



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



ELEKTROTECHNIKA PRO FMMI

učební texty

Tomáš Mlčák

Ostrava 2010

Recenze: Ing. Václav Kolář, Ph.D.
Ing. Aleš Oujezdský, Ph.D.

Název: Elektrotechnika pro FMMI
Autor: Ing. Tomáš Mlčák, Ph.D.
Vydání: první, 2010
Počet stran: 54
Náklad: 20

Studijní materiály pro studijní obory 2109R033 *Slévárenské technologie*, 2109R035 *Technologie výroby kovů*, 3904R020 *Tepelná technika a životní prostředí* studijního programu B2109 *Metalurgické inženýrství*, dále obory 2811R002 *Chemie a technologie paliv*, 3911R008 *Chemické a fyzikální metody zkoušení materiálu* studijního programu B3909 *Procesní inženýrství* a obory 3902R040 *Automatizace a počítačová technika v průmyslu*, 6208R123 *Ekonomika a management v průmyslu* studijního programu B3922 *Ekonomika a řízení průmyslových systémů* Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství.

Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:

Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost

Název: Personalizace výuky prostřednictvím e-learningu

Číslo: CZ.1.07/2.2.00/07.0339

Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava

Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Tomáš Mlčák

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2601-1

OBSAH

ELEKTROTECHNIKA PRO FMMI	1
Obsah.....	3
POKYNY KE STUDIU	5
1. TYPY ASYNCHRONNÍCH A SYNCHRONNÍCH STROJŮ, ZPŮSOBY SPOUŠTĚNÍ, ŘÍZENÍ A BRZDĚNÍ, PRAKTICKÉ POUŽITÍ TĚCHTO STROJŮ.....	7
1.1. Asynchronní stroje	7
☐ Základní pojmy.....	7
☐ Princip činnosti třífázového asynchronního motoru.....	8
☐ Spouštění asynchronního motoru s kotvou nakrátko.....	10
☐ Regulace otáček.....	11
☐ Brzdění	13
☐ Praktické aplikace asynchronních strojů	14
1.2. Synchronní stroje.....	19
☐ Základní pojmy.....	19
☐ Konstrukce synchronního stroje	19
☐ Princip činnosti třífázového synchronního stroje	20
☐ Spouštění synchronního motoru	21
☐ Řízení otáček synchronního motoru	21
☐ Speciální provedení synchronních motorů	21
☐ Praktické aplikace synchronních strojů	22
2. ELEKTRICKÉ TEPLA - VZNIK TEPLA Z ELEKTRICKÉ ENERGIE, DRUHY A POPISY JEDNOTLIVÝCH ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ, UŽITÍ ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ V PRAXI.....	24
2.1. Vznik tepla z elektrické energie	24
☐ Teplo.....	24
☐ Základní veličiny a jednotky	24
☐ Oteplovací a ochlazovací křivka	25
2.2. Elektrické teplo odporové – odporová elektrotepelná zařízení	27
☐ Praktické příklady odporových elektrotepelných zařízení využívajících přímý ohřev	28
☐ Rozdělení odporových elektrotepelných zařízení pracujících s nepřímým ohřevem	31
☐ Praktické příklady odporových elektrotepelných zařízení pracujících s nepřímým ohřevem	32
☐ Závěrem.....	33
2.3. Elektrické teplo obloukové – oblouková elektrotepelná zařízení.....	36
☐ Elektrický oblouk	36
☐ Typy elektrických obloukových pecí	37
☐ Elektrické svařování	38
2.3.1 Plazmový ohřev – plazmová elektrotepelná zařízení,	39
2.4. Indukční ohřev – indukční elektrotepelná zařízení.....	40
☐ Princip indukčního ohřevu	40
☐ Výhody indukčního ohřevu	41
☐ Praktické využití indukčního ohřevu v průmyslu:	42
2.5. Další způsoby ohřevu	45
2.5.1 Dielektrický ohřev	45

2.5.2	Elektronový ohřev	46
2.5.3	Ohřev pomocí laserů	46
2.5.4	Ohřev pomocí infrazářičů a sálavých panelů	47
2.6.	Bezpečnost provozu elektrotepelných průmyslových zařízení	48
	Klíč k řešení	51
	Rejstřík	54

POKYNY KE STUDIU

Elektrotechnika pro FMMI

Pro předmět *Elektrotechnika* vyučovaný na Fakultě metalurgie a materiálového inženýrství jste obdrželi studijní balík obsahující

- integrované skriptum pro distanční studium obsahující i pokyny ke studiu
- CD-ROM s doplňkovými animacemi vybraných částí kapitol
- harmonogram průběhu semestru a rozvrh prezenční části
- rozdělení studentů do skupin k jednotlivým tutorům a kontakty na tutorý
- kontakt na studijní oddělení

Prerekvizity

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětů *Základy fyziky*, *Fyzika I* a *Fyzika II*.

Cílem předmětu

je seznámení se základními pojmy v oblasti elektrických strojů a elektrotepelných zařízení. Po prostudování modulu by měl student pochopit základní principy činnosti a provozní vlastnosti elektrických pohonů a elektrotepelných zařízení. Student by měl být schopen orientovat se v této problematice elektrických zařízení a znát základní pojmy, které mu pomohou při orientaci v oborových technologiích a jejich návazností. Student získá zkušenosti, které bude moci uplatnit v praxi.

Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do bakalářského studia oborů 2109R033 *Slévárenské technologie*, 2109R035 *Technologie výroby kovů*, 3904R020 *Tepelná technika a životní prostředí* studijního programu B2109 *Metalurgické inženýrství*, dále oborů 2811R002 *Chemie a technologie paliv*, 3911R008 *Chemické a fyzikální metody zkoušení materiálu* studijního programu B3909 *Procesní inženýrství* a oborů 3902R040 *Automatizace a počítačová technika v průmyslu*, 6208R123 *Ekonomika a management v průmyslu* studijního programu B3922 *Ekonomika a řízení průmyslových systémů*, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsána struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden **čas** potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat ...
- definovat ...
- vyřešit ...

Okamžitě potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



VÝKLAD

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



Pojmy k zapamatování

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Otázky

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



Úlohy k řešení

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v databázové praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavním význam předmětu a schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti při řešení reálných situací hlavním cílem předmětu.



KLÍČ K ŘEŠENÍ

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek výše jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

Úspěšné a příjemné studium s touto učebnicí Vám přeje autor výukového materiálu

Tomáš Mlčák

1. TYPY ASYNCHRONNÍCH A SYNCHRONNÍCH STROJŮ, ZPŮSOBY SPOUŠTĚNÍ, ŘÍZENÍ A BRZDĚNÍ, PRAKTICKÉ POUŽITÍ TĚCHTO STROJŮ

1.1. Asynchronní stroje



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní pojmy a pracovní stavy asynchronních strojů
- popsat konstrukci, princip činnosti a oblast použití asynchronních strojů
- změřit momentovou charakteristiku asynchronního motoru



Výklad

□ Základní pojmy

Asynchronní stroj je dnes jedním z nejrozšířenějších typů točivých strojů. K tomuto faktu přispěl mohutný rozvoj polovodičové techniky a vývoj frekvenčních měničů. Asynchronní stroj může být konstruován jako jednofázový nebo třífázový. Převážně je používán jako motor, ale může také pracovat jako generátor.



Definice

Asynchronní motor je střídavý elektrický stroj, který slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou energii.

Naproti tomu asynchronní generátor je elektrický stroj, který přeměňuje rotační mechanickou energii na střídavou elektrickou energii.

□ Konstrukce asynchronního stroje

Většina asynchronních motorů používaných v průmyslu je s klecovým rotorovým vinutím, tzn. asynchronní motor s kotvou “nakrátko”. Tento typ je nejrozšířenější motor v elektrotechnické praxi. Můžeme se také setkat s asynchronním motorem s kotvou kroužkovou, kde v drážkách rotoru je trojfázové vinutí, jehož vývody jsou připojeny na tři kroužky nalisované na hřídeli stroje, ke kterým přiléhají pevně osazené kartáče umožňující vyvedení vinutí na svorkovnici stroje.

Oba motory, třífázový i jednofázový mají široké použití, které si ukážeme níže. Použití asynchronního stroje jako generátoru, je typické ve větrných elektrárnách, v aplikacích kde pracuje zároveň jako motor i generátor apod.

Asynchronní motor s kotvou nakrátko má velmi jednoduchou konstrukci, která neobsahuje žádné sběrací kroužky, kartáče, komutátory apod. Rotor je uložen pouze v ložiscích a není nijak elektricky

spojen se statorem. Pro svou jednoduchou konstrukci se asynchronní motor vyznačuje vysokou spolehlivostí (1).

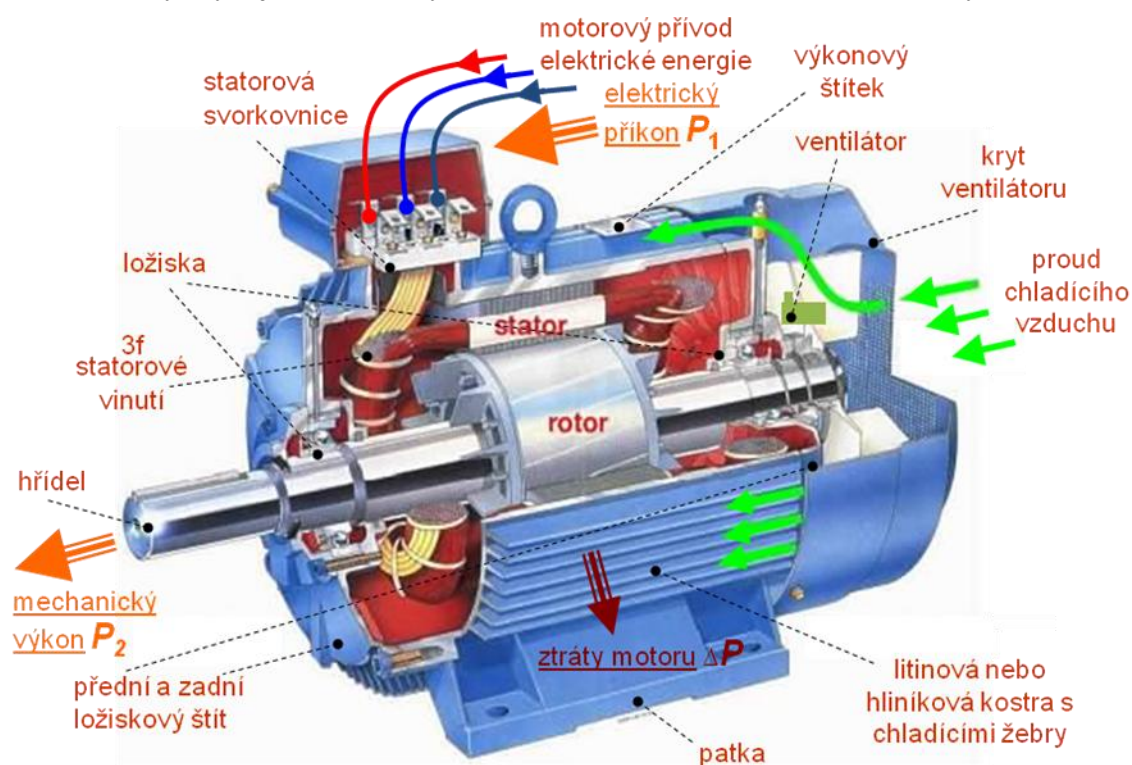
Konstrukční uspořádání asynchronního stroje je zobrazeno na obrázku 1.1.

1 Složení konstrukce statoru

- Nosná kostra motoru - litinová nebo hliníková kostra s chladicími žebry, přední a zadní ložiskový štít, atd.
- Jádru (paket) z izolovaných dynamolechů s drážkami
- Vinutí z izolovaných Cu vodičů, zpravidla tří nebo jednofázové, je vytvarováno a uloženo oddělené drážkovou izolací v drážkách jádra

2 Rotor asynchronního motoru s kotvou nakrátko

- Paket z izolovaných dynamolechů s drážkami na vnějším obvodu
- Kovové tyče vinutí zalisovány v drážkách, zpravidla z mědi nebo hliníku
- Dva zkratovací kroužky spojující tyče nakrátko
- Drážky a tyče jsou zešíkmeny z důvodů snížení hlučnosti vlivu harmonických



Obr. 1.1. Řez třífázovým asynchronním motorem v patkovém provedení

□ Princip činnosti třífázového asynchronního motoru

- Statorové vinutí je napájeno třífázovým napájecím napětím, které v něm vyvolá souměrný střídavý proud,
- protékající třífázový proud vygeneruje ve statoru točivé elektromagnetické pole,
- toto elektromagnetické pole se otáčí, neboli rotuje synchronní úhlovou rychlostí ω_1 (rad/s), která je závislá na napájecí frekvenci a na počtech pólů asynchronního stroje. Počet pólů v podstatě znamená, kolikrát opakovaně je trojfázové vinutí postupně rozloženo v drážkách

statoru. Synchronní úlová rychlost elektromagnetického pole (1.1) je úměrná synchronním otáčkám n_1 (min^{-1}):

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30} \quad (1.1)$$

Synchronní otáčky n_1 (1.2) závisí na frekvenci f (Hz) napájecího napětí asynchronního motoru a počtu pólových dvojic (pólů) p (-):

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1.2)$$

na vysvětlenou každý asynchronní motor má minimálně jednu pólovou dvojici neboli pólů p , ale běžně se u asynchronních motorů bavíme o počtu pólů, které označujeme $2p$. Tedy je logické jestliže je pólová dvojice p , potom tato má dva póly $2p$. Jak už bylo řečeno, u asynchronních motorů hovoříme o počtu pólů, tedy o veličině $2p$. Asynchronní motor musí mít principiálně minimálně dva póly a více, potom mohou nastat tyto případy:

$2p = 2$, jedná se o dvoupólový motor, kde $p = 1$ a synchronní rychlost statorového magnetického pole je v tomto případě $n_1 = 3\,000 \text{ min}^{-1}$, následně

$2p = 4$, je čtyřpólový asynchronní motor, kde $n_1 = 1\,500 \text{ min}^{-1}$,

$2p = 6$, je šestipólový asynchronní motor, kde $n_1 = 1\,000 \text{ min}^{-1}$, atd.

Maximální počet pólů je omezen konstrukční velikostí stroje, kdy už se do konstrukce statoru nevejde tolik drážek a vinutí. Tímto jsou hlavně omezeny stroje menších výkonů, které jsou samozřejmě konstrukčně menší. Asynchronní motory velkých výkonů mohou být až 24 pólové, kde potom synchronní rychlost vychází na $n_1 = 125 \text{ min}^{-1}$.

- Rotující elektromagnetické pole indukuje indukované napětí do vodičů rotorového vinutí nakrátko.
- Indukované napětí vyvolá v klecovém vinutí rotoru elektrický proud. Průchodem proudu se kolem rotoru vytvoří magnetické pole, které je unášeno magnetickým polem generovaným statorem. Protože rotor není napájen, nemůže se točit synchronní rychlostí, neboť kdyby se rotor točil stejnou rychlostí, jako obíhá magnetické pole statoru, vytvořilo by se stacionární magnetické pole (není pohyb, není indukované napětí, není proud, a tedy není moment) a do rotoru by se neindukovalo žádné napětí a tím by nemohl vyvinout žádnou sílu. Tedy se rotor musí otáčet jinými, tzn. asynchronními otáčkami, podle velikosti síly, kterou musí motor vyvinout.



CD-ROM

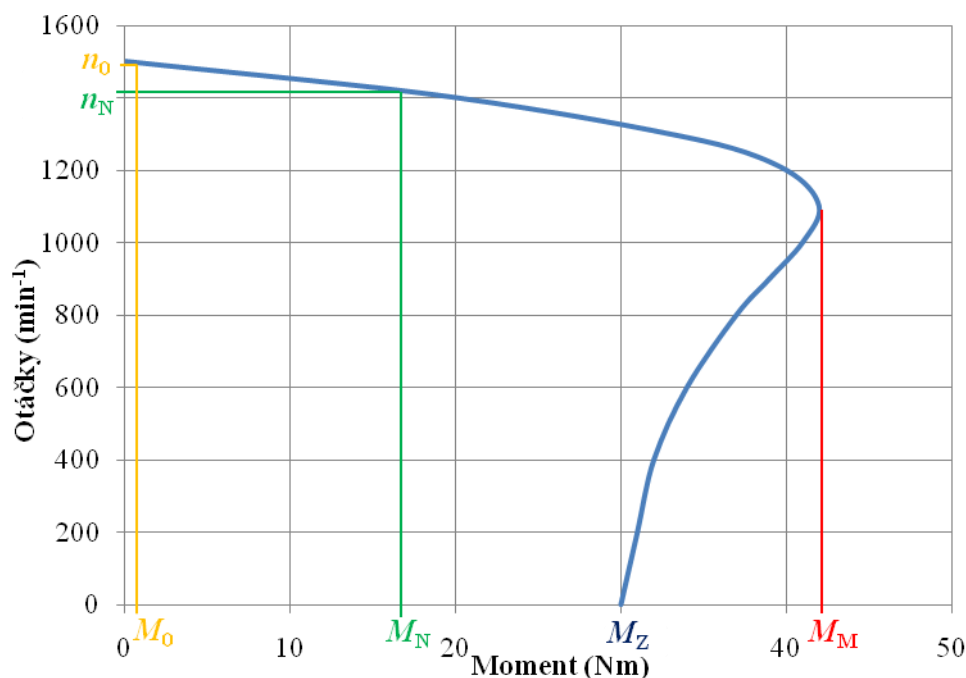
Na obrázku 1.2 je uveden průběh momentové charakteristiky asynchronního motoru. Podrobný popis momentové charakteristiky asynchronního motoru je předveden v animaci „Momentová charakteristika asynchronního motoru.swf“.

Ve videoklipu s názvem „Měření momentových charakteristik asynchronního motoru.avi“ je nozorně ukázán podrobný postup při měření momentové charakteristiky asynchronního motoru.

Na obrázku 1.2 jsou uvedeny následující veličiny v momentové charakteristice asynchronního motoru:

- **moment naprázdno M_0** , který se skládá z pasivních momentů v ložiscích motoru, momentu od chladicí vrtule motoru, apod., při tomto momentu má asynchronní motor otáčky naprázdno n_0 ,
- **jmenovitý moment M_N při jmenovitých otáčkách n_N** ,

- maximální moment neboli moment zvratu M_M ,
- záběrný moment M_Z .



Obr. 1.2. Momentová charakteristika čtyřpólového asynchronního motoru

□ Spouštění asynchronního motoru s kotvou nakrátko

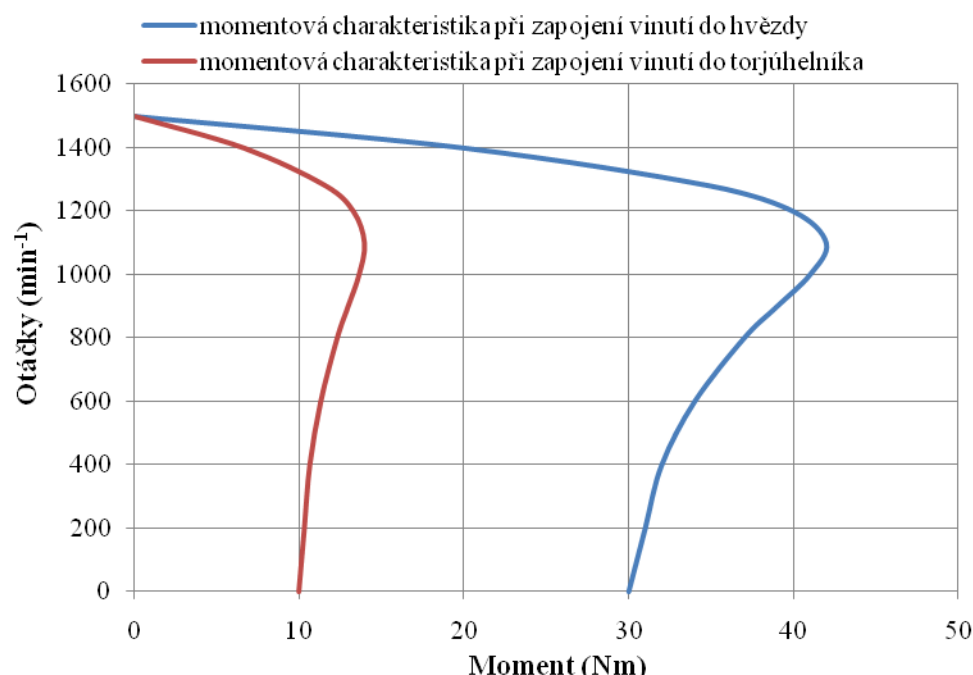
Při spouštění asynchronních motorů vzniká tzv. „záběrový proud“. Tento záběrový proud je v závislosti na konstrukci motoru 5-8 krát vyšší než jmenovitý proud motoru. Jmenovitý proud motoru je proud, který motorem protéká, když je již roztočen na jmenovité otáčky a zatížen jmenovitým momentem. V tomto případě má motor jmenovitý výkon, pokud je napájen jmenovitým napětím o jmenovité frekvenci.

Vlivem záběrových proudů mohou vzniknout v síti velké proudové rázy při poměrně malém záběrovém momentu. V klasických domovních instalacích je proto přímé připojení asynchronního motoru na napájecí síť povoleno pouze pro malé motory s výkonem do 4 kW.

Omezení velkého záběrového proudu při rozběhu lze docílit několika způsoby:

- **Statorovým spouštěčem** – do série s vinutím se zapojí předřadné omezovací odpory nebo tlumivky, které se po spuštění postupně vyřadí. Tento způsob není vhodný z důvodu zvýšení ztrát a zhoršení účinnosti při spouštění a **dnes se již prakticky nepoužívá.**
- **Rozběhové autotransformátory** – tyto snižují rozběhové napětí a tím i záběrný proud. Při rozběhu lze autotransformátor i přetížit, protože ihned po spuštění motoru je odpojen z obvodu motoru. Tento způsob rozběhu se používá hlavně pro motory velkých výkonů. I zde již začínají pronikat polovodičové měniče.
- **Přepínač hvězda - trojúhelník** – statorové vinutí asynchronního motoru bývá běžně spojeno do trojúhelníku, pokud ovšem při rozběhu přepneme statorové vinutí do hvězdy, napětí na vinutí se zmenší $\sqrt{3}$ krát, tím klesne odebíraný proud o $\sqrt{3}$ a celkový výkon se zmenší 3 krát. Metoda se může používat jen při malém rozběhovém zatížení motoru. Tato metoda se používá, jak

v domácnostech, tak v průmyslu. Na obrázku 1.3 je vidět rozdíl ve velikosti momentu při zapojení asynchronního motoru do hvězdy a do trojúhelníka.



Obr. 1.3. Momentové charakteristiky při zapojení do hvězdy a do trojúhelníku

- **Soft starter** – jedná se o polovodičový měnič, který pomocí spínacích prvků nazývaných triaky postupně zvyšuje napájecí napětí na motoru. Řízení měniče je plně elektronické, proto lze nastavit požadovaný rozběh podle typu aplikace. Stejný princip tohoto polovodičového měniče je například využíván v zařízeních pro stmívání osvětlení, nebo v aplikacích určených k regulaci topení apod.
- **Frekvenční měnič neboli měnič kmitočtu** – jedná se o polovodičový, kterým lze zajistit nejen plynulý rozběh motoru, ale i jeho kompletní řízení. Pomocí frekvenčních měničů dosahujeme nejúčinnější a nejkomfortnějších regulací asynchronního motoru a díky tomuto zařízení je asynchronní motor dnes nejpoužívanějším typem stroje. Aplikaci s frekvenčním měničem si popíšeme níže.

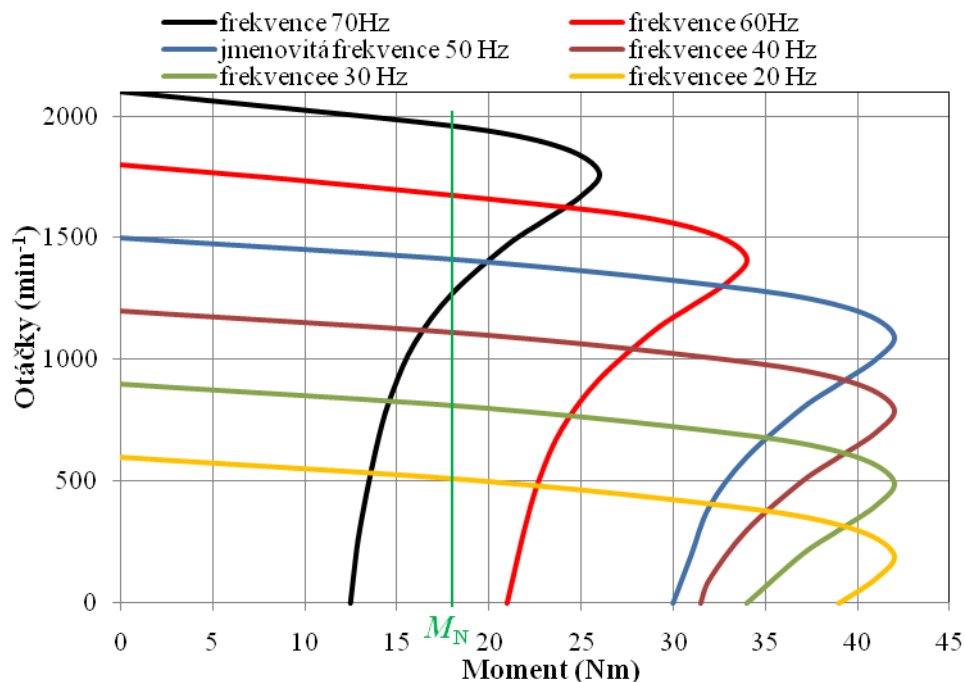
□ Regulace otáček

Otáčky asynchronního motoru jsou dány počtem pólů p , kmitočtem napájecího napětí f_1 a skluzem s . Z toho vyplývá, že regulace otáček je možná změnou kterékoliv z těchto tří veličin (1.3):

$$n = \frac{f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad (1.3)$$

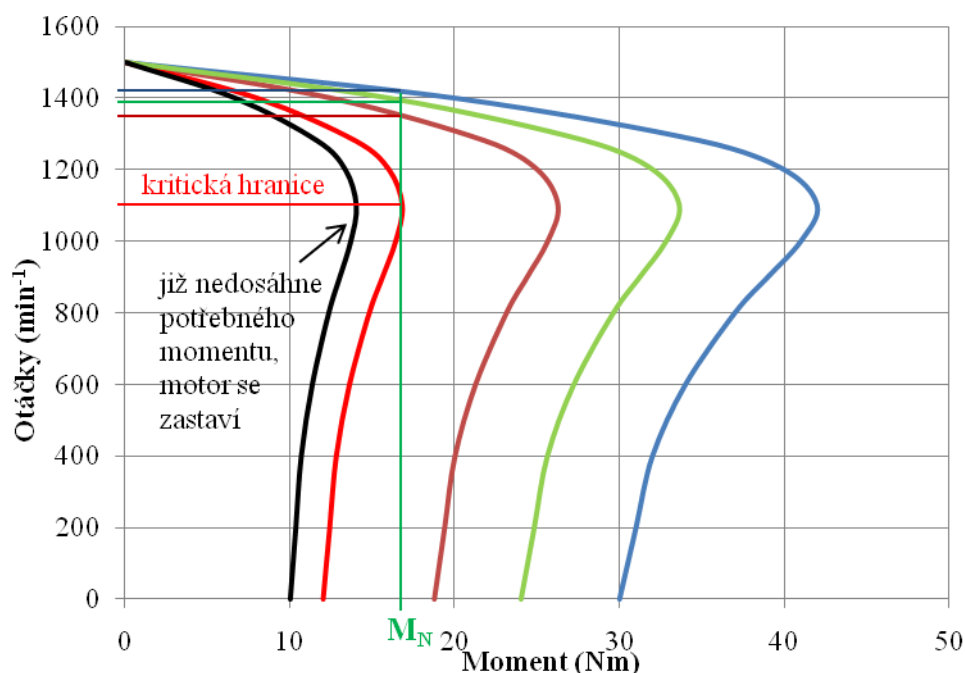
- **Regulace změnou kmitočtu** – v dnešní době nejrozšířenější regulace asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Pomocí měniče kmitočtu můžeme řídit frekvenci a napájecí napětí do statoru motoru a tím měnit rychlost a intenzitu magnetické pole statoru. Používáme dva základní typy řízení, a to skalární řízení s pulzně šířkovou modulací, které se používá u motorů s malými nároky na dynamické vlastnosti, např. ventilátory, čerpadla apod. Druhým způsobem je vektorové řízení s vektorovou modulací, kdy dosahujeme dobrých dynamických vlastností a obrovskou výhodou toho řízení je, že nám asynchronní motor při tomto řízení vyvine dostatečný moment i při nulových otáčkách. Průběh momentových charakteristik při frekvenčním řízení jsou znázorněny na obrázku 1.4. Z obrázku je vidět, že při tomto řízení lze udržet jmenovitý moment v celém rozsahu otáček, tedy od 0 do n_N a dokonce i v oblasti nad synchronními otáčkami. Jde o nejdokonalejší způsob řízení otáček asynchronních motorů a lze docílit i otáček vyšších, než

synchronních, tzv. nadsynchronních otáček, jak ukazuje černá a červená křivka na obrázku 1.4. Při provozování motoru v nadsynchronních otáčkách musíme ověřit, do jaké velikosti otáček můžeme motor provozovat vzhledem k mechanickým vlastnostem, zejména vzhledem k odolnosti ložisek a vyvážení rotoru motoru. Při navrhování pohonu s frekvenčním měničem musíme také myslet na to, že při regulaci v nízkých otáčkách bude motor s vlastním chlazením podstatně méně ochlazován a může se rychle přehřát. Proto musíme při těchto aplikacích motor správně dimenzovat, nebo použít motor s cizím chlazením.



Obr. 1.4. Momentové charakteristiky při frekvenčním řízení asynchronního motoru

- **Regulace změnou počtu pólů** – pomocí přepínání statorového vinutí, a tím změny počtu pólových dvojic lze dosáhnout skokové změny otáček. Motory musí mít na statoru takové vinutí, jehož počet pólů lze měnit.
- **Regulace změnou skluzu** – V tomto případě se jedná o změnu sklonu momentové charakteristiky při stejných synchronních otáčkách.



Obr. 1.5. Momentové charakteristiky při skluzovém řízení asynchronního motoru

Požadované změny otáček dosáhneme pouze u zatíženého motoru, kdy skluz bude závislý na jeho pracovním bodu. Toto řízení je možné u asynchronního motoru provést buď změnou napájecího napětí, nebo změnou impedance v obvodu statoru nebo rotoru. Prakticky se nejčastěji používá změna impedance v obvodu rotoru, což je možné pouze u motorů s kotvou kroužkovou. Změnou velikosti napájecího napětí motoru se mění moment motoru kvadraticky, tím se mění momentová charakteristika asynchronního motoru a při daném zatěžovacím momentu i jeho skluz a tím i otáčky motoru. Řízení lze realizovat principiálně stejně jako u spouštění asynchronních motorů. Možný rozsah řízení otáček je zde velmi nízký, jak je vidět na obrázku 1.5 (cca $\frac{1}{4}$ v horní oblasti momentové charakteristiky), proto se tento způsob řízení používá jen zřídka (např. pro pohony ventilátorů, čerpadel apod.)

□ Brzdění

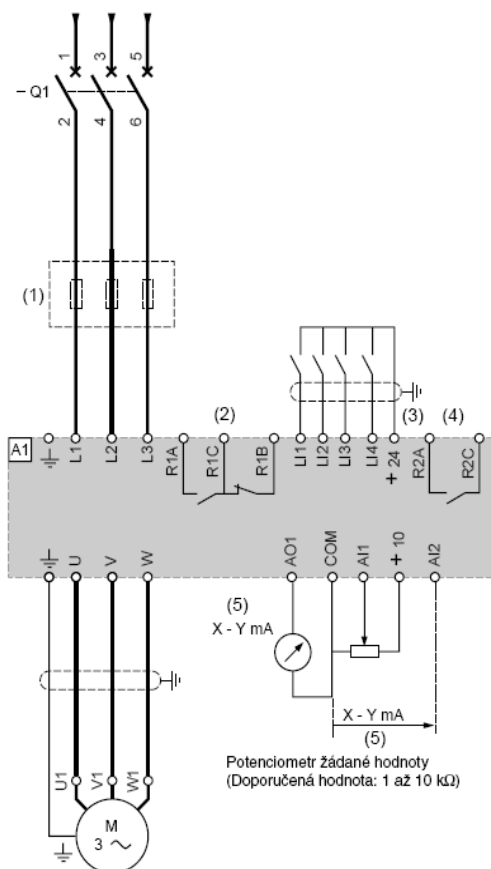
- **Brzdění protiproudem** – u roztočeného motoru změním smysl otáčení magnetického pole statoru, tak že přepojíme libovolné dvě fáze motoru. Tím se samozřejmě změní i směr působení momentu vyvolaného tímto polem a vytváří brzdný moment, který působí proti aktuálnímu směru otáčení rotoru. Při dosažení nulových otáček rotoru je nutno motor odpojit od napájecí sítě, aby se rotor neroztočil opačným směrem. Při tomto způsobu brzdění se motor značně zahřívá, protože veškerá kinetická energie se mění na teplo, tento způsob je tedy značně nevhodný. Přetížení motoru v tomto případě vyvolá odběr proudu na 10 – 12-ti násobek jmenovitého proudu motoru.
- **Dynamické brzdění** – někdy je také nazýváno jako stejnosměrné brzdění. Statorové vinutí motoru se odpojí od napájecí střídavé sítě a připojí se na zdroj stejnosměrného napětí. Stejnosměrný zdroj vytváří stacionární magnetické pole, které působí na magnetické pole otáčejícího se rotoru, tímto dochází ke vzniku momentu působícího proti směru otáčení rotoru a motoru se tak zabrzdí. Velikost brzdného momentu je možno regulovat velikostí stejnosměrného proudu, ale pouze v omezeném rozsahu. Dynamické brzdění není moc účinné při vysokých otáčkách a při otáčkách blízkých nule, kdy se motor musí dobrzdit mechanicky. Pro klasický čtyřpólový asynchronní motor je dynamické brzdění nejúčinnější v rozmezí od

10Hz do 5Hz. Dynamické brzdění opět není zvláště energeticky výhodné, protože veškerá brzdňá energie se opět přemění na teplo, které zůstává v motoru.

- **Brzdění generátorické** – nastává tehdy, jestliže asynchronní motor pracuje jako generátor, to znamená, jestliže jeho otáčky jsou větší než otáčky synchronní $n > n_1$. Toho lze dosáhnout přepínáním počtu pólů (např. přepnutím ze dvou na čtyři póly, tedy přepnutím na vyšší počet pólů), nebo změnou frekvence otáčení magnetického pole pomocí frekvenčního měniče. Docílit generátorického režimu je možné i působením aktivního momentu zátěže (např. spouštění břemene na jeřábu, vozidlo pohybující se z kopce apod.) Při generátorickém brzdění vrací asynchronní motor vyrobenou energii zpátky do napájecí sítě, jedná se tedy o nejefektivnější způsob brzdění asynchronního motoru. Spojení asynchronního motoru s čtyřkvadrantovým frekvenčním měničem je v dnešní době nejpoužívanější způsob, který využívají např. tramvaje, trolejbusy a moderní lokomotivy. U těchto způsobů brzdění je výhodné, že se vyrobená energie odvede mimo motor a ten se zbytečně nezahřívá. Pomocí této aplikace lze zastavit asynchronní motor až do nulových otáček, udržovat konstantní brzdící moment apod.

□ Praktické aplikace asynchronních strojů

Asynchronní stroje jsou díky své jednoduchosti a cenové dostupnosti nejpoužívanějšími elektromotory vůbec. Jsou rovněž provozně nejspolehlivější a nevyžadují téměř žádnou údržbu. Díky rozvoji frekvenčních měničů, jsou dnes nasazovány do aplikací, kde byly dříve dominantní jiné typy motorů. Na obrázku 1.6 je zobrazeno základní výkonové zapojení frekvenčního měniče s asynchronním motorem (4).



Obr. 1.6. Základní zapojení pohonu asynchronního motoru s frekvenčním měničem

Příklady použití asynchronních motorů:

- **Čerpadla** – nepřetržité množství aplikací s výkony od 100W až po 1MW. Mohou být aplikace bez řízení motoru, nebo aplikace s frekvenčními měniči, tedy s regulací průtoku.
- **Ventilátory** – aplikace s výkony od 100W až po 100kW. Zde se můžeme setkat s aplikacemi, kde se využívají vícepólové motory, např. 12, 24 pólové apod.
- **Kompresory** – obdobné nasazení, jako u čerpadel.
- **Pásové dopravníky** – u těchto aplikací může být kladen vyšší požadavek na krytí strojů, které většinou pracují v prašném, nebo venkovním prostředí.
- **Jeřáby** – jsou zařízení, kde je použito hned několik asynchronních motorů. Pohon pro pojezd jeřábu, kdy je většinou umístěn motor na každém pojezdovém kole, frekvenční měniče potom řídí rychlost pohybu mostní konstrukce (otáčková regulace s nadřazenou momentovou regulací). Pohon pojezdu vozíku neboli kočky jeřábu a následně pohon pro pohyb břemene.
- **Výtahy** – zde se můžeme být asynchronní motor použit přímo, jako pohon ocelového lana výtahu, se můžeme setkat s hydraulickými výtahy, kde je asynchronním motorem poháněné hydraulické čerpadlo.
- **Obráběcí stroje** – v těchto aplikacích je asynchronní motor hlavní pohonnou jednotkou vřetene. Na stroji ovšem většinou najdeme více asynchronních motorů, které mohou sloužit pohonu čerpadel, výměníků nástrojů, dopravy materiálu apod.
- **Tramvaje** – jsou většinou konstruovány tak, že mají instalovaný motor na každé nápravě jízdní soupravy. Celkový výkon asynchronních motorů tramvají se pohybuje okolo 250kW.
- **Trolejbusy** – jsou většinou konstruovány tak, že mají akumulární prvek. Toto zařízení umožní provoz i v případě výpadku trakčního napájení, nebo je možno na krátké vzdálenosti provozovat trolejbus, jako autobus. Celkový výkon asynchronních motorů pro pohon trolejbusů bývá kolem 150kW. Pohonná jednotka může být jedna, nebo opět složená z více motorů.
- **Lokomotivy** – elektrické lokomotivy vyráběné v minulém století byly vesměs konstruovány se stejnosměrnými motory. Dnešní moderní soupravy, jako Pendolino, nebo nová řada souprav 471 (soupravy s dvoupodlažními vozy) jsou poháněny asynchronními motory. Celkový výkon soupravy Pendolino je 4 000 kW, soupravy 471 potom 2 000kW (7). Škoda transportation nyní představuje novou vícesystémovou univerzální lokomotivu ŠKODA 109 E, která má čtyři asynchronní trakční motory s vinutím do dvojité hvězdy poskytují jmenovitý výkon 6 400 kW, umožňující lokomotivě bezpečně dosáhnout rychlosti až 200 km/h (6).

Příklady použití asynchronních generátorů:

- **Malé vodní elektrárny** – jsou nabízeny asynchronní generátory mající výkonový rozsah 30-1500 kW, 4-24 pólů, napětí do 6300 V, frekvence 50, 60 Hz.
- **Kogenerační jednotky** – cenově výhodné použití asynchronního motoru do výkonu 200kW.
- **Větrné elektrárny** – v současné době je většina větrných elektráren v České Republice vybavena asynchronními generátory. Jedna z nejvýkonnějších je osazena asynchronním motorem o výkonu 2 000kW.

Jako asynchronní generátor lze použít téměř každý asynchronní elektromotor s kotvou nakrátko. Uvádím pouze výčet nejčastějších a nejzajímavějších aplikací, kde můžeme nalézt asynchronní stroj.

**Příklad 1.1.**

11 160M 1LA7 163-2AA.. 2940 89,5 89,5 0,88 20,0 36 2,1 6,5 2,9 16 0,034 68,5

Třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko má tyto štítkové údaje:

- Jmenovitý výkon $P_{2N} = 11 \text{ kW}$

- Jmenovité napájecí napětí $U_{1N} = 400\text{V}$ (motor zapojen do hvězdy)
- Jmenovitou frekvenci $f_{1N} = 50\text{ Hz}$
- Jmenovitý proud $I_{1N} = 20\text{ A}$
- Jmenovité otáčky $n_{2N} = 2940\text{ min}^{-1}$
- Jmenovitý účinník $\cos \varphi_N = 0,88$

Výpočtem určete následující parametry:

- jmenovitý skluz,
- jmenovitý kmitočet indukovaného napětí ve vinutí rotoru,
- počet pólů motoru,
- jmenovitý elektrický příkon,
- jmenovitou účinnost,
- jmenovitý točivý moment,
- jmenovité výkonové ztráty.

Vlastní řešení příkladu:

a) Jmenovitou hodnotu skluzu třífázového asynchronního motoru určíme pomocí jeho synchronních otáček n_1 a otáček jmenovitých n_{2N} . Otáčky n_1 určíme jako nejvyšší bližší známé synchronní otáčky pro $f_{1N} = 50\text{ Hz}$, pro tento motor je $n_1 = 3\,000\text{ ot./min.}$ a tím je nám jasné, že se jedná o dvoupólový stroj, jak výpočtem potvrdíme níže.

Potom vypočítáme skluz podle (1.4):

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1} = \frac{3000 - 2940}{3000} = 0,02 \quad (1.4)$$

skluz se může udávat i v procentech, tedy v tomto případě je jmenovitý skluz 2%.

b) Kmitočet indukovaného proudu (nebo napětí) ve vinutí rotoru asynchronního motoru je přímo úměrný skluzu a je dán vztahem (1.5):

$$f_{2N} = s_N \cdot f_{1N} = 0,02 \cdot 50 = 1\text{ Hz} \quad (1.5)$$

c) Počet pólů $2p$ třífázového asynchronního motoru je konstrukční parametr stroje, ovlivněný druhem satorového vinutí. Jak již jsme si vysvětlili výše, má dvojnásobnou hodnotu vzhledem k veličině používané ve výpočtech p – počet pólpáru, tedy počet pólových dvojic. Pro počet pólových dvojic platí rovnice 1.6 a následně podle vztahu 1.7 vidíme, že se jedná o dvoupólový motor:

$$p = \frac{60 \cdot f_{1N}}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1 \quad (1.6)$$

Potom:

$$2 \cdot p = 2 \cdot 1 = 2 \quad (1.7)$$

d) Příkon třífázového asynchronního motoru je fyzikálně výkon, dodaný motoru (odebraný motorem) z napájecí třífázové sítě. Pro výpočet jmenovitého příkonu motoru platí (1.8):

$$P_{1N} = \sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot I_{1N} \cdot \cos \varphi_N = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 20 \cdot 0,88 = 12\,193,64\text{ W} \quad (1.8)$$

Poznámka: Napětí a proud volíme vždy pro dané zapojení vinutí – pokud je dáno, uvedeno na štítku. Pokud není zapojení známo, vyberu vždy odpovídající hodnoty zapojení. První údaj na výkonovém štítku (ve zlomcích) platí pro zapojení satorového vinutí do Y (hvězdy) a druhý údaj pro zapojení do D (trojúhelníku).

e) Účinnost třífázového asynchronního motoru je parametr, který se zatížením motoru (mechanickým na hřídeli) mění svoji velikost, určí se jako poměr mechanického výkonu asynchronního motoru na hřídeli, tedy výkonu P_2 ku elektrickému příkonu, tedy P_1 . Potom pro jmenovité hodnoty platí (1.9):

$$\eta_N = \frac{P_{2N}}{P_{1N}} = \frac{11\,000}{12\,193,64} = 0,902 \quad (1.9)$$

účinnost je veličina bezrozměrná, které se většinou udávána v procentech, tedy účinnost tohoto asynchronního motoru je 90.2%.

Poznámka: Účinnost u motorů s malým výkonem je nízká. S rostoucím výkonem, roste i jmenovitá účinnost.

f) Točivý moment třífázového asynchronního motoru je dán podílem velikosti mechanického výkonu P_2 a úhlové rychlosti rotoru Ω . Obecně tedy platí jednoduchý vztah 1.10. Přepočet úhlové rychlosti Ω (rad/s) na otáčky n (ot./min) je dán vztahem 1.11.

$$P = M \cdot \Omega \quad (1.10)$$

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (1.11)$$

Z těchto dvou jednoduchých rovnic dostaneme v praxi často používaný vztah pro výpočet točivého momentu (1.12):

$$M_N = 9,55 \cdot \frac{P_{2N}}{n_N} = 9,55 \cdot \frac{12\,193,64}{2940} = 39,6 \text{ Nm} \quad (1.12)$$

g) Ztráty asynchronního motoru, resp. výkonové ztráty, je údaj udávající celkové výkonové ztráty asynchronního motoru při jeho činnosti. V tomto případě se určí rozdílem hodnot příkonu a výkonu. Pro jmenovité hodnoty potom platí (1.13):

$$\Delta P_N = P_{1N} - P_{2N} = 12\,193,64 - 11\,000 = 1\,193,64 \text{ W} \quad (1.13)$$

Poznámka: Veškeré ztráty se v čase projevují tepelnou energií, kterou se motor otepluje.



Další zdroje

- (1) <http://fei1.vsb.cz/kat420>
- (2) <http://www.elektromotory-cz.cz>
- (3) <http://www.elektromotory-siemens.cz>
- (4) <http://www.siemens.com/entry/cz/cz>
- (5) <http://www.abb.cz>
- (6) <http://www.skoda.cz/transportation>
- (7) <http://www.atlaslokomotiv.net>
- (8) http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronní_motor



Pojmy k zapamatování

Stator asynchronního motoru	Moment zvratu
Rotor asynchronního motoru	Záběrný moment
Úhlová rychlost	Skluzová regulace
Synchronní otáčky	Frekvenční regulace
Počet pólů	Brzdění protiproudem
Počet pólových dvojic	Brzdění dynamické
Jmenovití moment	Brzdění generátorické



Otázky

- 1.1 Co je to asynchronní motor?
- 1.2 Z čeho se skládá asynchronní motor?
- 1.3 Co vyjadřuje počet pólů asynchronního motoru?
- 1.4 Jak můžeme regulovat otáčky asynchronního motoru?
- 1.5 Co je to moment zvratu?
- 1.6 Jak můžeme brzdit asynchronní motor?
- 1.7 Uveďte praktické příklady použití asynchronních strojů?

1.2. Synchronní stroje



Čas ke studiu: 45 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní pojmy a pracovní stavy synchronních strojů
- popsat konstrukci, princip použití a konstrukci synchronních strojů
- vyjmenovat nejčastější aplikace použití synchronních strojů



Výklad

□ Základní pojmy

Synchronní stroje jsou dodnes nejdůležitějšími elektrickými stroji pro výrobu elektrické energie. Tyto synchronní generátory nazývané také **alternátory** a jsou nejčastěji trojfázové. Alternátory, které jsou v elektrárnách poháněny parními nebo plynovými turbínami při rychlosti otáčení 3000 min^{-1} a nazývají se **turboalternátory**. Pokud jsou poháněny vodními turbínami při rychlosti, která je obvykle podstatně nižší nazývají se **hydroalternátory**. Později se synchronní stroje začaly používat také jako motory, jednak jako **synchronní kompenzátory** (pro zlepšování účinníku v elektrické síti), jednak pro pohony velkých čerpadel, ventilátorů a kompresorů (průmyslových zařízení, které nevyžadují časté spouštění a pracují s konstantní rychlostí a s málo proměnným zatížením). S rozvojem polovodičové a výpočetní techniky se synchronní motory uplatňují i v oblasti pohonů s řízením rychlosti a polohy a to jak u pohonů velkých výkonů řádově megawattů, tak i u malých výkonů v oblasti průmyslové automatizace a robotiky (tzv. servomechanismy) (1).



Definice

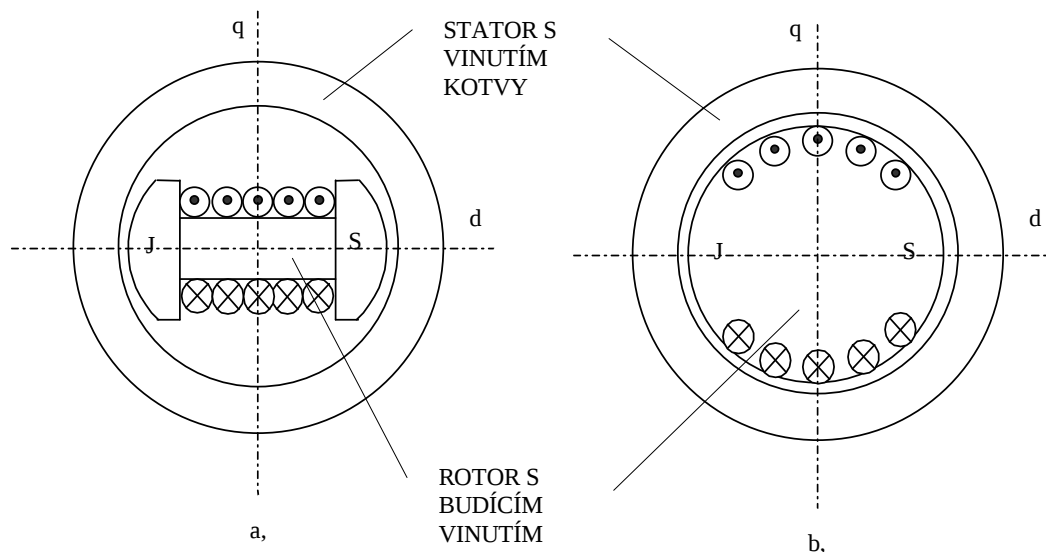
Synchronní motor je střídavý elektrický stroj, který slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou energii. Synchronní motor má konstantní otáčky v celém rozsahu pracovní charakteristiky.

Naproti tomu synchronní generátor (alternátor) je elektrický stroj, který přeměňuje rotační mechanickou energii na střídavou elektrickou energii. Alternátory jsou nejpoužívanější stroje pro výrobu elektrické energie.

□ Konstrukce synchronního stroje

Stator synchronního stroje se příliš neliší od statoru asynchronního stroje. Obsahuje trojfázové vinutí, které je umístěno v drážkách. Na rotoru je pak umístěno budící vinutí napájené stejnosměrným proudem přes sběrací kroužky a kartáče. Podle provedení rotoru se rozlišují dva základní typy synchronních strojů, a sice stroje s vyniklými póly uvedeného na obrázku 1.7a, které většinou používají na alternátory vodních elektráren a stroje s hladkým rotorem uvedeného na obrázku 1.7b, které se používají hlavně v tepelných a jaderných elektrárnách, tedy hydroalternátory. Synchronní stroje s permanentními magnety mají místo budícího vinutí na rotoru permanentní magnety, výhodou této konstrukce je, že odpadají sběrací kartáče a kroužky, nevýhodou potom nemožnost regulace buzení, změna parametrů permanentních magnetů při stárnutí stroje a vysoká cena.

Chlazení synchronních strojů bývá vzduchové, u strojů s hladkým rotorem vysokých výkonů potom vodíkové a vodní.



Obr. 1.7. Možné konstrukční typy synchronních strojů
a) stroj s vyniklými póly, b) stroj s hladkým rotorem

□ Princip činnosti třífázového synchronního stroje

Statorové vinutí je obdobné jako u asynchronního stroje. Rotorové vinutí je napájeno stejnosměrným proudem, který vybudí stejnosměrné magnetické pole, které následně generuje do statorového vinutí elektromotorické napětí, pokud stroj pracuje, jako alternátor. Pokud pracuje, jako motor je schopen díky napájení rotoru pevně držet se silovými účinky působícími ze statoru a tím se rotor otáčí stejnou rychlostí, jakou se otáčí točivé magnetické pole statoru.

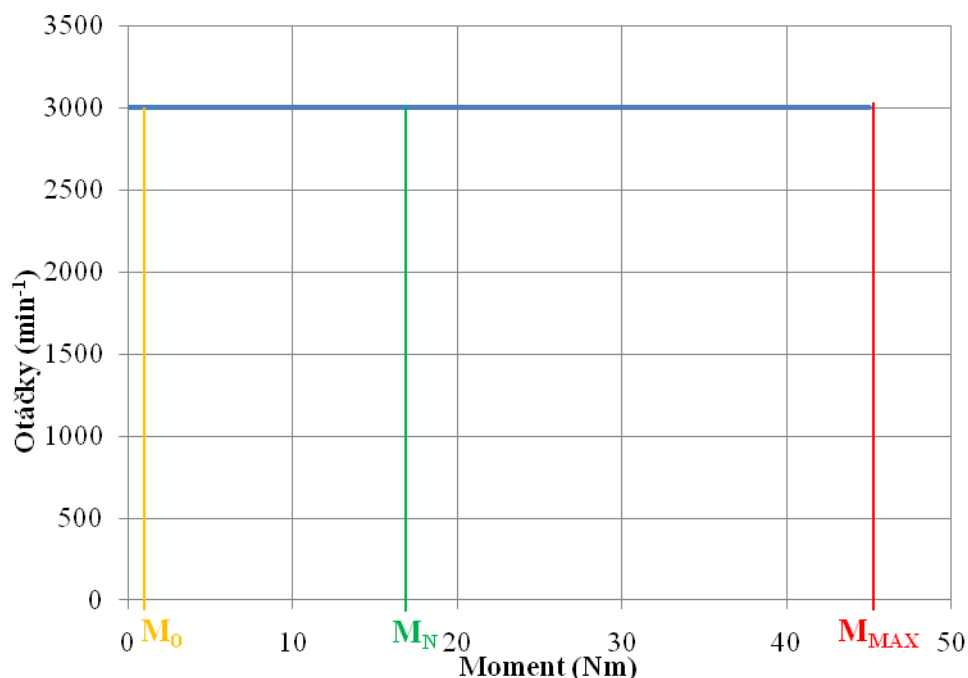
Základní režimy třífázového synchronního stroje:

- **Princip generátoru (alternátoru)** – pokud vyvineme rotační moment (např. parní turbínou), která otáčí nabuzeným rotorem alternátoru, potom se indukují v jednotlivých cívkách statoru střídavá napětí sinusového průběhu, která jsou v jednotlivých cívkách vzájemně časově posunuta o úhel 120° . Připojíme-li se ke svorkám statorového vinutí statoru třífázovou zátěží, potom vinutím statoru začne procházet střídavý elektrický proud. Prochází-li vinutím statoru střídavý třífázový proud, vzniká točivé magnetické pole s otáčkami n_{s1} , které má stejnou rychlost otáčení jako rotor alternátoru. Skluz alternátoru je nulový, $s = 0$. Tedy rozdíl otáček rotoru a otáček točivého magnetického pole (následně frekvence indukovaného napětí) je nulový, $n = n_{s1}$. Proto se stroj nazývá synchronní. Frekvenci generovaného (indukovaného) napětí vypočítáme tedy podle vztahu (1.4):

$$f_1 = p \cdot \frac{n_{s1}}{60} \quad (1.4)$$

- **Princip motoru** – konstrukčně je motor obdobný, jako synchronní alternátor. Stator motoru je připojen k třífázovému střídavému napájecímu napětí. Proud statorem vytváří točivé magnetické pole, které se otáčí synchronní rychlostí. Rotor vytvářející magnetický tok je vtažen do točivého pole a otáčí se stejnými tedy synchronními otáčkami. Na obrázku 1.8 je vidět momentová charakteristika synchronního motoru. Velikost otáček motoru je konstantní až do maximálního momentu $M_{\max}$, kdy dojde k výpadku ze synchronismu a motor se zastaví.

Tento poruchový stav je doprovázený proudovými a momentovými rázy a tato událost může mechanicky poškodit synchronní motor.



Obr. 1.8. Momentová charakteristika dvoupólového synchronního motoru

□ Spouštění synchronního motoru

Nejpoužívanější způsoby rozběhu synchronního motoru:

- **Asynchronní rozběh** – kromě budicího vinutí je na rotoru umístěno ještě tlumící (rozběhové) klecové vinutí. Motor se tedy rozbíhá jako asynchronní motor nakrátko, po dobu rozběhu je budicí vinutí odpojeno. Jakmile motor dosáhne otáčky blízké synchronní, nabudí se a rotor se vtáhne do synchronismu.
- **Rozběh pomocným motorem** – pro rozběh se použije buď budič (stejnosměrný generátor), který je umístěn na hřídeli motoru, nebo rozběhový asynchronní motor, který se používá pro rozběhy strojů vysokých výkonů. Tento typ rozběhu se téměř nevyužívá.
- **Řízený rozběh** – motor je napájen z měniče kmitočtu umožňujícího plynulé zvyšování kmitočtu.

□ Řízení otáček synchronního motoru

Otáčky lze řídit plynule změnou kmitočtu napájecího napětí. Lze k tomu použít výkonové polovodičové měniče. Pro regulované pohony se synchronními motory se používají nepřímé měniče kmitočtu (obecně **frekvenční měniče**), nebo přímé měniče kmitočtu tzv. **cyklokonvertory**. U cyklokonvertorů je řízení otáček značně omezena a s nástupem cenově dostupných frekvenčních měničů se již nepoužívá. Možnost skokové změny synchronních otáček změnou počtu pólů se nevyužívá.

□ Speciální provedení synchronních motorů

Od základní konstrukce synchronního stroje jsou odvozeny dalších typy speciálních motorů:

- **Krokové motory** – speciální druh mnohapólového synchronního motoru. Konstrukce a řízení pohybu je přizpůsobeno krokovému režimu. Změnou polohy magnetického toku na statoru (která se uskutečňuje diskretně po krocích) působí na zubový (popř. drážkovaný) rotor, vzniká synchronizační (reluktanční) moment způsobující pootočení rotoru do nové rovnovážné polohy, ve které je minimální magnetický odpor (reluktance). Velikost kroku je dána počtem fází na statoru, počtem pólů a způsobem řízení (s plným krokem - symetrické; s polovičním krokem - nesymetrické). Vhodným postupným střídáním ve vedení proudu ve fázových vinutích na statoru dochází k nespojitému (přetržitému) pohybu rotoru – krokování. Úhel (dráha) pohybu je pak úměrná počtu impulzů (kroků), rychlost pohybu je pak úměrná kmitočtu řídicích impulzů. Změnou sledu spínání fází se mění i směr otáčení motoru. Krokové motory mohou mít pasivní rotor (má rotor z dynamoplechů, tzv. **reluktanční motor**), nebo s aktivním rotorem, kde jsou póly rotoru osazeny permanentními magnety. Základní podmínkou chodu krokového motoru je řídicí jednotka, která převádí digitální signál na analogový úhel natočení rotoru.
- **Střídavé synchronní servomotory** – mají ve statoru rozložené trojfázové vinutí a permanentní magnety na rotoru. Vinutí je navrženo pro sinusové průběhy proudu a napětí. Tenká vrstva magnetů ze vzácných zemin neodym/železo/bór je umístěna na povrchu rotorové hřídele, čímž je zaručen malý moment setrvačnosti motoru. Segmentové uspořádání magnetů na rotoru a zešíkmení drážek ve statoru snižuje momentové pulsace. Motory jsou standardně šestipólové, což je optimum pro vztah mezi úhlovou rychlostí a kmitočtem napájecího napětí.

□ Praktické aplikace synchronních strojů

Jak už bylo uvedeno, synchronní stroje se používají pro výrobu elektrické energie, ale mají nezastupitelné místo v oblasti malých regulačních pohonů.

Příklady použití synchronních generátorů (alternátorů):

- **Turboalternátory** – tyto alternátory se konstruují se synchronními otáčkami 3 000 ot./min., při kterých pracují nejehospodárněji. Vyrábí se ve výkonech od desítek kW až po jednotky GW. Podílí se na výrobě elektrické energie v tepelných, plynových, jaderných elektrárnách, používají se v kogeneračních jednotkách apod. Například v jaderné elektrárně Temelín jsou dva turboalternátory, každý o výkonu 981 MW a výstupním sdruženém napětím 24 000 V (2) (stroje velkých výkonů mají obecně vyšší provozní napětí v řádu jednotkách kV).
- **Hydroalternátory** – u těchto strojů se pohybují otáčky od 100 ot./min. do 1 500 ot./min. Používají se převážně ve vodních elektrárnách. Největší vodní elektrárna na světě Tři soutěsky má momentálně 26 hydroalternátorů, každý o výkonu 700 MW. Celá elektrárna tedy má výkon 18 200 MW (3).
- **Větrné elektrárny** – tyto alternátory jsou konstruovány s rotorem s permanentních magnetů. Jedna z největších v České republice je o výkonu 3 MW (4).

Příklady použití synchronních motorů:

- **Velké výkony** – synchronní motory s výkony řadově 1 – 1 000 MW, dříve používané hlavně pro aplikace s trvalým provozem. Dnes, se díky frekvenčním měničům nasazují i pro dynamické aplikace. Příkladem mohou být 4 synchronní motory, každý s výkonem 5,2 MW s rozsahem otáček 125-300 ot./min. a napájecím napětím 3 000V, v provozní jednotce válcovny VJ16 v závodu ArcelorMittal Ostrava.
- **Malé výkony** – tyto motory se vyrábějí řadově od 1 – 1 000 W, jsou to různé typy speciálních synchronních motorů, např. krokové motory, spínané reluktanční motory, servomotory apod. Tyto motory mají široké použití, jak ve výpočetní technice, bílé technice, ovládacích mechanismech, strojních systémech, tak v automobilovém, lodním a leteckém průmyslu. Tyto synchronní stroje můžeme najít například v hradiscích počítačů, pračkách, pojezdech

obráběcích strojů, ventilech armatur, centrálním zamykání aut, posilovačích (brzd, volantů, klapků letadel apod.), mechanismech ovládání dveří, žaluzií, vzduchotechnických klapků atd. (5, 6)



Další zdroje

- (1) <http://fei1.vsb.cz/kat420>
- (2) <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny.html>
- (3) http://cs.wikipedia.org/wiki/Tři_soutěsky
- (4) <http://www.ckdblansko.cz/vetrne-elektřarny-wind>
- (5) <http://www.regulacni-pohony.cz>
- (6) http://cs.wikipedia.org/wiki/Synchronní_stroj#Synchronn.C3.AD_stroj



Pojmy k zapamatování

Vyniklé póly	Hydroalternátor
Hladký rotor	Turboalternátor
Cyklokonvertor	Asynchronní rozběh
Servomotor	Řízený rozběh
Korkový motor	Synchronní otáčky



Otázky

- 1.8 Co je to turboalternátor?
- 1.9 Co je to hydroalternátor?
- 1.10 Co vyjadřuje počet pólů synchronního alternátoru?
- 1.11 Jak můžeme regulovat otáčky synchronního motoru?
- 1.12 Co vyjadřuje maximální moment?
- 1.13 Uveďte praktické příklady použití synchronních strojů?

2. ELEKTRICKÉ TEPLA - VZNIK TEPLA Z ELEKTRICKÉ ENERGIE, DRUHY A POPISY JEDNOTLIVÝCH ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ, UŽITÍ ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ V PRAXI

2.1. Vznik tepla z elektrické energie



Čas ke studiu: 25 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní veličiny a jednotky v oblasti tepelné techniky
- popsat průběh oteplování a ochlazování tělesa
- vyjmenovat nejpoužívanější elektrotepelná zařízení



Výklad

□ Teplo

Teplo je forma energie, která se navenek projevuje v makroskopickém měřítku jen teplotou tělesa, v němž je akumulována. Mezi tělesy s různými teplotami dochází ke sdílení (přenosu) tepla vždy z tělesa teplejšího na těleso chladnější. K přenosu tepla dochází vždy pomocí tří základních principů:

- vedením – tzn. kondukcí
- prouděním tzn. konvekcí
- sáláním – tzn. radiací (zářením)

Nutnou podmínkou pro sdílení tepla vedením nebo prouděním je existence hmotných částic ve sledovaném prostoru.

K přenosu sáláním dochází i ve vakuu a nositelem tepelné energie pak je elektromagnetické vlnění. Všechny ostatní způsoby přenosu tepla jsou kombinacemi těchto základních principů (1).

□ Základní veličiny a jednotky

Obecně teplo označujeme písmenem Q , tuto veličinu je možno chápat, jako akumulované teplo nebo množství tepla přijatého systémem. Jednotkou je joule. Přijaté množství tepla je dáno vztahem (2.1):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

kde m (kg) – hmotnost systému,

c ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) – měrná tepelná kapacita,

ΔT (K) – rozdíl počáteční a koncové teploty.

□ Oteplovací a ochlazovací křivka

Oteplování a ochlazování systému, případně tělesa není lineární, ale probíhá po exponenciální křivce. Oteplování systému je dáno následujícím vztahem (2.2):

$$\Delta T = \Delta T_{MAX} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.2)$$

Obdobně ochlazování systému probíhá podle následujícího vzorce (2.3):

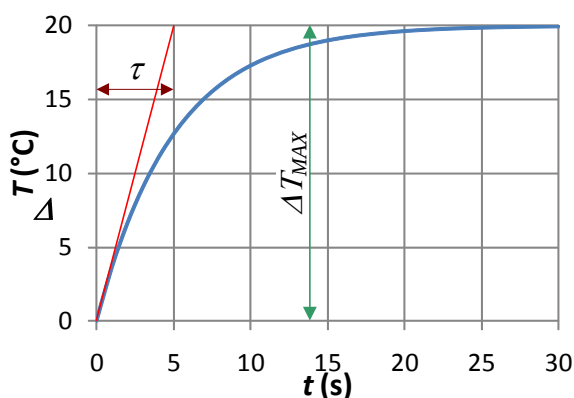
$$\Delta T = \Delta T_{MAX} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.3)$$

kde ΔT_{MAX} (K) – maximální teplota na kterou se systém může oteplít/ochladit,

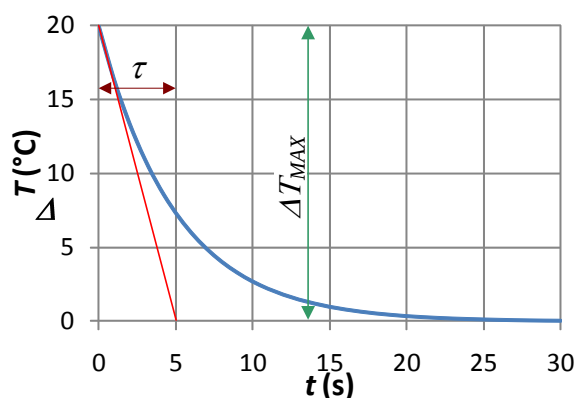
t (s) – čas, po který systém přijímá/ztrácí tepelnou energii,

τ (s⁻¹) – oteplovací/ochlazovací časová konstanta systému, je to čas, za který oteplení systému dosáhne hodnoty $0,633 \cdot \Delta T_{MAX}$, při ochlazování platí $(1-0,633) \cdot \Delta T_{MAX}$.

Na obrázku 2.1 je vidět průběh oteplování tělesa, obrázek 2.2 zobrazuje ochlazovací křivku.



Obr. 2.1 Oteplovací křivka



Obr. 2.2 Ochlazovací křivka



CD-ROM

Názorný popis oteplování a ochlazování zařízení je uveden v animaci „Oteplování a ochlazování točivých strojů.swf“.

V této kapitole si popíšeme jednotlivé možnosti a způsoby elektrického ohřevu. Budou zde popisovány následující typy elektrických ohřevů a příslušných elektrotepelných zařízení (2,3,4):

- Elektrické teplo odporové – odporová elektrotepelná zařízení,
- Elektrické teplo obloukové – oblouková elektrotepelná zařízení,
- Plazmový ohřev – plazmová elektrotepelná zařízení,
- Indukční ohřev – indukční elektrotepelná zařízení,
- Dielektrický ohřev
- Elektronový ohřev
- Ohřev pomocí laserů
- Ohřev pomocí infrazářičů a sálavých panelů



Další zdroje

- (1) <http://fei1.vsb.cz/kat420>
- (2) <http://www.aceso.cz/consarc/consarc>
- (3) <http://www.elsklo.cz/cs>
- (4) <http://www.zez.cz>
- (5) <http://csnonline.unmz.cz>
- (6) <http://www.powerwiki.cz/wiki/Teplo>
- (7) <http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplo>



Pojmy k zapamatování

Teplo	Ochlazovací křivka
Vedení – kondukce	Oteplovací křivka
Proudění – konvekce	Oteplovací časová konstanta
Sálání – radiace	Ochlazovací časová konstanta
Měrná tepelná kapacita	Elektrotepelné zařízení



Otázky

- 2.1. Jak vypočítáme akumulované teplo?
- 2.2. Jaké jsou základní principy přenosu tepla?
- 2.3. Co vyjadřuje oteplovací časová konstanta?
- 2.4. Jaké znáte typy elektrotepelných zařízení?

2.2. Elektrické teplo odporové – odporová elektrotepelná zařízení



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat teplo vznikající při elektrickém ohřevu
- popsat odporová elektrotepelná zařízení
- vyřešit jednoduchý předběžný návrh pece

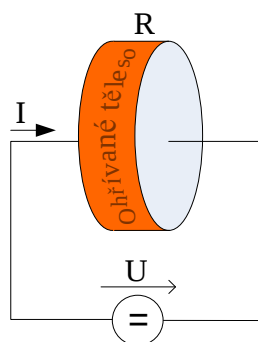


Výklad

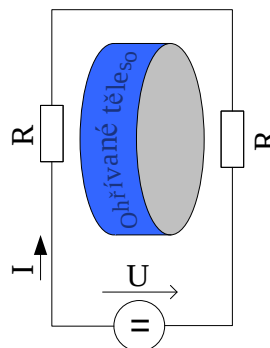
Elektrické teplo odporové vzniká přímou přeměnou elektrické energie na teplo pomocí odporu zapojeného v obvodu. Tento odpor může tvořit, buď samotné ohřívané těleso, nebo speciální odporové dráty určené pro ohřev.

Podle toho potom rozlišujeme dva základní způsoby elektrického ohřevu:

- Přímý odporový ohřev – obrázek 2.3,
- Nepřímý odporový ohřev – obrázek 2.4.



Obr. 2.3 Přímý odporový ohřev



Obr. 2.4 Nepřímý odporový ohřev

Normalizaci bezpečnostních požadavků pro odporová elektrotepelná zařízení popisují normy ČSN EN 60519-2 ed.2 – Bezpečnost u elektrotepelných zařízení - Část 2: Zvláštní požadavky pro odporová elektrotepelná zařízení, ČSN EN 60519-21 ed.2 – Bezpečnost u elektrotepelných zařízení - Část 21: Zvláštní požadavky na odporová zařízení - Zařízení pro ohřev a tavení skla, ČSN EN 60519-10 – bezpečnost u elektrotepelných zařízení - Část 10: Zvláštní požadavky na elektrické odporové pásové ohřívací systémy pro průmyslové a komerční použití.

U zařízení pro přímý odporový ohřev vzniká teplo přímým průchodem proudu elektrický vodivou pevnou látkou nebo elektricky vodivou kapalinou. Teplo vznikající při přímém ohřevu je dáno Joulovým zákonem (2.4). Platí tedy vztah:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t \quad (2.4)$$

kde P (W) – výkon na uvažovaném odporovém tělese, který závisí na odporu tělesa R (Ω) a velikosti procházejícího proudu I (A)
 t (s) – doba působení elektrického proudu

Odpor tělesa se následně vypočítá podle vztahu (2.5):

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (2.5)$$

kde ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) – rezistivita, měrný elektrický odpor materiálu,
 l (m) – délka uvažovaného tělesa,
 S (m^2) – průřez uvažovaného tělesa.

V tomto případě je třeba brát v úvahu, že odpor tělesa není konstantní, ale mění se se změnou teploty. Při ohřevu na vysoké teploty je tato změna podstatná. Závislost změny odporu na oteplení je následující (2.6):

$$R_T = R_{20^\circ\text{C}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (2.6)$$

kde $R_{20^\circ\text{C}}$ (Ω) – odpor materiálu při 20°C ,
 α (K^{-1}) – teplotní součinitel elektrického odporu,
 ΔT (K) – rozdíl teplot.

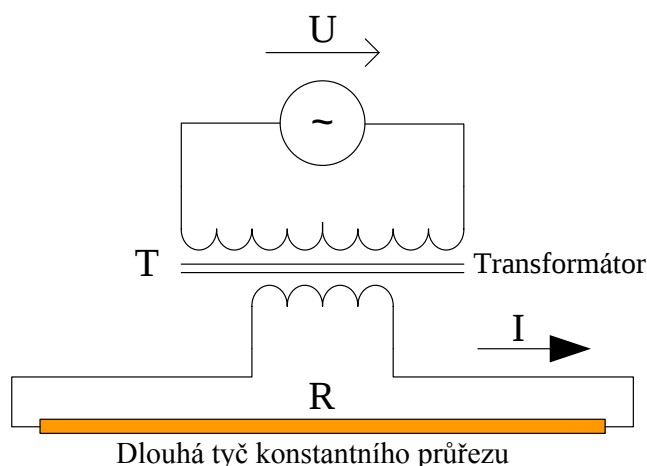
Projektování a konstrukce těchto zařízení nejsou zcela jednoduché. Projevují se zde obtíže související s nelinearitou jednotlivých fyzikálních veličin, zejména měrné tepelné kapacity, součinitele tepelné vodivosti a v neposlední řadě již zmiňované nelinearity rezistivity (měrný elektrický odpor).

Nejpoužívanější materiály pro výrobu topných rezistorů používaných pro nepřímý odporový ohřev:

- do 350°C – slitiny Cu-Ni (nikelin, konstantan)
- do 800°C – chromová litina, křemíková litina
- do 1350°C – slitina: Fe-Cr-Mn (kanthal), Fe-Cr-Al, (chromal), Fe-Cr-Co
- nad 1350°C – kovy: Pt, Mo, W

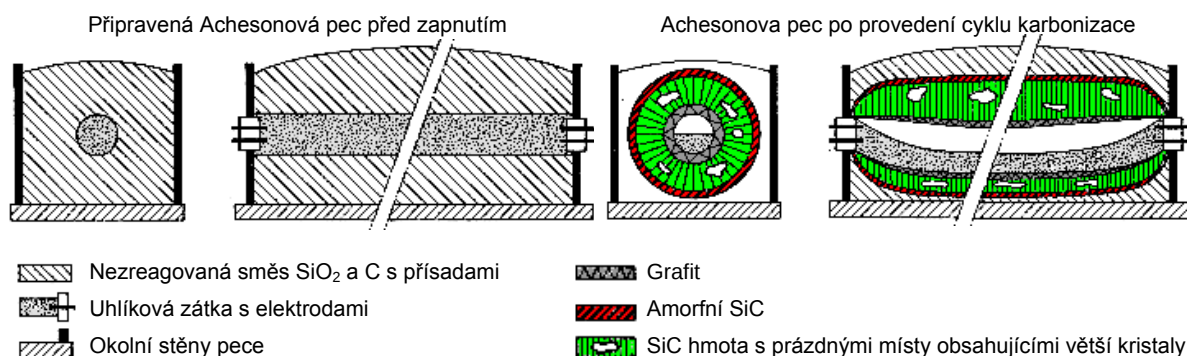
□ Praktické příklady odporových elektrotepelných zařízení využívajících přímý ohřev

- Ohřev dlouhých drátů, tyčí, pásů apod. (2.5)



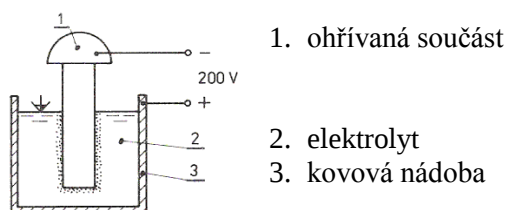
Obr. 2.5 Přímý odporový ohřev dlouhých tyčí.

- Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku – Achesonova pec
 Karbid křemíku známý též pod obchodním označením karborundum (SiC) se vyrábí reakcí uhlíku s křemíkem, nebo oxidem křemičitým tzv. grafitací – chemický proces probíhající při teplotě kolem 2500°C , při němž se amorfni uhlík strukturálně mění v karbid křemíku s vynikajícími fyzikálními, chemickými i mechanickými vlastnostmi (2.6).



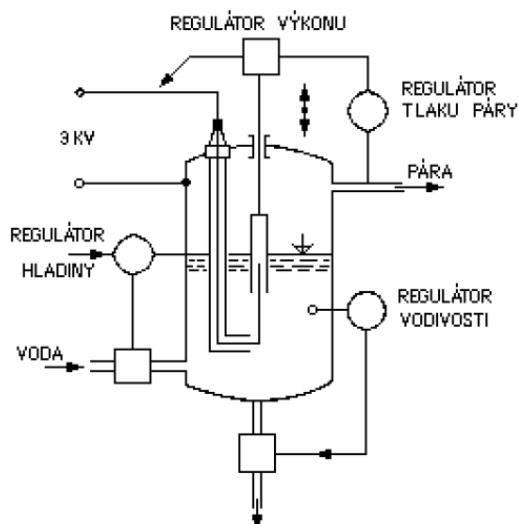
Obr. 2.6 Řez Achesonovou pecí

- Elektrolyzéry - termická elektrolýza**
 Elektrolyt se zahřívá přímým průchodem stejnosměrného proudu za současně probíhající elektrolýzy nebo rafinace. Nejrozšířenější termickou elektrolýzou je elektrolýtická výroba hliníku, používá se také k výrobě sodíku a hořčíku. Hliník se vyrábí z bauxitu (Al_2O_3), který má tavicí teplotu asi 2050°C . Rozpuštěním bauxitu v roztaveném kryolitu lze získat elektrolýzou hliník již při teplotě 950°C . Elektrolýtický vylučovaný hliník se v tekutém stavu usazuje na katodě, tedy na dně nádoby. Jeho hmotnost závisí na konstantní hustotě proudu, který se řídí pomocí regulace napájecího napětí, jehož velikost pro jeden elektrolýzér je asi 5V. Elektrolýzéry se proto zapojují do série a připojují se k polovodičovému usměrňovači. Proud je závislý na velikosti vany a pohybuje se v rozmezí $10 \div 100 \text{ kA}$. Na výrobu 1 kg hliníku se spotřebovává dle velikosti a technického stavu zařízení $16 \div 22 \text{ kWh}$.
- Elektrodové solné lázně**
 Solné lázně se používají zejména k ohřevu ocelových součástí ke kalení, např. kuliček nebo kroužků do kuličkových ložisek. Používají se i pro tepelné zpracování barevných kovů nebo slitin při teplotách až 1200°C .
- Katodový ohřev**
 Katodový ohřev je vhodný pro ohřev součástí a polotovarů určených pro kalení nebo tváření (2.7).



Obr. 2.7 Katodový ohřev

- Elektrodový ohřev vody**
 Pro přípravu horké vody a výrobu páry se využívá tepla vzniklého přímým průchodem proudu ohřevanou vodou (2.8). Proud se přivádí grafitovými elektrodami (pro malé příkony) nebo kovovými elektrodami (pro příkony velké). Na obrázku 2.9 je zobrazen parní generátor s elektrodovým systémem výroby páry

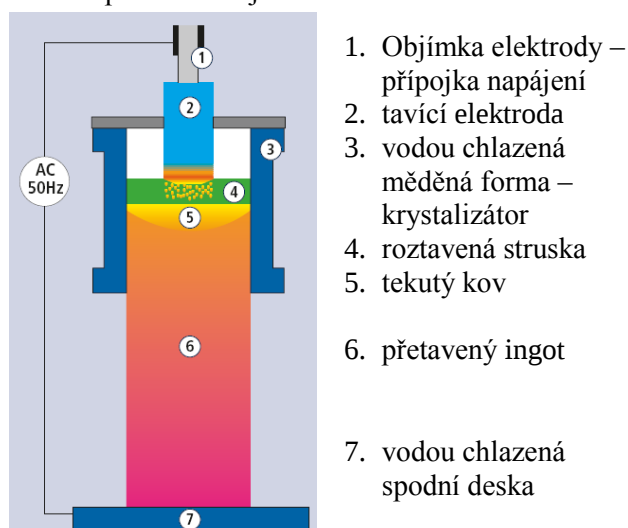


Obr. 2.8 Jednofázový elektroodový kotel



Obr. 2.9 Parní generátor

- Elektrické odporové svařování
 - na tupo (stykové) - svařované dílce jsou přitlačovány ve styčných plochách a svařují se po celé styčné ploše
 - bodové - spoje se vytvářejí v podobě svarových čóček mezi přepřátovanými dílci
 - švové - spoj se vytváří kotoučovými elektrodami ve tvaru souvislého sváru většinou mezi přepřátovanými dílci
 - bradavkové - spoje se vytvářejí na místech styku přirozených nebo záměrně vytvořených výstupků
- Elektrostruskové přetavování oceli – je možno použít pro přetavování v inertních plynech, přetavování v suchém vzduchu, přetavování ingotů na válcování plošek apod. Používaná bezpečnostní norma ČSN EN 60519-8 - Bezpečnost u elektrotepelných zařízení - Část 8: Zvláštní požadavky na elektrostruskové přetavovací pece. Princip elektrostruskového přetavování je vidět na obrázku 2.10.



Obr. 2.10 Elektrostruskové tavení oceli



Obr. 2.11 Elektrostruskové zařízení

□ Rozdělení odporových elektrotepelných zařízení pracujících s nepřímým ohřevem

V zařízeních s nepřímým odporovým ohřevem vzniká teplo v topných člancích umístěných přímo v pecním prostoru. Do vsázky se pak teplo přenáší převážně sáláním topných článků a vyzdívky, prouděním atmosféry v pecním prostoru, případě i vedením.

Požadavky kladené na topné články:

- odolnost proti žáru při pracovní teplotě,
- velká mechanická pevnost,
- odolnost proti vlivům atmosfér,
- velká rezistivita (měrný elektrický odpor) – možnost připojení větších průřezů topných článků a možnost přímého připojení k napájecí síti,
- stálost rezistivity během životnosti,
- malý teplotní součinitel odporu a malá teplotní roztažnost.

V zásadě tyto požadavky splňují použité materiály, které lze rozdělit do dvou skupin:

- materiály kovové (slitiny Ni, Cr, Fe, Al, čisté kovy, ocel atd.),
- materiály nekovové (karbid křemíku, cermet, uhlík, grafit).

Elektrická odporová zařízení s nepřímým ohřevem, tzv. odporové pece, je možné dělit podle několika hledisek.

1. Podle teploty na pece:

- nízkoteplotní do 600 °C,
- středoteplotní od 600 °C do 1100 °C,
- vysokoteplotní nad 1100 °C.

2. Podle atmosféry v pecním prostoru na pece:

- s normální atmosférou (vzduch),
- s řízenou atmosférou (např. pro nauhličování, nitridaci, pro zamezení oxidace),
- pracující s vakuem – vakuové pece.

3. Podle použití v provozu na pece:

- pro tepelné zpracování kovů,
- pro tavení kovů,
- pro tavení skla,
- pro chlazení skla,
- pro laboratoře, pro domácnosti,
- s infračerveným ohřevem atd.

4. Podle toho, zda se vsázka při ohřevu nepohybuje nebo se pohybuje, na pece:

- se stabilní vsázkou (1000 ÷ 1400) °C – nepohybující se vsázkou, s provozem přerušovaným,
 - Komorové pece
 - Vozové (vozíkové) pece
 - Šachtové (hlubinné) pece
 - Poklopy (zvonové) pece
 - Elevátorové pece
 - Kelímkové pece tavící a tavící vany
- se vsázkou procházející pecí (900 ÷ 1000) °C – pece průběžné, s pohyblivým dnem, s provozem nepřerušovaným.
 - Pásové pece
 - Válečkové pece
 - Narážecí pece
 - Střásací pece
 - Krokové pece
 - Protahovací pece

- Bubnové pece
- Karuselové (rotační) pece

Pro výrobu kusovou nebo malosériovou zvolíme pece se stabilní vsázkou, pro výrobu hromadnou jsou výhodnější pece průběžné popř. průběžné pecní linky.

□ Praktické příklady odporových elektrotepelných zařízení pracujících s nepřímým ohřevem

- **Komorová pec** – pece se používají zejména v keramickém a sklářském průmyslu pro výpal dekorativní i průmyslové keramiky, tepelné zpracování skla a výpal dekorací ve větším množství. Obrázek komorové pece je znázorněn na obrázku 2.12 (6).
- **Kelímková pec** – tavící a udržovací pec na hliník a jeho slitiny, maximální teplota v komoře pece 1100°C. Kelímkovou pec ukazuje obrázek 2.13 (3).

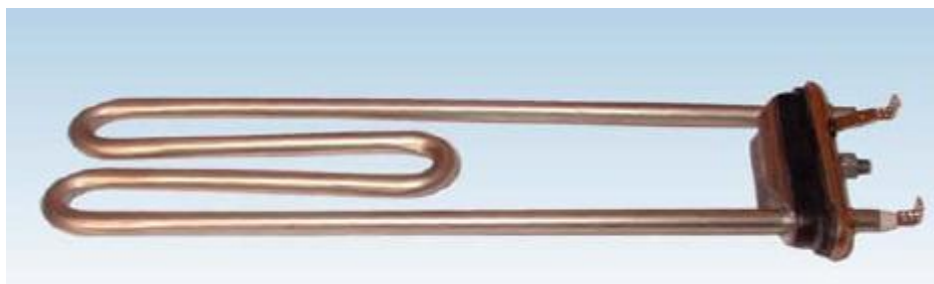


Obr. 2.12 Komorová pec



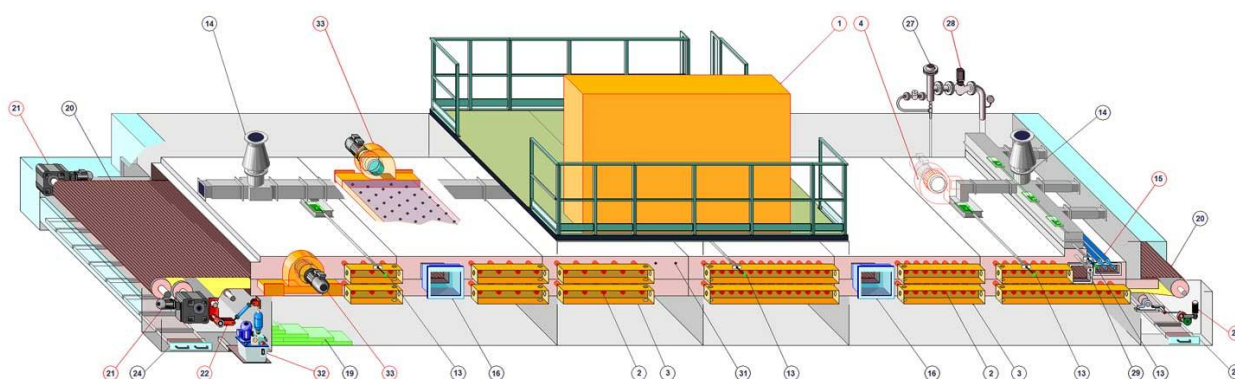
Obr. 2.13 Kelímková pec

- **Elektrická spirála** – tyto spirály jsou určeny zejména pro ohřev vody, například v bojleru, rychlovarné konvici apod. Příklad je uveden na obrázku 2.14.



Obr. 2.14 Elektrická spirála pro ohřev vody

- **Pásová pekařská pec** – výhoda elektrických pecí je, že zařízení spolu s elektronickým řízením a digitálním nastavením času a teploty umožňuje naprogramovat technologie pečení při pokaždé stejných podmínkách, příklad pásové pekařské pece je uveden na obrázku 2.15 (4).



Obr. 2.15 Pásová pekařská pec

1: hlavní elektrorozvaděč pece, 2: topná tělesa, 3: skříň elektrického propojení topných těles, 4: Motor, 13: hradítko regulace odtahu přebytečných par z pečné komory, 14: odtah par, 15: dvojité nerezové parní trubky se 100% odloučením kondenzátu, 16: nahlížecké okénko, 19: tepelná izolace, 20: síťový dopravní pás, 21: převodovka pohonu pásu, 22: hydraulické napínání pásu 23: stranová regulace pásu, 24: výsuvné lapače nečistot, 27: přívod páry z parního vyvíječe, 28: uzavírací ventil přívodu páry, 29: regulace stavitelné teflonové zástěny, 31: snímání teploty v pečné komoře, 32: hydraulický agregát, 33: ventilátor duothermu (turbulence).

- **Pekařská rotační pec** – nucený oběh horkého vzduchu přináší úspory elektrické energie a času.



Obr. 2.16 Rotační pekařská pec (5)

□ Závěrem

Obecně se odporové pece se používají k:

- sušení vinutí elektrických strojů a celých elektrických strojů – přibližně do teplot 250°C,
- tepelnému zpracování kovů, např. žíhání, kalení, popouštění – přibližně do teplot 1050°C,
- tavení kovů s nižším bodem tání,
- smaltování,
- sterilizace ve zdravotnictví.

Praktické ukazatele pro správný návrh a stanovení druhu odporové pece:

- technologické požadavky investora,
- druh a velikost vsázky,
- hmotnost vsázky ke zpracování za jednotku času,
- průběh teplotního režimu (maximální teplota, rychlost ohřevu, konečná teplota, doba výdrže na určité teplotě, rychlost ochlazování apod.),

- rovnoměrnost a přesnost dodržení teploty,
- druh atmosféry v peci (přírozená, umělá),
- druh provozu (přetržitý, nepřetržitý),
- prostorové nároky,
- přepokládaná cena díla.



Příklad 1.2.

Vlastní postup návrhu pece:

1. předběžný výpočet a určení hlavních parametrů,
2. konstrukční návrh doprovázený podrobnějšími výpočty.

Celkový příkon pece lze určit podle vztahu (2.7):

$$P_p = k_b \cdot (P_U + P_Z) \quad (2.7)$$

kde k_b (-) – bezpečnostní činitel, který může nabývat hodnot 1,2 – 1,7,
 P_U (W) – užitečný výkon pece (2.8),
 P_Z (W) – ztrátový výkon pece (2.11).

Užitečný výkon pece lze určit z následujících parametrů (2.8):

$$P_U = \frac{Q_U}{t_O} = \frac{m \cdot c_{AV} \cdot (T_{V2} - T_{V1})}{t_O} \quad (2.8)$$

kde m (kg) – hmotnost vsázky,
 c_{AV} ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) – střední měrná tepelná kapacita vsázky,
 T_{V2} (K) – konečná, neboli výstupní teplota vsázky,
 T_{V1} (K) – počáteční, neboli vstupní teplota vsázky,
 t_O (s) – doba ohřevu vsázky (2.10).

V případě neznalosti doby ohřevu je nutno tuto vypočítat (2.10), předtím musíme zavést více zjednodušujících předpokladů:

Při výpočtu předpokládáme přenos tepla sáláním a prouděním, přenos tepla vedením zanedbáváme (2.9).

$$P_U = \alpha \cdot S \cdot (T_p - T_{V1}) = (\alpha_k + \alpha_s) \cdot S \cdot (T_p - T_{V1}) \quad (2.9)$$

kde α ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) – součinitel přestupu tepla (s – sáláním, k – konvekci),
 S (m^2) – plocha povrchu přenosu výkonu,
 T_p (K) – teplota pece,
 T_{V1} (K) – počáteční teplota vsázky.

Střední hodnota součinitele přestupu tepla konvekci je u pece bez nuceného oběhu atmosféry přibližně $15 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Povrch, kterým vsázka přijímá teplo S je závislý na umístění článků v peci a stínění a tvoří jen část celkového povrchu vsázky.

Pro přesný výpočet je zapotřebí znalost časového průběhu teploty v peci a určit časový průběh teploty vsázky.

Pro orientační výpočet zavádíme následující zjednodušující předpoklady:

- V peci je po celou dobu ohřevu vsázky konstantní teplota ($T_p = \text{konstantní}$),
- Teplota vsázky roste dle parabolické závislosti $t \approx T_v^2$,
- Teplotní součinitel α je konstantní po celou dobu ohřevu.

Po těchto zjednodušeních a zavedením uvedených předpokladů lze dobu ohřevu určit dle vztahu (2.10):

$$t_O = \frac{3 \cdot m \cdot c_{AV} \cdot (T_{V2} - T_{V1})}{\alpha \cdot S \cdot (T_p - T_{V1})} \quad (2.10)$$

kde veškeré veličiny tohoto vztahu jsou popsány výše.

Z takto určené doby ohřevu a znalosti potřebných tepelných energií lze určit potřebný elektrický výkon nutný k ohřevu pece.

Ztrátový výkon pece je dán těmito dílčími ztrátovými výkony (2.11):

$$P_Z = P_{Z0} + P_{ZV} \quad (2.11)$$

Kde P_{Z0} (W) – ztrátový výkon naprázdno, neboli nezávislý na chodu pece – je dán ztrátami stěnami, netěsnostmi, na vstupu a výstupu pece

P_{ZV} (W) – ztráty závislé na chodu pece – otevírání a zavírání dveří, vynášení tepla dopravními mechanismy, ohřev muflí, palet, podložek apod.



Další zdroje

- (1) <http://fei1.vsb.cz/kat420>
- (2) <http://www.aceso.cz/consarc/consarc>
- (3) <http://www.lac.cz/www/cz>
- (4) <http://www.j4.eu/html/default.htm>
- (5) <http://www.kornfeil.cz>
- (6) <http://www.elsklo.cz/cs>
- (7) <http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplota>



Pojmy k zapamatování

Přímý odporový ohřev	Odporové svařování
Nepřímý odporový ohřev	Elektrodový ohřev
Měrný elektrický odpor materiálu	Elektrostruskové přetavování
Teplotní součinitel elektrického odporu	Užitečný výkon pece
Achesonova pec	Ztrátový výkon pece
Elektrolýza	Celkový výkon pece



Otázky

- 2.5. Uveďte příklady přímého odporového ohřevu?
- 2.6. Uveďte příklady nepřímého odporového ohřevu?
- 2.7. Na jakých parametrech je závislý elektrický odpor materiálu?
- 2.8. Jak se mění elektrický odpor s teplotou?
- 2.9. Vyjmenujte hlavní praktické ukazatele pro správný návrh odporové pece?

2.3. Elektrické teplo obloukové – oblouková elektrotepelná zařízení



Čas ke studiu: 25 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat elektrický oblouk
- popsat oblouková elektrotepelná zařízení
- popsat princip plazmového ohřevu



Výklad

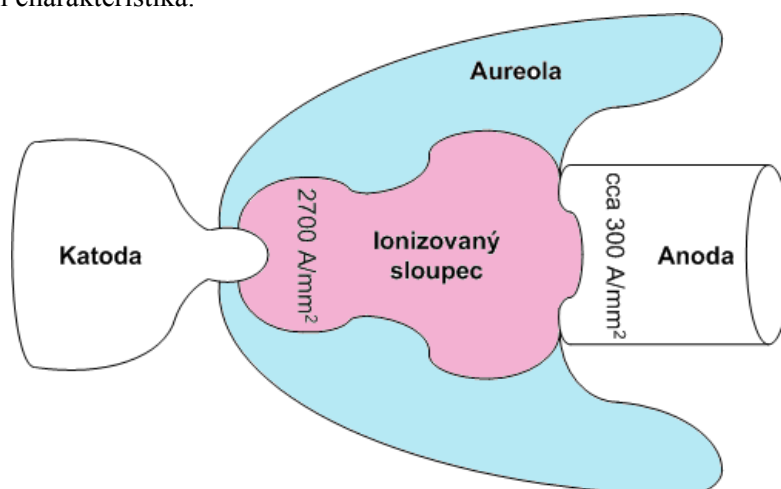
□ Elektrický oblouk

Vznik elektrického oblouku lze vysvětlit na jednoduchém případě elektrického obvodu napájeného stejnosměrným zdrojem napětí U , obsahující regulační odpor R a proměnlivý odpor oblouku R_p . Oblouk vzniká mezi dvěma elektrodami. Přiblížíme-li obě elektrody ke vzájemnému dotyku, začne obvodem protékat proud I , daný veličinami obvodu U a R . Opatrným oddálením elektrod dochází ke vzniku elektrického oblouku, který hoří v parách materiálů elektrod a v částicích vzduchu.

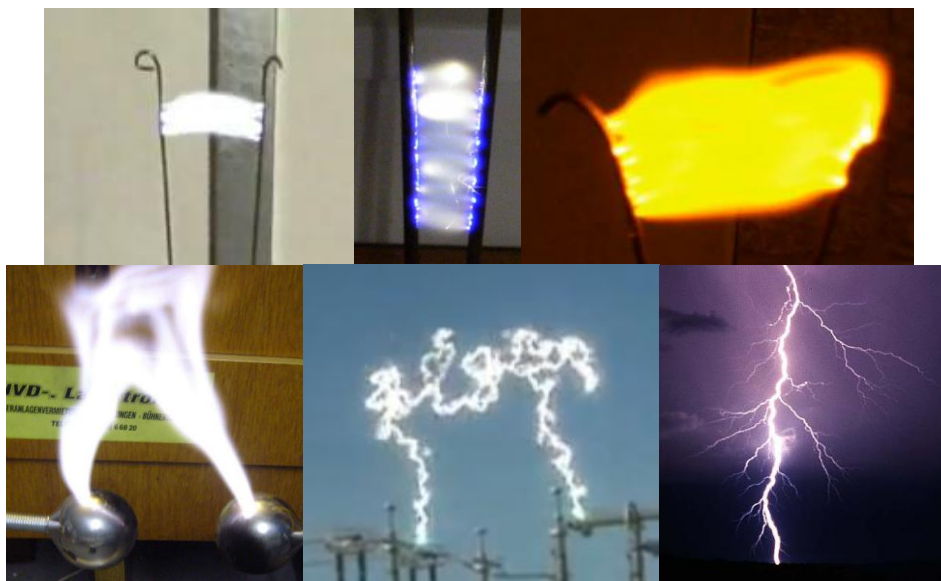
Obloukový výboj je složen z ionizovaného sloupce, kterým protéká proud a okolních plynů tzv. aureoly, nebo také někdy nazývané koróna. Délka výboje je dána vzdáleností obou elektrod, tedy anody a katody. Při delším hoření oblouku dochází k tvarování katody do kužele a u anody dochází v její střední části k prohloubení neboli úbytku materiálu (2.17).

Základní vlastnosti elektrického oblouku:

- elektrická vodivost (10^8 A/m²),
- vysoká teplota (10^4 - 10^5 K),
- intenzivní záření,
- nelineární charakteristika.



Obr. 2.17 Elektrický oblouk



Obr. 2.18 Fotografie elektrických oblouků

□ Typy elektrických obloukových pecí

Normalizaci bezpečnostních požadavků pro oblouková elektrotepelná zařízení popisuje norma ČSN EN 60519-4 ed. 2 – Bezpečnost u elektrotepelných zařízení - Část 4: Zvláštní požadavky na obloukové pece.

Rozdělení elektrických obloukových pecí podle hoření oblouku:

- Pece s přímým obloukem
Zde oblouk hoří mezi elektrodou a vsázkou, někdy se tyto pece nazývají pece se závislým obloukem. Tyto pece se používají především k výrobě oceli a litin.
- Pece s nepřímým obloukem
Oblouk hoří mezi dvěma elektrodami a teplo se do vsázky dostává výlučně sáláním, proto se tyto pece nazývají pece se sálavým obloukem. Oblouk hořící nezávisle na vsázce se nazývá nezávislý oblouk. Pece se používají k výrobě litiny, bronzu, mědi, feroslitin, karbidů a některých legovaných ocelí.
- Pece se zakrytým obloukem – obrázek 2.19
Zde oblouk opět hoří mezi elektrodami a vsázkou, ale elektrody jsou ponořeny do roztavené strusky a obsypány zavážkou rud a příměsí, oblouk je tedy zcela zakryt.

Elektrody tvoří důležitou část zařízení ovlivňující provozní náklady. K obloukovému ohřevu se používají tři druhy elektrod:

- uhlíkové,
- grafitové,
- násypné – určené pro velké průměry elektrod

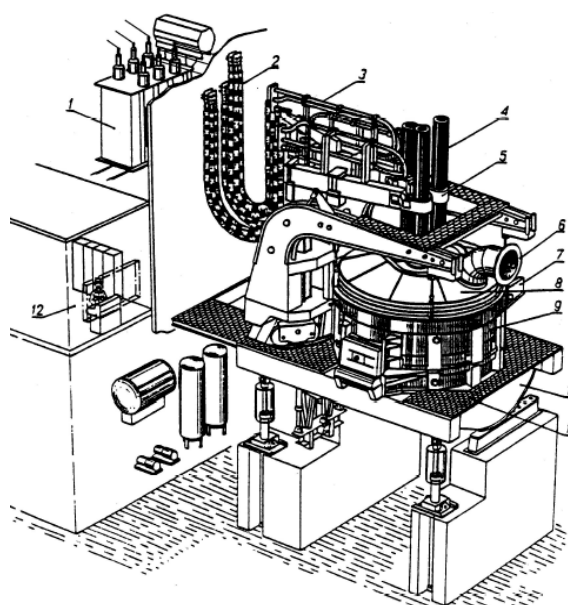
Další důležitou částí elektrického zařízení pece je automatické řízení polohy elektrod v závislosti na poměru napětí a proudu, který je udržován konstantní. Podle druhu pohonu lze tyto systémy rozdělit na elektromechanické a elektrohydraulické.

Z hlediska energetiky se jedná o spotřebič velkého proměnlivého činného i jalového výkonu, který má negativní rušivé účinky na napájecí síť. Děje, které probíhají při hoření oblouku a které určují velikost a rychlost změn proudu, jsou náhodné, velmi rychlé a ve třech fázích nesymetrické. Proto se připojuje odděleně přes tlumivku a napájecí transformátor k síti vysokého napětí. Tím se částečně eliminují

důsledky velkých proudových špiček a nepravidelného kolísání proudu mající za následek kolísání napětí v místě připojení k síti. K eliminaci negativních rušivých jevů se používá filtračně-kompenzační zařízení.

V souladu s předpisy je požadován určitý minimální poměr zkratového výkonu v místě připojení k výkonu pecního transformátoru.

Příznivější energetické poměry jsou u pecí na stejnosměrný proud, kde je mezi transformátor a pec vřazen polovodičový usměrňovač. Mezi výhody tohoto provedení dále patří snížená spotřeba elektrod, nižší hlučnost a snížení rušivých vlivů na napájecí síť.



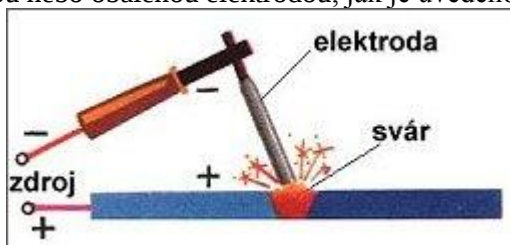
- 1 – pecní transformátor,
- 2 – ohebná část krátké cesty (kabely jsou chlazené),
- 3 – pevná část krátké cesty,
- 4 – elektrody,
- 5 – uchycení elektrod,
- 6 – odsávač plynu a prachu,
- 7 – odpichový žlab,
- 8 – víko pece,
- 9 – kotel (vana) pece,
- 10 – kolébka,
- 11 – plošina,
- 12 – řídicí stanoviště

Obr. 2.19 Oblouková pec

□ Elektrické svařování

Svařování je z hlediska strojírenské technologie spojování kovových materiálů stejného nebo přibližně stejného materiálu v nedělitelný celek. Kovy lze svařovat teplem elektrického oblouku nebo Jouleovým teplem při odporovém svařování. Obecně se tomuto svařování říká svařování tavné elektrickým obloukem, které se dále dělí na:

- Ruční svařování holou nebo obalenou elektrodou, jak je uvedeno na obrázku 2.20.



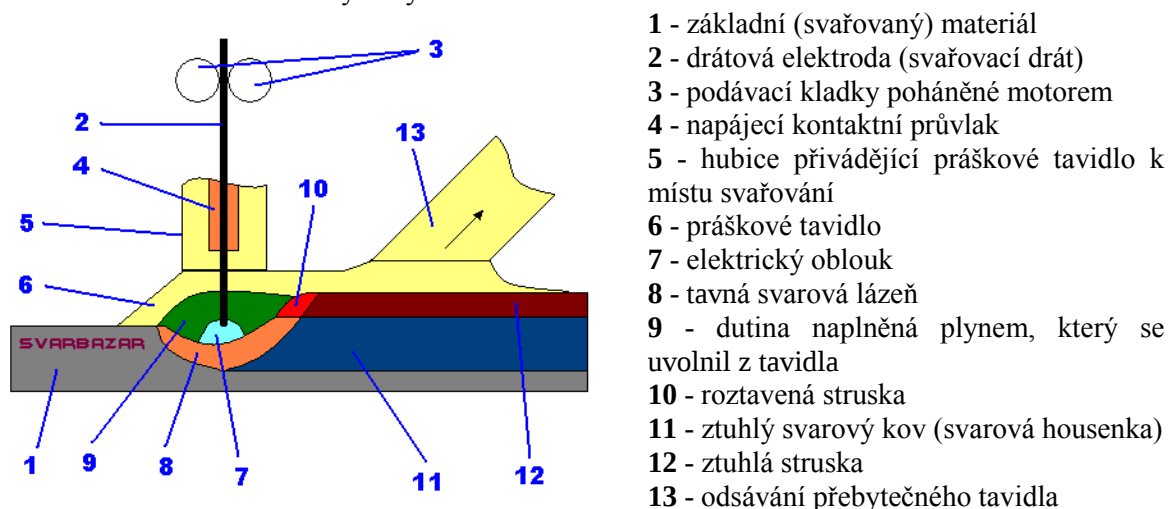
Obr. 2.20 Elektrické obloukové svařování

- Elektrostruskové svařování - je tavné svařování, při kterém lázeň roztavené strusky postupuje svisle zdola nahoru mezi čelními svarovými plochami a deskovými, vodou chlazenými příložkami. Potřebná energie se získává jako odporové (Jouleův efekt) průchodem svařovacího proudu roztavenou stoupající struskou a také jednou nebo více elektrodami.
- Svařování v ochranné atmosféře – rozlišujeme svařování kovů v ochranné atmosféře inertního plynu, tzv. MIG (Metall Inert Gas) nebo aktivního plynu, tzv. MAG (Metall Active Gas)

plynu. Pro MIG používáme argon, případně argon+helium, pro MAG klasické CO₂, případně směs Argonu a CO₂.

- Svařování pod tavidlem (2) - v zahraničí označované jako svařování SAW (Submerged Arc Welding), je ve své podstatě svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou. Elektrický oblouk hoří mezi základním svařovaným materiálem a odtavující se elektrodou. Elektroda je ve formě drátu navinutého na cívce a za pomoci elektromotorem poháněných kladek je posouvána do hořícího oblouku. Jistě jste si všimli, že až potud se princip neliší od běžného svařování v ochranné atmosféře.

Zásadní rozdíl je ale v ochraně svarové lázně před oxidací, tedy před přístupem vzduchu. Zatímco u svařování v ochranné atmosféře je ochrana zajištěna ochranným plynem, u svařování pod tavidlem zajišťuje ochranu práškové tavidlo (2.21). Svarová lázeň je během svařování neustále zasypávána vrstvou tavidla a pod touto vrstvou dokonce hoří i elektrický oblouk. Oblouk tedy vůbec není viditelný, je schován pod vrstvou tavidla a z toho pramení minimální emise škodlivých dýmů a záření.



Obr. 2.21 Svařování pod tavidlem

2.3.1 Plazmový ohřev – plazmová elektrotepelná zařízení

Využívá se zde nízkoteplotního plazmatu o teplotě v rozmezí (10000÷ 14000) °C vytvořeného v plazmovém hořáku. Tyto hořáky využívají elektrického oblouku koncentrovaného tryskou s aerodynamickým spoluúčinkem plazmatvorného plynu (argon) a formováním sloupce plazmatu induktorem.

Použití plazmových hořáků je pro svařování a řezání kovů, ke stříkání vysocetavitelných materiálů a ve speciální plazmové metalurgii (plazmové pece). Mezi hlavní výhody patří nižší provozní náklady a vyšší kvalita taveného produktu.



Další zdroje

- (1) <http://fei1.vsb.cz/kat420>
- (2) <http://www.svarbazar.cz/phprs/index.php>
- (3) http://cs.wikipedia.org/wiki/Fyzika_plazmatu
- (4) <http://www.aceso.cz/consarc/consarc>
- (5) <http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplo>



Pojmy k zapamatování

Elektrický oblouk
Oblouková elektrotepelná zařízení
Elektrické svařování

Svařování v ochranné atmosféře
Svařování pod tavidlem
Plazmová elektrotepelná zařízení



Otázky

- 2.10. Jak definujeme elektrický oblouk?
- 2.11. Jaké má elektrický oblouk vlastnosti?
- 2.12. Jaké znáte praktické příklady elektrotepelných zařízení obloukových?
- 2.13. Jaké přednosti má plazmový ohřev?

2.4. Indukční ohřev – indukční elektrotepelná zařízení



Čas ke studiu: 50 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat principy indukčního ohřevu
- popsat indukční elektrotepelná zařízení
- specifikovat použití indukčního ohřevu v praxi



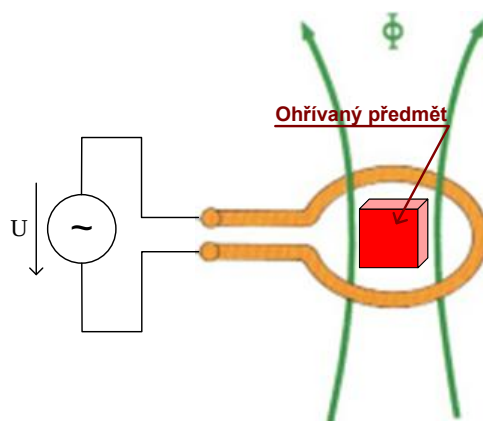
Výklad

□ Princip indukčního ohřevu

Vložením kovového (elektricky vodivého) předmětu do střídavého magnetického pole dochází v tomto předmětu k indukování proudů, které jsou v důsledku působení střídavého magnetického pole, tzv. skinefektů vytlačovány na povrch (2). Tím zde dochází ke zhušťování proudových siločar, tedy vzniku tzv. vířivých proudů a k vývinu Joulova tepla.

Normalizaci bezpečnostních požadavků pro indukční elektrotepelná zařízení popisuje norma ČSN EN 60519-3 ed.2 – Bezpečnost u elektrotepelných zařízení - Část 3: Zvláštní požadavky na instalace pro indukční a kondukční ohřev a pro indukční tavení.

Na obrázku 2.22 je vidět cívka, neboli induktor, který vytváří elektromagnetické střídavé pole. Uvnitř je feromagnetický předmět, který je zahříván střídavým magnetickým polem. V tomto předmětu se indukuje elektrické napětí, které následně způsobí tok elektrického proudu. Tento proud způsobuje vývin tepla a tím ohřívá předmět.



Obr. 2.22 Základní princip vzniku magnetického toku

Indukční ohřev je možný jen u materiálů elektricky vodivých. V předmětu z vodivého materiálu, který je vložen do střídavého magnetického pole se indukují vířivé proudy, které předmět zahřívají.

Často se zjednodušeně přirovnává indukční ohřev k transformátoru, kde výstupní vinutí představuje vsázka a je spojeno nakrátko. Primární obvod tvoří ohřívací cívka induktoru, sekundární obvod tvoří vsázka, nebo soustava vsázek. Vsázka je buď v dutině ohřívací cívky (induktoru) nebo v její blízkosti a má s ní vzájemnou indukčnost, jak je vidět na obrázku 2.22.

□ Výhody indukčního ohřevu

Doprava tepla do vsázky se tedy neděje tepelným spádem jako například u zařízení odporových s nepřímým ohřevem. Teplo se dopravuje střídavým magnetickým polem a vzniká přímo ve vsázce. Vsázka je nejteplejším objektem celé soustavy, přičemž vše ostatní může být chladné. Příklad indukčního ohřevu je na obrázku 2.23.

Vznik tepla přímo ve vsázce, která není mechanicky s ničím vázána, patří k největším výhodám indukčního ohřevu.

Co se týče účinnosti, je indukční ohřev v porovnání s průběžnou plynovou, nebo odporovou pecí energeticky řádově úspornější. Například 100kW průběžnou pec sloužící k ohřevu ocelových součástí lze nahradit vysokofrekvenčním generátorem o výkonu 25kW, jež lokálně zahřeje daný polotovár za dobu v řádech jednotek sekund pouze proto, že energie potřebná k ohřevu směřuje přímo do požadovaného místa (4).

Výhody použití vysokofrekvenčních a středofrekvenčních generátorů pro indukční ohřev s frekvenčními měniči s tranzistory MOSFET a IGBT:

- vysoká účinnost až 90%,
- velmi dlouhá životnost díky použití tranzistorů,
- zhruba poloviční až třetinová zastavěná plocha,
- malá spotřeba chladicí vody,
- okamžitý náběh do plného výkonu,
- až 1000x lacinější opravitelnost v případě havárie,
- trvalá stálost provozních parametrů – zajištění opakovanosti výroby.

Galvanické oddělení vysokofrekvenčního generátoru od napájecí sítě je nezbytné především z hlediska potlačení proudů při zemních zkratech mezi induktorem a neživými kovovými částmi okolního zařízení. Zároveň chrání obsluhu generátoru při nechtěném kontaktu s induktorem – typické při pájecích aplikacích. Pro galvanické oddělení od sítě se běžně používá tzv. síťový oddělovací transformátor. Jeho oddělovací efekt je však téměř nulový pro kmitočty v řádu stovek kHz z důvodu příliš vysoké vzájemné kapacity vinutí pohybující se v řádu jednotek nanoFaradů. Optimálního galvanického oddělení je možné dosáhnout pomocí spínacího zdroje s pulsním transformátorem, jež s

sebou přináší i další výhody v podobě lepšího účinku, vynikající účinnosti, minimálních rozměrů a hlavně zlomkové hmotnosti oproti klasickému řešení, např. 15kW třífázový transformátor váží typicky 170-200kg, kdežto ekvivalentní spínaný zdroj cca 20kg (4).

□ Praktické využití indukčního ohřevu v průmyslu:

- **Kelímkové a kanálkové indukční pece**

Slouží k tavení různých kovů, jako jsou zinek, olovo, měď, hliník a další kovy až po ocel. Oproti jiným pecím, zvláště obloukovým, mají tu výhodu, že umožňují připravit kovy čistší, protože v obloukové peci se do taveniny může dostat materiál z elektrod.

Touto problematikou se zabývá norma ČSN EN 62076 – Průmyslová ohřívací zařízení - Zkušební metody pro indukční kanálkové a kelímkové pece. Tato norma se používá pro elektrické instalace zahrnující průmyslové indukční kanálové pece a indukční kelímkové pece pro tavení, udržování a přehřívání. Jejím předmětem je normalizace zkušebních metod k určení základních parametrů a technických charakteristik instalací elektroohřevu zahrnující pece typu vyjmenovaného v předešlé větě.

- **Indukční ohřevy pro tváření**

Zde je důležité, aby se materiál prohřál rovnoměrně v celém objemu, a toho se dá dosáhnout vhodnou volbou tvaru induktoru, kmitočtu a doby ohřevu. Tento ohřev má široké uplatnění ve všech průmyslových odvětvích, používá se například i v autoopravných apod.



Obr. 2.23 Indukční ohřev (4)



Obr. 2.24 Indukční kalení (3)

- **Indukční ohřev pro kalení**

Stejně jako v předchozím případě se dá správnou volbou výše uvedených parametrů dosáhnout toho, aby se naopak prohřála pouze tenká povrchová vrstva, což je potřeba pro povrchové kalení, nebo jinou povrchovou úpravu. Výhody indukčního ohřevu pro kalení jsou:

- vysoká hustota výkonu a rychlost ohřevu
- dobré řízení teploty kovu
- přesné určení ohříváných zón

Příklad indukčního zařízení pro kalení je uveden na obrázku 2.24 (3,4)

- **Indukční svařování**

Pomocí speciálně upraveného induktoru se dají například svařovat švy při výrobě trubek z pásů plechu apod.

Při indukčním svařování prochází trubka s nezavařeným švem přes vodu chlazenou zpravidla jedno až tři závitovou pracovní cívku neboli induktor, jenž je napájena poměrně velkým

proudem řádově 0,5 až 10kA o vysokém kmitočtu 200 až 400kHz z vysokofrekvenčního generátoru. Lokální natavení hran materiálu a následné svaření pak probíhá indukčním ohřevem.

- **Indukční pájení**

Provádí se tak, že mezi pájené části kovu se vloží pájka, součásti se přitisknou na sebe a vloží do induktoru, který je prohřeje tak, aby se pájka roztavila. Tato metoda se používá například u pájení mnohapiňových konektorů pro výpočetní techniku nebo pro pájení vývodů na vinutí velkých synchronních generátorů.

- **Indukční plazma**

Principem této aplikace indukčního tepla je to, že se provede ionizace plynu (nejčastěji argonu) nějakým vnějším zdrojem, tím se plyn stane vodivým a jeho další udržování v tomto stavu se děje indukčním ohřevem. Indukční plazma se používá v plazmové chemii a práškové metalurgii.

Plazma generovaná nikoliv střídavým elektrickým polem, ale vnější indukční cívkou pod střídavým proudem. Výsledná plazma je stabilní od vakua po okolní tlak. Teplota takového plazmového plamene je v rozsahu 10000 až 20000 °K.

- **Tavení ve vakuovém kelímku**

Protože mezi induktorem a kelímkem nemusí být fyzický kontakt, je možné, aby kelímek byl uzavřený, a jeho prostor vysoce čistý. Toho se používá například při výrobě křemíkových monokrystalů pro polovodiče. Křemík se taví ve vakuu ve vodivém kelímku, jenž se ohřívá indukčně.

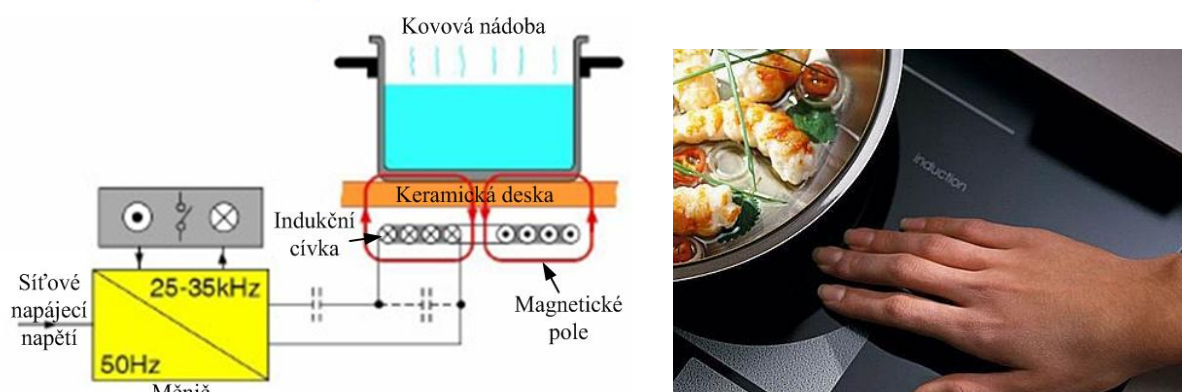
- **Indukční vařič**

Vaření na indukčním vařiči využívá odlišného principu ohřevu oproti klasickému odporovému vařiči. Indukční technologie dnes představuje nejúčinnější způsob přeměny elektrické energie na tepelnou. Teplo vzniká přímo v plášti nádoby indukcí elektrického proudu. Hlavní výhodou indukčního ohřívání je odbourání ztrát při přechodu tepla, protože ohřívá přímo dno kovové nádoby. Při tomto způsobu ohřevu je dosažena vysoká účinnost přeměny elektrické energie na teplo. Při využití běžného elektrického ohřevu pomocí odporové topné spirály (plotýnkový vařič, sklokeramická varná deska), prochází vzniklé teplo izolantem, kovovou nebo sklokeramickou deskou a teprve potom je předáváno dnu hrnce, ve kterém vaříme. Tento přechod je zdrojem velkých tepelných ztrát, především pokud k sobě obě plochy přesně nedoléhají (vznikne vzduchová mezera, která špatně vede teplo), nebo při znečištění plotýnky případně dna hrnce. Naproti tomu je při indukčním ohřevu ohříváno přímo dno hrnce. Indukční vařič je znázorněn na obrázku 2.25.

Jde o nejméně energeticky náročný ohřev pomocí elektrické energie. Ve srovnání se sklokeramickými, elektrickými a plynovými deskami ušetříte až 45% elektrické energie a získáte cca 50% času.

Další výhodou je bezpečnost a snadná údržba. Varnou plochu lze téměř ihned po použití očistit (deska se zahřívá pouze od nádoby, která je na ní položena).

Předpokladem pro vaření na indukční desce je magnetizované dno varné nádoby. Proto je vhodné vyzkoušet, které nádobí bude pro indukční desku vyhovující (feromagnetické materiály jako litina, smaltované kovové hrnce, nerez atd.)



Obr. 2.25 Indukční vařič



Další zdroje

- (1) <http://fei1.vsb.cz/kat420>
- (2) http://cs.wikipedia.org/wiki/Skin_efekt
- (3) <http://www.ancorapraha.cz/produkty/tepelne-zpracovani-kovu-sms-elotherm>
- (4) <http://www.rajmont.cz>



Pojmy k zapamatování

Elektromagnetické střídavé pole
 Skinefekt
 Induktor
 Cívka
 Vířivé proudy

Indukční kalení
 Indukční pájení
 Indukční plazma
 Indukční vařič
 Účinnost



Otázky

- 2.14. Jak vznikají vířivé proudy?
- 2.15. Jaké jsou výhody indukčního ohřevu?
- 2.16. Jaké znáte praktické příklady indukčních elektrotepelných zařízení?
- 2.17. Jaký bývá řádově pracovní kmitočet indukčních zařízení?

2.5. Další způsoby ohřevu



Čas ke studiu: 50 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat dielektrický ohřev
- popsat elektronový ohřev
- popsat ohřev pomocí laserů
- popsat ohřev pomocí infrazářičů a sálavých panelů
- navrhnout praktické použití těchto zařízení

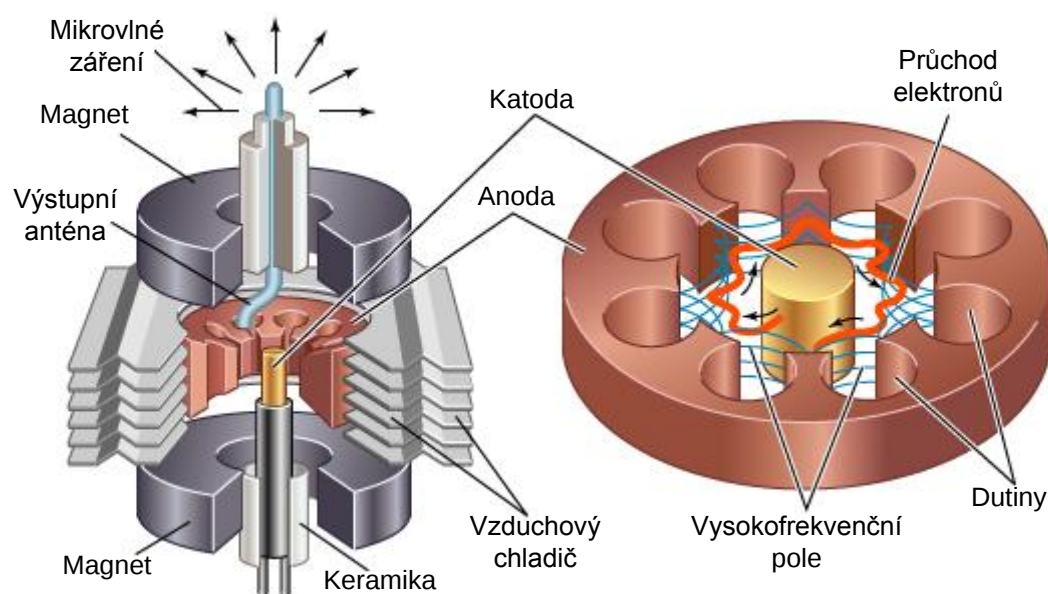


Výklad

2.5.1 Dielektrický ohřev

Dielektrická tepelná zařízení jsou analogická se zařízeními indukčními s tím, že se zde uplatňuje elektrická složka vlnění a pracovním nástrojem je zde kondenzátor. Uvnitř jeho dielektrika se nachází vsázka. V důsledku změny směru působení elektrického pole dochází k vzájemnému tření dipólů a ke vzniku tepla. Slouží k ohřevu elektricky nevodivých materiálů. Množství vyvinutého tepla je přímo úměrné napětí, kmitočtu a je závislé na vlastnostech materiálu (ztrátový úhel delta a permitivita) a nepřímo úměrné vzdálenosti elektrod. Jeho praktické použití je:

- v dřevařském průmyslu (výroba překližek, sušení, apod.)
- pro ohřev plastických hmot pro jejich tvarování
- pro svařování plastických hmot (včetně fólií)
- pro ohřevy při výrobě sklolaminátu.



Obr. 2.26 Princip magnetronu (3)

Pro dielektrický ohřev se používají vysoké kmitočty do cca 300 MHz, které se volí mimo oblast radiokomunikací. (např. 13,6, 17, 20, 27 MHz.). Tyto kmitočty jsou vyráběny v elektronkových generátorech

Mikrovlnný ohřev je zvláštním druhem dielektrického ohřevu. Použitý kmitočet je v jednotkách GHz (10^6 Hz) a pracovní kondenzátor je zde nahrazen dokonale uzavřeným prostorem tzv. multimódovým rezonátorem (mikrovlnka), jehož stěny jsou provedeny z dobře vodivého materiálu (nejčastěji hliníkový plech). K dosažení rovnoměrného ohřevu se vsázka otáčí, nebo se provádí „míchání“ stojatého vlnění otáčejícím se hliníkovým křídélkem. Vysoký kmitočet je vyráběn ve speciálních elektronkách tzv. magnetronech (2). Princip magnetronu je znázorněn na obrázku 2.26.

Použití mikrovlnného ohřevu v průmyslu je obdobné jako u dielektrického ohřevu. Navíc se používá k pasterizaci potravin a k ohřívání jídel a potravin.

Jeho hlavní předností je rychlost ohřevu a tím i energetická výhodnost v důsledku snížení ztrát.

Z bezpečnostních a hygienických důvodů nesmí tato zařízení vyzařovat energii mimo pracovní prostor. Při otevření dvířek musí dojít k blokování chodu zařízení!

Pro bezpečný provoz dielektrických a mikrovlnných elektrotepelných zařízení platí obecné předpisy a normy. Jedná se zejména o ČSN EN 60519-6 – Bezpečnost u elektrotepelných zařízení - Část 6: Technické požadavky na bezpečnost průmyslových mikrovlnných ohřívacích zařízení, ČSN EN 60335-2-25 ed.4 – elektrické spotřebiče pro domácnost a podobné účely - Bezpečnost - Část 2-25: Zvláštní požadavky na mikrovlnné trouby včetně kombinovaných mikrovlnných trub, ČSN EN 60519-9 ed.2 – bezpečnost u elektrotepelných zařízení - Část 9: Zvláštní požadavky na zařízení pro vysokofrekvenční dielektrický ohřev

2.5.2 Elektronový ohřev

Elektrická energie se zde mění v teplo dopadem urychlených elektronů na vsázku, kde odevzdávají svou kinetickou energii. Elektronový paprsek je tvořen z volných elektronů získaných ze žhavené katody, které jsou dále urychlovány a tvarovány v dalších zřízeních. Toto konstrukční uspořádání je označováno jako elektronové dělo, které může být v různých provedeních, například:

- axiální,
- s prstencovou katodou,
- s příčným paprskem.

Anodu tvoří buď tavený materiál, například u pecí nebo je samostatná a tvoří urychlovací prostředek pro elektronové paprsky dopadající na ohříváný materiál, jejichž směr lze ovlivňovat magnetickým polem pomocných cívek (magnetické čočky).

Použití je zejména v hutnickém průmyslu k tavení, spékání a k tepelnému zpracování těžkovitých kovů, k přetavování monokrystalů, k metalizování a napráškování. Lze je použít i pro opracování tvrdých a těžkozpracovatelných kovů. Pro jednu tavíci nádobu lze použít i více děl.

Urychlovací napětí se pohybuje v desítkách až stovkách kV. Předností elektrodového tavení je možnost sledování, řízení, a dosažení čistoty tavení.

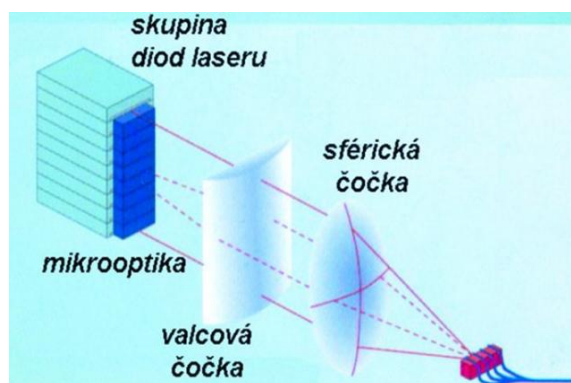
Normalizaci bezpečnostních požadavků pro elektronový ohřev popisuje norma ČSN EN 60519-7 ed.2 – Bezpečnost u elektrotepelných zařízení - Část 7: Zvláštní požadavky na pece s elektronovými děly.

2.5.3 Ohřev pomocí laserů

Laser je kvantový generátor elektromagnetického vlnění s kmitočtem v oblasti světla (řádově 10^{14} Hz). Ohříváný materiál pohlcuje laserové paprsky, jejichž energie se mění absorpcí v teplo. U kovů proniká laserový paprsek do hloubky, která je zlomkem vlnové délky záření. Vlastní absorpce je nepřímá

úměrná vlnové délce a elektrické vodivosti materiálu. Lépe se tedy ohřívá ocel než elektricky vodivější materiály (měď, stříbro, zlato, hliník). Použití je v lékařství, ve vojenské technice a v průmyslu (např. dolegování a přetavování povrchových vrstev, povrchové kalení, svařování, opracování, vrtání, řezání).

Mezi základní nevýhody patří nízká energetická účinnost (pod 1 %).



Obr. 2.27 Konstrukce polovodičového laseru (4)

2.5.4 Ohřev pomocí infrazářičů a sálavých panelů

Každé těleso teplejší než absolutní nula vyzařuje do svého okolí zářivou elektromagnetickou energii, která je pohlcována dalšími blízkými tělesy, kde dochází k jejich přeměně v teplo, tak bychom mohli definovat tepelné záření. Využívá se hlavně vlnových délek, které jsou dobře pohlcovány a emitovány. Šíření tepla se řídí zákony geometrické optiky, platí zde tedy vztah (2.12):

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.12)$$

kde c (m/s) – rychlost světla (rychlost světla ve vakuu $c = 299\,792\,458$ m/s).

λ (m) – vlnová délka

f (s⁻¹) – frekvence zářiče

Praktické provedení:

- infračervené zářiče - $\lambda = 1 - 10\ \mu\text{m}$
Jsou velmi účinné pro vytápění hal a zónové vytápění pracovišť. V technologických procesech je možné navrhnout zařízení s velmi vysokou hustotou tepelné energie a tu pak dávkovat vhodným řízením ohřívanému produktu. Krátkovlnné zářiče jsou značně využívány ve výrobních postupech pro předehřívání včetně kovů, sušení práškových barev či lepení.
- sálavé panely - $\lambda = 5\ \mu\text{m}$,
Na povrchu sálavých panelů, které fungují, jako topná tělesa je nanесena vrstva latexové hmoty s přidavkem speciálního křemičitého písku a s navulkanizováním zaručujícím velmi dobrou emisivitu tepelného záření (97 % emisivity absolutně černého tělesa). Pro člověka se jeví jako nejpříznivější vlnové délky 7,5 - 10 μm . Tepelná pohltivost člověka je asi 99 %. Tyto sálavé panely jsou původem ze severských zemí. Ve skutečnosti dochází k ohřevu stěn, předmětů a podlahy, od kterých je ohříván okolní vzduch. Tepelné záření se odráží a neprochází sklem (okny). Použití sálavých panelů úzce souvisí s tepelnou pohodou, což je pocit závislý na průměrné teplotě vzduchu a okolních stěn (ploch) v místnosti. Pro běžný návrh panelu pro vytápění dobře izolované místnosti se uvažuje příkon 18 - 30 W/m². Takto určený instalovaný elektrický příkon je asi o 60 % menší oproti příkonu potřebnému k akumulárnímu vytápění. Další výhody tohoto způsobu je úspora místa (umístění ve stěnách, na stropě apod.), rychlí náběh při zapnutí.



Další zdroje

- (1) <http://fei1.vsb.cz/kat420>
- (2) <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetron>
- (3) <http://www.britannica.com>
- (4) <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>



Pojmy k zapamatování

Dielektrický ohřev
Magnetron
Elektronový ohřev
Magnetická čočka

Ohřev pomocí laserů
Ohřev pomocí infrazářičů
Ohřev pomocí sálavých panelů
Vlnová délka



Otázky

- 2.18. K čemu slouží magnetron?
- 2.19. Jaké je praktické použití dielektrického ohřevu?
- 2.20. Jaký je rozdíl mezi infrazářiči a sálavými panely?
- 2.21. Jaké je praktické použití elektronového ohřevu?

2.6. Bezpečnost provozu elektrotepelných průmyslových zařízení



Čas ke studiu: 25 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat bezpečnost elektrotepelných zařízení
- popsat používané normy pro bezpečnost
- aplikovat základní bezpečnostní požadavky



Výklad

K bezpečnému provozování elektrotepelných zařízení je třeba dodržet bezpečnostní požadavky uvedené v normách, vyhláškách a předpisech.

Pro průmyslová zařízení platí základní norma ČSN EN 60519-1 ed.2 (33 50 02) – Bezpečnost u elektrotepelných zařízení – Část 1: Všeobecné požadavky. Tato norma mimo jiné uvádí:

- Odbornou terminologii.

- Členění elektrotepelných zařízení.
- Všeobecné požadavky.
- Požadavky na připojení k napájecí síti, vypínání a bezpečný provoz elektrotepelných zařízení, především ochranu před úrazem elektrickým proudem, požadavky na ekvipotenciální pospojování a účinky elektromagnetických vlivů.
- Zvláštní požadavky pro jednotlivé druhy pecí jsou uvedeny v dalších částech této normy.
- Norma se vztahuje na průmyslové elektrotepelné instalace v rozsahu střídavého napájecího napětí do 3 600 V nebo stejnosměrného do 5 000 V.
- Pojednává o všeobecných bezpečnostních požadavcích vztahujících se k průmyslovým elektrotepelným spotřebičům, o kterých jsme doposud hovořili.

Podle hodnoty napětí se elektrotepelná zařízení rozdělují takto na zařízení pro napěťové pásmo 1, 2 a 3, jak uvádí obr. 2.28.

Pásmo 1 zahrnuje: instalace, kde je ochrana před úrazem elektrickým proudem zajišťována za určitých podmínek hodnotou napětí; instalace, kde je napětí omezeno z provozních důvodů (např. instalace pro telekomunikaci, signalizace, zvonky, ovládání a poplach). Pásmo 2 zahrnuje napětí pro napájení instalací v oblasti obchodu a průmyslu. Toto pásmo zahrnuje všechna napětí pro veřejné distribuční systémy v různých zemích. Do pásma 3 spadají instalace vysokého napětí, pro které platí další doplňující normy a nařízení pro tuto oblast.

1	2	3
$U_{AC} < 50 \text{ V}$ $U_{DC} < 120 \text{ V}$	$50 \text{ V} < U_{AC} < 1000 \text{ V}$ $120 \text{ V} < U_{DC} < 1500 \text{ V}$	$1000 \text{ V} < U_{AC}$ $1500 \text{ V} < U_{DC}$

Obr. 2.28 Napěťová pásma pro elektrotepelná zařízení

Podle kmitočtu se elektrotepelná zařízení rozdělují takto:

- Stejnosměrná $f = 0 \text{ Hz}$
- Nízkofrekvenční $f < 60 \text{ Hz}$
- S kmitočtem sítě $f = 50 \text{ Hz}$
- Středofrekvenční $60 \text{ Hz} < f \leq 10 \text{ kHz}$
- Vysokofrekvenční $10 \text{ kHz} < f \leq 300 \text{ MHz}$
- Mikrovlnná $300 \text{ MHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$

Elektrotepelná zařízení musí být navržena a zkonstruována tak, aby:

- při instalaci a použití v souladu s předpisy výrobce nemohlo dojít k ohrožení obsluhy nebo okolí, byla zajištěna bezpečnost obsluhy a bylo zabráněno nebezpečí požáru a výbuchu,
- chránila obsluhu před škodlivými účinky vyzařovaného elektromagnetického pole,
- nedocházelo k nebezpečnému ohřátí vodičů protékanych proudem,
- byla vyloučená nebezpečí v důsledku energií nahromaděných v kondenzátorech a induktivních součástech během vypnutí nebo po něm (varovné štítky),
- byla za provozu a v normálních polohách dostatečně stabilní,
- nedocházelo k nadměrnému mechanickému namáhání elektrických částí zařízení.

Ochrana před úrazem elektrickým proudem musí být u zařízení 1. a 2. napěťového pásma zajištěna ochrannými opatřeními dle ČSN 332000-4-41 s možností uplatnění zvláštních opatření pro přímý i nepřímý dotyk (např. izolační oblek, rukavice, obuv, podložky, jiná uzemňovací zařízení atd.).

Norma ČSN EN 50156-1 - Elektrická zařízení pro kotle a pomocná zařízení - Část 1: Požadavky na návrh používání a instalace. Tato norma platí pro praktický návrh a instalaci elektrických zařízení, řídicích obvodů a ochranných systémů pro kotle, které pracují s pevnými, tekutými nebo plynými palivy a jejich pomocných zařízení. Specifikuje požadavky nutné pro splnění provozních podmínek

kotlů ke snížení nebezpečí spalování a k ochraně vytápěných systémů před poškozením např. přehřátím. Takové kotle a elektrická zařízení mohou být např. částí následujících provozů, jako jsou systémy ohřívání vody a instalace s parními kotli (parní a teplovodní kotle) a parní kotle s rekuperací tepla. Požadavky této normy platí obdobně pro elektrická zařízení elektricky vytápěných parních kotlů. Tyto požadavky mohou být použity pro taková zařízení, jako jsou ohřivače teplého vzduchu, ohřivače teplého plynu, systémy výměníků tepla, spalovací komory stacionárních turbin, pokud neplatí žádná jiná norma na kombinované teplárny a elektrárny, doporučuje se použít požadavky této normy, i na elektrická zařízení pro zařízení tepelného zpracování.

ČSN EN 62395-1 - Elektrické odporové pásové ohřívací systémy pro průmyslové a komerční použití - Část 1: Všeobecné a zkušební požadavky. Tato část IEC 62395 specifikuje požadavky na elektrické odporové pásové ohřívací systémy a obsahuje všeobecné požadavky na zkoušky. Tato norma se týká pásových ohřívacích systémů, které mohou obsahovat buď továrně vyrobené, nebo v provozu sestavené (na pracovním místě) jednotky a kterými mohou být sériové ohřívací kabely, paralelní ohřívací kabely, ohřívací vložky nebo ohřívací panely, které byly sestaveny a/nebo ukončeny podle návodu výrobce pro připojení na napájecí napětí do 450 V - 750 V včetně.

Pro elektrotepelná zařízení 3 napěťová pásma jsou platné bezpečnostní požadavky, které se vztahují na izolované sítě (IT).

Informace o neelektrických nebezpečích lze získat z ČSN EN 746-1 – Průmyslová tepelná zařízení - Část 1: Všeobecné bezpečnostní požadavky na průmyslová tepelná zařízení



Další zdroje

- (1) <http://fei1.vsb.cz/kat420>
- (2) <http://csnonline.unmz.cz/vyhledavani.aspx>
- (3) <http://www.technickenormy.cz>



Pojmy k zapamatování

ČSN EN 60519-1 ed.2
Napěťová pásma

Normy
ÚNMZ



Otázky

- 2.22. Jaká norma je zásadní pro bezpečnost elektrotepelných zařízení?
- 2.23. Do jakých napěťových pásem dělíme elektrotepelná zařízení?
- 2.24. Jak dělíme elektrotepelná zařízení podle kmitočtu?
- 2.25. Jaké jsou zásadní požadavky na konstrukci elektrotepelných zařízení?



Klíč k řešení

- O 1.1. Asynchronní motor je střídavý elektrický stroj, který slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou energii.
- O 1.2. Asynchronní motor se skládá ze statoru, který se skládá z nosné konstrukce, jádra z izolovaných plechů s drážkami a vinutí z izolovaných měděných vodičů a z rotoru, který se skládá z izolovaných dynamoplechů s drážkami, vinutí v drážkách a zkratovacích kroužků na čelech rotoru.
- O 1.3. Počet pólů nám určuje synchronní otáčky asynchronního motoru.
- O 1.4. Otáčky asynchronního motoru můžeme regulovat změnou kmitočtu napájecího napětí, přepínáním počtu pólů (u motorů, které to umožňují), a změnou skluzu, tedy změnou napájecího napětí, nebo změnou impedance v obvodu rotoru nebo statoru.
- O 1.5. Moment zvratu je maximální moment, který může vyvinout asynchronní motor.
- O 1.6. Brzdit asynchronní motor můžeme protiproudem (změna smyslu otáčení magnetického pole, přehození libovolných dvou fází), generátoricky (vrácení energie zpět do zdroje), nebo dynamickým brzděním (stejnoseměrným zdrojem).
- O 1.7. Asynchronní motor má praktické využití v čerpadlech, ventilátorech, kompresorech, pásových dopravnících, jeřábech, výtazích, obráběcích strojích, prostředcích hromadné dopravy, elektromobilech, lokomotivách apod.
- O 1.8. Turboalternátor je synchronní generátor, který se využívá při výrobě elektrické energie při rychloběžných otáčkách, tedy tam kde jsou mechanické otáčky generátoru uvažovány nad cca 1500 ot./min. Použití například v tepelných, jaderných elektrárnách, kogeneračních jednotkách apod.
- O 1.9. Hydroalternátor je tzv. pomaloběžný synchronní generátor, používané převážně ve vodních a větrných elektrárnách.
- O 1.10. Počtem pólů jsou dané výsledné pracovní otáčky stroje.
- O 1.11. Otáčky synchronního motor můžeme regulovat pomocí frekvenčních měničů, nebo cyklokonvertorů.
- O 1.12. Maximální moment je moment, při kterém synchronní motor vypadne ze synchronismu. Je to poruchový stav, při kterém se může synchronní stroj mechanicky poškodit.
- O 1.13. Synchronní stroje se používají převážně jako generátory v elektrárnách, ale mají i široké použití, jako krokové motory, nebo servopohony v mechatronických systémech.
- O 2.1. Akumulované teplo je možno vypočítat pomocí vztahu $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$.
- O 2.2. K přenosu tepla dochází pomocí tří základních principů. Pomocí vedení – tzn. kondukce, proudění tzn. konvekce a sálání – tzn. radiace, neboli záření.
- O 2.3. Oteplovací časová konstanta τ je čas, za který dosáhne oteplení systému hodnoty 0,633 maximálního ustáleného oteplení.
- O 2.4. Základní elektrotepelná zařízení používaná k elektrickému ohřevu jsou odporová, oblouková, indukční, elektronová, laserová apod.
- O 2.5. Přímý odporový elektrický ohřev můžeme prakticky využít při ohřevu dlouhých drátů, tyčí, pásů apod., dále při grafitaci v Achesonových pecích, v elektrolyzérch, při elektronovém ohřevu vody apod. Využití přímého ohřevu je také při elektrickém odporovém svařování a elektrostuskovém přetavování oceli.

- O 2.6. Pro nepřímý odporový ohřev se prakticky používají komorové pece, kelímkové pece, elektrické spirály, pekařské pece apod.
- O 2.7. Elektrický odpor materiálu závisí přímo úměrně na měrném elektrickém odporu materiálu a na délce materiálu a nepřímo úměrně na průřezu materiálu.
- O 2.8. Závislost změny odporu na oteplení je dána vztahem $R_T = R_{20^\circ\text{C}} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$.
- O 2.9. Pro správný návrh a stanovení druhu odporové pece je nutno brát v úvahu tyto ukazatele: technologické požadavky investora, druh a velikost vsázky, hmotnost vsázky ke zpracování za jednotku času, průběh teplotního režimu (maximální teplota, rychlost ohřevu, konečná teplota, doba výdrže na určité teplotě, rychlost ochlazování apod.), rovnoměrnost a přesnost dodržení teploty, druh atmosféry v peci (přirozená, umělá), druh provozu (přetržitý, nepřetržitý), prostorové nároky, předpokládanou konečnou cenu díla.
- O 2.10. Obloukový výboj je složen z ionizovaného sloupce, kterým protéká proud a okolních plynů tzv. aureoly, nebo také někdy nazývané koróna.
- O 2.11. Základní vlastnosti elektrického oblouku: vysoká elektrická vodivost (řádově 10^8 A/m^2), vysoká teplota (řádově $10^4 - 10^5 \text{ K}$), intenzivní záření a nelineární charakteristika.
- O 2.12. Elektrotepelná zařízení mohou být s přímým elektrickým obloukem, příkladem může být elektrické svařování, nebo s nepřímým elektrickým obloukem, což jsou různé obloukové pece, kde oblouk hoří mezi dvěma elektrodami a energie se předává sáláním, například vakuové pece, pece používané k výrobě litin karbidů apod.
- O 2.13. Mezi hlavní výhody plazmového ohřevu patří nižší provozní náklady a vyšší kvalita taveného produktu.
- O 2.14. Vložením elektricky vodivého předmětu do střídavého magnetického pole dochází v tomto předmětu ke vzniku vířivých proudů?
- O 2.15. Hlavní výhodou je vznik tepla přímo v ohřívaném předmětu, a s tím souvisí další ekonomické výhody, kdy nemusíme ohřívat okolí předmětu. Další výhodou je že ohříváný předmět nemusí být nijak mechanicky vázán s indukční pecí, protože přenos energie se provádí prostřednictvím magnetického pole.
- O 2.16. Praktické použití indukčních elektrotepelných zařízení je o oblasti ohřevu pro tváření, povrchového kalení, svařování, pájení, indukčních vařičů apod.
- O 2.17. Pracovní kmitočet se v závislosti na konkrétním typu zařízení pohybuje v rozsahu 20-400kHz.
- O 2.18. Ke generování vysokého kmitočtu pro mikrovlnný ohřev.
- O 2.19. Praktické použití dielektrického ohřevu je v dřevařském průmyslu (např. výroba překližek, sušení, apod.), pro ohřev plastických hmot pro jejich tvarování, pro svařování plastických hmot (včetně fólií), pro ohřevy při výrobě sklolaminátu, k pasterizaci potravin, k ohřívání jídel a potravin apod.
- O 2.20. Výhody sálavých panelů je menší energetická náročnost ve srovnání s konvenčním pro dosažení stejné tepelné pohody. Další výhodou je úspora místa (umístění ve stěnách, na stropě apod.) a rychlý nástup při zapnutí.
- O 2.21. Praktické použití je zejména v hutnickém průmyslu k tavení, spékání a k tepelnému zpracování těžkovytvářecích kovů, k přetavování monokrystalů, k metalizování a napraškování. Lze je použít i pro opracování tvrdých a těžkoobtavitelných kovů.
- O 2.22. Základní požadavky pro bezpečné provozování elektrotepelných zařízení jsou uvedeny v jednotlivých částech normy ČSN EN 60519.
- O 2.23. Elektrotepelná zařízení dělíme do tří napěťových pásem. První pásmo do 50VAC, druhé Pásmo od 50 VAC do 1000 VAC a třetí napěťové pásmo nad 1000 VAC.

- O 2.24. Elektrotepelná zařízení se podle kmitočtu rozdělují na stejnosměrná (0 Hz), nízkofrekvenční (do 60 Hz), s kmitočtem sítě (50 Hz), středofrekvenční (od 60 Hz do 10 kHz), vysokofrekvenční (od 10 kHz do 300 MHz) a mikrovlnná (od 300 MHz do 300 GHz).
- O 2.25. Elektrotepelná zařízení musí být konstruována tak, aby byla zajištěna bezpečnost obsluhy a bylo zabráněno nebezpečí požáru a výbuchu, chránila obsluhu před škodlivými účinky vyzařovaného elektromagnetického pole, nedocházelo k nebezpečnému ohřátí vodičů protékaných proudem, byla vyloučena nebezpečí v důsledku energií nahromaděných v kondenzátorech a induktivních součástech během vypnutí nebo po něm (varovné štítky), byla za provozu a v normálních polohách dostatečně stabilní, nedocházelo k nadměrnému mechanickému namáhání elektrických částí zařízení.

Rejstřík

Achesonova pec.....	27	infrazářiče.....	46
alternátor.....	19	jmenovitý moment asynchronního motoru	8
asynchronní generátor	14	Joulův zákon.....	26
Asynchronní rozběh	20	Katodový ohřev	28
asynchronní stroj	6	Kelímková pec	30
atmosféra pece	29	Komorová pec	30
Bezpečnost elektrotepelných zařízení	47	kondukce.....	23
Brzdění asynchronního motoru	12	konstrukce asynchronního stroje	6
Brzdění generátorické.....	13	konvekce	23
Brzdění protiproudem	12	kovové materiály	29
Celkový příkon pece	32	Krokový motor.....	21
cívka.....	40	Laser.....	45
cyklokonvertor.....	20	magnetron.....	44
Dielektrický ohřev	44	maximální moment asynchronního motoru	8
Dynamické brzdění.....	12	měníč kmitočtu	10
Elektrická spirála	31	měrný elektrický odpor materiálu	26
Elektrické odporové svařování.....	28	moment asynchronního motoru naprázdno	8
Elektrické svařování.....	37	moment zvratu asynchronního motoru	8
Elektrické teplo.....	25	napět'ové pásmo	48
elektrický oblouk	35	nekovové materiály	29
Elektrodový ohřev	28	Nepřímý odporový ohřev	25
elektromagnetické vlnění	23	nízkoteplotní pece	29
Elektronový ohřev	45	obloukové pece	36
Elektrostruskové přetavování	29	Ochlazování	24
Frekvenční měnič	10	oteplovací časová konstanta	24
grafitace.....	27	Oteplování	24
hladký rotor	18	pekařská pec.....	31
hydroalternátory	18	plazma.....	38
Indukční ohřev.....	40	Plazmový ohřev	38
Indukční pájení.....	42	počet pólových dvojic.....	8
indukční pece	41	počet pólů.....	8
Indukční plazma	42	proudění.....	23
Indukční svařování.....	41	provoz pece	30
Indukční vařič.....	42	Přepínač hvězda - trojúhelník	9

Přímý odporový ohřev	25
radiace	23
Regulace otáček	10
Regulace otáček asynchronního motoru ...	10
Regulace změnou kmitočtu	10
Regulace změnou počtu pólů	11
Regulace změnou skluzu	11
rezistivita	26
Rotor	19
rotor asynchronní motoru	7
Rozběh pomocným motorem	20
rychlost světla	46
Řízený rozběh	20
sálání	23
sálavé panely	46
servomotor	21
skinefekt	39
Soft startér	10

stabilní vsázka	30
stator asynchronní motoru	7
středoteplotní pece	29
synchronní kompenzátory	18
synchronní motor	20
teplotní součinitel elektrického odporu	26
termická elektrolýza	27
turboalternátory	18
Užitečný výkon pece	33
vířivé proudy	39
vlnová délka	46
vsázka procházející pecí	30
vyniklé póly	18
vysokoteplotní pece	29
záběrný moment asynchronního motoru	8
záření	23
Ztrátový výkon pece	33