání	16
1.2.21	<i>Motor s kroužkovým rotorem</i>	<i>16</i>
1.2.22	<i>Motor s klecovým rotorem</i>	<i>20</i>
1.2.23	<i>Jednofázové motory</i>	<i>21</i>
1.2.24	<i>Motory pro speciální účely</i>	<i>22</i>
1.2.3	Provozní vlastnosti	22
1.2.31	<i>Provozní charakteristiky</i>	<i>22</i>
1.2.32	<i>Účinnost a ztráty za provozu</i>	<i>26</i>
1.2.4	Řízení chodu	26
1.2.41	Spouštění	26
a)	<i>Všeobecně</i>	<i>26</i>
b)	<i>Přímé připojení na síť</i>	<i>26</i>
c)	<i>Zmenšení statorového napětí</i>	<i>26</i>
d)	<i>Impedance v rotorovém obvodu</i>	<i>27</i>
e)	<i>Soft-start</i>	<i>27</i>
f)	<i>Rozběhové spojky</i>	<i>28</i>
1.2.42	Brzdění	28
a)	<i>Protiproud</i>	<i>28</i>
b)	<i>Rekuperace</i>	<i>28</i>
c)	<i>Stejnoseměrný proud</i>	<i>29</i>
d)	<i>Jednofázové zapojení</i>	<i>29</i>
1.2.43	Řízení rychlosti otáčení	30
a)	<i>Všeobecně</i>	<i>30</i>
b)	<i>Změna počtu pólů</i>	<i>30</i>
c)	<i>Změna skluzu</i>	<i>30</i>
d)	<i>Změna kmitočtu napájecího napětí</i>	<i>31</i>
e)	<i>Kaskády</i>	<i>34</i>
1.2.5	Příklady konstrukce motorů	35
1.3	VELKÉ SYNCHRONNÍ MOTORY	40
1.3.1	Princip působení	40
1.3.2	Konstrukční uspořádání	41

1.3.21	Motor s vyniklými póly	41
1.3.22	Turbomotor	43
1.3.3	Provozní vlastnosti	44
1.3.31	Provozní charakteristiky	44
1.3.32	Kritická rychlost otáčení	46
1.3.33	Účinnost a ztráty za provozu	47
1.3.4	Budicí soustavy	47
1.3.41	Všeobecně	47
1.3.42	Kroužkové budicí soustavy	47
a)	Rotační budič	47
b)	Řízený usměrňovač	48
c)	Kompaudační soustava	48
2.3.43	Bezkrůžkové budicí soustavy	48
a)	Střídavý budič a rotující usměrňovač	48
b)	Neřízený usměrňovač a rotační transformátor	48
c)	Budič s protiběžným polem	48
1.3.5	Řízení chodu	49
1.3.51	Spouštění	49
a)	Všeobecně	49
b)	Asynchronní rozběh	49
c)	Rozběhový motor	50
d)	Kmitočtový rozběh	50
1.3.52	Synchronizace	51
1.3.53	Brzdění	51
1.3.54	Řízení rychlosti otáčení	51
a)	Konvenční kmitočtové řízení	51
b)	Nezávislé řízení	51
c)	Závislé řízení (ventilový motor)	52
1.3.6	Konstrukce motorů	56
1.4	RÁMCOVĚ O VELKÝCH STEJNOSMĚRNÝCH MOTORECH	59
1.4.1	Princip a uspořádání	59
1.4.2	Hlavní typy	61
1.4.3	Provozní vlastnosti	61
1.4.4	Řízení chodu	62
1.4.5	Konstrukce velkých motorů	63
1.5	VNĚJŠÍ ZAŘÍZENÍ VE VÝKONOVÝCH OBVODECH MOTORŮ	63
1.5.1	Všeobecně	63

1.5.2	Hřídelové spojky	63
1.5.21	Všeobecně	63
1.5.22	Pevné spojky	65
1.5.23	Pružné spojky	66
1.5.24	Zubové spojky	66
1.5.25	Třecí spojky	67
1.5.26	Odstředivé spojky	67
1.5.27	Indukční spojky	68
1.5.3	Brzdy	69
1.5.4	Odporníky a spouštěče	69
1.5.41	<i>Odporníky</i>	69
1.5.42	<i>Spouštěče</i>	70
1.5.43	<i>Spouštěcí reaktory a autotransformátory</i>	70
1.5.5	Spínací kontaktní přístroje	71
1.5.51	<i>Přístroje vysokého napětí</i>	71
1.5.52	<i>Přístroje nízkého napětí</i>	72
1.5.6	Spínací bezkontaktní přístroje	72
1.5.7	Ochrany	73
1.5.8	Kabely	74

2 VYBRANÉ REGULAČNÍ POHONY 75

2.1	VŠEOBECNĚ	75
2.2	VÝKONOVÉ POLOVODIČOVÉ KOMPONENTY	76
2.2.1	Výkonové polovodičové součástky	76
2.2.2	Výkonové integrované struktury	77
2.2.3	Chlazení	78
2.3	STATICKÉ MĚNIČE	79
2.3.1	Rozdělení a zapojení měničů	79
2.3.2	Elektromagnetická kompatibilita měničů	80
2.3.3	Výběr měniče	82
2.4	POHON S INDUKČNÍM MOTOREM	82
2.4.1	Měničové pohony	82
2.4.12	<i>Možnosti programování řídicí části měničů</i>	84

2.4.13	<i>Způsoby řízení motorů</i>	85
2.4.2	Některé konkrétní struktury indukčního pohonu	85
2.5	POHON SE SYNCHRONNÍM POHONEM	89
2.6	POHON SE STEJNOSMĚRNÝM MOTOREM	89
3	OKOLNOSTI ROZHODOVÁNÍ O VOLBĚ POHONNÉHO PROSTŘEDKU	91
3.1	VŠEOBECNĚ	91
3.2	MECHANICKÉ A TECHNOLOGICKÉ PROSTŘEDÍ.....	91
3.2.1	Zatěžovací charakteristiky poháněných zařízení	91
3.2.2	Dynamické zatížení	93
3.2.3	Momentové charakteristiky a zatěžování motorů	93
3.2.4	Technologické charakteristiky poháněných zařízení	94
3.3	PROVOZNÍ DISPOZICE MOTORŮ	97
3.3.1	Všeobecně	97
3.3.2	Indukční motory	97
3.3.3	Synchronní motory	98
3.3.4	Velké stejnosměrné motory	99
3.3.5	Motory s převodem	100
3.3.6	Konstrukční hlediska u motorů	100
3.4	VÝBĚR DRUHU ELEKTRICKÉHO POHONNÉHO PROSTŘEDKU	103
3.4.1	Všeobecně	103
3.4.2	Hlediska výběru	103
4	PRAVIDLA A OKOLNOSTI PRO INSTALACI A UŽITÍ VYBRANÝCH MOTORŮ A POHONŮ	105
4.1	K DISPOZICI POHONNÉHO PROSTŘEDKU	105
4.1.1	Všeobecně	105
4.1.2	Základní dispozice	105
4.1.3	Doplňující okolnosti	106
4.2	PROVOZNÍ PROSTŘEDÍ	107

4.2.1	Všeobecně	107
4.2.2	Motory	107
4.2.3	Regulační pohony	108
4.2.4	Doporučení krytí a úprav	109
4.2.5	Blíže o prostředí s nebezpečím výbuchu	110
<i>4.2.51</i>	<i>Všeobecně</i>	<i>110</i>
<i>4.2.52</i>	<i>Parametry prostředí</i>	<i>110</i>
<i>4.2.53</i>	<i>Druh ochran</i>	<i>111</i>
<i>4.2.54</i>	<i>Označování chráněných zařízení</i>	<i>112</i>
4.3	TECHNICKÉ PROVOZNÍ PODMÍNKY	113
4.3.1	Všeobecně	113
4.3.2	Motory	113
4.3.3	Regulační pohony	115
4.4	VŠEOBECNÁ PROHLÍDKA ZAŘÍZENÍ	116
4.5	NEELEKTRICKÉ NÁLEŽITOSTI INSTALACE	117
4.5.1	Základy pro motory a rozváděče	117
<i>4.5.11</i>	<i>Upevnění motoru</i>	<i>117</i>
a)	<i>Běžné upevnění</i>	<i>117</i>
b)	<i>Odpružené upevnění</i>	<i>119</i>
c)	<i>Dimenzování základu</i>	<i>121</i>
<i>4.5.12</i>	<i>Základ pro rozváděče</i>	<i>121</i>
<i>4.5.13</i>	<i>Prívod chladicího vzduchu</i>	<i>121</i>
4.5.2	Kapalinové okruhy	121
<i>4.5.21</i>	<i>Výměníky tepla s vodním chlazením</i>	<i>121</i>
a)	<i>Chlazení motorů</i>	<i>121</i>
b)	<i>Chlazení přístrojových skříní</i>	<i>122</i>
<i>4.5.22</i>	<i>Olejové mazací okruhy</i>	<i>123</i>
4.5.3	Hřídelové spojky	123
4.6	MECHANICKÁ OCHRANA PŘED ÚRAZEM	126
4.7	ELEKTRICKÉ NÁLEŽITOSTI INSTALACE	127
4.7.1	Ochrana před úrazem elektrickým proudem	127
<i>4.7.11</i>	<i>Hlavní zásady</i>	<i>127</i>
a)	<i>Všeobecně</i>	<i>127</i>
b)	<i>Druhy a prostředky ochran</i>	<i>128</i>
c)	<i>Ochranná opatření</i>	<i>129</i>
d)	<i>Zvýšený stupeň ochrany</i>	<i>129</i>

e)	<i>Uzemňování a ochranné vodiče</i>	<i>130</i>
f)	<i>Ochrana zařízení s napětím nad 1 kV</i>	<i>130</i>
4.7.12	<i>Ochrana komponent pohonu</i>	<i>130</i>
4.7.2	Přístroje pro připojení k napájecí síti	132
4.7.21	<i>Všeobecně</i>	<i>132</i>
4.7.22	<i>Pojistky</i>	<i>133</i>
4.7.23	<i>Spínací přístroje</i>	<i>134</i>
4.7.24	<i>Řídící výkonové přístroje pro motory</i>	<i>135</i>
4.7.3	Přepětí a ochrana před ním	136
4.7.31	<i>Všeobecně</i>	<i>136</i>
4.7.32	<i>Svodiče přepětí</i>	<i>137</i>
4.7.33	<i>Uspořádání přepětíové ochrany</i>	<i>137</i>
4.8	KABELY	138
4.8.1	<i>Všeobecně</i>	<i>138</i>
4.8.2	<i>Dimenzování kabelů</i>	<i>139</i>
4.8.3	<i>Poznámka k ukládání kabelů</i>	<i>141</i>
4.9	JIŠTĚNÍ	142
4.9.1	<i>Přístup k jištění</i>	<i>142</i>
4.9.2	<i>Předepsané jištění</i>	<i>143</i>
4.9.3	<i>Poznámky k jištění a jeho nastavení</i>	<i>144</i>
4.9.31	<i>Všeobecně</i>	<i>144</i>
4.9.32	<i>Jištění u střídavých motorů</i>	<i>144</i>
a)	<i>Nízkonapětové motory</i>	<i>144</i>
b)	<i>K přítomnosti stykačů a kontrolérů u nízkonapětových motorů</i>	<i>147</i>
c)	<i>Vysokonapětové motory</i>	<i>147</i>
4.9.33	<i>Rámcově k jištění u velkých stejnosměrných motorů</i>	<i>148</i>
4.9.34	<i>Jištění u statických měničů</i>	<i>149</i>
4.9.35	<i>Jištění kabelových přívodů</i>	<i>149</i>
4.10	ZÁSADY PRO OPTICKOU SIGNALIZACI PROVOZNÍCH STAVŮ	149
4.11	KONTROLA PŘED UVEDENÍM DO PROVOZU	150
4.12	POZNÁMKY K TEMPEROVÁNÍ A SKLADOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ	152
4.12.1	<i>Temperování</i>	<i>152</i>
4.12.2	<i>Skladování</i>	<i>152</i>

5	PRAKTICKÉ PŘÍKLADY INSTALACE	155
6	DOPLŇKY	157
6.1	POSUZOVÁNÍ SHODY	157
6.2	K UVÁDĚNÍ MOTORŮ A POHONŮ DO PROVOZU	157
	PŘÍLOHA 1	159
	PŘÍLOHA 2	162
	PŘÍLOHA 3	170
	PŘÍLOHA 4	174
	POUŽITÁ LITERATURA A KNIŽNÍ BIBLIOGRAFIE	179

Předložená příručka podává přehled o technice, hlediscích volby a přístupech k instalaci a užití vybraných druhů elektrických motorů (dále pouze motorů) a jednomotorových regulačních pohonů, vyskytujících se zejména v energetice, v průmyslu těžby a zpracování uhlí a rud, v těžkém průmyslu a v podobných průmyslových odvětvích. Jde o obory, pro které jsou charakteristickými jednak nároky na velké výkony pohonů stěžejních zařízení a jednak požadavky na zabezpečení pohonů středních a menších výkonů pro rozsáhlé související technologické soubory. Obsah příručky má posloužit k rychlé orientaci v problematice a v neposlední řadě též k iniciování podnětů pro tvůrčí rozhodování při řešení otázek volby, instalace a užití předmětných zařízení i v méně obvyklých podmínkách.

Věcná náplň příručky je členěna do šesti oddílů a příručka má čtyři přílohy.

První oddíl je věnován principům stavby a působení indukčních a velkých synchronních motorů a pouze okrajově (s ohledem na klesající význam) témuž u velkých stejnosměrných motorů. Jelikož v některých případech tvoří integrální součást motorů elektronické periferie, jsou zde objasněny též zásady činnosti v úvahu přicházejících zapojení. Pro úplnost je první oddíl doplněn zmínkou o zařízeních ve vnějších elektrických a mechanických výkonových obvodech motorů, zabezpečujících funkci motorů.

Druhý oddíl seznamuje s hlavními vlastnostmi nejdůležitějších výkonových polovodičových součástí a s výkonovými integrovanými strukturami, jakož i se statickými polovodičovými měniči a jejich použitím ve střídavých pohonech. Na některých konkrétních blokových schématech střídavých a stejnosměrných jednomotorových pohonů se objasňuje působení automatické regulace jejich chodu.

Třetí kapitola si všímá hledisek, ovlivňujících volbu pohonného motoru nebo regulačního pohonu pro danou aplikaci a souvisejících s jejich konstrukčními a provozními vlastnostmi. Předkládá rovněž rámcové strojně-technologické charakteristiky nejdůležitějších v úvahu přicházejících poháněných zařízení.

Ve čtvrtém nejrozsáhlejší oddíle jsou uváděny praktické okolnosti, rozhodující pro instalaci a užití předmětných motorů a pohonů a jejich příslušenství a respektující evropské, mezinárodní a české technické normy EN (CENELEC), IEC a ČSN. Týká se to zejména základních dispozic motorů a pohonů, provozního prostředí, provozních podmínek, neelektrických a elektrických náležitostí instalace, ochrany před úrazem se zvláštním důrazem na opatření proti úrazu elektrickým proudem, dále pak kabeláže, jištění, skladování a prohlídek. Je zmíněn též systém signalizace provozních stavů.

Pátý oddíl ilustruje předchozí výklad několika praktickými příklady.

V šestém, doplňkovém oddíle je upozorněno na posuzování shody, velmi důležité okolnosti pro výrobu, dovoz a trh pouze bezpečných zařízení. Toliko pro celkovou souvislost se naznačuje poslední krok k užití – uvádění motorů a pohonů do provozu (tyto záležitosti již leží mimo rámec příručky).

První příloha podává přehled hlavních parametrů a vlastností indukčních a velkých synchronních motorů. Ve druhé příloze jsou přiblížena nejdůležitější principiální

schémata zapojení a základní vlastností polovodičových statických měničů, používaných v pohonech. Třetí příloha uvádí hlavní normy EN a IEC, mající vztah k obsahu příručky. Jelikož relevantní české technické normy ČSN EN a ČSN IEC jejich obsah buď přejímají nebo k němu směřují, nejsou zvlášť citovány. Ve čtvrté příloze lze nalézt vždy užitečný přehled jednotek mezinárodní soustavy SI, používaných v elektrotechnice a převod vybraných cizích nebo starších jednotek na jednotky soustavy SI.

K usměrnění případného dalšího studia tematiky, kterou se příručka zabývá, mohou posloužit odkazy v připojeném rozsáhlém seznamu literatury.

Jelikož příručka má přehledný podrobný obsah, neobsahuje jmenný rejstřík.

Jako podkladů pro zpracování příručky bylo využito veřejně publikované i firemní literatury o elektrických strojích, o regulačních pohonech s nimi, o přístrojovém příslušenství jejich silových a řídicích obvodů, dále pak souvisejících norem EN a IEC a konzultací s odborníky z vysokých škol a z průmyslu.

Příručku mohou využívat technici a inženýři, zabývající se obchodně-technickými a servisními službami, užitečné informace poskytne i manažerům, projektantům, pracovníkům investičních útvarů, provozu a údržby a rovněž studentům odborných škol. Svou jednoduchostí a přehledností má předpoklady stát se vhodnou pomůckou též pro odborníky souvisejících profesí s neelektrotechnickou specializací a jako taková poslouží i všem ostatním zájemcům o příslušnou problematiku, kteří k seznámení se s ní dosud neměli jinou příležitost.

Autor se snažil podat široký tematický rozsah příručky, přihlížející přitom k jejímu účelu, co nejúplněji, nejsrozumitelněji a v pokud možno vyvážené formě, aniž by přitom pustil ze zřetele nezbytnost zachování úsporného stránkového rozsahu díla. Pokud se mu tento obtížný úmysl ne všude a ve všem dařilo plnit, prosí laskavého čtenáře o shovívavost.

Autorovi je milou povinností poděkovat na tomto místě především recesentům pánům Ing. Josefovi Heřmanovi Csc. z FCC PUBLIC, s. r. o., Ing. Janovi Peřinovi z ČVUT a Ing. Josefovi Šimkovi CSc. z ČKD-NOVÉ ENERGO, a. s. za zájem a pozornost, kterou věnovali rukopisu a za spolupráci a řadu podnětných připomínek i mimo rámec recenze, čím vším výrazně přispěli k úrovni a vyváženosti obsahu. Dále pak děkuje pánům Aleši Vebrovi ze ZKUŠEBNICTVÍ, a. s. za spolupráci na pátém oddíle a za zpracování obrázků, doc. Ing. Františku Fenclovi CSc. z ČVUT za vytvoření podkladů k vypracování kapitoly 4.8 a Ing. Pavlu Křemenovi CSc. z a. s. ZKUŠEBNICTVÍ za cenné připomínky, jakož i všem ostatním, kteří byli nápomocni radou a přispěním.

Fotografická dokumentace velkých elektrických strojů a jejich součástí byla zapůjčena laskavostí výrobce ČKD Nové Energo, a. s. Ostatní vyobrazení tohoto druhu pocházejí z propagační dokumentace výrobců, uváděných v textu k příslušným obrázkům.

V neposlední řadě zaslouží ocenění též konstruktivní přístup redakce vydavatele k záměru na vydání příručky i její sympatické a efektivní jednání v období přípravy a redakce rukopisu, a to tím spíše, že současné zdejší vydavatelské povědomí není, v důsledku dopadů restrukturalizace českého elektrotechnického průmyslu, vydávání publikací z oblasti silnoproudé elektrotechniky příliš nakloněno.

Autor

Vysvětlují se principy stavby a funkce indukčních a velkých synchronních motorů, ve stručnosti (vzhledem k menšímu významu) též velkých motorů stejnosměrných. Je věnována pozornost i elektrickým přístrojům a mechanickým komponentám v jejich výkonových obvodech a elektronickým periferiím, integrovaným se strukturou motorů. Popisují se vlastnosti nejdůležitějších výkonových polovodičových součástek, je poukázáno na výkonové integrované struktury a přibližují se hlavní typy statických polovodičových měničů s jejich charakteristikami. Na blokových schématech se objasňuje funkce některých konkrétních střídavých a stejnosměrných jednomotorových pohonů s automatickou regulací chodu. Předkládají se stanoviska pro aplikační výběr vhodného druhu motoru nebo regulačního pohonu. V souladu s normami EN a IEC je poukázáno na hlavní skutečnosti, významné pro instalaci a užití sledovaných motorů a regulačních pohonů. Nejsou pomíjeny ani otázky ochrany před úrazem, především elektrickým proudem, posuzování shody a uvádění zařízení do provozu. Výklad objasňují praktické příklady. Přílohy uvádějí přehled důležitých vlastností a parametrů uvažovaných motorů, statických měničů pro regulační pohony, seznam s předmětem práce souvisejících hlavních norem EN a IEC a přehled jednotek mezinárodní soustavy SI, používaných v elektrotechnice (včetně přepočtu cizích a starých jednotek). Je přiložena též rozsáhlá knižní bibliografie k obsahu příručky.

Příručka má přispět k rychlé orientaci v otázkách výběru pohonného prostředku pro danou aplikaci a k rozvoji tvůrčích postupů při jeho instalaci a užití, a to též v méně obvyklých, netypických nebo nových podmínkách. Je určena technikům a inženýrům z oblastí obchodně-technických služeb, servisu, projekce, investic, provozu a údržby, hodí se i pro průmyslové manažery, studenty odborných škol, jakož i pro ostatní zájemce o problematiku příručky.