

Elektrotepelná technika

Zdeněk Hradílek | Ilona Lázníčková | Vladimír Král



Elektrotepeľná technika

Zdeněk Hradílek

Ilona Lázničková

Vladimír Král



České vysoké učení technické v Praze

Praha 2011

Publikace byla zpracována za finanční podpory Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2011 – část A – Program EFEKT.



MINISTERSTVO
PRŮMYSLU A OBCHODU



Recenzent: prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

© Zdeněk Hradílek, Ilona Lázníčková, Vladimír Král, 2011

ISBN 978-80-01-04938-9

Vážení čtenáři,

čas, kdy tato publikace vznikla, je ve znamení pokračujících dynamických změn v energetice. Energetika jako celek, nejen výroba, přenos a distribuce elektřiny, na které se zaměřuje tato edice odborných publikací, je ovlivňována zásadními událostmi. Plně se otevřel trh s elektřinou a plynem, stále narůstá podíl obnovitelných zdrojů na výrobě elektřiny, mění se a vyhraňují postoje k jaderné energetice. V rámci Evropy se stále více diskutuje o využití primárních zdrojů i paliv, rostou nároky na přenosovou soustavu.

Celý rozvoj energetického odvětví by však nebyl možný bez dostatku kvalitních lidských zdrojů. Proto považuji za akutní problém zajištění dostatečného počtu odborníků pro budoucí činnost v této náročné technické oblasti. Předpokladem pro přípravu kvalitních odborníků jsou kvalitní odborné základy a já věřím, že právě tato publikace je dokáže poskytnout.

Celá edice odborných publikací je svým způsobem výjimečná, neboť po delší době opět věnuje pozornost jednotlivým oblastem elektroenergetiky a velmi kvalitně standardizuje poznatky z tohoto náročného oboru. Je jisté, že tato edice může přispět k větší konsolidaci a spolupráci v oboru technického vzdělávání, vědy a výzkumu, aby se opět zvýšila prestiž technických oborů. Ministerstvo průmyslu a obchodu, které významně podpořilo vznik této ediční řady, chce tímto způsobem přispět k zajištění konkurenceschopnosti hospodářství na území České republiky, které bylo vždy založeno na kvalitní technické produkci.

Řada publikací vznikla ve spolupráci kolektivů autorů technických vysokých škol České republiky. Rád bych závěrem poděkoval autorům za jejich profesionální přístup při přípravě publikace a také mým kolegům z ministerstva za zajištění realizace projektu. Všem uživatelům přeji, aby jim publikace napomohla při jejich vzdělávání a práci a stala se nedílnou součástí knihovny, ke které se budou pravidelně vracet.

Ing. Roman Portužák, CSc.

ředitel odboru elektroenergetiky

Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky



Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Základy sdílení tepla	12
2.1.	Pojmy, symboly, veličiny a jednotky	12
2.2.	Kalorimetrické výpočty	14
2.3.	Přenos energie a přenos tepla	15
2.4.	Termodynamické procesy	16
2.4.1	Vedení tepla, přenos energie difúzí	16
2.4.2	Proudění tepla, přenos energie difúzně-konvekční.....	21
2.4.3	Přenos tepla sáláním.....	23
2.5.	Všeobecná rovnice šíření energie.....	29
2.6.	Základní kritéria podobnosti teplotních polí v pevném prostředí.....	31
2.7.	Analogie mezi teplotním a elektrickým polem.....	32
2.8.	Literatura	33
3.	Elektrotepelná zařízení odporová.....	34
3.1.	Přímý odporový ohřev	34
3.1.1	Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů apod.	35
3.1.2	Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku.....	37
3.1.3	Termická elektrolýza	38
3.1.4	Elektrodové solné lázně	38
3.1.5	Elektrodový ohřev vody.....	39
3.2.	Nepřímý odporový ohřev	40
3.2.1	Odporové pece se stabilní vsázkou	41
3.2.2	Odporové pece průběžné.....	43
3.2.3	Materiály a součásti elektrických odporových pecí s nepřímým ohřevem	45
3.2.4	Materiály pro topné články kovové.....	46
3.2.5	Materiály pro topné články nekovové.....	47
3.2.6	Základní použití odporových pecí v průmyslu a ve strojírenství	48
3.2.7	Vlastní výpočet topného článku	49
3.2.8	Zapojení a regulace elektrických odporových pecí	50
3.2.9	Automatická regulace teploty v odporových pecích.....	51
3.3.	Výpočty odporových elektrotepelných zařízení pro nepřímý odporový ohřev.....	53
3.3.1	Základy návrhu a výpočtu odporových pecí.....	53
3.3.2	Výpočet celkového příkonu pece	54
3.3.3	Výpočet doby ohřevu vsázky	56
3.4.	Literatura	57
4.	Elektrotepelná zařízení indukční	58
4.1.	Princip vzniku tepla v indukčních zařízeních.....	58
4.2.	Elektrické schéma indukčních zařízení	60
4.2.1	Dva sousedé elektrické obvody	60
4.2.2	Tři sousedé elektrické obvody.....	63

4.2.3	Rezonanční obvod	68
4.3.	Indukční kelímkové pece.....	73
4.4.	Indukční zařízení pro povrchový ohřev	79
4.5.	Kanálkové indukční pece	83
4.5.1	Připojení kanálkových pecí k síti	84
4.6.	Elektrické zdroje napájení indukčních pecí	92
4.7.	Literatura	96
5.	Elektrotepelná zařízení dielektrická a mikrovlnný ohřev	97
5.1.	Dielektrická elektrotepelná zařízení	97
5.1.1	Fyzikální princip polarizace	97
5.1.2	Princip dielektrického ohřevu	98
5.1.3	Náhradní schéma deskového kondenzátoru [1]	100
5.1.4	Nesourodá dielektrika	102
5.1.5	Aplikace dielektrického ohřevu.....	104
5.2.	Mikrovlnná dielektrická zařízení [1].....	108
5.2.1	Princip mikrovlnného ohřevu.....	108
5.2.2	Zdroje mikrovlnného záření.....	111
5.2.3	Aplikace mikrovlnného ohřevu	112
5.3.	Literatura	113
6.	Obloukové pece, připojení na síť	114
6.1.	Fyzikální princip vzniku elektrického oblouku ionizací plynů	114
6.2.	Elektrické charakteristiky oblouku	116
6.3.	Charakteristiky střídavého oblouku	120
6.4.	Teoretické základy elektrických obloukových pecí	122
6.5.	Teoretické vztahy pro trojfázovou obloukovou pec	129
6.6.	Zařízení trojfázových pecí	134
6.7.	Napájecí síť vysokého napětí.....	136
6.8.	Řízení obloukových pecí počítačem	151
6.9.	Automatická regulace polohy elektrod	153
6.10.	Tavicí obloukové pece na ocel.....	154
6.11.	Stejnoseměrné elektrické obloukové pece	158
6.12.	Literatura	160
7.	Elektrotepelná zařízení plazmová, laserová, elektronová a infračervená	161
7.1.	Plazmová elektrotepelná zařízení	161
7.1.1	Plazma	161
7.1.2	Aplikace plazmového ohřevu	164
7.1.3	Plazmatrony	166
7.2.	Elektronová elektrotepelná zařízení.....	171
7.2.1	Fyzikální princip elektronového ohřevu.....	171
7.2.2	Elektronová zařízení	173
7.2.3	Aplikace elektronového ohřevu	179
7.3.	Laserová elektrotepelná zařízení	180
7.3.1	Laser	180
7.3.2	Fyzikální podstata laseru	181
7.3.3	Typy laserů.....	184

7.3.4	Aplikace laseru	188
7.4.	Infračervená elektrotopelná zařízení	190
7.4.1	Infračervené záření	190
7.4.2	Princip vzniku infračerveného záření	190
7.4.3	Zdroje infračerveného záření	191
7.4.4	Aplikace infračerveného ohřevu	193
7.5.	Literatura	194
8.	Elektrické vytápění.....	195
8.1.	Problematika tepelné pohody člověka v místnosti	195
8.1.1	Tepelný stav prostředí.....	196
8.2.	Praktický výpočet otopných zařízení	198
8.2.1	Obecný postup výpočtu tepelných ztrát	199
8.2.2	Výpočet tepelných ztrát - Norma ČSN EN 12831	201
8.2.3	Výpočet topného příkonu	203
8.3.	Elektrické vytápěcí systémy	205
8.3.1	Akumulační elektrické vytápění.....	206
8.3.2	Přímotopné elektrické vytápění	207
8.3.3	Smíšené (hybridní) elektrické vytápění	210
8.4.	Tepelná čerpadla.....	210
8.4.1	Druhy tepelných čerpadel.....	212
8.4.2	Provoz tepelných čerpadel.....	216
8.4.3	Stanovení bodu bivalence.....	218
8.4.4	Příprava teplé užitkové vody	218
8.4.5	Provoz se slunečními kolektory.....	218
8.4.6	Akumulace tepelné energie.....	218
8.5.	Literatura	219
9.	Klimatizace, úspory energie.....	220
9.1.	Klimatizace	220
9.1.1	Provozní režimy, funkce	221
9.1.2	Provedení kompresorů, chladicí kapalina	223
9.1.3	Vzduchové systémy	224
9.1.4	Vodní systémy	225
9.1.5	Chladivové systémy	226
9.1.6	Kombinované systémy vzduch-voda.....	226
9.1.7	Typy klimatizačních jednotek	226
9.2.	Možnosti úspor energie - nejen při vytápění	228
9.2.1	Úspory energie v domě	228
9.2.2	Zateplování.....	231
9.2.3	Velikost tepelných ztrát	234
9.2.4	Ekonomika zateplení	234
9.2.5	Snížení ztrát okny a prosklením.....	235
9.2.6	Větrání.....	236
9.2.7	Zdroje tepla	238
9.2.8	Návratnost investic při zateplování	240
9.3.	Připojování elektrotopelných spotřebičů k distribuční síti nízkého napětí	241
9.3.1	Podmínky pro připojování elektrotopelných spotřebičů	241

9.3.2	Jištění elektrotepelných spotřebičů	241
9.3.3	Měření spotřeby elektrické energie	242
9.3.4	Blokování elektrotepelných spotřebičů	242
9.4.	Literatura	244
10.	Numerické metody v elektrotepelné technice.....	245
10.1.	Diferenciální operace s vektory.....	245
10.2.	Křivkový integrál	248
10.3.	Besselovy funkce	249
10.4.	Maxwellovy rovnice	251
10.5.	Energie elektromagnetického pole.....	253
10.6.	Poyntingův zářivý vektor	254
10.7.	Vlnové rovnice elektromagnetického pole	257
10.7.1	Rovinné elektromagnetické vlnění	258
10.7.2	Válcové elektromagnetické vlnění.....	260
10.8.	Základy matematicko-fyzikálního modelování termického plazmatu.....	261
10.9.	Literatura	264

Seznam nejdůležitějších veličin elektrotepelné techniky

Zkratka	Význam	Jednotka
M	intenzita vyzařování	$W \cdot m^{-2}$
C	tepelná kapacita	$J \cdot K^{-1}$
J	proudová hustota	$A \cdot m^{-2}$
P	výkon	W
Q	teplo	J
S	plocha	m^2
T	termodynamická teplota	K
V	objem	m^3
W	energie	J
c	měrná tepelná kapacita	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
p_{skut}	skutečné povrchové zatížení	$W \cdot m^{-2}$
a	součinitel teplotní vodivosti	$m^2 \cdot s^{-1}$
q	hustota tepelného toku	$W \cdot m^{-2}$
h	Planckova konstanta	$J \cdot s$
t	čas	s
f	frekvence	Hz
α	součinitel přestupu tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
γ	konduktivita	$S \cdot m^{-1}$
ε	emisivita	-
ε	permitivita	$F \cdot m^{-1}$
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
Λ	vlnová délka	m
Λ	tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ	permeabilita	$H \cdot m^{-1}$
ρ	hustota	$kg \cdot m^{-3}$
ρ	rezistivita	$\Omega \cdot m$
$tg \delta$	ztrátový činitel	-
$\cos \varphi$	účinník	-
Φ	tepelný tok, tepelné ztráty	W
ϑ	teplota	$^{\circ}C$

Ostatní symboly a zkratky se vyskytují v textu s jejich okamžitým vysvětlením.

1. Úvod

Předkládaná kniha je určena především studentům elektrotechnických oborů, ale i dalších příbuzných oborů strojírenských, stavebních, hutnických a dalších, kde studenti řeší problematiku elektrotepelné techniky. Některé části knihy mohou využít i pracovníci v praxi. Elektrotepelná technika se zabývá přeměnou elektrické energie v teplo v různých druzích elektrotepelných zařízení popsanych v knize. Významná část je věnována energetickým problémům elektrotepelných zařízení v průmyslu, dále pak vytápění, klimatizaci a úsporám elektrické energie. Teoretické části knihy mohou být cennou pomůckou pro studium zejména v doktorském studijním programu.

Na zpracování knihy se podílel autorský kolektiv, který zpracoval tyto části:

prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc. zpracoval kapitolu č. 4 Elektrotepelná zařízení indukční, kapitolu č. 6 Obloukové pece a připojení na síť, kapitolu č. 8 Elektrické vytápění.

Ing. Vladimír Král, Ph.D. zpracoval kapitolu č. 2 Základy sdílení tepla, kapitolu č. 3 Elektrotepelná zařízení odporová, kapitolu č. 9 Klimatizace a úspory energie,

doc. Ing. Ilona Lázníčková, Ph.D. zpracovala kapitolu č. 5 Elektrotepelná zařízení dielektrická a mikrovlnný ohřev, kapitolu č. 7 Elektrotepelná zařízení plazmová, laserová a elektronová, kapitolu č. 10 Numerické metody v elektrotepelné technice.

Rád bych poděkoval studentům doktorského studijního programu Ing. Tomáši Šumberovi, Ing. Petru Zachovi a Ing. Janu Šrámkovi za technickou spolupráci při úpravách textů a obrázků v knize.

Na závěr si dovoluji poděkovat recenzentu, prof. Ing. Jiřímu Koženému CSc., za cenné připomínky a podněty ke zpracování předkládané knihy.

prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc.

2. Základy sdílení tepla

2.1. Pojmy, symboly, veličiny a jednotky

- **Termodynamická (TD) soustava** je vymezená část prostoru se svou látkovou náplní. Vně ní je její okolí. Soustava je od svého okolí oddělena hranicemi, ať již skutečnými, nebo smyšlenými. Vlastnosti této hranice určují její charakter z hlediska:
 - propustnosti látky:
 - otevřená hranice – může přes ní přecházet energie i látka,
 - uzavřená hranice – oběma směry může přecházet pouze energie, ne látka,
 - propustnosti energie:
 - neizolovaná hranice umožňuje přestup tepla i mechanické práce,
 - izolovaná hranice neumožňuje přestup tepla a mechanické práce mezi soustavou a jejím okolím,
 - stejnorodosti:
 - homogenní – vlastnosti soustavy jsou ve všech částech stejné,
 - nehomogenní – vlastnosti soustavy se v některých částech mění skokově.
- **Termodynamické proměnné** jsou vhodně zvolené funkce (veličiny), které vyjadřují vlastnosti TD soustavy a její vzájemnou interakci s okolím.
- **Termodynamický děj** vyjadřuje změny, ke kterým dochází v soustavě a nebo na její hranici s okolím. Je to posloupnost stavů soustavy, při kterých se TD proměnné mění v prostoru a čase.
- **Termodynamická rovnováha** je stav soustavy, kdy TD proměnné nezávisí ani na místě v soustavě, ani na čase. Tento stav nastává u izolované a uzavřené soustavy po uplynutí určitého času. Úplná termodynamická rovnováha je rovnováha tepelná, mechanická, chemická.
- **Energie** je TD proměnná vyjadřující schopnost soustavy vykonávat práci. Z fyzikální podstaty je třeba rozlišovat vnější a vnitřní energii.
- **Vnější energie** souvisí s pohybem a polohou soustavy v poli vnějších sil. Představuje energii kinetickou.
- **Vnitřní energie** souvisí s vnitřním stavem soustavy a mikrofyzikálními pohyby v ní. Vnitřní energie soustavy se rovná celkové energii, kterou jí musíme dodat, aby přešla z jednoho stavu do druhého.

- **Tepl**o je TD proměnná, kterou vyjadřujeme přírůstek nebo úbytek vnitřní energie soustavy, pokud tato energie nevykonává práci a pokud v soustavě neprobíhají chemické reakce a změny skupenství. Je to tedy část vnitřní energie soustavy, která se prostřednictvím mikrofyzikálních interakcí může vyměňovat s okolím. Tepl jako forma přenosu energie je vyjádřením působení neusměrněných mikroskopických sil. Není tedy stavovou veličinou, závisí totiž na způsobu vzájemné interakce soustavy s okolím.
- **Práce** je rovněž formou přenosu energie a jednou z forem, jakou je TD soustava ve vzájemné vazbě s okolím. Na rozdíl od tepla práce souvisí s působením makroskopických usměrněných sil (např. tlaku). Podobně jako tepl nezávisí na stavu soustavy, ale na vzájemné interakci s okolím. Proto také není stavovou veličinou. Práce je popisem uspořádaného vratného přenosu, zatímco tepl je popisem přenosu dokonale chaotického.
- **Termodynamická teplota** je stavová TD proměnná, která vyjadřuje tepelný stav soustavy, a je měrou její celkové vnitřní energie. Je to veličina kvantitativní. Dá se změřit prostřednictvím změny jiných fyzikálních vlastností soustavy, jakými jsou objem a tlak.
- **Zákony termodynamiky**
 - **Nultá věta (zákon) termodynamiky** – vyjadřuje zákon zachování energie. Neizolované TD soustavy, které jsou ve vzájemné interakci a zároveň v TD rovnováze, mají stejnou teplotu.
 - **1. termodynamická věta** vyjadřuje všeobecný princip zachování energie v TD soustavách. Definuje stavovou funkci - vnitřní energii, jenž je vlastností daného stavu uzavřené soustavy závislou na fyzikálních veličinách práce a tepl. Změna vnitřní energie je součtem tepla, které bylo dodáno do systému, a práce, která byla na systému vykonána.
 - **2. termodynamická věta** vyjadřuje skutečnost, že chladnější těleso nepředává tepl tělesu teplejšímu. Určuje tedy směr předávání tepelné energie. Je postavena na definici entropie, která je extenzivní funkcí definující stav systému. Entropie definuje neuspořádanost systému. Celková změna entropie v uzavřeném systému je součtem změny entropie uvnitř systému a entropie, která je do systému přenesena z jeho okolí.
 - **3. termodynamická věta** - při absolutní nulové teplotě je entropie látky rovna nule.
- **Teplotní rozdíl** - Pokud existuje v TD soustavě rozdíl teplot, pak dochází k výměně energií a k jejich vzájemnému vyrovnávání v podobě přenosu tepla. Každý element soustavy má svou vnitřní energii, tedy teplotu a vytváří tak skalární teplotní pole.
- **Tepelný výkon** P je tepl za jednotku času ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1} = \text{W}$), je roven tepelnému toku Φ . Je to veličina skalární.

$$P = \frac{Q}{t} \quad (2.1)$$

- **Hustota tepelného toku** q má směr daný normálou a vyjadřuje množství energie procházející daným průřezem za určitý čas. Jednotkou je $W \cdot m^2$.

$$q = \frac{dP}{dS} \quad (2.2)$$

- **Tepelná kapacita** C ($J \cdot K^{-1}$) je fyzikální veličina, která vyjadřuje množství tepla, kterým se těleso ohřeje o 1 K.
- **Měrná tepelná kapacita** c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) je tepelná kapacita jednoho kilogramu látky.

2.2. Kalorimetrické výpočty

Kalorimetrické výpočty patří k základním úlohám tepelné techniky. Typ materiálu určuje, jaké množství tepla je nutné dodat 1 kg látky, aby se ohřála o 1 teplotní stupeň. Schopnost látky akumulovat teplo určuje měrná tepelná kapacita c . Jedná se zpravidla o konstantu v určitém teplotním intervalu. Tab. 2.1 uvádí hodnoty této veličiny pro nejběžnější látky a materiály [2].

Látka	c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	Látka	c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
voda	4187	železo	450
vzduch ($^{\circ}C$)	1003	měď	383
ethanol	2460	zinek	385
led	2090	hliník	896
olej	2000	cín	227
suché dřevo ($^{\circ}C$)	1450	olovo	129
kyslík	917	zlato	129
křemík	703	platina	133

Tab. 2.1: Měrná tepelná kapacita látek a materiálů

Základní otázkou kalorimetrického výpočtu je, jaké množství tepla je zapotřebí pro ohřátí (ochlazení) látky o hmotnosti m při teplotním rozdílu ΔT . Kalorimetrická rovnice pak má tvar

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

Přeměna elektrické energie na tepelnou probíhá s účinností η . Celkově dodaná energie pak závisí na elektrickém příkonu zařízení a na čase. Pro elektrickou energii platí vztah:

$$Q_e = P \cdot t \quad (2.4)$$

kde P je příkon (W), t je čas (s).

Sloučením obou rovnic a zahrnutím účinnosti dostaneme výsledný vztah pro rovnováhu tepelné a elektrické energie:

$$m \cdot c \cdot \Delta T = P \cdot \eta \cdot t \quad (2.5)$$

Vztahy mezi nejběžněji používanými jednotkami uvádí následující tabulka.

Jednotka	J	Wh	cal
J	1	$2,778 \cdot 10^{-4}$	0,239
Wh	3600	1	860
cal	4,186	$1,163 \cdot 10^{-3}$	1

Tab. 2.2: Vztahy mezi jednotkami

2.3. Přenos energie a přenos tepla

Při využití tepla jak pro průmyslové aplikace, tak pro potřeby vytápění, se jeho šíření řídí podle obecného principu šíření energie, tedy z místa s větší hustotou energie k místu s menší hustotou energie. Objemová hustota energie ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$) je množství energie W příslušející jednotce objemu prostředí, tedy

$$w = \frac{dW}{dV} \quad (2.6)$$

Intenzitu přenosu energie pak vyjadřuje tepelný tok (výkon)

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad (2.7)$$

Hustota tepelného toku ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) se uvažuje jako průchod daného tepelného výkonu plochou $S = 1 \text{ m}^2$.

$$q = \frac{dP}{dS} = \frac{d^2Q}{dS \cdot dt} \quad (2.8)$$

Přenos energie (tepla) prostředím je realizován pomocí nosičů energie. Jsou to částice, které se v daném prostředí vyskytují, ale mají vyšší energii než částice v jejich blízkosti, nebo se do daného prostředí dostanou z okolí. Z toho důvodu jsou druh, rychlost a způsob pohybu částic odlišené a závisí na typu prostředí.

Může se jednat o elementární částice (elektrony, atomy), ale i elektromagnetické vlny, které přenášejí energii pomocí fotonů.

Existují dva konkrétní způsoby přemístování částic (nosičů energie) a závisí na koncentraci látkových částic v daném prostředí.

První způsob se uplatňuje zejména v prostředích s vysokou koncentrací částic (pevné nebo kapalné skupenství). Pak částice, které se pohybují proti gradientu hustoty energie, jsou v neustálém kontaktu s ostatními částicemi prostředí. Tato neustálá interakce mezi těmito částicemi se nazývá difúzí. Jedná se tedy o přirozený přenos tepla s míst s vyšší tepelnou koncentrací do míst s koncentrací nižší. Energie je odevzdávána prostřednictvím neustálých srážek mezi částicemi.

Další varianta tohoto způsobu přenosu tepla nastává v proudících kapalinách, kde k přenosu energie pomocí difúze ještě přispívá přenos energie hmotností prostředí. Jedná se tedy o způsob přenosu difúzně-konvekční a závisí silně na rychlosti proudění tekutiny.

Druhý a odlišný způsob přenosu energie se uskutečňuje v prostředí s nízkým obsahem částic. Přemístování nosičů energie probíhá zářením. To může mít například formu světla.

Tyto principy popisují přenos tepla prostředím a jsou pro ně odvozeny tyto tři způsoby přenosu tepla [1]:

- vedení tepla (kondukce),
- proudění tepla (konvekce),
- sálání tepla (záření, radiace).

2.4. Termodynamické procesy

Přenos tepla vedením, prouděním a sáláním a jejich případná kombinace představují tzv. termodynamické procesy.

2.4.1. Vedení tepla, přenos energie difúzí

Difúzní přenos energie ($W \cdot m^{-2}$) je podmíněn pohybem částic prostředí proti gradientu hustoty energie.

$$\varphi = -\frac{1}{2} \cdot v_{av} \cdot l_{av} \cdot \text{grad } w \quad (2.9)$$

kde výraz $\frac{1}{2} \cdot v_{av} \cdot l_{av} = a_D$ se nazývá také koeficientem difúzního přenosu energie.

Energii v tuhém prostředí, které má blízko termodynamické rovnováže, zastupuje pouze vnitřní energie, její hustota a teplota prostředí. Poté se změna této vnitřní energie dw a teploty dT rovná tepelné kapacitě v jednotce objemu prostředí. Proto lze využít analogie mezi $dw = du$

$$\frac{dw}{dT} \equiv \frac{du}{dT} = \rho \cdot c \quad (2.10)$$

$$dw \equiv du = \rho \cdot c \cdot dT \quad (2.11)$$

Pokud dosadíme rovnice (2.10) a (2.11) do (2.9), získáme hustotu tepelného toku vedením tepla.

$$\mathbf{q}_v = -a \cdot \text{grad } u = -a \cdot \text{grad } (\rho \cdot c \cdot T) \quad (2.12)$$

Pokud se bude měnit pouze gradient teploty, pak

$$\mathbf{q}_v = -a \cdot \rho \cdot c \cdot \text{grad } T = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (2.13)$$

Rovnice (2.13) vyjadřuje hustotu tepelného toku vedením tepla a zároveň je tato rovnice matematickým vyjádřením Fourierova zákona pro vedení tepla. Koeficient λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) vyjadřuje termofyzikální vlastnost prostředí a nazývá se **tepelná vodivost**.

Soubor fyzikálních parametrů

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (2.14)$$

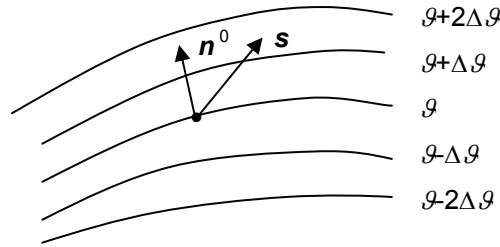
nazýváme **koeficient teplotní vodivosti** ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Ten je ekvivalentem koeficientu a_D v rovnici (2.9).

Teplotní pole může být

- z hlediska prostoru
 - jednorozměrné $\mathcal{G} = \mathcal{G}(x, t)$,
 - dvojrozměrné $\mathcal{G} = \mathcal{G}(x, y, t)$,
 - třírozměrné $\mathcal{G} = \mathcal{G}(x, y, z, t)$,
- z hlediska času
 - stacionární, např. $\mathcal{G} = \mathcal{G}(x, y, z)$,
 - nestacionární $\mathcal{G} = \mathcal{G}(x, y, z, t)$.

Při výpočtu tepelných ztrát a tepelné pohody prostředí se předpokládá ustálený stav, tj. řeší se případ stacionárního teplotního pole. Skutečné kolísání teplot v čase se zohlední v přidavných koeficientech uplatňovaných v užívaných vztazích.

Spojnice míst se stejnou hladinou tepelné energie se nazývají izotermie (Obr. 2.1), resp. izotermické plochy, a jsou to rovněž místa se stejnou teplotou.



Obr. 2.1: Izotermie

Největší změny teploty nastávají ve směru normály k izotermické ploše. Limitní hodnotou teplotního spádu je gradient teploty

$$\text{grad } g = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{\Delta g}{\Delta n} \mathbf{n}^0 \quad (2.15)$$

Je to vektor kolmý k izotermické ploše. Množina teplotních gradientů tvoří vektorové pole. Existence pole (je-li nenulové) znamená, že v prostoru dochází k šíření tepla.

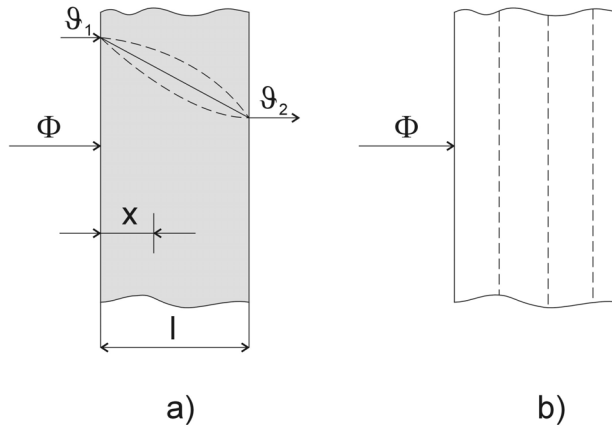
Vedení tepla rovinnou stěnou

Tepelný tok Φ (W) procházející homogenní rovinnou stěnou o tloušťce l , ploše S a rozdílu povrchových teplot g_1-g_2 (Obr. 2.2a) je

$$\Phi = \frac{\lambda}{l} \cdot S \cdot (g_1 - g_2) \quad (2.16)$$

Teplota g se zmenšuje lineárně se vzdáleností x z hodnoty g_1 na levém rozhraní na teplotu g_2 na pravém rozhraní (rovnice 2.17). Čárkovanou čarou na Obr. 2.2a nad lineárním průběhem je zobrazen skutečný průběh pro keramické materiály, pod lineárním průběhem pro čisté kovy. Na Obr. 2.2b jsou čárkovaně vyznačeny izotermické plochy.

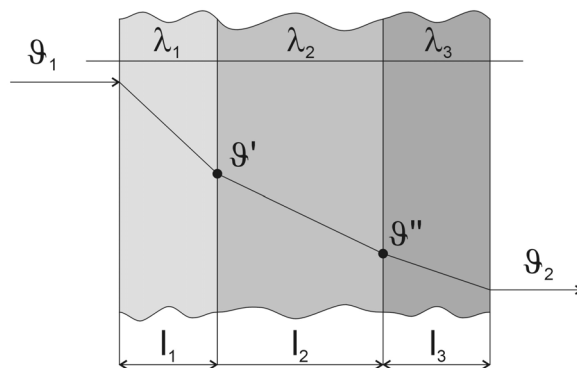
$$g = \frac{g_1 - g_2}{l} \cdot x + g_1 \quad (2.17)$$



Obr. 2.2: Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou

Je-li stěna složena z několika různě silných vrstev materiálů s rozdílnou tepelnou vodivostí (Obr. 2.3), pak tepelný tok touto konstrukcí je

$$\Phi = \frac{S \cdot (g_1 - g_2)}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n}} \quad (2.18)$$



Obr. 2.3: Vedení tepla složenou rovinnou stěnou

U složené rovinné stěny pro teplotu na rozhraní vrstev platí vztahy:

$$g' = g_1 - \frac{\Phi \cdot l_1}{\lambda_1 \cdot S} \quad (2.19)$$

$$g'' = g_2 + \frac{\Phi \cdot l_2}{\lambda_2 \cdot S} \quad (2.20)$$

Vedení tepla válcovou stěnou

Při vedení tepla z vnitřního povrchu tlustostěnné válcové trubky k vnějšímu povrchu (Obr. 2.4) se při vzrůstajícím průměru zvětšuje také plocha, kterou teplo prochází. Průběh teplot v závislosti na poloměru má proto tvar logaritmické křivky. Pro tepelný tok platí vztah

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot l \cdot (g_1 - g_2) \quad (2.21)$$

Pro složenou válcovou stěnu (Obr. 2.5) pak obdobně platí vztah

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (g_1 - g_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \quad (2.22)$$

Teploty na rozhraní vrstev pak vypočteme podle

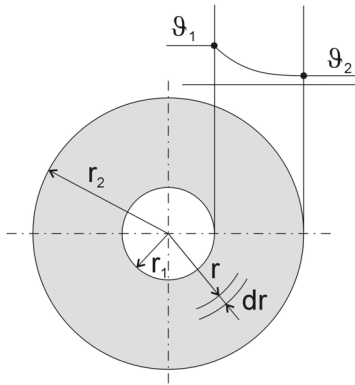
$$g' = g_1 - \frac{\Phi}{\pi \cdot l} \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d'}{d_1} \quad (2.23)$$

$$g'' = g_2 - \frac{\Phi}{\pi \cdot l} \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_2}{d''}$$

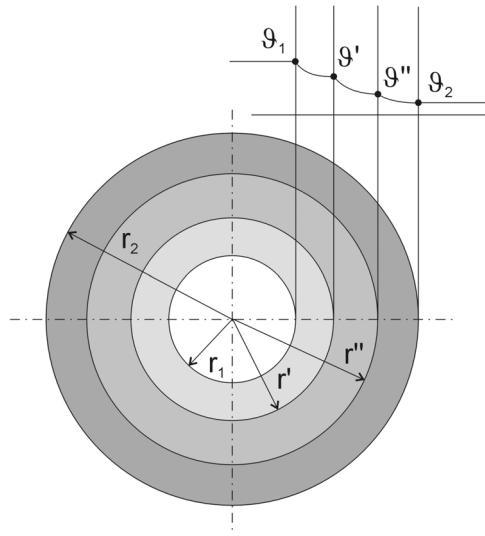
V následující tabulce jsou tepelné vodivosti vybraných materiálů.

Druh materiálu (látky)	Tepelná vodivost λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
vzduch	0,025 (při 20°C)
voda	0,6 (při 20°C)
led	2,2
tepelné izolanty	0,03 – 0,1
dřevo	0,1 - 0,5
stavební materiály	0,2 – 1,2
kámen	15 – 3,5
čisté kovy	50 – 400
slitiny	10 – 200

Tab. 2.3: Tepelné vodivosti vybraných materiálů



Obr. 2.4: Vedení tepla válcovou stěnou



Obr. 2.5: Vedení tepla složenou válcovou stěnou

2.4.2. Proudění tepla, přenos energie difúzně-konvekční

Konvekce je takový způsob přenosu tepla, který je vázán na přenos hmoty o určité vnitřní energii z jednoho místa na druhé. Z makroskopického pohledu se nejedná o přenos tepla, ale o přenos hmoty, na kterou je teplo vázané. Tento pohyb je iniciován buď gradientem teploty, nebo také vnějším působením (např. ventilátorem). Rozlišují se tedy dvě možnosti:

- přirozená konvekce,
- nucená konvekce.

V obou případech se přenos hmotnosti prostředí vyjadřuje pomocí vektoru hustoty toku hmotnosti ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$\mathbf{m}_k = \rho \cdot \mathbf{v} \quad (2.24)$$

Vektor hustoty tepelného toku proudění získáme vynásobením hustoty toku hmotnosti \mathbf{m}_k přenášenou vnitřní energií ($m \cdot c \cdot \vartheta$) v jednotce hmotnosti, tedy

$$\mathbf{q}_k = \mathbf{m}_k \cdot c \cdot T = \mathbf{v} \cdot \rho \cdot c \cdot T = \mathbf{v} \cdot u \quad (2.25)$$

což je v souladu s 1.větou termodynamiky a vyjadřuje přenos tepla pouze prouděním. V reálném prostředí se na přenosu tepla v prostředí podílí i difúze (difúzní přenos tepla). Celkový přenos tepla je poté difúzně-konvekční

$$\mathbf{q}_{v,k} = \mathbf{q}_v + \mathbf{q}_k = -\lambda \cdot \text{grad } T + v \cdot \rho \cdot c \cdot T \quad (2.26)$$

Příspěvek jednotlivých tepelných toků v rovnici (2.26), je závislý na druhu, rychlosti, termodynamických a hydrodynamických podmínkách prostředí. Toto posouzení je v praxi velmi složité a náročné, proto se pro běžné potřeby používá matematicko-experimentální model. Pro obtékání povrchu pevného prostředí s teplotou T_p a proudící tekutinou s teplotou T_i platí rovnice

$$\mathbf{q}_k = \alpha \cdot (T_p - T_i) = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.27)$$

To znamená, že hustota tepelného toku prouděním je přímo dána teplotním rozdílem mezi povrchem a tekutinou. Velikost hustoty ovlivňuje součinitel přestupu tepla α ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).

Součinitel přestupu tepla prouděním α je závislý na tlaku, teplotě a rychlosti proudění tekutiny, na druhu proudění (laminární nebo turbulentní) a na fyzikálních vlastnostech kapaliny (hustotě, měrné tepelné kapacitě, tepelné vodivosti a viskozitě) a dále na tvaru, rozměrech a drsnosti obtékaného tělesa. Následující tabulka uvádí hodnoty tohoto součinitele pro některé známé případy.

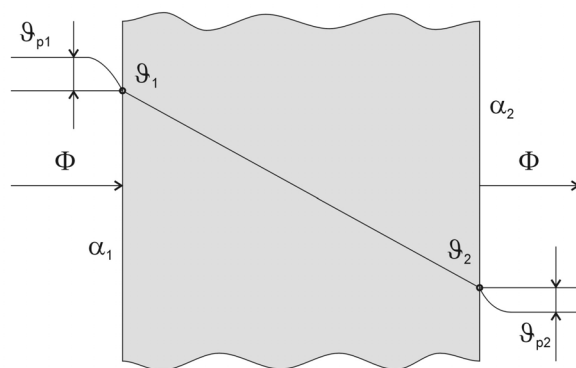
	α_{\min} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	α_{\max} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
klidný vzduch	12,5	125
proudící vzduch	40	2100
proudící kapalina	8400	21000
vroucí kapalina	16800	25100
kondenzující páry	29000	50000

Tab. 2.4: Hodnoty součinitele přestupu tepla [2]

Přenos tepla prouděním patří k nejobtížnějším výpočtovým problémům v tepelné technice. Zabývá se jím mnoho odborné literatury. V důležitých případech je nejlépe, určíme-li součinitel přestupu tepla α sami měřením na modelu co nejvíce odpovídajícím našemu případu při použití uvedených vztahů v nichž se α vyskytuje. Při přestupu tepla prouděním (Obr. 2.6) platí Newtonův zákon:

$$\Phi = \alpha_1 \cdot (\mathcal{G}_{p1} - \mathcal{G}_1) \cdot S \quad (2.28)$$

$$\Phi = \alpha_2 \cdot (\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_{p2}) \cdot S \quad (2.29)$$



Obr. 2.6: Přenos tepla prouděním

Mezi teplotou prostředí a teplotou povrchu je i v ustáleném stavu teplotní rozdíl daný tím, že na povrchu stěny lpí vždy tenká vrstva plynu nebo kapaliny, která se neúčastní proudění. Touto vrstvou prochází tepelný tok pouze vedením, a protože tepelná vodivost plynů a kapalin je malá, nastává zde teplotní skok.

2.4.3. Přenos tepla sáláním

Přenos tepla sáláním se liší od vedení a proudění jiným mechanismem přenosu. Přenos energie, respektive tepla, se děje pomocí elektromagnetických vln v celém rozsahu vlnových délek. Elektromagnetické vlnění je vytvářeno každým neprůzračným tělesem o teplotě větší než 0 K a zároveň okolní záření pohlcuje.

Záření lze rozložit na jednotlivé složky, kterým odpovídají jednotlivé vlnové délky, a můžeme tak získat vyzařované spektrum.

Na těleso rovněž dopadá tepelný tok od ostatních těles v prostoru. K ohřevu tělesa pochopitelně dochází, přijímá-li ze svého okolí více energie než samo vyzáří a naopak. Množství vyzařované energie je úměrné ploše aktivního povrchu tělesa a čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty. Je rovněž závislé na charakteru povrchu tělesa. Tok energie dopadající na těleso lze rozdělit na tři části:

- A - pohlcený tok (A je poměrná pohltivost – absorpce),
- B – odražený tok (B je poměrná odrazivost - reflexe),
- C - prostupující tok (C je poměrná propustnost).

Musí platit

$$A + B + C = 1 \quad (2.30)$$

Lze definovat tyto extrémy:

$A = 1$ absolutně černý povrch (celá energie tepelného toku je tělesem pohlcena),

$B = 1$ absolutně bílý povrch (veškerá energie je tělesem odražena),

$C = 1$ průzračné (průteplivé) prostředí - dvouatomové plyny a vzduch,

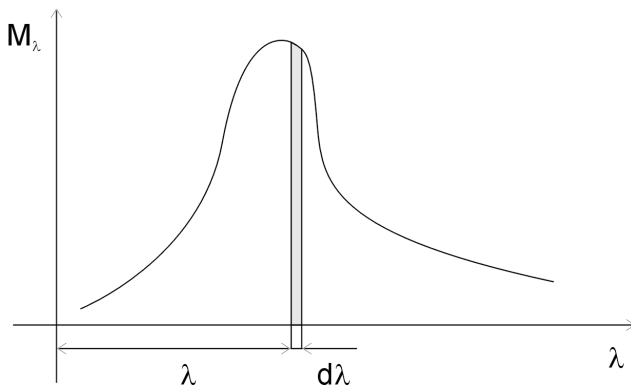
$C = 0$ tepelně neprůzračné prostředí - např. kovy.

Tyto koeficienty mohou být závislé na frekvenci elektromagnetické vlny, proto je možné definovat jejich spektrální hodnoty, a pro všechny vlnové délky musí platit

$$A_\lambda + B_\lambda + C_\lambda = 1 \quad (2.31)$$

Zákony sálání

Přenos tepla sáláním (zářením) se řídí fyzikálními zákony. Povrch zahřátého absolutně černého tělesa vyzařuje souvislé spektrum záření o různých vlnových délkách (Obr. 2.7).



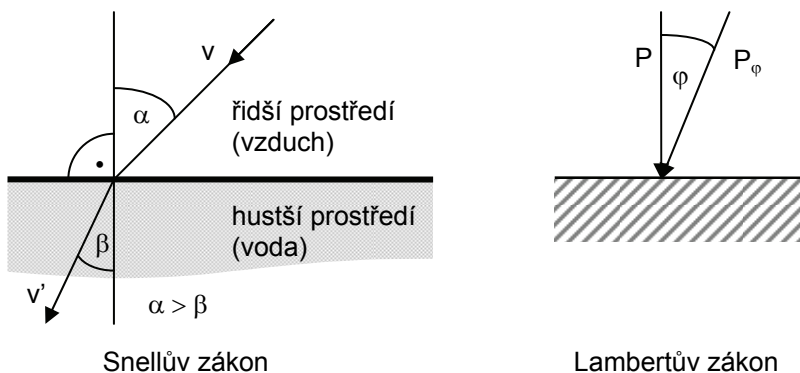
Obr. 2.7: Průběh spektrální zářivosti v závislosti na vlnové délce

Snellův zákon

Snellův zákon vyjadřuje charakter šíření záření při přechodu z jednoho prostředí do druhého (Obr. 2.8). Pro směr šíření platí vztah

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v}{v'} = n \quad (2.32)$$

kde n je index lomu, v a v' jsou rychlosti šíření v daných prostředích.



Obr. 2.8: Šíření záření na přechodu dvou prostředí [4]

Zákon Lambertův

Zákon Lambertův říká, že výkonově se uplatňuje pouze kolmá složka záření.

$$P = P_{\varphi} \cdot \cos \varphi \quad (2.33)$$

kde φ je úhel dopadu záření, P_{φ} je energie ve směru úhlu φ .

Zákon Stefan-Boltzmannův

Zákon Stefan-Boltzmannův popisuje celkovou intenzitu záření absolutně černého tělesa. Tento zákon říká, že intenzita vyzařování M ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (2.34)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$, T je termodynamická teplota v K.

Zákon Planckův

Zákon Planckův popisuje závislost spektrální intenzity záření M_{λ} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$) absolutně černého tělesa na jeho povrchové teplotě

$$M_{\lambda} = f(T, \lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2.35)$$

kde $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$.

Rovnice (2.35) udává vyzářený výkon z 1 m² plochy pouze pro 1 vlnovou délku λ . Celkový vyzářený výkon bude sumou pro všechny vlnové délky, tedy pro $\lambda = 0$ do $\lambda = \infty$.

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(T, \lambda) \cdot d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} \cdot d\lambda \quad (2.36)$$

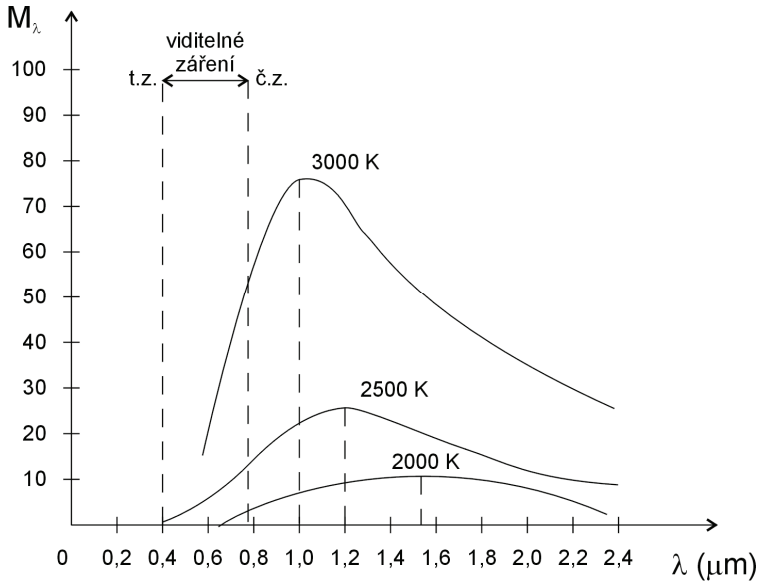
Integrací a dosazením konstant dostaneme vztah

$$M(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (2.37)$$

což je vztah vyjadřující Stefan-Boltzmannův zákon - viz. rovnice (2.34).

Zákon Wienův

Spektrální intenzita záření M_λ je za dané teploty nejintenzivnější pro vlnovou délku λ_m , která je nepřímo úměrná této teplotě T . Z toho vyplývá, že těleso vyzařuje svým povrchem při nízké teplotě pouze dlouhovlnné (infráčervené) záření. S rostoucí teplotou tedy nejen stoupá zářivost tělesa, ale maximum vyzařovaného spektra se rovněž posouvá ke kratším vlnovým délkám – Wienův posunovací zákon



Obr. 2.9: Wienův posunovací zákon

$$\lambda_m = \frac{2892}{T} \quad (2.38)$$

Lidské oko je přizpůsobeno slunečnímu záření, které má maximum v oblasti barvy žlutozelené, odpovídající vlnové délce $\lambda = 500 \text{ nm}$. Dosazením této hodnoty do Wienova zákona dostaneme teplotu slunečního povrchu

$$T = \frac{2892}{0,5} = 5784 \text{ K} \quad (2.39)$$

Zákon Kirchhoffův

Zákon Kirchhoffův platí pro spektrální i úhrnnou zářivost šedých těles ve vztahu k tělesům s absolutně černým povrchem.

Poměr úhrnné zářivosti a relativní pohltivosti šedého tělesa je závislý pouze na absolutní teplotě tělesa T a nezávisí na barvě povrchu. Můžeme tedy napsat Kirchhoffův zákon pro záření také v této podobě – pro spektrální zářivost:

$$\frac{M_{\text{š}}}{A_{\text{š}}} = f(T) = \frac{M_{\text{č}}}{A_{\text{č}}} = M_{\text{č}} \quad (2.40)$$

$$\frac{M_{\lambda\text{š}}}{A_{\lambda\text{š}}} = f(T, \lambda) = M_{\lambda\text{č}} \quad (2.41)$$

kde $M_{\text{š}}$, $M_{\text{č}}$ ($M_{\lambda\text{š}}$, $M_{\lambda\text{č}}$) jsou úhrnné (spektrální) zářivosti šedého a černého povrchu a $A_{\text{š}}$, $A_{\text{č}}$ ($A_{\lambda\text{š}}$, $A_{\lambda\text{č}}$) jsou relativní (spektrální) pohltivosti šedého a černého povrchu.

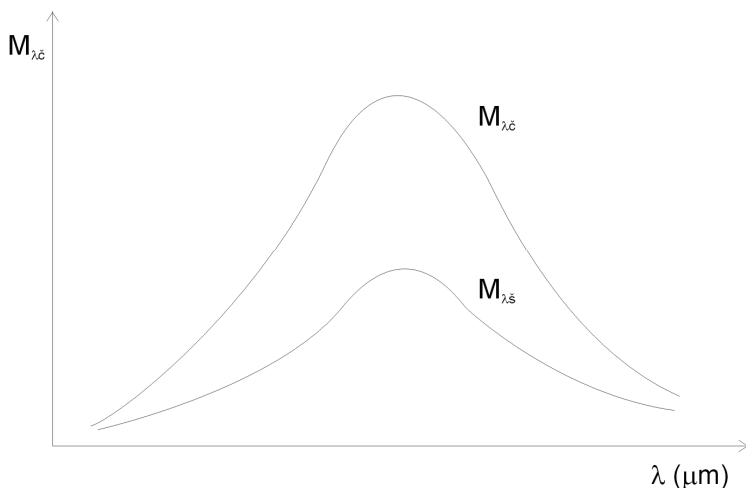
Z křivek na Obr. 2.9 vidíme, že absolutně černý povrch vyznačuje plynulé spektrum zářivosti, nepřerušované mezerami. Pro většinu skutečných, tj. fyzikálně šedých povrchů, je křivka spektrální zářivosti rovněž nepřerušovaná a je podobná křivce černého tělesa (Obr. 2.10). Můžeme tedy napsat:

$$\frac{M_{\lambda\text{š}}}{M_{\lambda\text{č}}} = \text{konst.} = \varepsilon \quad (2.42)$$

Nebo jinak:

$$A_{\text{š}} = \frac{M_{\text{š}}}{M_{\text{č}}} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma_{\text{č}} \cdot T^4}{\sigma_{\text{č}} \cdot T^4} = \varepsilon \quad (2.43)$$

Můžeme tedy říci, že poměrná pohltivost $A_{\text{š}}$ je číselně rovna stupni černosti ε uvažovaného povrchu.



Obr. 2.10: Spektrální zářivost pro černý a šedý povrch

Informativní hodnoty emisivity jsou v následující tabulce.

Materiál	Emisivita ϵ (-)
absolutně černé těleso	1
saze, grafit	0,95
zoxidovaná ocel	0,85-0,95
zoxidovaná měď	0,7
cihla pálená	0,9
cihla šamotová	0,8
zoxidovaný hliník	0,3
lesklý hliník	0,1
leštěná ocel	0,29
leštěný nikl	0,07
leštěné stříbro	0,02
voda, led (hladký povrch)	0,96
sklo	0,94

Tab. 2.5: Hodnoty emisivity [2]

Vzájemné ozařování povrchů těles

Těleso o ploše S vyzařuje sálavý tok:

$$\Phi = M \cdot S = \sigma \cdot T^4 \cdot S \quad (2.44)$$

Budeme uvažovat dvě tělesa o plochách S_1 , S_2 , termodynamických teplotách povrchů T_1 , T_2 a o emisivitách ϵ_1 a ϵ_2 . Pak pro sálavý tepelný tok v ustáleném stavu platí pro

- případ dvou povrchů, které tvoří uzavřenou obálku

$$\Phi = \frac{\sigma_{\varepsilon} \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_1} + \frac{1}{F_{12} \cdot S_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_2}} \quad (2.45)$$

kde F_{12} je faktor osálení (jak na sebe povrchy vidí),

- případ dvou rovnoběžných, stejně velkých ploch, kdy $S_1 = S_2 = S$, $F_{12} = 1$

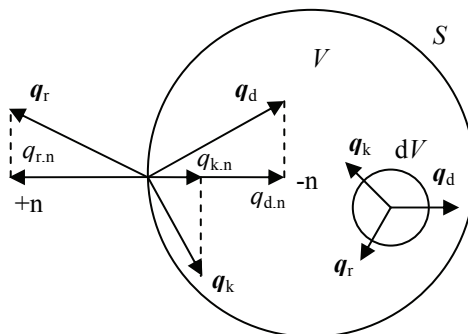
$$\Phi = \frac{S \cdot \sigma_{\varepsilon} \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.46)$$

- případ dvou těles, kdy jedno zcela prostorově obklopuje druhé, tedy $S_1 \ll S_2$

$$\Phi = \frac{S_1 \cdot \sigma_{\varepsilon} \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (2.47)$$

2.5. Všeobecná rovnice šíření energie

Podstatu šíření energie lze využít pro sestavení matematického modelu – rovnice šíření energie v prostředí. Výchozí předpoklad je, že prostředí má charakter uzavřené, ale neizolované TD soustavy. Tato soustava je schopna pouze výměny energie s okolím.



Obr. 2.11: Šíření energie v neizolované TD soustavě [1]

Prostředí se nachází v nestacionárním stavu a nemá vnitřní zdroj energie. Po-

kud se uplatní zákon o zachování energie, je možné vyjádřit energetickou bilanci takového prostředí takto: změna celkové energie prostředí o objemu V v elementárním čase dt se rovná součtu všech možných toků energie do a ven z prostředí přes hraniční povrch S ve stejném čase dt .

Za změnu celkové energie prostředí můžeme považovat změnu všech možných složek, které se nacházejí v prostředí [1]:

změnu vnitřní energie dU

$$dU = \int_V du \cdot dV = \int_V d(\rho \cdot c \cdot \vartheta) \cdot dV \quad (2.48)$$

změnu kinetické energie dW_k

$$dW_k = \int_V dw_k \cdot dV = \int_V d\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2\right) \cdot dV \quad (2.49)$$

změnu potenciální energie dW_p

$$dW_p = \int_V dw_p \cdot dV = \int_V d\left(\sum_{i=1}^n \rho_i \cdot e_i\right) \cdot dV \quad (2.50)$$

změnu energie záření dW_r

$$dW_r = \int_V dw_r \cdot dV \quad (2.51)$$

Součtem změn jednotlivých energií získáme celkovou změnu energie zkoumané termodynamické soustavy

$$dW = dU + dW_k + dW_p + dW_r \quad (2.52)$$

Příčinou výše uvedených změn je existence vnitřního zdroje energie a následná interakce TD soustavy s okolím prostřednictvím jednotlivých toků energie.

Vnitřní zdroj energie se dá definovat pomocí objemové hustoty w_z

$$W_z = \int_V dw_z \cdot dV \quad (2.53)$$

jehož časová změna vyjadřuje tzv. objemovou hustotu energie vnitřního zdroje

$$q_z = \frac{dw_z}{dt} \quad (2.54)$$

Pokud vektory hustoty jednotlivých toků vyjádříme prostřednictvím normálových složek k povrchu S soustavy (Obr. 2.11), pak tato změna je dána rovnicí

$$\frac{dW}{dt} = - \int_S (\mathbf{q}_d + \mathbf{q}_k + \mathbf{q}_r) \cdot d\mathbf{S} \quad (2.55)$$

čemuž odpovídá identická rovnice

$$\frac{dW}{dt} = - \int_V \operatorname{div}(\mathbf{q}_d + \mathbf{q}_k + \mathbf{q}_r) \cdot dV \quad (2.56)$$

Obraz o celkové energetické bilanci uvažovaného prostředí – TD soustavy bez vnitřního zdroje pak vyjadřuje rovnice

$$\int_V [du + dw_k + dw_p + dw_r] \cdot dV = \left[- \int_V \operatorname{div}(\mathbf{q}_d + \mathbf{q}_k + \mathbf{q}_r) \cdot dV \right] \cdot dt + \left[\int_V \operatorname{div} \mathbf{q}_z \cdot dV \right] \cdot dt \quad (2.57)$$

Tato rovnice se nazývá všeobecnou rovnicí šíření energie. Změny jednotlivých forem energie obsažených v jednotce objemu soustavy za jednotku času jsou vždy výsledkem působení vnitřního zdroje energie (pokud existuje) a přenosu energie přes jednotku plochy povrchu soustavy, vyjádřené vektory možných toků energií.

Rovnice (2.57) nemá přímé praktické uplatnění, protože neexistuje všeobecné prostředí, ve kterém by se současně měnily všechny obsažené formy energie a zároveň by se uplatnily všechny toky energie. Partikulární řešení této rovnice respektující podmínky přenosu energie a charakter prostředí lze nalézt v [1].

2.6. Základní kritéria podobnosti teplotních polí v pevném prostředí

Fourierovo kritérium

$$Fo = \frac{a}{l_{ch}^2} \cdot \tau = \frac{\lambda \cdot l_{ch}}{\rho \cdot c \cdot l_{ch}^3} \cdot \tau \quad (2.58)$$

kde l_{ch} je charakteristický rozměr prostředí.

Fourierovo číslo Fo je bezrozměrný čas tepelného děje a vyjadřuje poměr času probíhajícího tepelného procesu k času molekulární difúze tepla. V bezrozměrově vyjádřeném čase se projevuje vztah mezi rychlostí změny teplotního pole, fyzikálními parametry a rozměry tepelného systému. Ve druhém tvaru vyjadřuje poměr tepla přenášeného v systému vedením k teplotě akumulované v systému.

Biotovo kritérium

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l_{ch}}{\lambda} = \frac{s/\lambda}{1/\alpha} = \frac{R_\lambda}{R_\alpha} \quad (2.59)$$

Biotovo kritérium Bi vyjadruje pomer tepelného toku prenášaného povrchom vsázky prouděním k tepelnému toku prenášanému uvnitř vsázky vedením. To je vlastně pomer tepelného odporu vlastní vsázky R_λ k tepelnému odporu rozhraní povrch vsázky – okolí R_α .

A nebo jinak řeceno, v prvním tvaru vyjadruje pomer charakteristicke délky tělesa k ekvivalentní tloušťce prostředí přiléhajícího k povrchu. Při $Bi > 100$ je tepelný odpor při přestupu tepla na povrchu nepatrný proti tepelnému odporu vedením. Teplotní pole se vyznačuje značnou nerovnoměrností. Naopak při $Bi < 0,1$ je teplotní spád na povrchu tělesa velký, uvnitř tělesa nepatrný a teplotní pole je rovnoměrné.

Kritérium nerovnoměrnosti teplotního pole

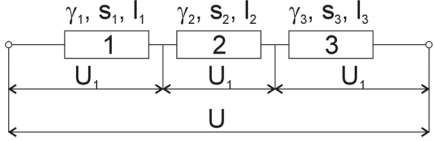
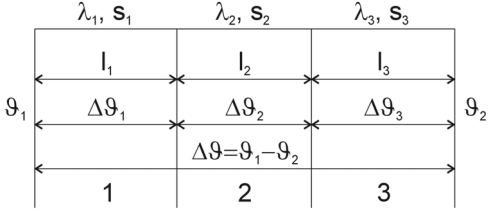
$$\Psi = \frac{\vartheta_o - \vartheta_p}{\vartheta_o - \vartheta_{ob}} \quad (2.60)$$

Kritérium nerovnoměrnosti teplotního pole Ψ vyjadruje pomer rozdílu teploty prostředí a povrchové teploty tělesa ($\vartheta_o - \vartheta_p$) k rozdílu teploty prostředí a středně integrální objemové teploty ($\vartheta_o - \vartheta_{ob}$). Charakterizuje nerovnoměrnost teplotního pole v tělese.

2.7. Analogie mezi teplotním a elektrickým polem

Analogie podstatně usnadňuje výpočty šíření tepla v jednodušších soustavách a v ustáleném stavu. Stacionární proudové pole a stacionární teplotní pole jsou nevírová, nezřídlová, proto platí Laplaceova věta. V Tab. 2.6 jsou uvedeny příklady analogie mezi polem elektrickým a teplotním.

Pole elektrické	Pole teplotní
Potenciál Nulový potenciál je v nekonečnu skalární veličina, jednotka (V)	Termodynamická teplota Absolutní nula = -273,15 °C Skalární veličina, jednotka (K)
Napětí $U = V_1 - V_2$ (V)	Teplotní rozdíl $\Delta T = T_1 - T_2$ (K)
Konduktivita γ (S·m ⁻¹)	Tepelná vodivost λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Rezistivita $\rho = \frac{1}{\gamma}$ (Ω·m)	Měrný tepelný odpor $\frac{1}{\lambda}$ (m·K·W ⁻¹)

<p>Elektrická vodivost</p> $G = \frac{\gamma \cdot S}{l} \text{ (S)}$	<p>Tepelná vodivost</p> $G = \frac{\lambda \cdot S}{l} \text{ (W} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$
<p>Elektrický odpor</p> $R = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{\rho \cdot l}{S} \text{ (}\Omega\text{)}$	<p>Tepelný odpor</p> $R = \frac{l}{\lambda \cdot S} \text{ (K} \cdot \text{W}^{-1}\text{)}$
<p>Elektrický proud</p> $I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \text{ (A)}$	<p>Tepelný tok</p> $\Phi = \int_S \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} \text{ (W)}$
<p>Odpor v sérii</p>  <p style="text-align: center;">$R = R_1 + R_2 + R_3$</p>	<p>Vedení tepla složenou stěnou</p>  <p style="text-align: center;">$R = R_1 + R_2 + R_3$</p>

Tab. 2.6: Příklady elektrotepelné analogie [3]

2.8. Literatura

- [1] Novák, P.: Elektrické teplo. Základy a teorie elektrických ohrevů a aplikací. Equilibria, s.r.o, Košice 2010, ISBN 978-80-89284-48-1
- [2] Baxant, P., Drápela, J., Lázníčková, I.: Elektrotepelná technika. Elektronické skriptum FEKT VUT v Brně, Brno, 2006
- [3] Hradílek, Z.: Elektrotepelná technika. VŠB – TU Ostrava, Ostrava, 1996
- [4] Rada J.: Elektrotepelná technika, SNTL, Praha, 1985
- [5] Metaxas, A. C.: Foundations Of Electroheat. 1996. ISBN 0-471-95644-9
- [6] Isachenko, V., Osipova, V., Sukomel, A.: Heat Transfer, Mir Publisher, Moscow 1969.
- [7] Novák, P.: Elektrické ohřevy, I.část - Odporový ohrev. Mercury-Smékal, Košice 2002, ISBN 80-89061-60-5
- [8] Hradílek, Z. a kol.: Elektrotepelná technika. Simulace - počítačové programy. Skripta VŠB-TU, Ostrava 2001, ISBN 80-7078-874-7
- [9] Kuneš, J.: Modelování tepelných procesů. SNTL Praha 1989, ISBN 80-03-00134-X
- [10] Příhoda, M., Rédr, M.: Sdílení tepla a proudění. VŠB Ostrava 1998, ISBN 80-78-549-7

3. Elektrotepelná zařízení odporová

3.1. Přímý odporový ohřev

V zařízeních pro přímý odporový ohřev vzniká teplo přímým průchodem proudu elektricky vodivou pevnou vsázkou nebo elektricky vodivou kapalinou – elektrolytem obklopujícím vsázkou. Teoretické základy přímého odporového ohřevu jsou jednoduché (Jouleův zákon). Prochází-li vodičem o odporu R po dobu t proud I , vzniká ve vodiči teplo Q .

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t \quad (3.1)$$

Odpor vodiče o délce l (m) a průřezu s (mm²) je

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \quad (3.2)$$

kde ρ je rezistivita materiálu. Tato je u většiny materiálů závislá na teplotě. Při oteplení o ΔT je

$$R_g = R \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (3.3)$$

kde α je teplotní činitel odporu, který je pro většinu kovů kladný, pro keramické materiály záporný a je silně závislý na teplotě.

Výpočty a projektování těchto zařízení nejsou snadné. Zde se projevují obtíže související s nelineární závislostí fyzikálních vlastností vsázky či elektrolytu na teplotě. Jde zejména o rezistivitu, měrnou tepelnou kapacitu a také o tepelnou vodivost. Tyto veličiny ovlivňují tepelnou bilanci ohřevu, kterou lze vyjádřit vztahem

$$Q = Q_u + Q_z \quad (3.4)$$

kde Q je teplo vzniklé průchodem proudu, Q_u je užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky a Q_z jsou tepelné ztráty. Uvedená tepelná bilance tvoří základ k určení potřebného výkonu:

$$P \approx \frac{dQ}{dt} \quad (3.5)$$

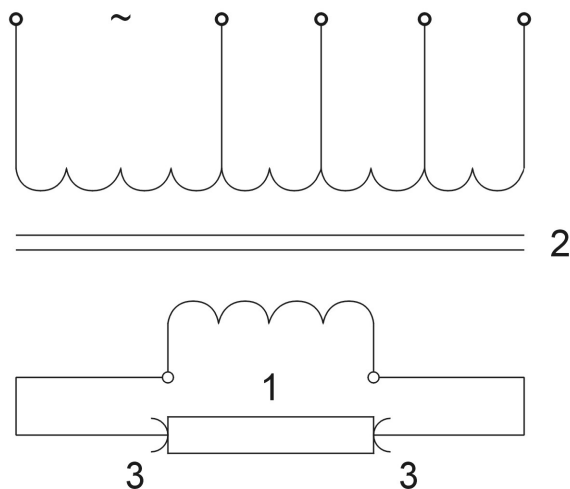
Ten závisí na časovém průběhu ohřevu vsázky. Celkový odebíraný výkon P_c elektrotepelného zařízení se zvětšuje o tepelné ztráty způsobené vsázcím zařízením, ochlazováním vsázky, o výkon potřebný pro pohon mechanismů a o ztráty příslušného transformátoru.

Podle vzniku tepla lze zařízení pro přímý odporový ohřev dělit na dva základní typy:

- zařízení pro ohřev pevné vsázky,
- zařízení pro ohřev tekuté vsázky.

3.1.1. Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů apod.

Princip odporového ohřevu je schematicky znázorněn na obr. Obr. 3.1. Délka ohřívané tyče musí být nejméně 10krát delší než její průměr, aby byl ohřev dostatečně rovnoměrný po celé délce. Do tyče 1 konstantního průřezu je z regulačního transformátoru 2 zaváděn kontakty 3 velký proud. Ohřev je velmi rychlý a účinný.

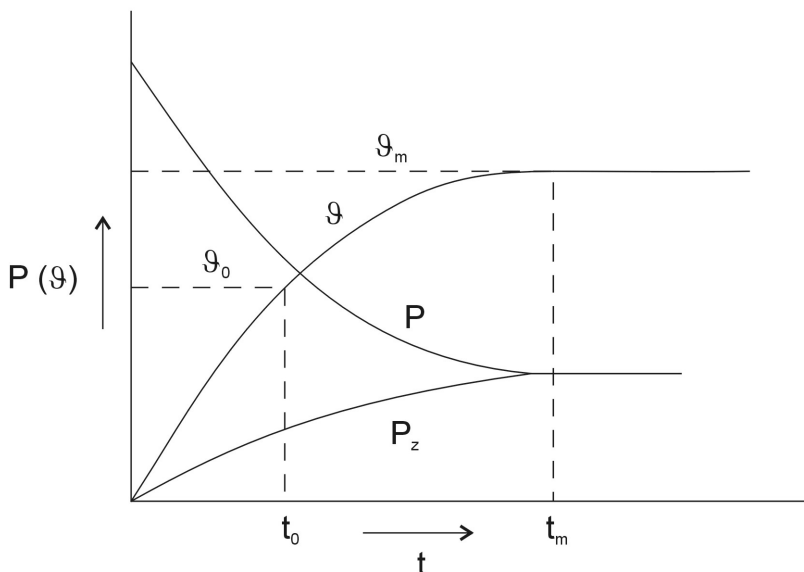


Obr. 3.1: Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů a pásů

Optimální poměry nastávají, jestliže se činný odpor tyče rovná impedanci celého přívodního vedení. Tomu se blíží studená měděná tyč. Odpor oceli však stoupá až 7krát při ohřátí z 20 °C na 1200 °C. Aby impedanční přizpůsobení bylo přijatelné, zvyšujeme během ohřevu napětí na tyči souhlasně s růstem odporu přepínáním odboček na vstupním vinutí transformátoru. Konce tyčí musí být pokud možno čisté, kontakty bývají měděné, chlazené vodou a jsou k ohřívané tyči přitlačovány pneumaticky nebo hydraulicky.

Ohřev přímým průchodem proudu se výhodně aplikuje při výkonech do 100 kW a ve zvláště vhodných případech. U jednofázového zařízení nad 500 kW je nutno použít symetrizační zařízení.

Průběhy příkonu, teploty a ztrát při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče bez přepínání napětí jsou na Obr. 3.2. Příkon klesá podle růstu odporu tyče s teplotou, tepelné ztráty rostou. Rovná-li se příkon ztrátám, dosáhla teplota své mezní hodnoty. Teplota ohřevu musí být menší než mezní.



Obr. 3.2: Průběhy příkonu, teploty a ztrát

Účinník $\cos \varphi$ je u přímého odporového ohřevu nízký, je to proto, že se výrazně uplatňuje reaktance přívodů ke kontaktům u vysokých proudů. Zapínáním a vypínáním transformátoru při ohřevu dochází ke kolísání napětí v síti. U zařízení jedno-fázového nad 500 kW je nutno použít symetrizačního zařízení.

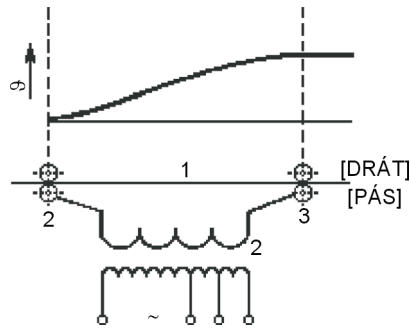
Při přímém ohřevu ocelových feromagnetických tyčí střídavým proudem se uplatňuje značně povrchový jev. Největší teplo (86,4 %) vzniká přibližně v tzv. hloubce vniku a . Lze ji určit podle vztahu:

$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (3.6)$$

kde ρ je rezistivita tyče, ω je úhlová rychlost, μ_0 je permeabilita vakua a μ_r je relativní permeabilita.

Pro běžnou konstrukční ocel (magnetickou) do teploty 768 °C (Curierův bod – ztráta feromagnetismu) je hloubka vniku a při frekvenci 50 Hz řádově v jednotkách mm. Nad teplotu 768 °C je ρ asi 7krát větší a hloubka vniku je asi 70 mm.

Zařízení pro průběžný ohřev drátu nebo pásu je znázorněno schematicky na Obr. 3.3. Drát nebo pás 1 je do proudového obvodu výstupní strany transformátoru 2 připojen kladkami 3 (nebo grafitovými bloky).

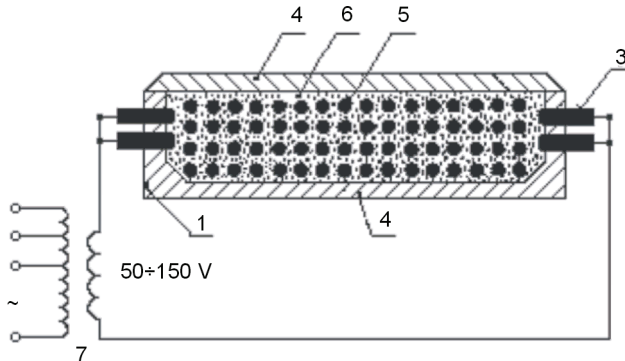


Obr. 3.3: Zařízení pro průběžný ohřev

Konečné teploty ohřevu lze docílit změnou napětí mezi kladkami, změnou jejich vzájemné vzdálenosti, změnou protahovací rychlosti drátu. Popsaný ohřev se používá např. pro měkké žhánání měděných drátů a pásů před izolací pláštěm, pro ohřev ocelových tyčí pro kování, pro ohýbání, kalení drátů do předpjatého betonu apod.

3.1.2. Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku

Grafit a karbid křemíku (karborundum) se vyrábějí v Achesonových pecích (Obr. 3.4). Grafit se vyrábí z uhlíku tzv. grafitizace – chemickým procesem probíhající při teplotě kolem 2500 °C, při němž se amorfni uhlík strukturálně mění v grafit s vynikajícími fyzikálními, chemickými i mechanickými vlastnostmi.



Obr. 3.4: Grafitační pec Achesonova

Na Obr. 3.4 je 1 dno pece, 2 čelní stěna, 3 jsou grafitové bloky, 4 víko pece, 5 vsázka, 6 zásylová směs a 7 napájecí transformátor.

Pece mají délku až 20 m s hmotností vsázky 50 t i více. Příkon transformátorů až do 10 MVA. Napájecí napětí je regulováno v rozsahu 50 V až 150 V. Tyto pece mají malý $\cos\varphi$ (kolem 0,5) a zatěžují napájecí síť nerovnoměrně. Proto u pecí s velkými výkony se používá symetrizační zařízení. Při napájení stejnosměrným proudem odpadá kompenzace i symetrizace a regulace výkonu je snazší.

Spotřeba elektrické energie na výrobu 1 kg grafitu se podle velikosti pece a druhu výrobků pohybuje od 4 kWh do 6 kWh, na 1 kg karbidu křemíku asi 8 kWh. Ohřev trvá 2 až 4 dny, po vypnutí pec chladne 10 až 14 dnů, pak se vsázka z pece vyjme.

3.1.3. Termická elektrolýza

Elektrolyt se zahřívá přímým průchodem stejnosměrného proudu za současně probíhající elektrolýzy nebo rafinace. Nejrozšířenější termickou elektrolýzou je elektrolytická výroba hliníku, používá se také k výrobě sodíku a hořčíku.

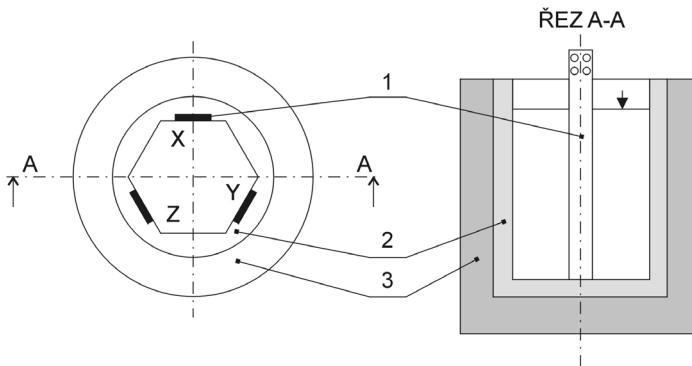
Hliník se vyrábí z bauxitu (Al_2O_3), který má tavicí teplotu asi 2050 °C. Rozpuštěním bauxitu v roztaveném kryolitu (fluorid hlinito-sodný) lze však elektrolýzou již při 950 °C získávat hliník, což je technicky mnohem výhodnější.

Na výrobu 1 kg je spotřeba elektrické energie podle velikosti a technického stavu zařízení 16 kWh až 22 kWh.

3.1.4. 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 1 400 °C. Dělí se na dva základní typy:

- Proud prochází nejen elektrolytem, ale i vsázkou ponořenou v elektrolytu, příkon závisí na vsázce. Na Obr. 3.5 jsou 1 elektrody, 2 keramický kelímeček a 3 jeho tepelná izolace.
- Vsázka se vkládá do soli v místě, kde není elektrické pole a vsázkou proud neprochází, příkon na vsázce nezávisí.



Obr. 3.5: Solná lázeň 1. typu

Elektrody mají velké stykové plochy, aby se zabránilo nadměrnému místnímu přehřátí. Teplo vzniká průchodem elektrického proudu roztavenou solí. Používané soli jsou v tuhém stavu nevodivé. Proto je nutno použít přídatný odporový topný článek, který nataví tenkou vrstvu soli a pak se odpojí. Další ohřev nastává prů-

chodem proudu touto vrstvou. Při ohřevu soli klesá její odpor, takže je potřebný k napájení transformátor s možností regulace sekundárního napětí v rozsahu 4 až 24 V. Podle pracovní teploty solné lázně se volí směs soli, která nejlépe vyhovuje.

Složení směsi (%)	Pracovní teplota (°C)
55 KNO ₃ + 45 NaNO ₃	230 ÷ 480
28 NaCl + 72 CaCl ₂	550 ÷ 870
50 Na ₂ CO ₃ + 50 KCl	600 ÷ 820
65 Na ₂ CO ₃ + 35 NaCl	650 ÷ 880
20 KCl + 80 BaCl ₂	850 ÷ 1350

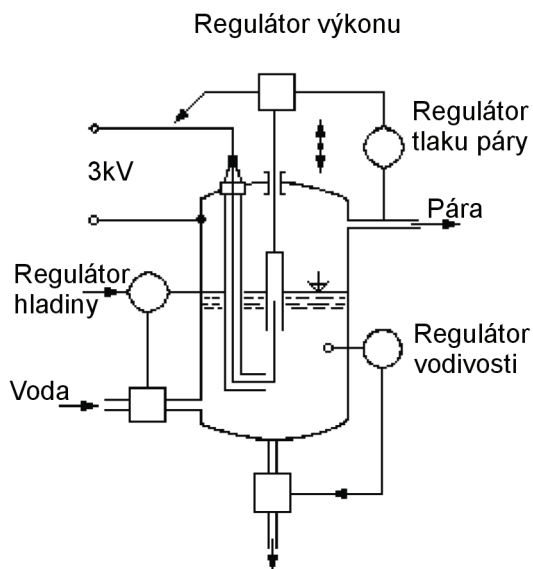
Tab. 3.1 Chemické složení některých používaných solí a rozsah použití

Hlavní výhodou solných lázní je rychlý, přesný a rovnoměrný ohřev vsázky bez přístupu vzduchu. Rychlost ohřevu je dána velkou hodnotou součinitele přestupu tepla prouděním mezi elektrolytem a tuhous vsázkou. Solné lázně musí splňovat přísné bezpečnostní provozní předpisy, např. odtah a čištění uvolňujících se zplodin z roztavených solí.

3.1.5. Elektrodotý ohřev vody

Pro přípravu horké vody a výrobu páry se využívá tepla vzniklého přímým průchodem proudu ohřevanou vodou. Proud se přivádí elektrodami grafitovými (pro malé příkony) nebo kovovými (pro příkony velké). Používá se střídavý proud pro zamezení vývinu výbušných plynů a koroze. Hustota proudu povrchem elektrody se volí do 1,5 A·cm⁻², většinou kolem 0,5 A·cm⁻². Elektrická vodivost vody závisí na jejím složení a zejména na její teplotě.

Používá se mnoho různých konstrukcí elektrodotých kotlů. Konstruují se nejen pro napětí 231 V a 400 V, ale také pro napětí vysoká až do 30 kV. Průtokové kotle na ohřev vody se staví od výkonu několika kilowattů až do několika megawattů. Často se voda ohřívá nočním proudem jako akumuláční médium pro vytápění i technologie v průmyslu papírenském, textilním, potravinářském apod. Například pro vaření se používají obvykle elektrodoté kotle na výrobu páry (Obr.3.6), která se rozvádí do varných kotlů a vrací se zpět jako kondenzát. K průmyslové výrobě horké vody a páry se stavějí kotle s výkonem až 60 MW při provozním napětí 30 kV a přetlaku až 4 MPa.



Obr.3.6: Jednofázový elektrodový kotel

Výkon elektrodového zařízení při daném napětí lze regulovat těmito způsoby:

- 1) úpravou vodivosti vody,
- 2) plochou elektrod – zakrýváním izolačními návleky (porcelánové nebo křemenné trubky), zkracováním, prodlužováním,
- 3) přibližováním a oddalováním elektrod,
- 4) rozdělením elektrod na skupiny, které se různě spínají a přepojují,
- 5) mechanickým zanořováním a vynořováním elektrod z vody,
- 6) změnou výšky hladiny vody v kotli pomocí čerpadla při pevných elektrodách zavěšených shora,
- 7) změnou počtu trysek u tzv. tryskových elektrodových vysokonapěťových kotlů.

3.2. Nepřímý odporový ohřev

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, popřípadě i vedením. Elektrická odporová zařízení s nepřímým ohřevem, tzv. odporové pece, je možné dělit podle několika hledisek (např. podle ČSN IEC 60050-841).

Podle teploty na pece:

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

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.

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.

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

- se stabilní – nepohybující se vsázkou, s provozem přerušovaným,
- se vsázkou procházející pecí – pece průběžné, s pohyblivým dnem, s provozem nepřerušovaným.

Toto poslední kritérium je pro rozdělení pecí rozhodující, a proto se v dalším podle tohoto způsobu budeme řídit.

3.2.1. Odporové pece se stabilní vsázkou

Nejběžnější pece, v nichž se vsázka během ohřevu nepohybuje, jsou pece: komorové, vozové, šachtové, pokloповé (zvonové), elevátorové a kelímkové tavicí.

Komorové pece

Komorové pece patří k nejstarším typům elektrických odporových pecí. Jsou velmi univerzální, proto hojně používané. Topné články jsou umístěné obvykle na bocích, někdy v podlaze, v zadní stěně a ve dveřích, také na stropě. Komorové pece se staví až do teplot 1100 °C s topnými články kovovými, do teplot 1400 °C s články z karbidu křemíku (SiC) nebo z jiných materiálů (tzv. cermetů).

Vozové (vozikové) pece

Vozové pece jsou větší pece komorové, u nichž jsou stabilní boky se stropem a zadním čelem. Dno s předním čelem tvoří vůz, který vyjíždí z pece. Vsázka se

naloží na vůz mimo pec a zajede se s ním do vytopené pece, kola vozu jsou přesně vedena. Vozové pece jsou hospodárné jen pro vsázku velkých rozměrů s hmotností 100 t i více s výkonem 3 000 kW až 5 000 kW.

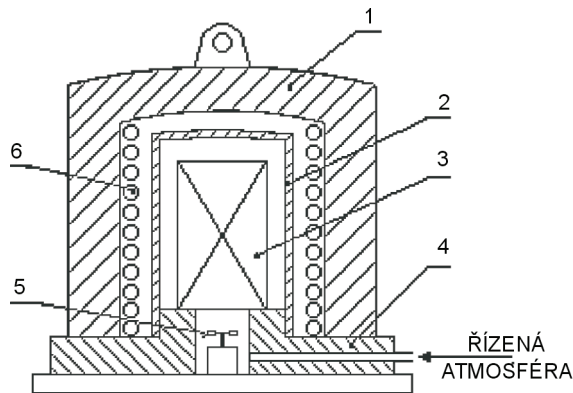
Šachtové (hlubinné) pece

Šachtové pece mají svislou osu a kruhový nebo čtvercový průřez. Pece jsou někdy 10 m až 20 m hluboké, nazývají se hlubinné a jsou obvykle zapuštěny pod podlahu. Pro dosažení větší rychlosti ohřevu a rovnoměrného rozložení teploty v peci se někdy do dna či víka instalují ventilátory pro oběh atmosféry v peci.

Šachtové pece nejsou tak univerzální jako pece komorové nebo vozové, ale snadno se utěsňují a izolují proti ztrátám tepla.

Pokloповé (zvonové) pece

Pokloповá pec (Obr. 3.7) má dobře tepelně izolovaný topný poklop 1 (zvon) kruhového nebo čtvercového průřezu a má na svém vnitřním povrchu topné vinutí 6. Poklop se nasazuje jeřábem na pracovní plošinu 4, na kterou byla umístěna vsázka 3. Vsázka je krytá žáruvzdornou muflí 2 (poklopem) proti přímému sálání topných článků, a tím i proti lokálnímu přehřátí. Pod vsázkou je umístěn ventilátor 5. Pec má několik pracovních plošin a muflí. Pokloповé pece se staví do výkonů několika set kilowattů.



Obr. 3.7 Pokloповá pec

Elevátorové pece

Elevátorové pece patří k největším odporovým pecím se stabilní vsázkou. Pece pracují s dobrou účinností, konstruují se pro teploty do 1000 °C až 1200 °C s výkony 500 kW až 2 000 kW. Elevátorové pece jsou vhodné pro vsázku velkých rozměrů a velké hmotnosti (desítky tun). Velkou jejich výhodou je, že mohou být vřazeny do průběžné výrobní linky, neboť vůz se vsázkou po ohřevu pokračuje dále ve směru příjezdu k peci.

Kelímkové pece tavicí a tavicí vany

Konstruují se pro tavení kovů nebo slitin s nižším bodem tání (Sn, Pb, Al, Zn

atd.). Kolem kovového nebo keramického kelímku je topné vinutí. Vně topení je tepelná izolace a kostra pece. Obvykle jsou tyto pece sklopné, aby se dal roztavený kov vylít.

Tavicí vany jsou různých konstrukcí, mají např. na vnější straně vany topné vinutí s tepelnou izolací, nejsou sklopné (pro pozinkování, pocínování, alitaci atd.). Pro přetavování (egalizaci) hliníku mají topení ve stropě a při odlévání se naklápějí po otočných kladkách.

3.2.2. Odporové pece průběžné

Používají se tam, kde je předepsáno tepelné zpracování pro větší počet výrobků. Průběžných pecí, které jsou většinou dimenzovány na nižší teploty, se staví celá řada různých druhů. V těchto pecích lze podle technologického procesu provádět předepsaný ohřev, výdrž a ochlazování. Obecně mají pece více teplotních pásem, která jsou samostatně napájena a regulována. V případě pomalého ochlazování vsazených částí je k peci připojena ochlazovací komora, která podle požadované rychlosti ochlazování je vybavena buď tepelnou izolací, nebo vodním chlazením.

Několik průběžných pecí může tvořit jeden zcela mechanizovaný a automatizovaný celek. Většinou se spojují kalící a popouštěcí pece s kalíciemi lázněmi, čistícími a sušícími zařízeními.

Pece jsou konstruované pro trvalý provoz. Podle druhu mechanismu k dopravě vsázky se nejčastěji používají pece: pásové a řetězové, válečkové, nárazecí, střešací, krokové, protahovací, bubnové a karuselové.

Pásové pece

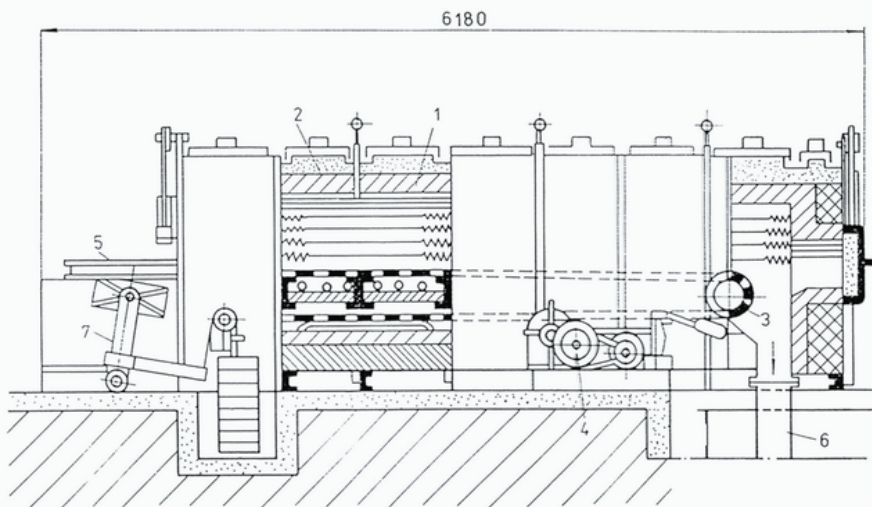
Vsázka u pásové pece (Obr. 3.8) se vkládá ručně nebo pomocí speciální automatiky přes podávací stůl 5 na dopravní pás 3 procházející pecí. Pás je pro lehké součásti zhotoven z kovového pletiva, pro těžké součásti z ražených desek, které jsou vzájemně propojeny pomocí čepů a spojek. Napínán je pomocí zařízení 7, 4 je pohon pásu. Na konci pece je materiál odebírán z prostoru 6.

Topné články 2 NiCr se umísťují většinou na stropě a dně, pod horní úroveň pásu. Pracovní prostor pece obklopuje žáruvzdorná vyzdívka 1. Pásové pece jsou určeny pro tepelné zpracování menších součástí do teploty 900°C.

Válečkové pece

Staví se pro teploty do 900°C. Válečková dráha prochází celou pecí a je složena ze žáruvzdorných válečků, s osou kolmou ke směru pohybu, s ložisky vně pece po obou stranách. Vsázka se klade přímo na válečky nebo na podložky tak, aby byla dobře unášena.

Při konstrukci se musí respektovat tepelná roztažnost válečků a vyzdívky pece.



Obr. 3.8: Pásová pec

Narážecí pece

Pracovní teplota nárážecí pece je do 1000 °C.

Střásací pece

Střásací pece jsou určeny k ohřevu drobné kusové vsázky na teploty do 900 °C.

Krokové pece

Krokové pece se staví pro ohřev velkých výkovků a odlitků na střední a vysoké teploty. Krokový mechanismus je mimo pracovní prostor pece. Při pohybu vpřed se vsázka pozdvihne a posune. Při pohybu vzad mechanismus klesne a připraví se na další krok vpřed, je poháněn hydraulicky nebo elektromotorem.

Protahovací pece

Protahovací pece se konstruují se pro ohřev drátů a pásů zejména z barevných kovů (i z oceli), které se pecí protahují. Dosahuje se rovnoměrného prohřátí. Pro velké výkony jsou pece se svislým pohybem drátů v několika smyčkách (výroba smaltovaných drátů).

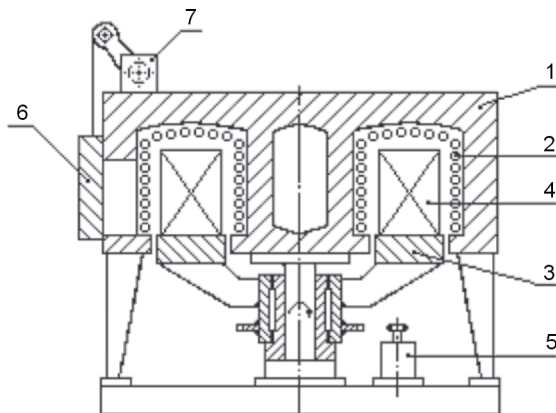
Bubnové pece

Buben bubnové pece se zhotovuje z drahého žáruvzdorného materiálu, je tepelně i mechanicky značně namáhán, má omezenou životnost. V peci se dosahuje přesné a rovnoměrné teploty.

Tyto pece se hodí k tepelnému zpracování (kalení, žíhání apod.) podložek, šroubů, menších ložiskových kroužků a kuliček, ale také ke štěpení slídy.

Karuselové (rotační) pece

Karuselové pece se konstruují se pro nejvyšší teploty, protože mechanismy pece jsou zcela mimo prostor s pracovní teplotou. Řez pecí je na Obr. 3.9. Vlastní pecní těleso 1 je rotační, s topnými články 2. Podlaha pece je otočná a klade se na ni vsázka 4. Otáčení zajišťuje elektromotor 5. Vsázka se vkládá do pece otvorem s dveřmi 6 a po jedné otočce se z výstupního otvoru s dveřmi vedle vstupu vyjímá. Dveře se uzavírají zařízením 7. Doba ohřevu vsázky se mění v závislosti na změně rychlosti otáčení podlahy.



Obr. 3.9: Karuselová pec

3.2.3. Materiály a součásti elektrických odporových pecí s nepřímým ohřevem

Klasická odporová pec s nepřímým ohřevem je tvořena těmito základními částmi:

- 1) žáruvzdorná vyzdívka,
- 2) tepelná izolace,
- 3) skříň pece,
- 4) topné články,
- 5) podávací mechanismy a jejich pohony.

Kromě toho mohou být pece vybaveny zařízeními pro výrobu ochranné atmosféry nebo vakua. Všechny pece jsou vybaveny přístroji pro měření a regulaci teploty.

Žáruvzdorná vyzdívka ohraničuje uvnitř pece pracovní prostor. Musí při pracovní teplotě dostatečně odolávat žáru, musí být dostatečně pevná, chemicky stabilní. V odporových pecích užíváme nejčastěji šamotové díly, složené z 38 % až 44 % oxidu hlinitého Al_2O_3 , zbytek je oxid křemičitý SiO_2 .

Materiály pro tepelnou izolaci mají přirozenou nebo umělou poréznost (magnezit, struska, oxid hlinitý, skleněná vata).

Skříň a konstrukce se obvykle zhotovují z ocelového plechu a ocelových profilů. Některé součásti se vyrábějí z litiny a ocelolitiny. Tyto součásti pracují při normální teplotě a nejsou na ně kladeny žádné speciální požadavky.

Na materiály pro topné články jsou kladeny vysoké nároky, měly by mít tyto vlastnosti:

- odolnost proti žáru při pracovní teplotě článku,
- velkou mechanickou pevnost zatepla,
- odolnost proti chemickým vlivům atmosfér v pecích a keramiky, s níž se stýkají
- velkou rezistivitu pro možnost použití větších průřezů a přiměřených délek vodičů a pro umožnění přímého připojení k síti,
- malý teplotní součinitel odporu, který zajistí malý rozdíl mezi odporem článku zastudena a zatepla,
- stálost rezistivity po celou dobu životnosti článku,
- malou tepelnou roztažnost,
- dobrou zpracovatelnost do různých tvarů.

Uvedené požadavky jsou velmi náročné. V praxi se daří splnit současně jen některé, popř. pro dosažení maximální životnosti se volí kompromisní řešení.

Materiály pro topné články se dělí do dvou základních skupin:

- 1) materiály kovové,
- 2) materiály nekovové.

3.2.4. Materiály pro topné články kovové

Mezi kovové materiály patří slitiny Ni, Cr, Fe, Al nemagnetické a magnetické, čisté kovy, ocel a speciální slitiny.

Austenitické slitiny

Austenitické slitiny jsou nemagnetické, tzv. chromniklové. Pro topné články se používá slitina Ni+Cr, a slitina Ni+Cr+Fe. Tyto slitiny jsou nejjakostnější, mají dobrou žárovzdornost, odolávají častým zapnutím a vypnutím. Dobře se svařují a tvarují. Mají velkou rezistivitu a malý teplotní součinitel odporu, nestárnou, jsou stálé.

Feritické slitiny

Feritické slitiny jsou magnetické slitiny Cr+Al+Fe bez niklu, vysoce žárovzdorné s větší rezistivitou než skupina předešlá. Patří sem slitiny s obchodními názvy: Kanthal, Alsichrom, Alkrothal, Chromal, Aluchrom, Thermal aj. Rezistivity drátů

z těchto slitin jsou kolem $1,4 \mu\Omega\cdot\text{m}$ při 20°C a mění se s teplotou velmi málo. Tyto materiály jsou použitelné pro pracovní teploty až do 1375°C .

Čisté kovy

Čisté kovy jsou drahé, těžkotavitelné, např. platina, wolfram a molybden. Používají se pro topné články laboratorních nebo jiných speciálních pecí, kde se požaduje značně vysoká teplota.

Platina neoxiduje, ale intenzivně se nauhličuje, nemůže se použít v redukční atmosféře. Protože se její odpor mění značně s teplotou, způsobí zapnutí za studeného stavu velký proudový náraz.

Wolfram je velmi křehký. Topné články jsou obvykle ve tvaru trubky, jejíž vnitřní prostor je přímo pracovním prostorem. Přívody proudu se chladí vodou. Wolframové topné články pracují ve vakuu nebo v ochranné atmosféře až do 2600°C .

Molybden se používá pro teploty 1400°C až 2000°C . Vyžaduje ochrannou atmosféru (např. páry lihu nebo vodík), ve vakuu se při teplotě 1650°C rozprašuje.

Ocel a speciální odporové slitiny

Ocelový drát lze použít až do 900°C , avšak jen ve vodíkové atmosféře. V normální atmosféře jen do 400°C . Je levný, používá se v sušících pecích.

Konstantan (56% Cu + 44% Ni) a Nikelin (65% Cu + 34% Ni + 1% Fe) jsou speciální slitiny, jejichž odpor se téměř s teplotou nemění. Používají se hlavně v měřicí a regulační technice. Dají se však také použít pro topné články do malých spotřebičů a pro nízké teploty.

3.2.5. Materiály pro topné články nekovové

Pracovní teploty kovových topných článků dosahují nejvýše 1375°C , proto se hledaly materiály, které při stejných základních vlastnostech jako u kovových mohou pracovat v normální atmosféře při teplotách vyšších.

Karbid křemíku (SiC)

Karbid křemíku je nejčastěji používaný nekovový materiál pro topné články s obchodními názvy Silit, Globar, Crusilir, Cesiwid aj. Rezistivita je značně vyšší než u kovových materiálů ($0,6\text{--}3,0 \text{ m}\Omega\cdot\text{m}$), což umožňuje topné články zhotovovat např. ve tvaru tyčí se zesílenými konci. Průměry tyčí jsou $1,2$ až 5 cm , délky od 8 do 200 cm .

Použitelnost topných SiC článků je až do teploty 1500°C . Teplotní součinitel odporu je asi do 800°C záporný, nad 800°C kladný. Doba životnosti topných článků je od 3000 do 10000 pracovních hodin.

Cermetové články

Jsou vyráběny práškovou metalurgií. Základním materiálem je směs molybdenitu křemičitanů (MoSiO_2) s oxidem křemičitým (SiO_2). Články jsou nejčastěji ve tvaru U (vlásenky). Mohou být také ve tvaru tyčí, trubek.

Pracovní teploty článků jsou 1600 °C až 1700 °C. Žárovzdornost způsobuje ochranná vrstva SiO₂ vznikající na povrchu článku za provozu. Cermetové články jsou křehké, nesnášejí otřesy. Jsou odolné proti atmosféře oxidační, dusíkové, argonové a z CO. Škodí jim síra a chlor. Rezistivita se mění značně s teplotou (při 20 °C je $\rho=0,25 \mu\Omega\cdot m$, při 1600 °C je $\rho = 3,5 \mu\Omega\cdot m$), proto se připojují přes regulační transformátory.

Uhlíkové a grafitové topné články

Základní suroviny a výroba grafitu byly popsány v čl. 3.1.2. Topné články se vyrábějí ve tvaru tyčí, trubek aj.

Pracovní teploty jsou až do 2000 °C ve vakuu nebo řízené atmosféře, zabráňující oxidaci. Při normální atmosféře nastává oxidace u uhlíkových článků zhruba od 400 °C, u grafitových zhruba od 600 °C. Rezistivita uhlíku s rostoucí teplotou klesá, např. při teplotě 1400 °C asi na 67 % z plné hodnoty při 0 °C. U grafitu ze 100 % při 0 °C s rostoucí teplotou rezistivita nejprve klesá, při teplotě kolem 400 °C je asi 77 % a potom opět roste. Při 1400 °C je rezistivita asi 96 % původní hodnoty.

3.2.6. Základní použití odporových pecí v průmyslu a ve strojírenství

Základní oblasti použití elektrických odporových pecí v průmyslu je tepelné zpracování. Jde o procesy, při nichž jsou kovové předměty v tuhém stavu podrobeny určitým změnám teploty k dosažení požadovaných vlastností materiálu. Jde zejména o zvýšení hranice pevnosti a namáhání při zachování tvaru tepelně zpracovávaného předmětu. Je-li tento děj ovlivněn chemickým účinkem prostředí, jde o zpracování chemicko-tepelné.

V odporových pecích se pro tepelné zpracování, zejména strojírenských součástí ocelových, ale i z barevných kovů a jejich slitin, používají tyto procesy ČSN EN 10052:

- 1) **Žihání** snižuje tvrdost, zlepšuje obrobitelnost, snižuje vnitřní pnutí a způsobuje dosažení žádoucí mikrostruktury. Ocelové součásti se ohřejí na teplotu 700 °C (u mosazi až 800 °C, niklu 960 °C až 1200 °C), 2 hodiny setrvávají na této teplotě a potom pomalu chladnou. Druhy žihání jsou např. lesklé, normalizační, izotermické, rekrystalizační atd.
- 2) **Kalení** zvyšuje tvrdost ocelových součástí, které se ohřejí nad překrystalizační teplotu a potom se rychle ochladí ponořením do vody nebo oleje. Mezi druhy kalení patří např. termální, izotermické, přerušované, povrchové atd.
- 3) **Popouštění** následuje obvykle po kalení. Zakalené ocelové předměty jsou sice velmi tvrdé, ale zároveň i velmi křehké, proto se dále tepelně zpracují popouštěním. Ohřejí se na teploty od 150 °C do 600 °C, po prodlevě na popouštěcí teplotě pomalu chladnou.
- 4) **Cementování** způsobuje velkou tvrdost povrchové vrstvy ocelových součástí při zachování houževnatosti jádra. Cementování je nasycování povrchu ocelového předmětu uhlíkem v tuhém, kapalném a především plyném prostředí při teplotě asi 900 °C.

- 5) **Nitridování** zvyšuje odolnost povrchové vrstvy ocelových součástí proti otěru. Nitridování je nasycování povrchu ocelových součástí dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí při teplotách 470 °C až 580 °C.
- 6) **Zušlechťování** ocelových výrobků. Zušlechťováním se dosahuje velké pevnosti, tvrdosti a houževnatosti. Před posledním mechanickým opracováním se provede žíhání, následuje zakalení do oleje nebo vody a potom popouštění s prodlevou a následným řízeným ochlazováním.

Elektrické odporové pece mají použití při tepelném zpracování výrobků ze skla. Automatické linky tepelného zpracování polotovarů a výrobků se rozšiřují do nejrůznějších oblastí výroby včetně průmyslu textilního, potravinářského atd.

3.2.7. Vlastní výpočet topného článku

Pro návrh topných článků kruhového či obdélníkového průřezu odporového vodiče používáme následujících vztahů:

článek kruhového průřezu

Průměr odporového drátu vypočteme podle vztahu

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho \cdot P^2}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot p_{\text{skut}}}} \quad (3.7)$$

článek obdélníkového průřezu

$$b = \sqrt[3]{\frac{P^2 \cdot \rho}{2 \cdot \beta \cdot (\beta + 1) \cdot U^2 \cdot p_{\text{skut}}}} \quad (3.8)$$

$$a = b \cdot \beta \quad (3.9)$$

Potřebnou délku vypočteme dle následujících vztahů:

$$l = \frac{U^2 \cdot S_p}{P \cdot \rho} \quad (3.10)$$

nebo

$$l = \frac{P}{\sigma \cdot p_{\text{skut}}} \quad (3.11)$$

kde

P (W)..... příkon do jednoho topného článku

U (V)..... napětí na topném článku (může to být napětí fázové při spojení do hvězdy nebo sdružené při spojení do trojúhelníka)

R (Ω) odpor uvažovaného článku při pracovní teplotě

ρ ($\Omega \cdot m$).. rezistivita topného materiálu při pracovní teplotě

l (m)..... délka vodiče jednoho topného článku

d (m)..... průměr vodiče kruhového průřezu

o (m)..... obvod vodiče

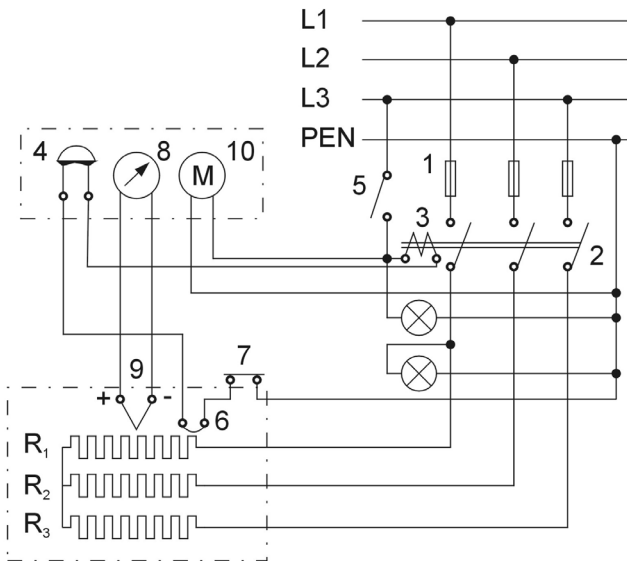
S_p (m^2) .. průřez vodiče jednoho topného článku

ρ_{skut} ($W \cdot m^{-2}$)skutečné povrchové zatížení topného článku

β poměr stran obdélníku

3.2.8. Zapojení a regulace elektrických odporových pecí

Nejběžnější způsob elektrického zapojení odporové pece je uveden na Obr. 3.10.



Obr. 3.10: Zapojení odporové pece

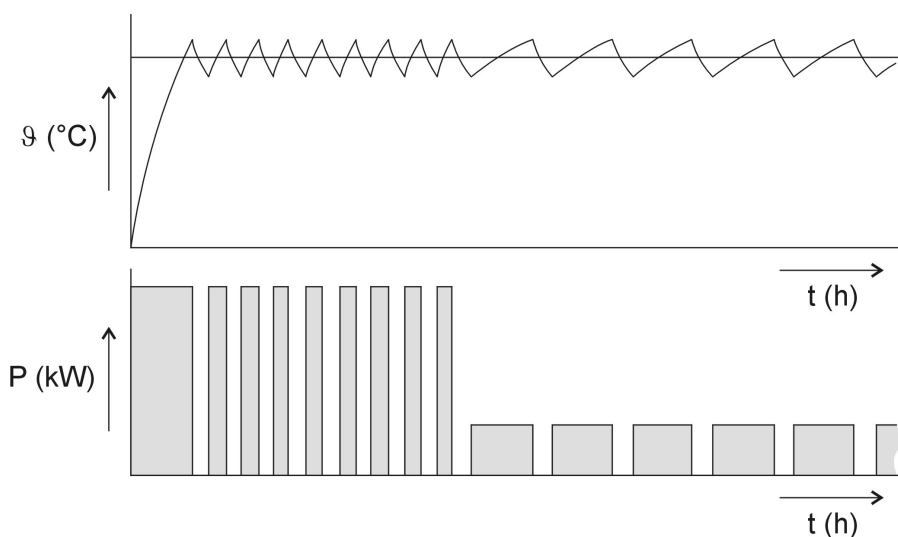
Elektrická odporová pec, zapojená podle Obr. 3.10, je připojena k trojfázové síti s nulovým vodičem prostřednictvím stykače 2. Jištění je provedeno pojistkami 1. Topná vinutí pece představují odpory o stejné hodnotě R_1 , R_2 , R_3 . Pec zapneme vypínačem 5. Sepnutím tohoto vypínače uzavřeme pomocný spínací obvod, složený z těchto prvků: cívka stykače 3, rtuťový spínač automatického regulátoru teploty 4, pojistkový topný drátek v peci 6, dveřní kontakt 7. Chod pece je signalizován rozsvícením červeného světla. Současně také startuje motorek automatického

regulátoru teploty 10. Po nabuzení spínací cívky 3 sepne stykač 2 a připojí topné články k síti. Termočlánek 9 dodává napětí pro přístroj ukazující teplotu v peci. Při dosažení požadované teploty se přeplojí rtuťový spínač automatického regulátoru teploty 4, v ovládacím obvodu je přerušen proud a stykač 2 odepne topné články od sítě. Ve schématu Obr. 3.10. je možná regulace teploty v peci pouze vypínáním a zapínáním celého příkonu.

3.2.9. Automatická regulace teploty v odporových pecích

Úkolem regulace teploty elektrické pece je trvale a přesně udržovat požadovanou teplotu pracovního prostoru, nebo reagovat na změny podle předem stanoveného programu. V průmyslu se užívá regulace skoková nebo plynulá.

Skoková regulace se dosáhne nejjednodušeji vypínáním a zapínáním celého příkonu pece. Dále můžeme využít přepínání odporových sekcí hvězda-trojúhelník, nebo přepínání skupin odporových článků. Průběh teploty a příkonu u odporové pece při jednopólové a dvoupólové skokové regulaci je zobrazen na Obr. 3.11.



Obr. 3.11: Průběh teploty a příkonu u odporové pece při jednopólové a dvoupólové skokové regulaci

V první části Obr. 3.11 je znázorněna jednopólová regulace zapnuto, vypnuto. V druhé části obrázku je uvedena dvoupólová regulace teploty a příkonu při použití přepínání odporových sekcí hvězda-trojúhelník.

Pro plynulou regulaci příkonu elektrické odporové pece používáme polovodičových prvků, zapojených v přívodu k peci (Obr. 3.12). Zde se uplatňuje řízení pomocí akčního členu s říditelným výstupním střídavým napětím a konstantním kmitočtem. Základním členem je antiparalelní zapojení tyristorů. Výstupní napětí tyristorových měničů je možné řídit zapalovacím úhlem tyristorů. K tomu je třeba přivádět na řídicí elektrodu řídicí signály vhodných vlastností ve vhodném okamžiku. Tuto funkci zajišťují obvody, které podle účelu rozdělujeme na obvody zapínací

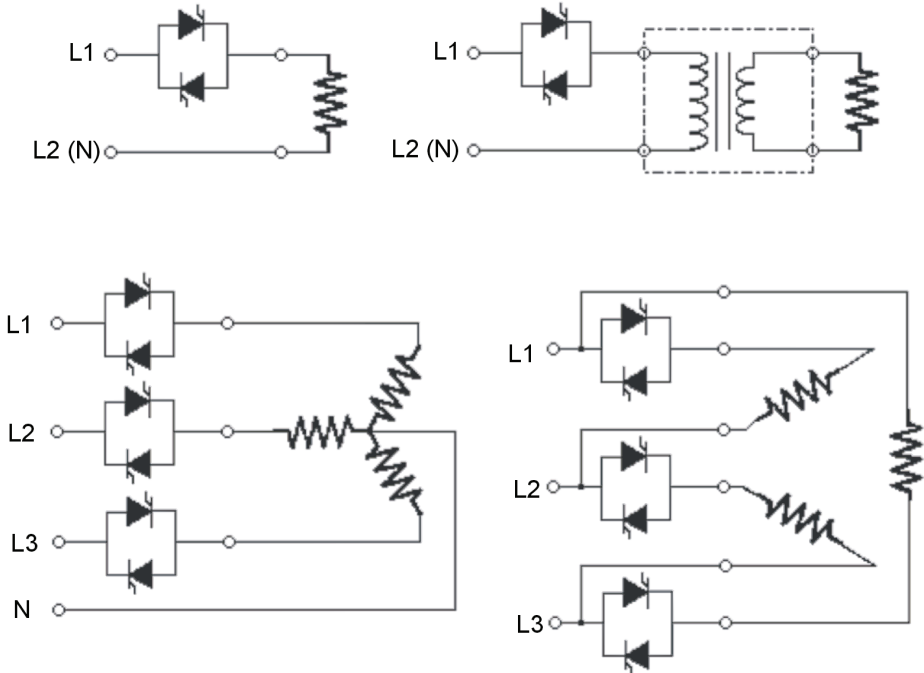
a obvody řídicí. Zapínací obvody zajišťují pouze zapnutí tyristorů vždy na začátku kladné půlvlny napětí. Řídicí obvody zajišťují navíc plynulé řízení okamžiku zapnutí tyristorem během kladné půlvlny napětí.

Souhrn požadavků na řízení je možno shrnout do těchto bodů:

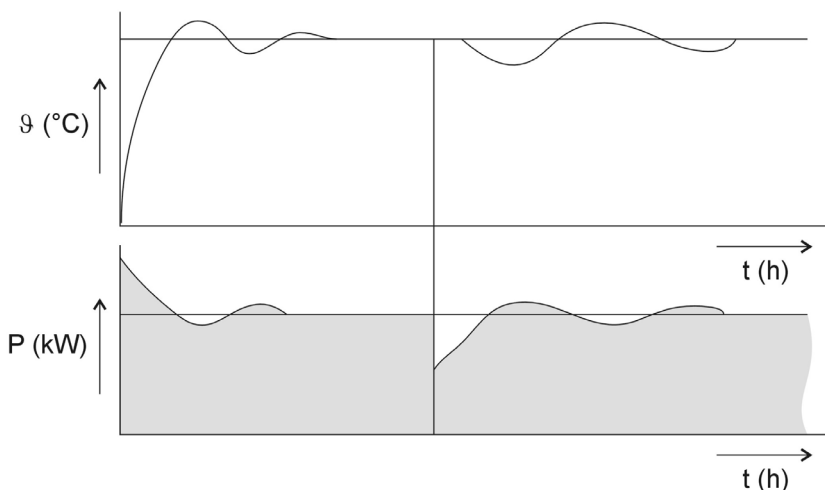
- 1) Řídicím signálem nesmí být přetěžována řídicí elektroda tyristoru, aby nedošlo ke ztrátě blokovací a závěrné schopnosti tyristoru.
- 2) Řídicí signál musí mít potřebnou šířku. Jeho hodnotu ovlivňuje zejména druh zátěže. Kratší impulsy musí mít větší amplitudu.

Řídicí signál musí mít potřebnou strmost nárůstu, protože malá strmost snižuje i strmost nárůstu proudu.

Využitím této plynulé regulace dochází u odporové pece k výraznému zrovnoměnění teplotního průběhu, jak je zobrazeno na Obr. 3.13.



Obr. 3.12: jednofázové a třífázové zapojení odporové pece



Obr. 3.13: Plynulá regulace odporové pece

U většiny odporových pecí se dosahuje maximální rovnoměrnosti ve vnitřním prostoru ± 5 °C. Některé procesy, které vyžadují vyšší přesnost a rovnoměrnost ohřevu se vybavují topnými pásy, které se regulují samostatně.

V podstatě pro dosažení vyšší rovnoměrnosti teploty se u pecí provádějí tato základní opatření:

- zlepšení tepelné izolace celé pece proti tepelným ztrátám, zejména utěsnění dveří apod.,
- účelnější rozmístění topných odporových článků v pecích,
- dokonalejší a citlivější regulace skupin topných článků,
- cirkulace vnitřní atmosféry u šachtových a tunelových pecí,
- umístění oběhových vložek nebo nastavitelných klapek pro usměrnění toku atmosféry odporové pece,
- u odporových pecí se středními teplotami se provádí tzv. kaloriferové topení (oběh atmosféry přes topné články).

3.3. Výpočty odporových elektrotepelných zařízení pro nepřímý odporový ohřev

3.3.1. Základy návrhu a výpočtu odporových pecí

Pro správné stanovení druhu pece pro požadovaný způsob tepelného zpracování vsázky jsou rozhodující zejména tato hlediska:

- technologické požadavky na tepelné zpracování vsázky,
- druh vsázky a její velikost,
- 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,
- přirozená či řízená atmosféra v peci,
- nepřetržitý nebo nepřetržitý provoz,
- prostor, který je k dispozici,
- cena pece.

Pro výrobu kusovou nebo malosériovou zvolíme pec nebo skupinu pecí se stabilní vsázkou, pro výrobu hromadnou jsou výhodnější pece průběžné nebo celé automatické průběžné pecní linky.

Návrh pece vyžaduje mnoho technických kompromisů, zkušeností i ekonomických úvah. Obvykle se pro daný účel podle zkušeností nebo orientačním výpočtem určí předběžné základní parametry pece (velikost, mechanizace, příkon a další). Potom se pec přibližně navrhne konstrukčně včetně volby tepelných izolací, jejich tloušťek atd. Tento první přibližný návrh se kontroluje již výpočty podrobnějšími. Provedou se v něm příslušné korekce, nakreslí se návrh další, zpřesněný. Tento druhý návrh se opět výpočtově, daleko podrobněji kontroluje. Kontrolují se zejména základní rozměry pece z hlediska dané výrobní technologie, pro kterou je pec určena, tepelná izolace a tepelné ztráty, příkon, účinnost, průběhy teplot, výrobnost a další.

3.3.2. Výpočet celkového příkonu pece

Pro zpracovaný základní konstrukční návrh pece při známé teplotě nebo rozdělení teplot v peci vypočítáme ztrátový výkon P_z pece v ustáleném stavu.

Ztrátový výkon je určen ztrátami:

- 1) jednotlivými stěnami pece,
- 2) netěsnostmi (např. dveří a vozu u pecí s nepohyblivou vsázkou),
- 3) na vstupu a výstupu u průběžných pecí,
- 4) při otevírání a zavírání dveří,
- 5) vynášením tepla dopravními mechanismy u průběžných pecí (pásky, řetězy aj.),
- 6) pro ohřev muflí, palet, podložek apod.

Ztrátový výkon je možné rozdělit na ztrátový výkon naprázdno P_{z0} (nezávisí na chodu pece se vsázkou) a na ztráty P_{zv} související s chodem pece se vsázkou.

Platí

$$P_z = P_{z0} + P_{zv} \quad (3.12)$$

P_{z0} souvisí s výše uvedenými body 1, 2, 3. P_{zv} s body 4, 5, 6. Výpočet P_{z0} a P_{zv} provádíme podle obecných zákonitostí šíření tepla v ustáleném stavu a podle měrné tepelné kapacity, teploty a hmotnosti u ztrát paletami, muflemi, podložkami apod.

Užitečný výkon

K ohřátí vsázky s hmotností m , měrnou kapacitou c , z teploty \mathcal{G}_0 na teplotu \mathcal{G}_k je zapotřebí energie

$$W_u = \int_{\mathcal{G}_0}^{\mathcal{G}_k} c \cdot m \cdot d\mathcal{G} \quad (3.13)$$

Zavedeme-li střední měrnou tepelnou kapacitu c_{av} , zjednoduší se vztah (3.13.) na tvar

$$W_u = c_{av} \cdot m \cdot (\mathcal{G}_k - \mathcal{G}_0) \quad (3.14)$$

Pokud je v zadání uvedena doba ohřevu $t_{ohř}$, vyšel by užitečný příkon

$$P_u = \frac{W_u}{t_{ohř}} \quad (3.15)$$

a teoretický potřebný příkon pece by byl dán vztahem

$$P_p = P_z + P_u \quad (3.16)$$

Protože musíme počítat s určitou nepřesností výpočtu, s rezervou na pokles napětí v síti, se stárnutím topných článků, se vzrůstem ztrát pece apod., volíme určitý bezpečnostní činitel $k_b = 1,2$ až $1,7$. Pak příkon pece je

$$P_p = k_b \cdot (P_z + P_u) \quad (3.17)$$

V praxi však většinou dobu ohřevu vsázky $t_{ohř}$, neznáme a musíme ji vypočítat.

3.3.3. Výpočet doby ohřevu vsázky

Teplu se přenáší do vsázky hlavně sáláním a prouděním. Přenos pomocí vedení tepla obvykle zanedbáváme, což představuje určitou rezervu. Pro přenos tepla prouděním platí podle Newtonova zákona vztah

$$P_u = \alpha \cdot S \cdot (T_p - T_v) \quad (3.18)$$

$$\alpha = \alpha_s + \alpha_k \quad (3.19)$$

kde:

P_u je užitečný výkon přenášený do vsázky povrchem S ,

α výsledný součinitel přestupu tepla z pece do vsázky,

α_s součinitel přestupu tepla sáláním,

α_k součinitel přestupu tepla prouděním (konvekci),

T_p teplota pece,

T_v teplota vsázky.

Pro náhradní součinitel přestupu tepla sáláním v určitém menším rozsahu teplot T_p a T_v byl odvozen vztah

$$\alpha_s = \frac{\sigma_\varepsilon \cdot \varepsilon \cdot (T_p^4 - T_v^4)}{T_p - T_v} \quad (3.20)$$

kde ε je emisivita povrchu vsázky a σ_ε je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma_\varepsilon = 5,674 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

Pec má vnitřní povrch mnohonásobně větší než je povrch vsázky, stupeň černosti vnitřního povrchu pece $\varepsilon = 0,8$ až $0,9$.

Střední hodnota součinitele α_k je u pecí bez nuceného oběhu atmosféry přibližně $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Pak je

$$\alpha = \alpha_s + 15 \quad (3.21)$$

Povrchem S přijímá vsázka teplo. Tento povrch tvoří podle umístění v peci a podle vzájemného „stínění“ kusů vsázky jen část celkového povrchu S_v vsázky

$$S = k_v \cdot S_v \quad (3.22)$$

kde $k_v < 1$ je redukční činitel. Určuje se obvykle podle praktických zkušeností.

Při výpočtu dále předpokládáme, že vsázka je tzv. tepelně tenká. U takové vsázky teplota vnitřku vsázky sleduje teplotu jejího povrchu téměř bez časového

zpoždění. V každém časovém okamžiku lze vsázku posuzovat jako rovnoměrně prohřátou. Pro tepelně tenkou vsázku platí $Bi < 0,25$.

$$Bi = \frac{\alpha \cdot s}{2 \cdot \lambda} \quad (3.23)$$

kde Bi je Biotovo podobnostní kritérium, s je reprezentativní tloušťka stěny vsázky, určující její „masívnost“. Pro $Bi > 0,5$ je vsázka již tzv. tepelně masivní. Vnitřek vsázky je v daném okamžiku ohřevu chladnější než její povrch.

U průběžných pecí při ohřevu drobnějších součástí pro hromadnou výrobu (např. výkovky a odlitky pro osobní automobily) bývá podmínka $Bi < 0,25$ většinou splněna. V pecích se stabilní vsázkou se ohřívá obvykle tepelně masivní vsázka ($Bi > 0,5$). Doba ohřevu se počítá jako ohřev tlusté desky, válce atd.

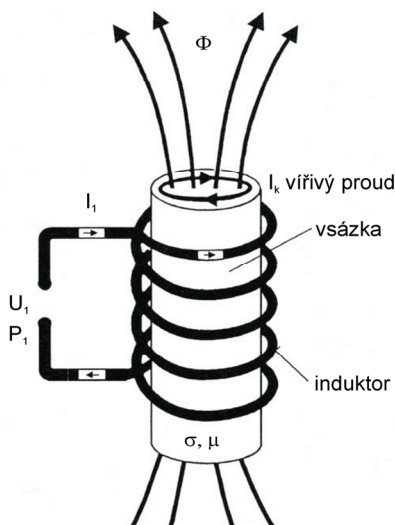
3.4. Literatura

- [1] Novák, P.: Elektrické ohřevy, I.část - Odporový ohrev. Mercury-Smékal, Košice 2002, ISBN 80-89061-60-5
- [2] Hradílek, Z. a kol.: Elektrotepelná zařízení. IN-EL Praha 1997, ISBN 80-902333-2-5
- [3] Novák, P.: Elektrické teplo. Základy a teorie elektrických ohrevov a aplikacie. Equilibria, s.r.o, Košice 2010, ISBN 978-80-89284-48-1
- [4] Hradílek, Z.: Elektrotepelná technika. VŠB – TU Ostrava, Ostrava, 1996
- [5] Rada J.: Elektrotepelná technika, SNTL, Praha, 1985
- [6] Metaxas, A. C.: Foundations Of Electroheat. 1996. ISBN 0-471-95644-9
- [7] Hradílek, Z. a kol.: Elektrotepelná technika. Simulace - počítačové programy. Skripta VŠB-TU, Ostrava 2001, ISBN 80-7078-874-7
- [8] Kuneš, J.: Modelování tepelných procesů. SNTL Praha 1989, ISBN 80-03-00134-X
- [9] Příhoda, M., Rédr, M.: Sdílení tepla a proudění. VŠB Ostrava 1998, ISBN 80-78-549-7

4. Elektrotepelná zařízení indukční

4.1. Princip vzniku tepla v indukčních zařízeních

Každé indukční zařízení sestává vždy z cívky, kterou prochází střídavý proud, ze zdroje a ze vsázky, která přijímá elektromagnetické vlnění vyzářené cívkou. Je to v podstatě vzduchový transformátor, kde cívka je stranou primární a vsázka stranou sekundární, spojenou nakrátko. Průchodem proudem rovinným zářičem vzniká v jeho okolí elektromagnetické vlnění rovinné. Průchodem proudem válcovým zářičem vzniká v okolí tohoto zářiče elektromagnetické vlnění válcové. Válcová cívka, kterou prochází střídavý proud, vyzařuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění [4], [8].



Obr. 4.1: Princip indukčního zařízení

Umístíme-li souose v cívkě válcovou elektricky vodivou vsázku, pak dopadající elektromagnetické vlnění vstupuje do vsázky povrchem a vyvolává indukované proudy, jejichž účinkem se vsázka zahřívá. Pronikající elektromagnetické vlnění se utlumuje a jeho energie se mění na energii tepelnou. Hloubka vniku záření závisí na kmitočtu

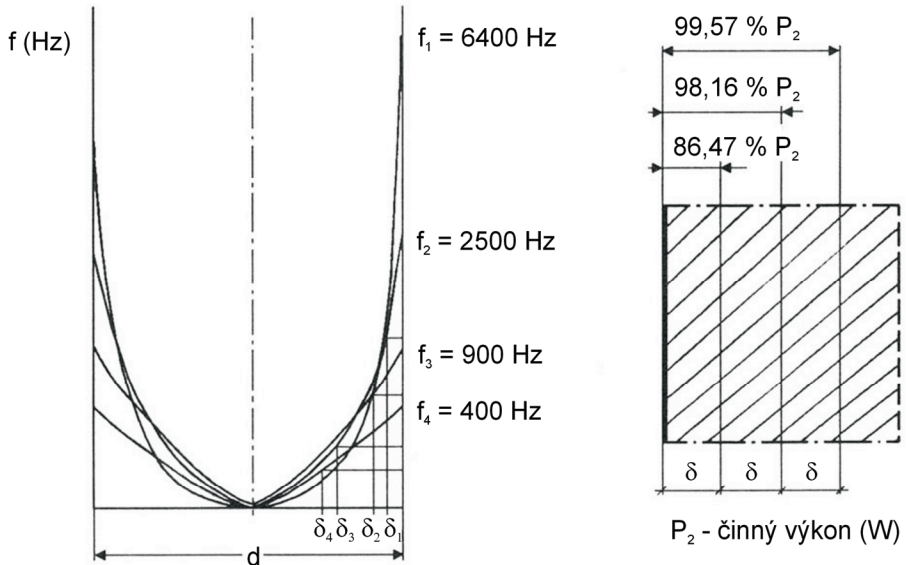
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (4.1)$$

kde δ je hloubka vniku (m), f je frekvence (Hz), μ je permeabilita ($\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$), σ je konduktivita ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$).

Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na kmitočtu je znázorněna na Obr. 4.2.

Frekvence (Hz)	Hloubka vniku (mm)					
	Cu		Al		Ocel	
	20 °C	1100 °C	20 °C	660 °C	20 °C	800 °C
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8	71,2
1000	2,1	7,1	2,7	7	1,8	15,9
10000	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5
1000000	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5

Tab. 4.1: Závislost hloubky vniku na kmitočtu

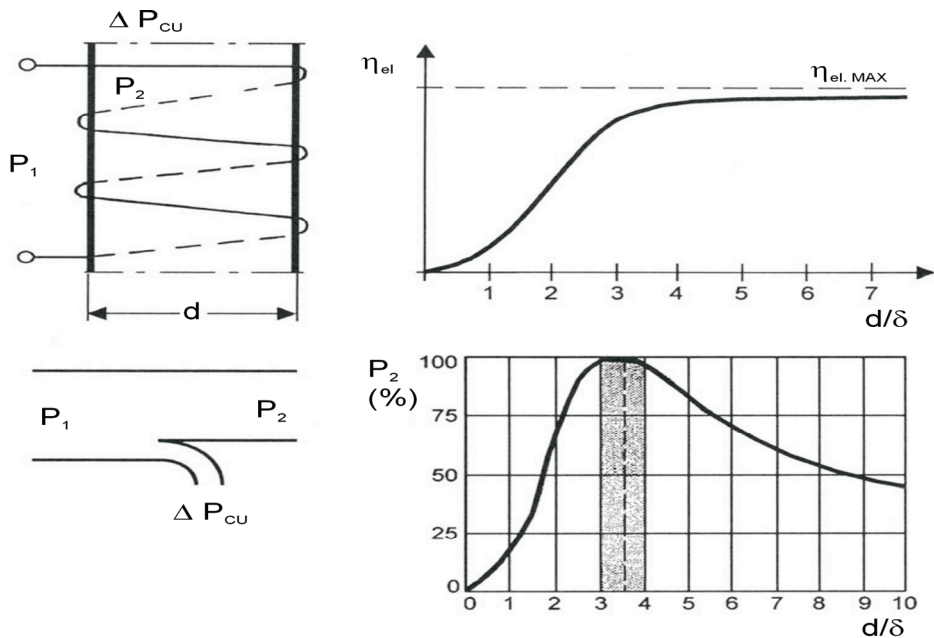


Obr. 4.2: Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na kmitočtu

Elektrická účinnost indukčního ohřevu je závislá na poměru d/δ . Tedy velikosti průměru, tloušťky vsázky ku hloubce vniku podle Obr. 4.3. Také materiál ohřívajícího předmětu a jeho teplota ovlivňuje výslednou účinnost indukčního ohřevu.

Materiál	Teplota (°C)	$\eta_{el. max}$ (%)
Cu	20	50
	1100	77
AL	20	56
	660	77
Ocel	20	93
	800	88

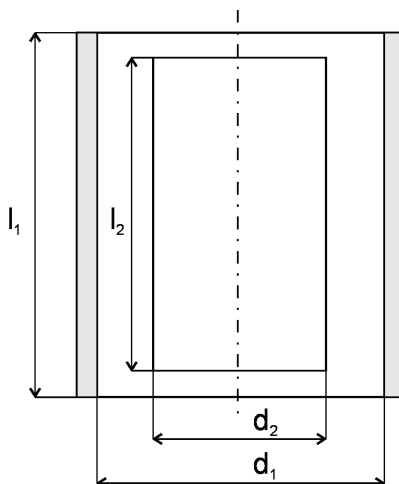
Tab. 4.2: Závislost účinnosti indukčního ohřevu na materiálu



Obr. 4.3: Elektrická účinnost indukčního ohřevu

4.2. Elektrické schéma indukčních zařízení

4.2.1. Dva sousé elektrické obvody

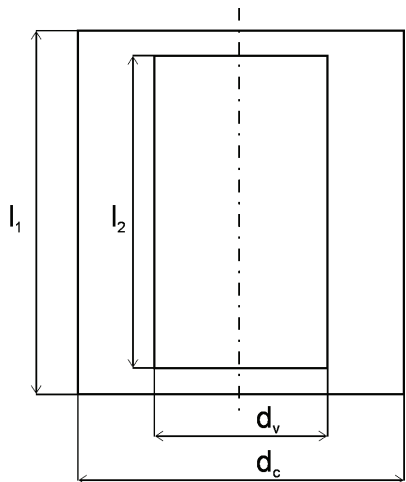


Obr. 4.4: Dva sousé elektrické obvody

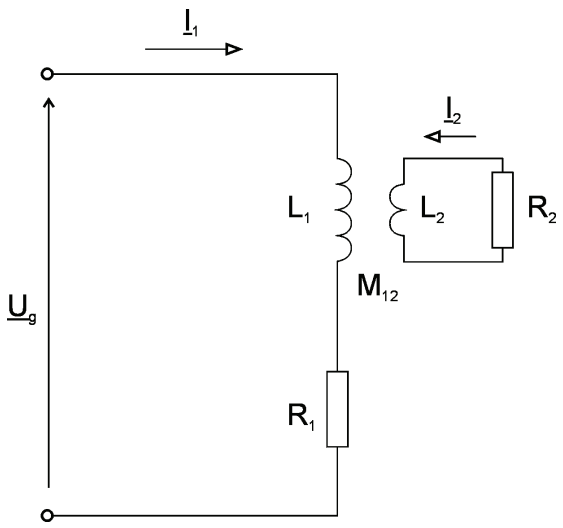
Uvažujeme dva elektrické obvody podle Obr. 4.4, cívku a vsázku. Vnitřní průměr cívky označme d_1 , průměr vsázky je d_2 , hloubky vniku jsou δ_1 , δ_2 . Délky jsou

l_1, l_2 . V této úvaze budeme uvažovat místo skutečných elektrických obvodů s prostorovým rozložením proudu náhradní nulové tloušťky. Je-li hloubka vniku značně menší než příslušný poloměr, jsou náhradní průměry dány výrazy pro cívku $d_c = d_1 + \delta_1$ za předpokladu, že $(\delta_1 \ll r_1)$, pro vsázku $d_v = d_2 - \delta_2$ za předpokladu, že $(\delta_2 \ll r_2)$.

Délky l_1, l_2 zůstávají beze změny. Místo Obr.4.4 budeme pro výpočet uvažovat náhradní uspořádání podle Obr. 4.5. Jeho elektrické schéma je na Obr. 4.6.



Obr. 4.5: Náhradní uspořádání dvou sousých elektrických obvodů



Obr. 4.6: Elektrické schéma

Na Obr. 4.6 značí L_1, L_2 (H) a R_1, R_2 (Ohm) vlastní indukčnosti a odpory cívky a vsázky, M_{12} (H) vzájemná indukčnost obou obvodů $M_{12} = k_{12} (L_1 \cdot L_2)^{1/2}$, proudy

v těchto obvodech jsme označili I_1 a I_2 . Na svorky pevné cívky přivádíme ze zdroje střídavý proud o kmitočtu f (Hz) a napětí \underline{U}_g (V). Odvodíme působení druhého obvodu na obvod první. Vyjdeme ze dvou základních rovnic těchto obvodů, z nichž každá značí, že přiváděné napětí se rovná součtu úbytků (2. Kirchhoffův zákon).

$$\underline{U}_g = (R_1 + j\omega L_1) \cdot \underline{I}_1 + j\omega M_{12} \cdot \underline{I}_2 \quad (4.2)$$

$$0 = (R_2 + j\omega L_2) \cdot \underline{I}_2 + j\omega M_{12} \cdot \underline{I}_1 \quad (4.3)$$

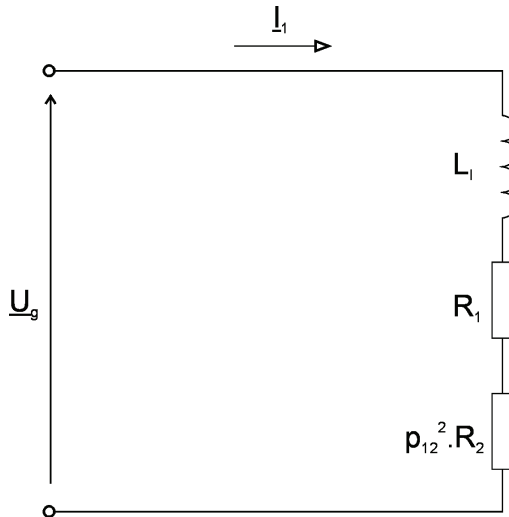
Ze druhé rovnice vyjádříme I_2 a dosadíme do první

$$\underline{U}_g = [(R_1 + p_{12}^2 R_2) + j\omega(L_1 - p_{12}^2 L_2)] \cdot \underline{I}_1 = (R_I + j\omega L_I) \cdot \underline{I}_1 \quad (4.4)$$

Naznačená matematická úprava značí, že jsme převedli hodnoty vsázky (impedanci $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$) do prvního obvodu. Výsledný odpor v prvním obvodu R_I je dán součtem vlastního odporu cívky a převedeného odporu vsázky. Výsledná indukčnost L_I je dána rozdílem vlastní indukčnosti cívky a převedené indukčnosti vsázky.

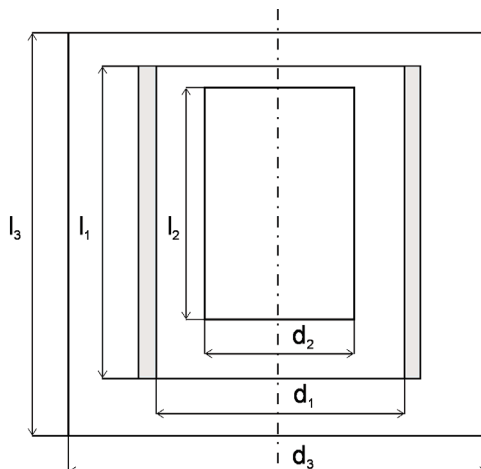
$$R_I = R_1 + p_{12}^2 R_2 ; \quad L_I = L_1 - p_{12}^2 L_2 ; \quad p_{12}^2 = \frac{\omega^2 \cdot M_{12}^2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \quad (4.5)$$

Elektrické schéma podle Obr. 4.6 má po převedení sekundární strany tvar podle Obr. 4.7.



Obr. 4.7: Elektrické schéma převedené na primární stranu

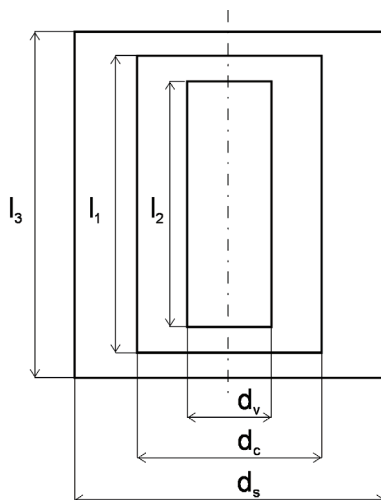
4.2.2. Tři sousé elektrické obvody



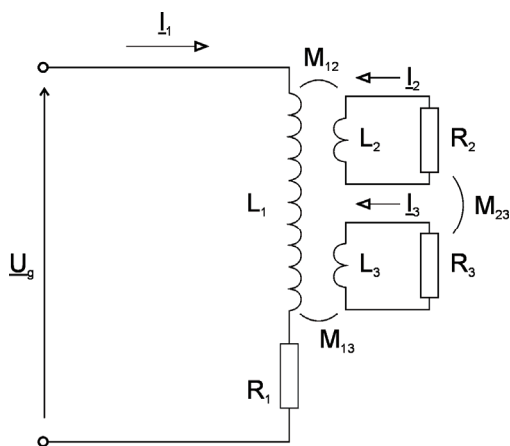
Obr. 4.8: Tři sousé elektrické obvody

Jedná-li se o indukční zařízení se stínícím pláštěm, je třeba uvažovat tři sousé elektrické obvody podle Obr. 4.8. Vnitřní průměr cívky označme d_1 , průměr vsázky je d_2 a průměr stínění je d_3 . Délky jsou l_1 , l_2 a l_3 . Místo skutečných obvodů s prostorovým rozložením proudu uvažujeme opět náhradní válce nulové tloušťky s těmito průměry pro cívku: $d_c = d_1 + \delta_1$ za předpokladu, že $(\delta_1 \ll r_1)$, pro vsázku $d_v = d_2 - \delta_2$ za předpokladu, že $(\delta_2 \ll r_2)$, pro stínění: $d_s = d_3 + \delta_3$ za předpokladu, že $(\delta_3 \ll r_3)$.

Délky l_1 , l_2 zůstávají beze změny. Místo Obr. 4.8 budeme pro výpočet uvažovat náhradní uspořádání podle Obr. 4.9. Jeho elektrické schéma je na Obr. 4.10.



Obr. 4.9: Náhradní uspořádání tří sousých elektrických obvodů



Obr. 4.10: Elektrické schéma

Na Obr. 4.10 značí L_1, L_2, L_3 (H) a R_1, R_2, R_3 (Ω) vlastní indukčnosti a odpory cívky, vsázky a stínění, M_{12}, M_{13}, M_{23} , (H) vzájemné indukčnosti, proudy v těchto obvodech jsme označili I_1, I_2 a I_3 . Na svorky pevně cívky přivádíme ze zdroje střídavý proud o kmitočtu f (Hz) a napětí \underline{U}_g (V). Odvodíme působení druhého a třetího obvodu na obvod první. Vyjdeme ze tří základních rovnic těchto obvodů. Každá rovnice značí, že přiváděné napětí se rovná součtu úbytků napětí. V zájmu kratšího psaní zavedeme impedance

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1; \quad \underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2; \quad \underline{Z}_3 = R_3 + j\omega L_3 \quad (4.6)$$

$$\underline{U}_g = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega M_{12} \cdot \underline{I}_2 + j\omega M_{13} \cdot \underline{I}_3 \quad (4.7)$$

$$0 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 + j\omega M_{12} \cdot \underline{I}_1 + j\omega M_{23} \cdot \underline{I}_3 \quad (4.8)$$

$$0 = \underline{Z}_3 \cdot \underline{I}_3 + j\omega M_{13} \cdot \underline{I}_1 + j\omega M_{23} \cdot \underline{I}_2 \quad (4.9)$$

Vyřešením těchto rovnic dostaneme neznámé I_1, I_2 a I_3 . Z rovnice třetí určíme I_3 a dosadíme do první a druhé. Abychom zjednodušili psaní, zavedli jsme pomocné konstanty

$$\underline{V}_1 = \left(\underline{Z}_1 + \frac{\omega^2 \cdot M_{13}^2}{\underline{Z}_3} \right)$$

$$\underline{V}_2 = \left(\underline{Z}_2 + \frac{\omega^2 \cdot M_{23}^2}{\underline{Z}_3} \right)$$

$$\underline{V}_3 = \left(\frac{\omega^2 \cdot M_{13} \cdot M_{23}}{\underline{Z}_3} + j\omega M_{12} \right)$$

Rovnice (4.7) a (4.8) nyní budou

$$\underline{U}_g = \underline{V}_1 \cdot \underline{I}_1 + \underline{V}_3 \cdot \underline{I}_2 \quad (4.10)$$

$$0 = \underline{V}_2 \cdot \underline{I}_2 + \underline{V}_3 \cdot \underline{I}_1 \quad \text{z toho} \quad \underline{I}_2 = -\frac{\underline{V}_3}{\underline{V}_2} \cdot \underline{I}_1 \quad (4.11)$$

$$\underline{U}_g = \left[\underline{V}_1 - \frac{\underline{V}_3^2}{\underline{V}_2} \right] \cdot \underline{I}_1 \quad (4.12)$$

Bez vhodných úprav bychom dostali složitý a nepřehledný výsledek. Pokusme se proto zjednodušit předchozí výrazy tím, že zanedbáme některé veličiny, které mají nepatrné hodnoty ve srovnání s jinými. U tavicích pecí zpravidla platí

$$R_1 < \omega L_1, \quad R_3 < \omega L_3$$

V této úvaze můžeme R_1 zanedbat proti ωL_1 , stejně R_3 proti ωL_3 . Při výpočtu pece je však třeba R_1 opět vhodným způsobem zařadit. Výrazy pro impedanci potom budou

$$\underline{Z}_1 \cong j\omega L_1; \quad \underline{Z}_3 \cong j\omega L_3 \quad (4.13)$$

U vsázky nelze zanedbat R_2 proti ωL_2 , takže v dalším uvažujeme

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2$$

Výrazy \underline{V}_1 až \underline{V}_3 budou

$$\underline{V}_1 = j\omega L_1 \cdot (1 - \kappa_{13}^2)$$

$$\underline{V}_2 = R_2 + j\omega L_2 \cdot (1 - \kappa_{23}^2)$$

$$\underline{V}_3 = j\omega \sqrt{L_1 \cdot L_2} \cdot (\kappa_{12} - \kappa_{13} \cdot \kappa_{23})$$

Dále můžeme zanedbat

$$\left(\frac{R^2}{\omega L^2} \right)^2 \quad \text{proti} \quad (1 - \kappa_{23}^2)^2$$

Po dalších úpravách bude mít výraz pro napětí konečnou podobu

$$\underline{U}_g = \left[j\omega L_1 \cdot (1 - \kappa_{13}^2) - j\omega L_1 \cdot \frac{(\kappa_{12} - \kappa_{13} \cdot \kappa_{23})^2}{1 - \kappa_{23}^2} + \frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{(\kappa_{12} - \kappa_{13} \kappa_{23})^2}{(1 - \kappa_{23}^2)^2} \cdot R_2 \right] \cdot \underline{I}_1 = \quad (4.14)$$

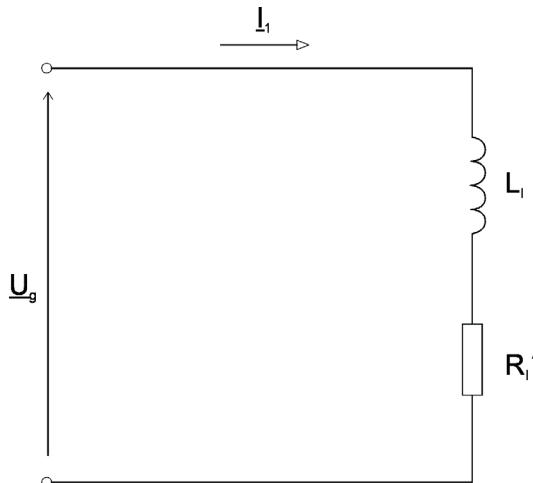
$$= \left[\frac{L_1}{L_2} \cdot \Psi_{12}^2 \cdot R_2 + j\omega L_1 \cdot (1 - \varepsilon) \right] \cdot \underline{I}_1$$

Použili jsme těchto symbolů v zájmu zkráceného psaní

$$\Psi_{12}^2 = \frac{\kappa_{12} - \kappa_{13} \cdot \kappa_{23}}{1 - \kappa_{23}^2} \quad (4.15)$$

$$\varepsilon = \frac{\kappa_{12}^2 + \kappa_{13}^2 - 2 \cdot \kappa_{12} \cdot \kappa_{13} \cdot \kappa_{23}}{1 - \kappa_{23}^2} = \frac{\kappa_{12} - \kappa_{13} \cdot \kappa_{23}}{1 - \kappa_{23}^2} \cdot \kappa_{12} + \frac{\kappa_{13} - \kappa_{12} \cdot \kappa_{23}}{1 - \kappa_{23}^2} \cdot \kappa_{13} = \kappa_{12} \cdot \Psi_{12} + \kappa_{13} \cdot \Psi_{13} \quad (4.16)$$

Provedená matematická úprava značí, že jsme hodnoty impedancí z druhého a třetího obvodu převedli do obvodu cívky. Výsledná impedance má složku reálnou R_1' a imaginární $\omega L_1'$. Elektrické schéma na Obr. 4.10 bude nahrazeno novým schématem na Obr. 4.11.



Obr. 4.11: Náhradní elektrické schéma

Reálný člen výrazu pro \underline{U}_g udává činný výsledný odpor R_I' v prvním obvodu. Protože podle učiněného předpokladu jsme uvažovali, že $R_1=R_3=0$, znamená R_I' pouze činný odpor samotné vsázky, převedený do prvního obvodu. Druhý člen výrazu udává výslednou reaktanci ωL_I v prvním obvodu, tj. vlastní reaktanci ωL_1 pecní cívky, zmenšenou o převedené reaktance ωL_2 a ωL_3 vsázky a stínění.

$$\underline{U}_g = (R_I' + j\omega L_I) \cdot \underline{I} \quad (4.17)$$

$$R_I' = \frac{L_1}{L_2} \cdot \Psi_{12}^2 \cdot R_2 \quad (4.18)$$

$$L_I = L_1 \cdot (1 - \varepsilon) \quad (4.19)$$

Proud ve všech třech obvodech

Proud \underline{I}_1 v prvním obvodu z výrazu pro napětí \underline{U}_g

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_g}{\left[\frac{L_1}{L_2} \cdot \Psi_{12}^2 \cdot R_2 + j\omega L_1 \cdot (1 - \varepsilon) \right]} = \frac{\underline{U}_g \cdot \left[\frac{\Psi_{12}^2}{Q_2} - j(1 - \varepsilon) \right]}{\omega L_1 \cdot \left[\left(\frac{\Psi_{12}^2}{Q_2} \right)^2 + (1 - \varepsilon)^2 \right]} \quad (4.20)$$

Zavedli jsme znaky Q_1 a Q_2 pro „jakost obvodu“

$$Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1} \quad a \quad Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2}$$

Poměry u tavicích pecí jsou takové, že se dopustíme chyby menší než 1 %, zanedbáme-li ve jmenovateli první člen proti druhému a dále dělíme čitatele i jmenovatele výrazem $(1 - \varepsilon)$. Potom

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_g}{\omega L_1 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot \left[\frac{\Psi_{12}^2}{(1 - \varepsilon) \cdot Q_2} - j1 \right] \quad (4.21)$$

Proud \underline{I}_2 z výrazu (4.11)

$$\underline{I}_2 = -j \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \cdot \frac{(\kappa_{12} - \kappa_{13} \cdot \kappa_{23}) \cdot \left[\frac{R_2}{\omega L_2} - j \cdot (1 - \kappa_{23}^2) \right]}{\left(\frac{R_2}{\omega L_2} \right)^2 + (1 - \kappa_{23}^2)^2} \cdot \underline{I}_1 \quad (4.22)$$

Opět lze zanedbat ve jmenovateli první člen proti druhému. V konečné úpravě

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_g \cdot \Psi_{12}}{\omega \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot \left[-\frac{1}{(1 - \varepsilon) \cdot Q_2} \cdot \frac{1 - \kappa_{13}^2}{1 - \kappa_{23}^2} - j1 \right] \quad (4.23)$$

Proud \underline{I}_3 vyjde z výrazu (4.9) pro úbytky napětí ve třetí smyčce náhradního schématu

$$\underline{I}_3 = -\frac{j\omega}{\underline{Z}_3} \cdot (M_{13} \cdot \underline{I}_1 + M_{23} \cdot \underline{I}_2) \quad (4.24)$$

Dosaďme za \underline{I}_1 a za \underline{I}_2 z odvozených vztahů

$$\underline{I}_3 = -\frac{\underline{U}_g \cdot \Psi_{12}}{\omega \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_3} \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot \left[\frac{1}{(1 - \varepsilon) \cdot Q_2} \cdot \frac{\kappa_{23} - \kappa_{12} \cdot \kappa_{13}}{1 - \kappa_{23}^2} + j \frac{\kappa_{13} - \kappa_{12} \cdot \kappa_{23}}{\kappa_{12} - \kappa_{13} \cdot \kappa_{23}} \right] \quad (4.25)$$

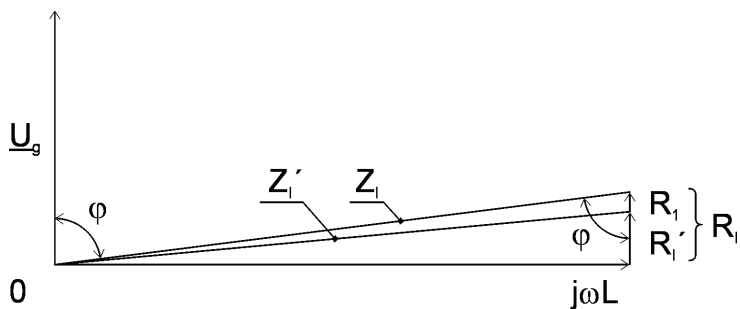
4.2.3. Rezonanční obvod

Uvažujeme opět tři elektrické obvody cívky, vsázky a stínící plášť podle Obr. 4.8. Po převedení impedancí vsázky a stínění do obvodu cívky jsme dostali výraz pro napětí generátoru. Výsledné elektrické schéma je na Obr. 4.10. Výsledná indukčnost a výsledný odpor jsou dány výrazy

$$L_I = L_1 \cdot (1 - \varepsilon); \quad R_I' = \frac{L_1}{L_2} \cdot \Psi_{12}^2 \cdot R_2 \quad (4.26)$$

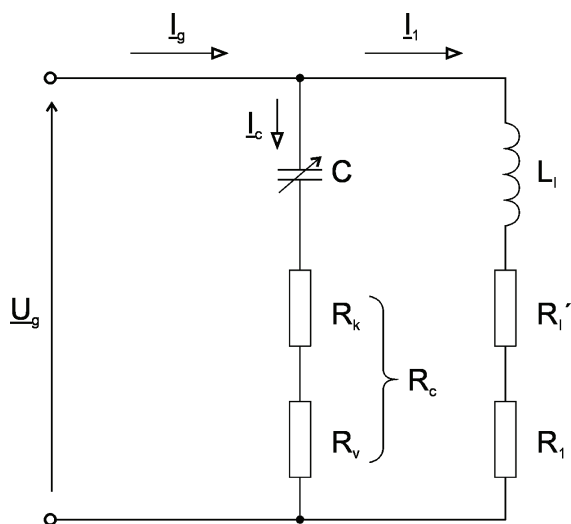
Reálná část R_I' výsledné impedance značí pouze činný odpor R_2 samotné vsázky, převedený do prvního obvodu, protože jsme při odvozování zanedbali reálné složky R_1 a R_3 v impedancích Z_1 a Z_3 . Skutečný výsledný činný odpor R_I cívky je však dán součtem převedeného odporu R_I' a vlastního odporu R_1 cívky $R_I = R_I' + R_1$. Hodnota R_1 bývá u peci tohoto typu asi 4krát menší než R_I' . Výsledná reaktance ωL_I bývá u peci na ocel asi 10krát větší než R_I' , u vodivějších materiálů je tento poměr ještě větší. Dopustíme se proto nepatrné chyby, budeme-li v dal-

šim uvažovat ve výsledné impedanci $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ odpor R_1 místo R_1' . Pro větší názornost sestrojme vektorový diagram pro impedanci Z_1' , resp. Z_1 Obr. 4.12. Rozdíl obou impedancí je opravdu zanedbatelný.



Obr. 4.12: Vektorový diagram pro impedanci Z_1'

U uvažované tavicí pece jsou činné ztráty P_3 ve stínění pouze 0,73 % z příkonu P_c do cívky. Je tedy i odpor R_3 převedený do cívky menší než 1 % z celkového odporu R_1 , a proto jej zanedbáme a nadále nebudeme uvažovat. Ve výsledném schématu Obr. 4.10 zakreslíme vlastní odpor cívky R_1 , takže dostaneme nové schéma Obr. 4.13.



Obr. 4.13: Výsledné elektrické schéma

Z vektorového diagramu pro impedanci Obr. 4.12 vidíme, že impedance Z_1 má poměrně malou reálnou složku, což značí, že účinník $\cos\phi$ pecní cívky je malý

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{R_I}{Z_I} = \frac{R_I}{\sqrt{R_I^2 + (\omega L_I)^2}} = \\ &= \frac{R_I}{\omega L_I} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Q_I^2} + 1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_I^2}} \cong \frac{1}{Q_I} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Znakem Q_I jsme označili výslednou „jakost“ obvodu

$$Q_I = \frac{\omega L_I}{R_I}$$

Proud I_1 v pecní cívce má jalovou složku značně větší než je složka činná. Abychom odlehčili zdroj od dodávky jalového magnetizačního proudu, připojujeme paralelně k cívce vhodně dimenzovanou kapacitu C , která dodává magnetizační složku proudu I_1 Obr. 4.13. Vlastní kmitočet obvodu (L_I , R_I , C) je potom roven přiváděnému kmitočtu f (Hz). Dielektrické ztráty v kondenzátoru C nahrazujeme při výpočtech obvykle ztrátami ve vhodném odporu R_k , který je připojen ke kondenzátoru buď paralelně nebo v sérii. Na Obr. 4.13 jsme vyznačili sériový odpor R_c , který zahrnuje dielektrické ztráty P_k v kondenzátoru C a dále poměrně malé ztráty P_v ve spojovacím pásovém vedení mezi pecní cívkou a kondenzátorovou baterií, $R_c = R_k + R_v$. Velikost odporu $R_c = R_k + R_v$ ve schématu Obr. 4.13 je dána tím, že při průchodu proudu I_c se v něm spotřebuje 5 % z příkonu P_g . U ohřívacích zařízení na ocel jsou ztráty dielektrické a ve spojovacím vedení menší, přibližně 3 % z P_g generátoru. Pak proud I_c je přibližně stejný, jako kdyby tam nebyl odpor R_c .

$$\underline{I}_c = j\omega C \cdot \underline{U}_g \quad (4.28)$$

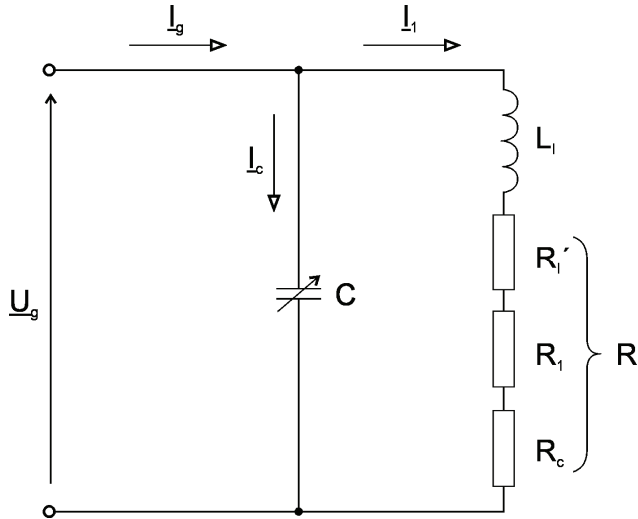
V dalším se (v zájmu jednoduššího výpočtu indukčního zařízení) dopustíme přípustné chyby menší než 1 % tím, že odpor R_c přemístíme ve schématu Obr. 4.13 z větve kondenzátoru do větve cívky. Ve větvi cívky jsou zařazeny všechny činné odpory Obr. 4.14.

$$R_I = R_I' + R_I + R_c \quad (4.29)$$

Odvození potřebné kapacity

Na Obr. 4.14 máme obvod (L_I , R_I , C) se dvěma paralelními větvemi, napájený ze zdroje generátoru zvýšeného kmitočtu f (Hz), $\omega = 2\pi f$. Kapacitu C nastavíme na takovou hodnotu, aby byl obvod právě vyladěný pro přiváděný kmitočet. To znamená, že vlastní kmitočet obvodu se rovná přiváděnému kmitočtu f . V takovém případě zdroj dodává do obvodu (L_I , R_I , C) pouze činný příkon, proud I_g nemá jalovou složku. Obecně platí, že proud I_g ze zdroje se rozděluje do obou větví, kterými procházejí proudy I_1 a I_c .

$$\underline{I}_g = \underline{I}_1 + \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_g}{R_l + j\omega L_l} + j\omega C \cdot \underline{U}_g$$



Obr. 4.14: Elektrické schéma pro odvození potřebné kapacity

Po úpravě na reálnou a imaginární složku

$$\underline{I}_g = \frac{\underline{U}_g}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} \cdot R_l + j \frac{\underline{U}_g}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} \cdot (\omega \cdot C \cdot R_l^2 + \omega \cdot C \cdot \omega^2 \cdot L_l^2 - \omega \cdot L_l) = \underline{I}_{gr} + j \underline{I}_{gi} \quad (4.30)$$

Není-li obvod vyladěný, má proud \underline{I}_g složku činnou a jalovou. Potřebná kapacita C pro vyladění vyjde z podmínky, že jalová složka $\underline{I}_{gi} = 0$. Položíme-li výraz v závorce roven nule, dostaneme

$$C = \frac{L_l}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} = \frac{L_l}{(\omega L_l)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{Q_l^2}} = \frac{1}{\omega^2 L_l} \cdot \frac{Q_l^2}{Q_l^2 + 1} \quad (4.31)$$

Z tohoto výrazu vidíme, jak potřebná kapacita C závisí na jakosti obvodu Q_l . Je-li $R_l^2 \ll (\omega L_l)^2$ neboli $Q_l^2 \gg 1$ (zanedbáme-li ztráty v obvodu) dostaneme známý Thompsonův vztah

$$C = \frac{1}{\omega^2 L_l}; \quad \omega^2 = \frac{1}{C \cdot L_l} \quad (4.32)$$

Je-li přiváděný kmitočet konstantní, $\omega = 2\pi f = \text{konst.}$, zmenšuje se potřebná kapacita C pro vyladění, roste-li činný odpor R_l . Naopak maximální hodnoty C dosahuje, je-li $R_l = 0$. Vraťme se k výrazu pro kapacitu C . Má-li kapacita C správnou velikost, je obvod (L_l , R_l , C) v rezonanci pro přiváděný kmitočet. Obvod odebírá ze zdroje pouze činný výkon, proud I_{gr} má pouze činnou složku I_{gr} . Její velikost určíme z výrazu pro proud I_{gr}

$$I_{gr} = \frac{U_g}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} \cdot R_l \quad (4.33)$$

Vyladěný pecní obvod se vůči zdroji chová jako činný zatěžovací odpor R_z , jehož hodnotu dostaneme z předchozího vztahu

$$R_z = \frac{U_g}{I_{gr}} = \frac{R_l^2 + (\omega L_l)^2}{R_l} = R_l \cdot (1 + Q_l^2) \quad (4.34)$$

Pokud u tavicích je zpravidla $R_l^2 \ll (\omega L_l)^2$; $Q_l^2 \gg 1$, můžeme výraz pro výpočet R_z zjednodušit

$$R_z \cong \frac{(\omega L_l)^2}{R_l} = R_l \cdot Q_l^2 \cong \omega L_l \cdot Q_l \quad (4.35)$$

Spojíme-li výraz (4.35) pro R_z a výraz (4.32) pro kapacitu C , dostaneme další výraz pro R_z

$$R_z = \frac{L_l}{C \cdot R_l} \quad (4.36)$$

Z výrazu pro I_{gr} můžeme dále odvodit, kolikrát je u vyladěného obvodu oscilační proud I_l větší, než budící proud I_g z generátoru

$$\begin{aligned} I_g = I_{gr} &= \frac{U_g \cdot R_l}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} = \\ &= \frac{U_g}{R_l + j\omega L_l} \cdot \frac{R_l}{R_l - j\omega L_l} = I_1 \cdot \frac{1 + jQ_l}{1 + jQ_l^2} \end{aligned} \quad (4.37)$$

Absolutní hodnoty

$$|I_g| = |I_{gr}| = I_1 \cdot \frac{\sqrt{1 + Q_l^2}}{1 + Q_l^2} = \frac{I_1}{\sqrt{1 + Q_l^2}} = \frac{I_1}{Q_l}$$

U tavicích pecí bývá $Q_l = 12$, takže $Q_l^2 \gg 1$. Proud I_l v pecní cívce je velmi přibližně Q_l krát větší, než proud I_g ze zdroje. Porovnejme ještě mezi sebou proud I_l v pecní cívce a proud I_c , procházející kapacitou C

$$\begin{aligned} \underline{I}_c &= \underline{I}_g - \underline{I}_l = \frac{\underline{U}_g \cdot R_l}{(R_l + j\omega L_l) \cdot (R_l - j\omega L_l)} - \frac{\underline{U}_g}{R_l + j\omega L_l} = \\ &= \underline{I}_l \cdot \left(\frac{R_l}{R_l - j\omega L_l} - 1 \right) = \underline{I}_l \cdot Q_l \cdot \frac{(-Q_l + j1)}{1 + Q_l^2} \end{aligned} \quad (4.38)$$

$$|I_c| = I_l \cdot \frac{Q_l}{\sqrt{1 + Q_l^2}} \cong I_l$$

Můžeme-li zanedbat 1 proti Q_l^2 (u tavicích pecí), je proud I_c , procházející kapacitou C téměř stejně velký jako proud I_l v pecní cívce. Např. již pro $Q_l = 10$ je $I_c = 0,995 I_l$. Na této skutečnosti je založen starší způsob ladění indukční pece pomocí dvou stejných ampérmetrů, umístěných na rozvaděči, obvykle nad sebou. Tavič může i z větší dálky sledovat stav vyladění a podle potřeby zasáhnout. Proud $I_l = I_c$ v oscilačním obvodu mají vždy poměrně vysoké hodnoty. Dodává-li generátor do pece např. výkon $P_g = 500$ kW, $U_g = 1000$ V, je proud ze zdroje ve vyladěném stavu $I_g = 500$ A. Je-li jakost obvodu $Q_l = 12$, je proud $I_l = I_c = 6000$ A. Pro tak velké proudy je vhodné provést spojovací vedení mezi cívkou a kapacitou jako pásové vedení [1], [2].

4.3. Indukční kelímkové pece

Indukční kelímkové pece s nevodivým kelímkem

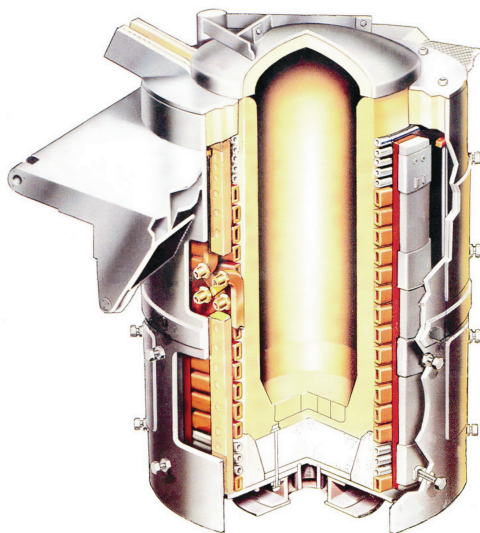
V cívce je umístěn kelímek, který se pěchuje z keramické hmoty. Pec má buď stínící plášť z mědi, nebo ocelový plášť, který na vnitřní straně nese svazky transformátorových plechů.

Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm

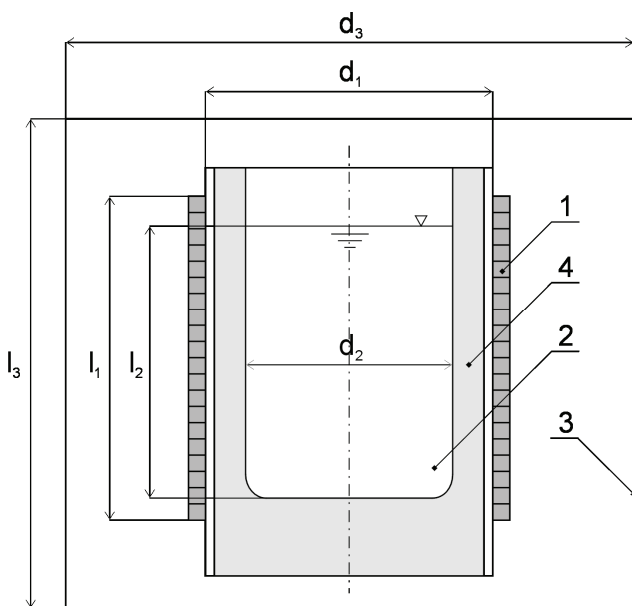
Schematicky je pec tohoto typu vyznačena na Obr. 4.16.

Keramický kelímek 4 válcového tvaru elektricky nevodivý, obsahující vsázku 2, je ovinut cívkou 1. Cívku vineme zpravidla z měděné trubky obdélníkového průřezu. Cívkou prochází proud zvýšeného kmitočtu (500 až 1000 Hz), příp. proud síťového kmitočtu 50 Hz. Vnitřní povrch cívky vyzařuje do své dutiny elektromagnetické vlnění, které dopadá kolmo na povrch vsázky, je jí pohlcováno, energie elektromagnetická se mění v tepelnou. Dutinou cívky prochází magnetický tok, který se uzavírá vně cívky. Je třeba učinit vhodné opatření, aby intenzita magnetického pole vně pece byla co nejmenší, aby nedocházelo k zahřívání nosných konstrukcí pece. Toho dosáhneme buď tak, že pec opatříme stínícím pláštěm z dobře vodivého materiálu vhodného průměru, nebo umístíme vně cívky jádro ze železných plechů, kterým se magnetický tok uzavírá. Indukční kelímkové pece mají vždy

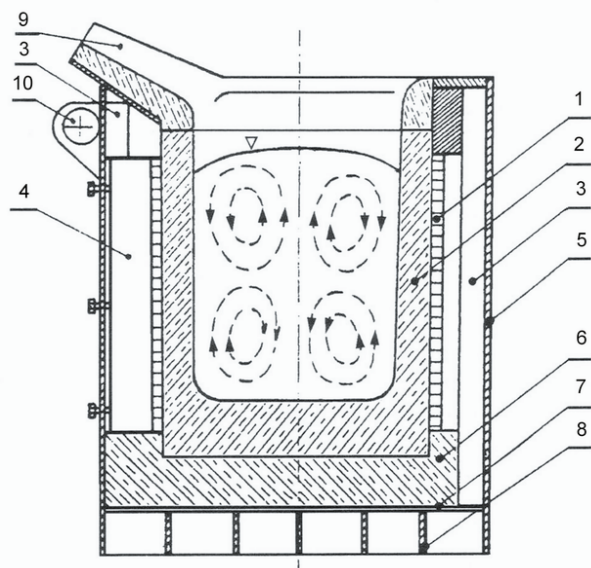
stínění, a to buď jako vodivý stínící plášť, nebo jako jádro z transformátorových plechů vně cívky. Počítáme-li však menší pece, můžeme zanedbat vliv stínění a pec počítáme, jakoby stínění neměla. Při výpočtu uvažujeme pouze cívku a vsázku, tedy pouze dva na sebe působící elektrické obvody. Výpočet se tím zjednoduší a zkrátí.



Obr. 4.15: Indukční kelímková pec



Obr. 4.16: Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm



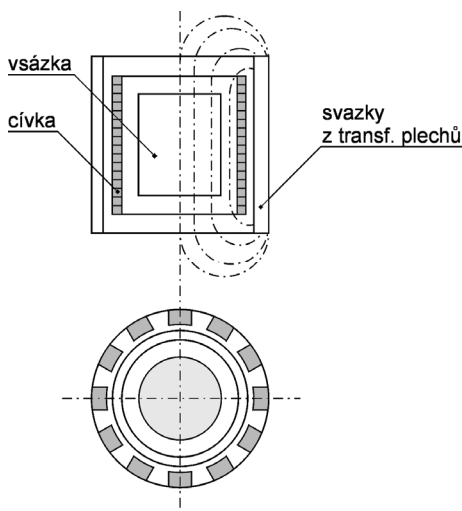
Obr. 4.17: Schéma indukční kelímkové pece s vodivým stínícím pláštěm

1 je kruhová ohřívací cívka. Cívka je navinuta jako jednovrstvová, nejčastěji dutým měděným vodičem čtyřhranného průřezu. Dutinou vodiče protéká chladicí voda, 2 je keramický zadusný kelímek pece. Nejčastěji z křemičitého písku, 3 jsou svazky transformátorových plechů. Jsou svisle uspořádány po celém vnitřním obvodu pláště pece 5. Tyto svazky svádějí magnetický tok vně cívky, aby nezabíhal do pláště 5 a do dalších konstrukčních částí pece. 4 jsou střední žárobetonové trámce pro cívku 1, 5 je ocelový plášť pece, 6 je cihlová keramická vyzdívka na dně pece, 7 je stínící měděný plech zabráňující vniknutí magnetického toku cívky do mřížového dna pece, 8 je mřížové dno pece, 9 je hubice pece pro odlévání a 10 je osa, kolem které se pec otáčí při vyklápění, odpichu. Pec je vyklápěna většinou hydraulickými válci.

Indukční kelímková pec se železným jádrem vně cívky

Je-li indukční kelímková pec opatřena vodivým stínícím pláštěm, sníží se velmi výrazně intenzita magnetického pole vně pláště. Podobného účinku dosáhneme také tak, že vně cívky, místo stínícího vodivého pláště dáme železné jádro z většího počtu svazků z transformátorových plechů, podle Obr. 4.18. Převážná část magnetického toku buzeného cívkou se bude uzavírat vně cívky magneticky dobře vodivou cestou, tj. svazky transformátorových plechů, uchycených na vnitřní straně pecního pláště z kotlového plechu. Zařazením magneticky vodivých svazků se zmenší magnetický odpor pro magnetický tok buzený cívkou, takže tok poněkud vzroste. Zvětší se vlastní indukčnost pecní cívky, tj. magnetický tok pro jednotkový proud. Rovněž vzroste vlastní indukčnost a vzájemná indukčnost M_{12} . Pec se stínícím pláštěm vyžaduje cívku s poněkud vyšším počtem závitů a větší kondenzátorovou baterii než je pec s jádrem. Užitečný výkon je nižší a ztráty v cívce jsou vyšší u pece s pláštěm než u pece s jádrem. Hodnoty pro pec bez stínění jsou zpravidla mezi hodnotami I a III a jsou bližší hodnotám III. Elektrická účinnost je u pece

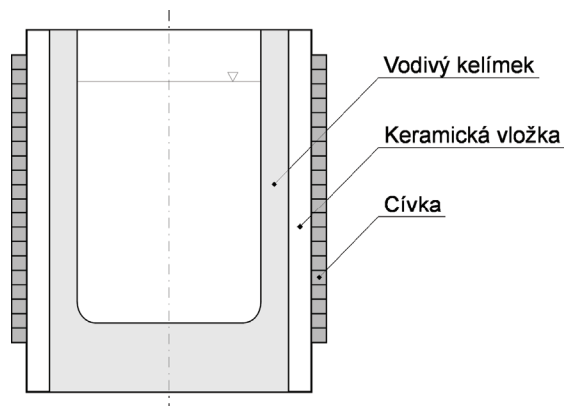
s pláštěm výrazně nižší než u pece s jádrem. Nejdůležitějším výsledkem provedeného porovnání je zjištění, že účinnost pece se železným jádrem je téměř o 5 % vyšší než u pece se stínícím pláštěm. To přináší v provozu značné úspory elektrické energie, zejména u velkých pecí s nepřetržitým provozem. Provedení indukční kelímkové pece se železným jádrem je proto technicky dokonalejším řešením. Výrobně však tato pec je dražší a dojde-li při provozu k protavení kelímku, je poškození této pece zpravidla horší, případně dojde k úplnému zničení pece.



Obr. 4.18: Indukční kelímková pec se železným jádrem vně cívky

Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

Indukční pec s nevodivým kelímkem má nízkou elektrickou účinnost při tavení dobře vodivých materiálů, jako jsou měď a její slitiny, hliník a jeho slitiny apod. Elektrická účinnost podstatně stoupne jestliže pec opatříme vodivým kelímkem schematicky podle Obr. 4.19 (pro tavení Al a Cu). Jedná-li se o nižší teploty, jaké přicházejí v úvahu při tavení hliníku a jeho slitin, zhotovuje se kelímkem z ocelolitin. Pro vyšší teploty se používají tzv. grafitové kelímky. Zhotovují se ze směsi šamotu a grafitu. Čím více grafitu, tím je kelímkem vodivější. Velká vodivost však není žádoucí. Mezi kelímkem a cívkou je keramická izolační vrstva, která zmenšuje ztrátový tepelný tok ze žhavého kelímku do vodou chlazené cívky. Zavedeme-li do cívky proud, dopadá elektromagnetické vlnění vyzářené vnitřním povrchem cívky na vnější povrch vodivého kelímku, vstupuje do jeho stěny, indukuje proud ve stěně a jeho průchodem se kelímkem zahřívá. Ten potom předává teplo vsázce, vložené do jeho dutiny. Poměry jsou obvykle takové, že ve stěně kelímku se přemění v teplo větší část dopadající elektromagnetické energie, menší část však projde stěnou a zahřívá přímo vsázku. Rozhodující je vzájemný poměr mezi tloušťkou stěny δ_3 a hloubkou vniku d_3 . Je-li hloubka vniku malá proti tloušťce stěny, pohltí se všechna elektromagnetická energie ve stěně kelímku. Výpočet je stejný jako pro dva sousední válce u pece s nevodivým kelímkem. Při výpočtu považujeme kelímkem za vsázku. Není-li však $d_3 \ll \delta_3$, projde značná část elektromagnetické energie stěnou kelímku do vsázky.

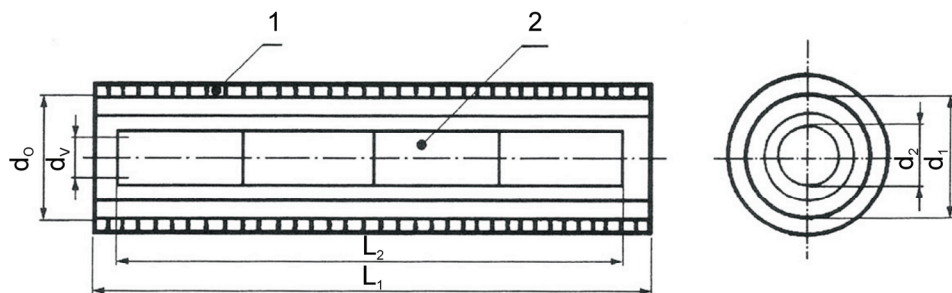


Obr. 4.19: Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

Indukční prohřívací zařízení

V závodech, kde se zhotovují součásti kováním nebo lisováním za horka, je důležitým problémem rovnoměrné prohřátí materiálu. Kovové vývalky válcového nebo čtyřhranného tvaru nejčastěji ocelové je třeba ohřát na kovací teplotu (ocel 1150 °C až 1250 °C). Ve starších kovárnách se k prohřívání vývalků používá pecí palivových, vytápěných plynem, práškovým uhlím nebo naftou. Rovnoměrné prohřátí v celém průřezu však trvá příliš dlouho a během této doby dochází na povrchu k oxidaci materiálu. Několik procent materiálu se zničí a mimoto vzniklé okraje poškozují při další operaci zápusťky a zkracují jejich životnost. Naproti tomu prohřívání v indukční peci trvá velmi krátkou dobu, takže prakticky nenastává oxidace na povrchu. Ekonomické výhody jsou příčinou rychlého zavádění indukčního prohřívání do nově budovaných kováren. Indukční pec (indukční ohříváčka) na vývalky má obvykle válcový tvar, schematicky podle Obr. 4.20.

Hlavní částí indukční ohříváčky je indukční cívka 1 o délce obvykle asi 1 m. Její průměr se volí podle průměru vývalků, které mají být indukčně prohřívány. V induktoru je obvykle větší počet (4 až 7) vývalků téže délky.



Obr. 4.20: Schéma indukčního prohřívání

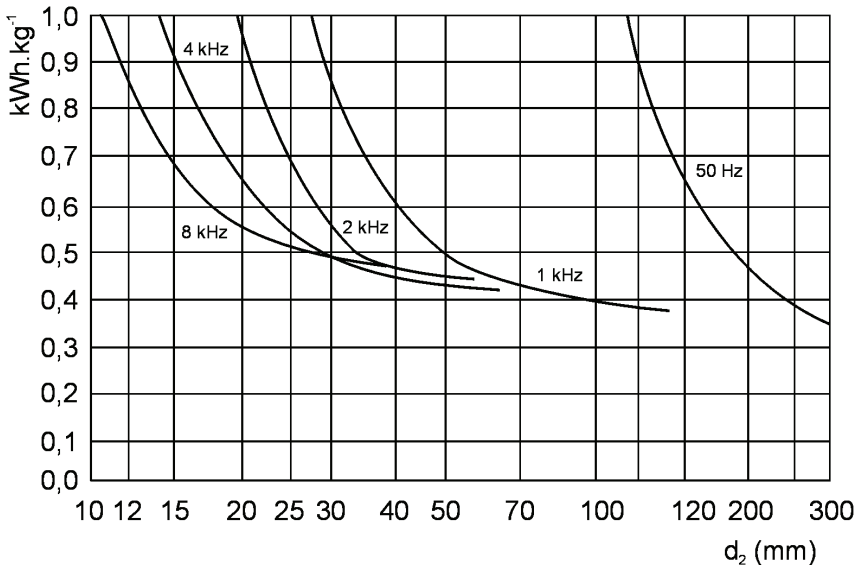
Volba kmitočtu a doby prohřívání

Rovnoměrné prohřátí nastane tak, že se teplo z povrchové vrstvy, kde vzniká, šíří vedením do nitra vývalku. Z tohoto hlediska je výhodnější, aby vrstva, ve které se teplo vyvíjí, nebyla příliš slabá, což jinými slovy znamená, že kmitočet nesmí být příliš vysoký. Je proto třeba zvolit vhodný kmitočet, a tím i vrstvu, ve které se teplo vyvíjí tak, aby nastalo absorbování energie s dobrou účinností, avšak aby nedocházelo k přehřívání povrchu. Za optimální lze označit takový kmitočet, při kterém je přibližně $r_2 = (2,5 \text{ až } 3,0) \cdot \delta_2$. Bereme hloubku vniku pro materiál již prohřátý, tj. magnetický, jde-li o ocel. V praxi se volí kmitočet pro indukční prohřívání oceli v závislosti na průměru vývalků podle Tab. 4.3. Z tabulky vidíme, že každý kmitočet lze použít pro průměry ve značném rozsahu různých.

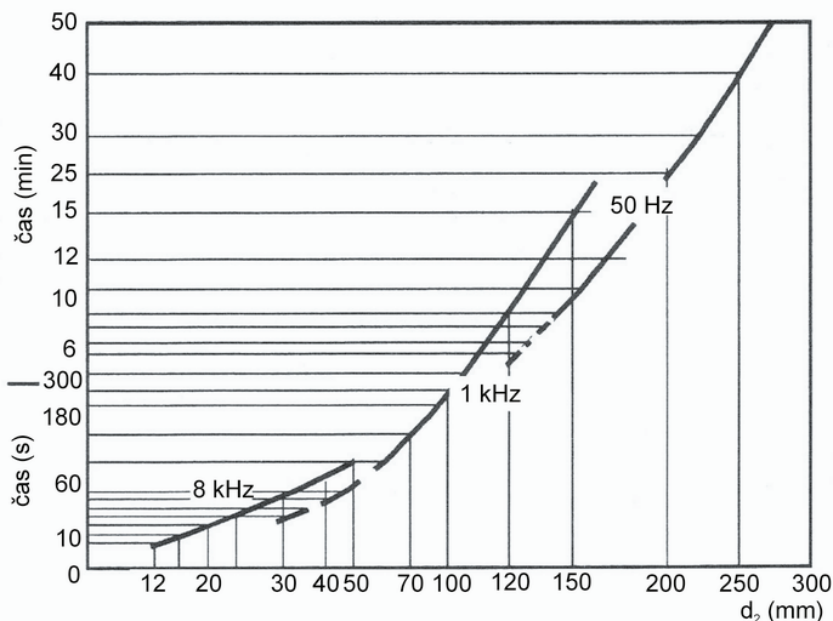
f (Hz)	50	500	1000	2000	4000	8000
d (mm)	160÷500	80÷280	50÷180	35÷120	22÷70	15÷50

Tab. 4.3: Volba kmitočtu pro indukční prohřívání oceli

Z diagramu uvedeného na Obr. 4.21 je zřejmé, že měrná spotřeba v kWh na prohřátí 1 kg oceli na 1200 °C stoupá, jestliže se blížíme k dolní hranici rozsahu průměrů. Materiál se stává elektromagneticky pružným. Pro průměr $d_2 = 10,0$ cm oceli je měrná spotřeba energie ze sítě asi $0,40 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ při kmitočtu 1000 Hz. Doba t potřebná k rovnoměrnému prohřátí oceli se obvykle nepočítá a bere se z příslušného diagramu podle Obr. 4.22.



Obr. 4.21: Diagram měrné spotřeby



Obr. 4.22: Diagram doby k prohřátí ocelového vývalku

Rovnoměrnost prohřátí vývalku je postačující, jestliže ke konci prohřívání procesu není rozdíl teploty na povrchu a v ose větší než 100 °C. Nerovnoměrnost se ještě zmenší během dalších zpravidla několika desítek vteřin, které uplynou mezi koncem prohřívání a kovací operací v lisu. Z Obr. 4.22 můžeme odečíst, že vhodná doba k prohřátí ocelového vývalku o průměru $d_2 = 100$ mm je asi 7 min, při uvažovaném kmitočtu 1000 Hz. Doba prohřátí se dá zkrátit asi o třetinu v případě tzv. rychloohřevu. Při rychloohřevu je část cívky na začátku induktoru, kterým vstupují studené vývalky, provedena se zhuštěnými závitů. V této části připadá více závitů N_{11} na 1 cm délky cívky. Tím vzroste intenzita magnetického pole $H_1 = N_{11} I_1$ ($A \cdot cm^{-1}$) ve vstupní části induktoru, a protože vyvinuté teplo závisí na druhé mocnině H_1^2 , zahřejí se v této části induktoru vložené kusy rychleji na vyšší teplotu a celková doba prohřívání se zkrátí. Větší rozdíl teploty na povrchu a v ose vývalku se potom vyrovná v dalším průběhu pomalejšího prohřívání [6].

4.4. Indukční zařízení pro povrchový ohřev

Pro povrchové prohřívání předmětů řádově do hloubky 10 mm používáme vysoké frekvence, řádově 10^4 až 10^6 Hz. V průmyslu se používají indukční prohřívací zařízení, induktory, k těmto technologickým účelům [4]:

- Kalení
- Pájení
- Svařování
- Rafinační přetavování

Hloubka prohřáté vrstvy závisí na frekvenci podle následující Tab. 4.4.

Frekvence f (kHz)	Hloubka vniku δ (mm) (ocel 1000 °C)	Hloubka ohřáté vrstvy $g = (2 \text{ až } 3) \delta$ (mm)
10	5,00	10 - 15
100	1,60	3,2 - 5
1 000	0,50	1 - 1,5
10 000	0,16	0,3 - 0,5
30 000	0,09	0,2 - 0,3
100 000	0,05	0,1 - 0,15

Tab. 4.4: Hloubka prohřáté vrstvy v závislosti na frekvenci

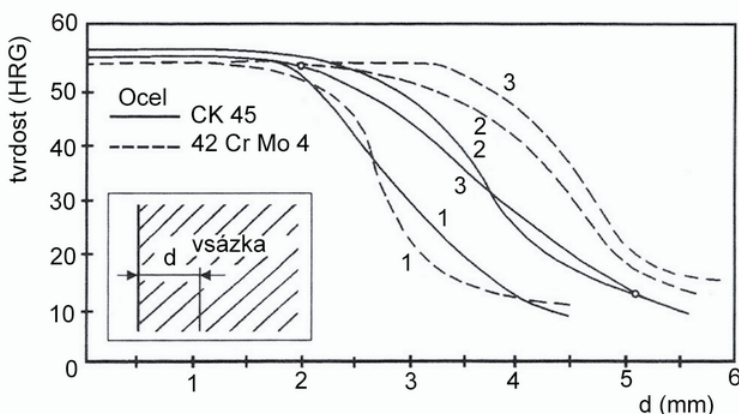
Kalení

Pro kalení používáme specifický výkon v rozsahu 1 až 20 kW·cm⁻². Optimální frekvence se vypočítá ze vztahu

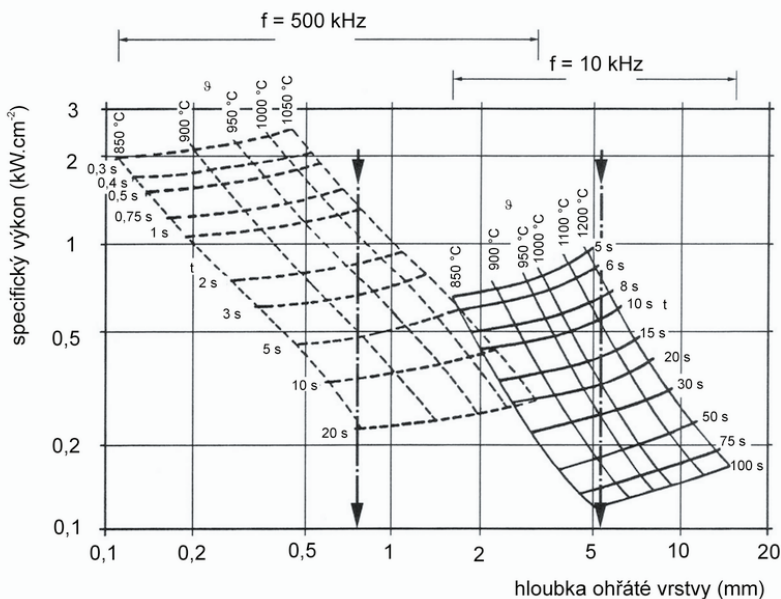
$$\frac{0,015}{d^2} < f < \frac{0,25}{d^2} \quad (4.39)$$

kde d je hloubka zakalení (mm), f je frekvence (kHz).

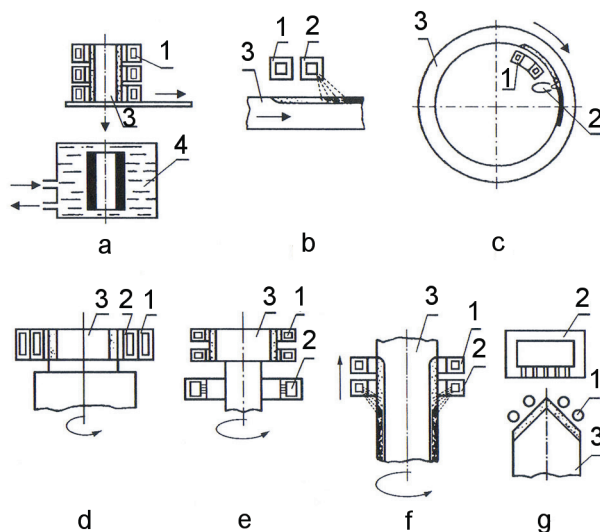
Na Obr. 4.23 a v Tab. 4.4 je možné sledovat hloubku zakalení d v závislosti na frekvenci a tvrdosti použité oceli. Křivka 1 je pro $f = 400$ kHz, 2 je pro $f = 10$ kHz a 3 je pro $f = 4$ kHz. Energetické poměry při kalení vyjadřuje nomogram na Obr. 4.24. Metody chlazení zahřáté povrchové vrstvy při kalení jsou schematicky znázorněny na Obr. 4.25.



Obr. 4.23: Hloubka zakalení



Obr. 4.24: Frekvenční závislost ohřáté vrstvy při kalení



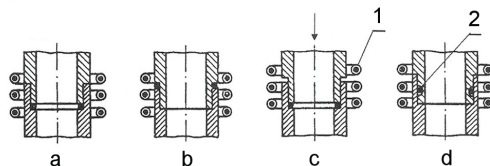
Obr. 4.25: Metody chlazení zahřáté povrchové vrstvy při kalení

Na Obr. 4.25 je 1 induktor, 2 je sprcha, 3 je vsázka a 4 je zásobník vody.

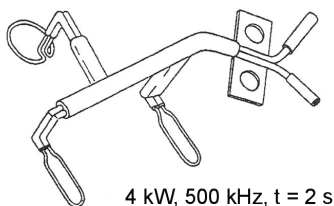
Pájení

Při pájení používáme frekvenci v rozsahu 2 kHz až 2,5 MHz. Princip pájení prostřednictvím speciálního induktoru je znázorněn na Obr. 4.26 a Obr. 4.27 speci-

ální induktor pro pájení tří různých tvarů současně. Pájení na měkko využívá pro teploty od 150 do 450 °C výkony 0,5 až 5 kW. Pájení na tvrdo využívá pro teploty od 450 do 1 050 °C výkony 3 až 30 kW. Na Obr. 4.26 je 1 induktor, 2 je pájka.



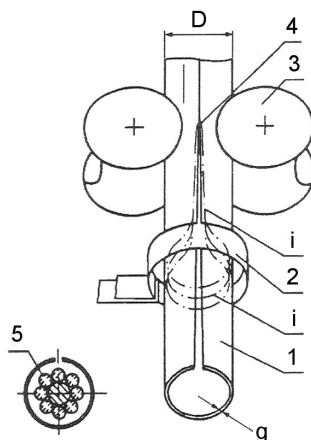
Obr. 4.26: Princip indukčního pájení



Obr. 4.27: Speciální induktor pro pájení tří různých tvarů současně

Svařování trubek

Princip svařování trubek pomocí posunujícího se induktoru je znázorněn na Obr. 4.28. Používají se zdroje o frekvenci 8 až 500 kHz a výkony 50 až 700 kW podle různé hloubky prohřátí.

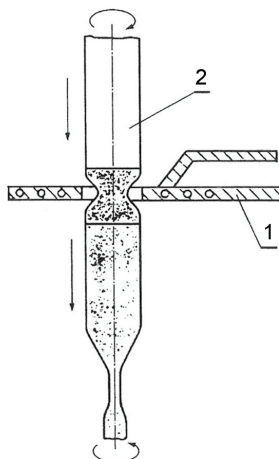


Obr. 4.28: Princip indukčního svařování trubek

1 - trubka, 2 - induktor, 3 - kladky, 4 - svar, 5 - magnetické jádro, i - indukovaný proud, $v = 15 - 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 8 - 500 \text{ kHz}$, $P = 50 - 700 \text{ kW}$, $g = 0,4 - 12 \text{ mm}$, $D = 8 - 500 \text{ mm}$.

Rafinační přetavování

Princip rafinačního přetavování je znázorněn na Obr. 4.29, kde 1 je induktor a 2 je vsázka (Si). Používají se zdroje o frekvenci 400 kHz až 5 MHz při výkonech 10 až 50 kW.

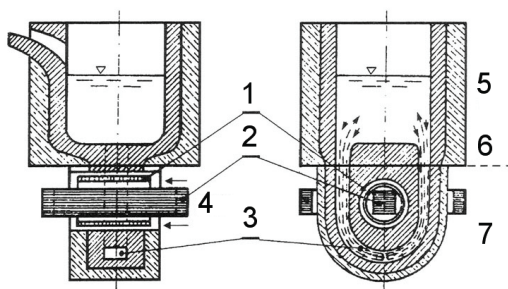


Obr. 4.29: Princip rafinačního přetavování

4.5. Kanálkové indukční pece

Provedení kanálkové indukční pece

Indukční kanálková pec je v podstatě transformátor s uzavřeným železným jádrem, s primární cívkou připojenou na síť. Kanálek vyplněný roztaveným kovem je sekundární stranou transformátoru. Je to vlastně závit spojený nakrátko Obr. 4.30.



Obr. 4.30: Kanálková indukční pec

1- ohřívací cívka chlazená vzduchem (vznačeno šipkami), 2- jádro z transformátrových plechů plášťového typu, na jehož středním sloupku je ohřívací cívka 1, 3-kanálek, který obepíná ohřívací cívku jako závit nakrátko, 4- chladič vzduch, 5- vana pece, 6- dělící spára, 7- induktor.

Elektrické indukční kanálkové pece se používají na tavení barevných kovů, zejména mědi a jejích slitin, hliníku a jeho slitin, případně k přehřívání litiny roztavené předtím, například v kuplovně. Při zvyšování příkonu do pece s odkrytým kanálkem se zjistilo, že při překročení jisté kritické hodnoty proudu ve vsázce nastává nežádoucí účinek, tzv. „uskřipovací jev“. Vlivem elektrodynamických sil působících v radiálních rovinách všemi směry kolmo k povrchu tekutého vodiče dojde k přerušení souvislého prstence roztaveného kovu. V tom okamžiku však skončí elektrodynamické působení, prsteneček se znovu spojí a jev se opakuje. Vznikají rázy, které znemožňují řádný provoz pece. Částečně se tomuto jevu čelilo vhodnou konstrukcí pecní cívky. Ještě vhodnější se však ukázalo řešení se zakrytým kanálkem zapuštěným do dna pece. Hydrostatický tlak roztaveného kovu do značné míry zabraňuje vzniku uskřipovacího jevu. Při odlévání se v peci ponechá asi třetina vsázky, zaplňující kanálek a dno pece, aby se po zapnutí transformátoru v uzavřeném závitě mohlo vyvíjet teplo. Pec se potom naplní vsázkou, která se taví ponořením do přehřáté lázně u dna pece. U těchto pecí vzniká teplo pouze ve vsázce nalézající se v kanálku. Působením elektrodynamického tlaku je kov z kanálku plynule vytlačován do nístěje a chladnější kov z nístěje vtéká do kanálku. Tím se přenáší teplo z kanálku do celé vsázky v nístěji. Má-li kanálek svislou plochu, napomáhá intenzivnímu pronikání horkého kovu z kanálku i rozdíl teplot, protože teplejší kov je lehčí.

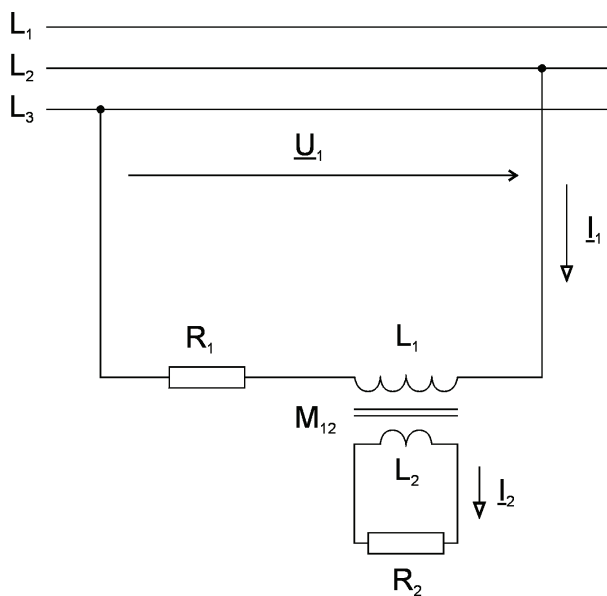
4.5.1. Připojení kanálkových pecí k síti

Pece jednofázové

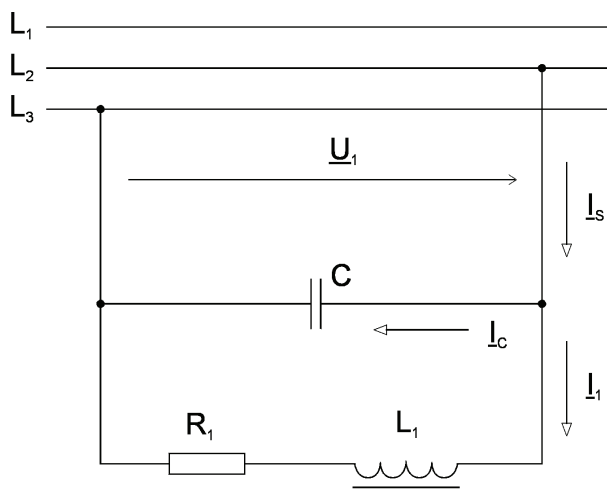
Jednofázové pece mají zpravidla jeden kanálek. Připojují se na fázové nebo sdružené napětí sítě 3 x 400 V, 50 Hz. Jednofázové pece se vyrábí až do zdánlivého příkonu 150 kVA. V hutí je zpravidla podobných pecí větší počet a jejich prostřídáním připojením k různým fázím se zhruba vyrovnává zatížení ve všech třech fázích. Schematicky je připojení jednofázové indukční pece s jedním kanálkem vyznačeno na Obr. 4.31.

Pecní cívka má indukčnost L_1 , odpor R_1 , vsázka (závit nakrátko vyplněný roztaveným kovem) má hodnoty L_2 , R_2 . Po převedení hodnot vsázky na cívku dostaneme výslednou indukčnost L_I a výsledný odpor R_I schéma na Obr. 4.32.

Pec je připojena na sdružená napětí U_I . Zatěžuje nesymetricky síť a odebírá ze sítě vedle činného výkonu i výkon jalový tím větší, čím nižší je účinník $\cos\varphi$. U pecí na tavení odporových slitin je $\cos\varphi = 0,8$, při tavení hliníku je asi 0,3. Abychom odlehčili síť od dodávky jalového výkonu, připojujeme paralelně k cívce vhodně velikou kapacitu C . S přihlédnutím k Obr. 4.32 můžeme napsat výraz pro proud I_S ze sítě (I_C je proud kondenzátoru, I_I je proud v pecní cívce – zanedbáváme ztráty v kondenzátoru).



Obr. 4.31: Připojení jednofázové indukční pece



Obr. 4.32: Schéma jednofázové indukční pece po převedení hodnot vsázky

$$\underline{I}_s = \underline{I}_1 + \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_1}{R_l + j\omega L_l} + j\omega C \cdot \underline{U}_1 \quad (4.40)$$

$$\underline{I}_s = \frac{\underline{U}_1}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} \cdot \left[R_l + j(\omega C R_l^2 + \omega C \cdot \omega^2 L_l^2 - \omega L_l) \right] \quad (4.41)$$

Potřebná kapacita pro úplnou kompenzaci jalového výkonu vyjde z podmínky, že proud I_S nebude mít jalovou složku. Oscilační obvod (L_I, C, R_I) bude „vyladěn“ pro přiváděný kmitočet f (Hz). Imaginární člen výrazu (4.41) bude roven nule. Z toho

$$C = \frac{L_I}{R_I^2 + (\omega L_I)^2} \quad (4.42)$$

U kanálkových pecí se z úsporných důvodů obvykle kompenzuje na výsledný $\cos\varphi = 0,95$. Ušetří se část kondenzátorové baterie, proud I_S ze sítě je větší než by byl při úplné kompenzaci. V některých případech je žádoucí učinit takové opatření, aby jednofázová indukční pec zatěžovala symetricky všechny tři fáze. Především připojíme k peci paralelně kondenzátor C .

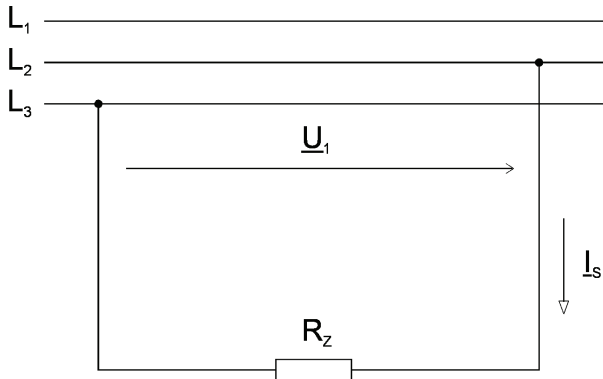
Z výrazu pro I_S vidíme, že indukční pec v tomto případě odebírá pouze činný proud

$$I_S = \frac{U_1}{R_I^2 + (\omega L_I)^2} \cdot R_I \quad (4.43)$$

Vyladěný obvod pece (L_I, C, R_I) se chová vůči síti jako činný zatěžovací odpor R_Z .

$$R_Z = \frac{U_1}{I_S} = \frac{R_I^2 + (\omega L_I)^2}{R_I} \quad (4.44)$$

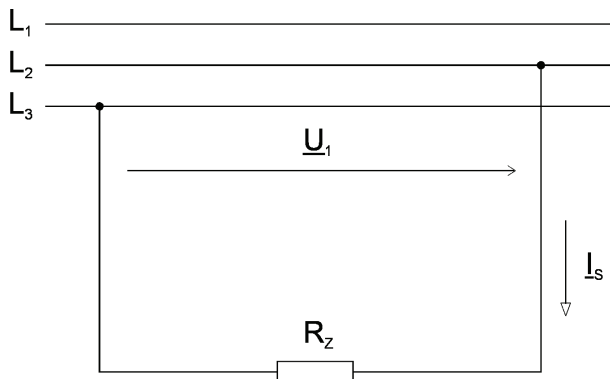
Místo schématu na Obr. 4.32 jsme dostali schéma na Obr. 4.33.



Obr. 4.33: Náhradní schéma jednofázové indukční pece

V dalším budeme místo vyladěné indukční pece uvažovat zatěžovací odpor R_Z . Symetrického zatížení trojfázové sítě vyladěnou jednofázovou pecí lze dosáhnout pomocí tzv. symetrizačního zařízení. Je to umělá zátěž, sestávající ze tří větví. V jedné větvi je odpor R_Z , nahrazující vyladěnou indukční pec. Ve druhé větvi je

indukčnost L vhodné velikostí a ve třetí větvi je vhodné veliká kapacita C . Tyto tři větve symetrizačního zařízení mohou být zapojeny do trojúhelníka nebo do hvězdy. V obou případech lze dosáhnout při správném sledu fází přesně symetrického zatížení všech tří fází při $\cos\varphi = 1,0$. Na Obr. 4.34 je vyznačeno symetrizační zařízení v zapojení do trojúhelníka.



Obr. 4.34: Symetrizační zařízení zapojené do trojúhelníka

Pro velikost potřebné indukčnosti L a kapacity C platí

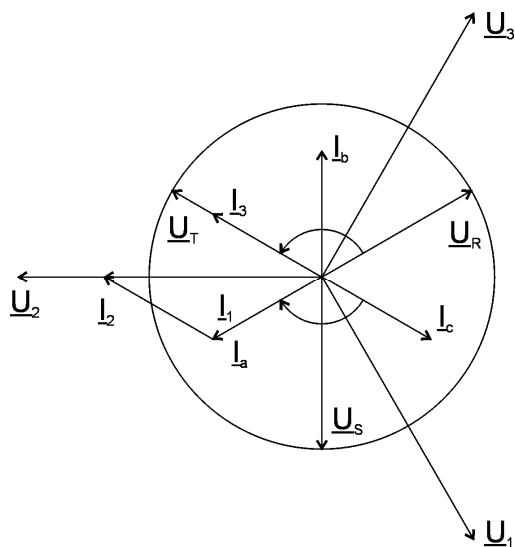
$$L = \frac{\sqrt{3} \cdot R_Z}{\omega}; \quad C = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{3} \cdot R_Z}; \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{3} \cdot R_Z \quad (4.45)$$

Symetrizace se dosáhne pouze při správném sledu fází podle Obr. 4.34. V diagramu na Obr. 4.35 na následující straně jsou vyznačeny proudy a napětí v jednotlivých částech symetrizačního zařízení. Činný výkon P_2 , který odebrá pec a jalový výkon Q v indukčnosti L nebo v kondenzátoru C budou

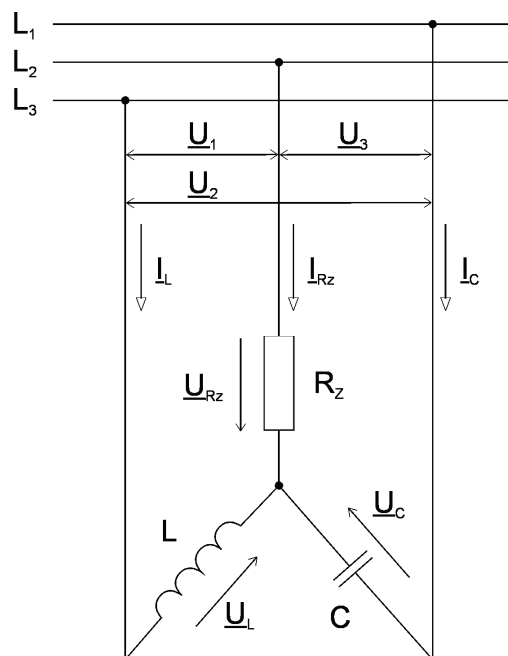
$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = \frac{U_2^2}{R_Z} \quad (4.46)$$

$$Q_2 = \frac{U_2^2}{\sqrt{3} \cdot R_Z} = \frac{P_2}{\sqrt{3}} \quad (4.47)$$

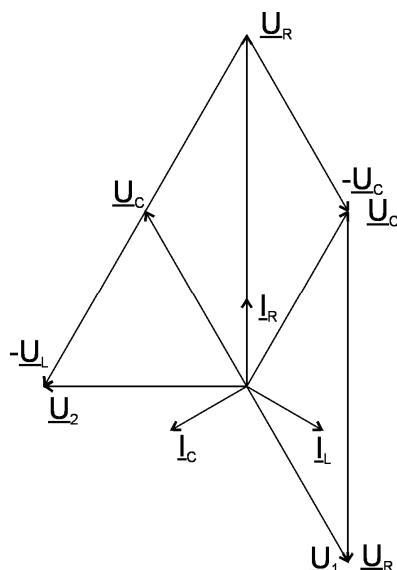
Při montáži pece se symetrizačním zařízením se vloží do všech tří přívodů ampérmetry. Při správném sledu fází ukazují všechny ampérmetry stejnou výchylku. Při nesprávném sledu fází ukazují ampérmetry ve fázích L_1 a L_3 proud vyšší, než ve fázi L_2 . Přehodíme-li mezi sebou kterékoliv dva přívody, dostaneme správný sled fází. Zapojení symetrizačního zařízení do hvězdy je na Obr. 4.36. Proudů a napětí jsou v diagramu na Obr. 4.37.



Obr. 4.35: Fázorový diagram symetrizačního zařízení v zapojení do trojúhelníku



Obr. 4.36: Symetrizační zařízení zapojené do hvězdy



Obr. 4.37: Fázorový diagram symetrizačního zařízení v zapojení do hvězdy

Na peci se objeví zvýšené napětí U_R rovné trojnásobku fázového napětí, což je u větších pecí výhodné.

$$L = \frac{R_Z}{\sqrt{3} \cdot \omega}; \quad C = \frac{\sqrt{3}}{\omega \cdot R_Z}; \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{3} \cdot R_Z \quad (4.48)$$

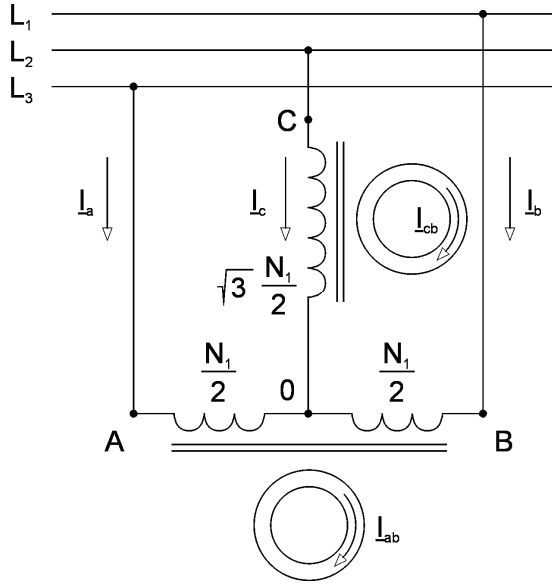
Porovnáme-li s rovnicí (4.45) vidíme, že při symetrizačním zapojení do hvězdy je potřebná indukčnost 3krát menší a potřebná kapacita 3krát větší než při zapojení do trojúhelníka – v obou případech vztaheno na zatěžovací odpor R_Z . Protože při zapojení do hvězdy je pro pec stejného příkonu zatěžovací odpor R_Z 3krát větší (napětí na peci je $3^{1/2}$ krát větší), jsou skutečné hodnoty L a C v obou případech přesně stejné.

Pece dvoufázové

Jsou to indukční pece as dvěma, případně až čtyřmi kanálky, z nichž vždy dva jsou spojeny paralelně a mají pro oba kanálky společný pecní transformátor. Symetrického rozložení na všechny tři fáze sítě dosáhneme buď použitím dvou pecních transformátorů ve Scottově zapojení, nebo lze také užít zvláštního symetrizačního zapojení. Na Obr. 4.38 je pec se dvěma stejnými kanálky ve Scottově zapojení.

Každý z obou kanálků má svůj pecní transformátor, připojený k trojfázové síti. Mezi body A a B na Obr. 4.38 je připojen tzv. „hlavní“ transformátor, který má primární vinutí rozdělené na dvě stejné části. Počet závitů v každé části jsme označili $N_1/2$. Mezi třetí fází (bod C) a středem vinutí hlavního transformátoru (bod 0) je připojen „pomocný“ transformátor s počtem závitů $3^{1/2}/2 \cdot N_1$. Oba kanálky jsou přesně stejné. Při takovém uspořádání jsou proudy odebírané z jednotlivých fází stejné.

Stejně jsou i proudy naindukované v obou kanálcích, a tedy i množství tepla, které se v nich vyvine.



Obr. 4.38: Připojení dvoufázové indukční pece

$$|I_a| = |I_b| = |I_c| \quad (4.49)$$

$$|I_{cb}| = |I_{ab}| = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot N_1 \quad (4.50)$$

Pro symetrické připojení indukční dvoukanálové pece na třífázovou síť můžeme také použít symetrizačního zapojení podle Obr. 4.39.

Při symetrickém připojení podle Obr. 4.39 jsou oba pecní transformátory stejné, což je výhoda proti Scottovu zapojení. Znaky L_I , R_I značí výslednou indukčnost a výsledný odpor pecní cívky v první větvi, po převedení hodnot L_2 , R_2 vsázky (kanálku) do prvního obvodu. Obdobně L_{III} , R_{III} ve třetí větvi. Protože oba pecní transformátory i oba kanálky jsou stejné, platí rovnost

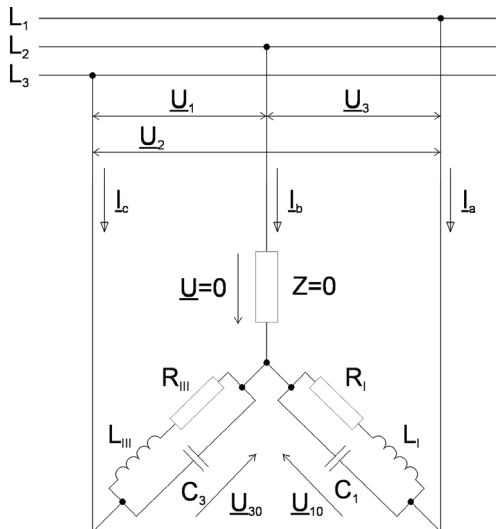
$$L_I = L_{III} ; R_I = R_{III} \quad (4.51)$$

Napřed je třeba, abychom „vyladili“ obvod každé z obou pecí přiřazením paralelní rezonanční kapacity.

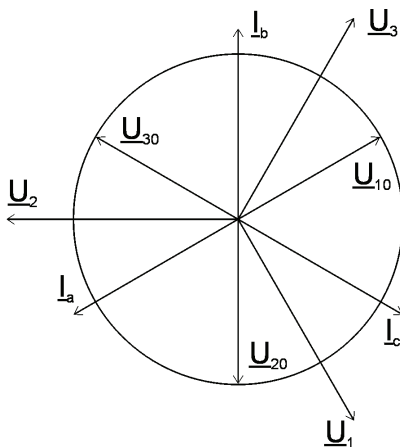
$$C_{1rez} = C_{3rez} = \frac{L_I}{R_I^2 + (\omega L_I)^2} \quad (4.52)$$

Vektorový diagram napětí a proudu je na Obr. 4.40.

Je třeba dodržet správný sled fází. To se zkontroluje při montáži třemi ampérmetry v přívodech. Při nesprávném sledu fází je proud I_b 2krát větší než $I_a = I_c$. Pro získání správného sledu postačí přepojit mezi sebou kterékoliv dva přívoody.



Obr. 4.39: Symetrizační zapojení dvoukanálové pece na třífázovou síť

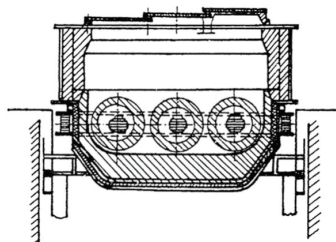


Obr. 4.40: Fazorový diagram dvoufázové indukční pece

Pece třífázové

Pece třífázové se třemi, případně se šesti kanálky, z nichž vždy dva jsou paralelně připojeny na společné jádro. Tyto pece mají třífázový pecní transformátor buď v jádrovém nebo plášťovém provedení. Každé ze tří jader nese pecní cívku, kolem které je buď jeden nebo paralelně dva stejné kanálky. Všechny tři cívky jsou připojeny na síť buď v zapojení do trojúhelníka (cívky jsou na sdružené napětí), nebo do

hvězdy (cívky jsou na fázové napětí). Zatížení všech tří fází je symetrické, pro zlepšení $\cos\varphi$ je třeba připojit třífázovou kondenzátorovou baterii. Na Obr. 4.41 je třífázová pec se třemi kanálky a třífázovým transformátorem, určená k tavení barevných kovů. Tato pec symetricky zatěžuje třífázovou síť [2].

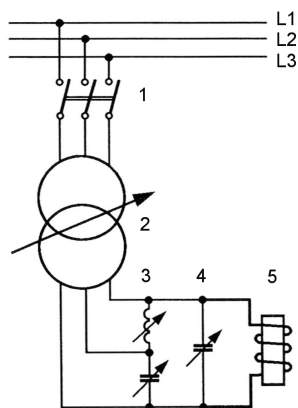


Obr. 4.41: Třífázová pec se třemi kanálky

4.6. Elektrické zdroje napájení indukčních pecí

Napájení ze sítě 3 x 400/230 V, 50 Hz

Jak bylo dříve uvedeno, v některých případech se indukční kelímkové pece napájejí proudem s kmitočtem 50 Hz. Obdobně se připojují k síti 50 Hz i indukční ohříváčky, jedná-li se o prohřívání válcových těles větších průměrů, u oceli jsou to průměry v rozsahu 160 až 500 mm.

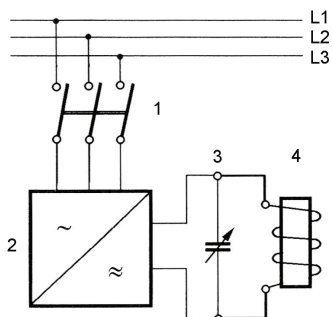


Obr. 4.42: Zapojení pro napájení ze sítě 3 x 400/230 V, 50 Hz

Princip zapojení elektrických obvodů je na Obr. 4.42, kde 1 je výkonový spínač, 2 je regulační transformátor, 3 je symetrizační obvod převádějící jednofázovou zátěž na zátěž trojfázovou symetrickou, 4 je regulační kondenzátorová baterie kompenzující jalový výkon ohřívací cívky, 5 je indukční ohřev.

Středofrekvenční zdroje napájení

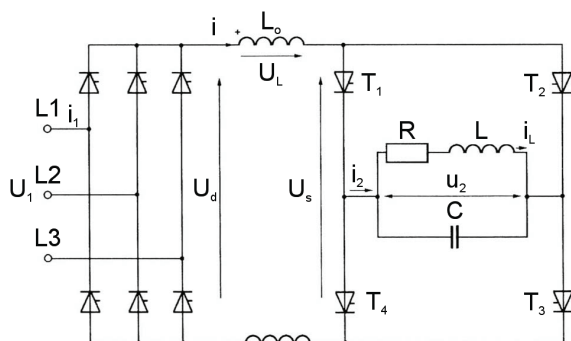
Princip zapojení je na Obr. 4.43, kde 1 je výkonový vypínač, 2 je měnič frekvence, 3 je kondenzátorová baterie, 4 je indukční ohřev.



Obr. 4.43: Zapojení pro středofrekvenční zdroje napájení

Tyristorové měniče kmitočtu pro středofrekvenční indukční ohřevy

Jako zdroje energie pro indukční ohřevy bylo až dosud využíváno rotačních měničů – zubových generátorů, poháněných asynchronním motorem. V poslední době se přechází na využití statických měničů s tyristory. Princip zapojení tyristorového měniče kmitočtu je na Obr. 4.44.



Obr. 4.44: Zapojení tyristorového měniče kmitočtu

Tyristorový měnič se skládá z usměrňovače, meziobvodové tlumivky a střídače. Usměrňovač je celořízený trojfázový můstek, s možností invertorového chodu. Střídač pracuje jako invertor proudu. Je řízený zátěží, tedy přímo topným obvodem. Tento oscilační obvod je složen z prvků cívky induktoru – R , L a kompenzačního kondenzátoru C . Tento kondenzátor slouží současně jako kondenzátor komutační pro tyristory střídače T_1 až T_4 . Meziobvodová tlumivka L_o má velkou indukčnost (několik mH), a má tyto tři funkce:

- 1) Oddělovací – před tlumivkou je napětí oscilačního obvodu spínané přes tyristory. Tlumivka zachycuje okamžité napěťové rozdíly mezi usměrňovačem a střídačem.
- 2) Vyhlažovací – tlumivka má za úkol vyhlazovat stejnosměrný proud z usměrňovače i při jeho fázovém řízení.
- 3) Omezovací – tlumivka má za úkol při zkratu ve střídači (např. prohoření můstku) omezit nárůst zkratového proudu na přípustnou hodnotu součtového proudu pro tyristory až do doby, než zapůsobí nadproudové ochrany. Při výpočtu potřebné indukčnosti tlumivky, je tato funkce omezovací rozhodující.

Činnost střídače spočívá v tom, že střídavě vedou proud tyristory T_1 a T_3 a potom tyristory T_2 a T_4 . Tím jsou do topného oscilačního obvodu L , C , R , zaváděny obdélníkové proudové impulsy střídavé polarity. Tyristory působí jako spínače těchto impulsů. Obdélníkový průběh impulsů je dán velkou indukčností L_o , která má snahu vést konstantní stejnosměrný proud. Na oscilačním obvodu L , C , R je napětí u_2 čistě sinusové. Je to proto, že kondenzátor C filtruje vyšší harmonické obdélníkového průběhu napětí. Také proud i_L v oscilačním obvodu je téměř sinusový. Kmitočet střídače je řízen přímo zátěží, tj. oscilačním topným obvodem. Střídavé spínání dvojic tyristorů T_1 , T_3 a T_2 , T_4 , obstarává regulátor měniče. Regulátor obsahuje i zařízení pro start měniče. Tento start se provádí nejčastěji tak, že se vybije velký kondenzátor pro pomocné tyristory do oscilačního topného obvodu. Nastanou tlumené kmity, na které reaguje regulátor a začne spínat rytmicky tyristory v diagonálách můstku. Požadované vlastnosti tyristorů pro střídač:

- 1) Krátká vypínací doba t_g (pro 10 kHz pod 10 ms),
- 2) velmi rychlé rozšíření plochy zapnutí na celou pracovní plochu tyristoru,
- 3) vysoké opakovatelné špičkové blokovací a závěrné napětí (alespoň 1200 V),
- 4) velký střední propustný proud při daném kmitočtu (300 až 600 A),
- 5) velká hodnota mezního integrálu druhé mocniny propustného proudu,
- 6) velká kritická strmost nárůstu propustného proudu,
- 7) velká kritická strmost růstu blokovacího napětí (100 až $200 \text{ V}\cdot\text{ms}^{-1}$),
- 8) malý náboj zotavení.

Tyristory musí být vybírány se stálými parametry a stejně tak, aby mohly být v provozu lehce vyměnitelné v případě selhání. Porovnání měničů rotačních s novými měniči tyristorovými:

- 1) Tyristorové měniče mají asi o 10 % vyšší energetickou účinnost.
- 2) Tyristorové měniče mají výhodnější průběh křivky účinnosti v závislosti na zatížení.
- 3) Tyristorové měniče je možné snadno vypínat při přestávkách v práci. Ušetří se tak energie odebíraná rotačními měniči při chodu naprázdno.

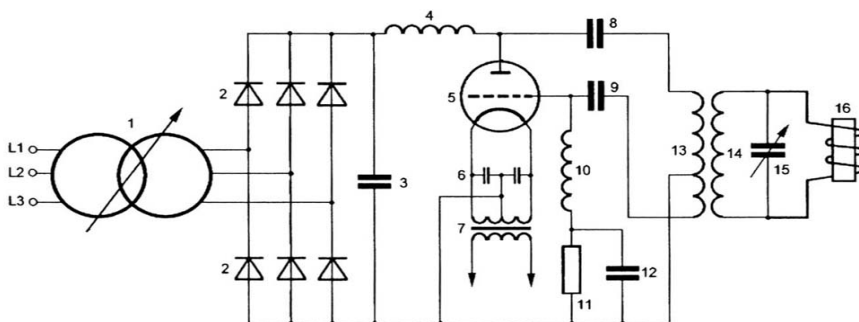
- 4) Velká přizpůsobivost tyristorových měniče provozním a technologickým požadavkům.
- 5) Provozní spolehlivost. Při poruše se vymění pouze určitá stavebnicová součástka.
- 6) Menší hlučnost, menší hmotnost (3,5krát lehčí).
- 7) Nepotřebují robustní stavební základy.
- 8) Tyristorový měnič pracuje na různých kmitočtech. Odpadá doladování kondenzátorů v topném obvodu. Přeladění kmitočtu se provádí nastavením oscilačního topného obvodu. Tyristorové měniče kmitočtu pracují s paralelním nebo sériovým pracovním obvodem R, L, C. S paralelním podle Obr. 4.44.

Nevýhodou je zpětné působení na napájecí síť tuto nevýhodu lze však potlačit pomocí hradicích členů a filtrů na vyšší harmonické.

Vysokofrekvenční elektronkový generátor nad 50 kHz

Schéma zapojení pro indukční ohřev je na Obr. 4.45, kde:

1 je regulační vstupní transformátor pro usměrňovač, 2 je usměrňovací diody usměrňovače, 3 je vyhlazovací kondenzátor, 4 je oddělovací tlumivka pro střídavou vysokofrekvenční složku na anodě výkonové triody 5, 6 jsou kondenzátory zkratující vysokofrekvenční složky proudu katod, 7 je žhavicí transformátor triody 5, 8 je oddělovací kondenzátor, který propouští jen střídavé vysokofrekvenční složky, 9 je oddělovací kondenzátor pro stejnosměrné mřížkové předpětí triody 5, který však umožňuje průtok střídavých vysokofrekvenčních proudů zpětné vazby, 10 je tlumivka znemožňující zkratování vysokofrekvenčního mřížkového zpětnovazebního napětí kondenzátorem 12, 11 je odpor, na němž vzniká záporné předpětí mřížky triody 5, 12 je filtrační kondenzátor mřížkového předpětí, 13 je primární vinutí vysokofrekvenčního transformátoru, 14 je sekundární vinutí vysokofrekvenčního transformátoru, 15 je kompenzační kondenzátor pro ohřívací cívku (induktor) 16. Indukčnosti vinutí 13, 14, 16 tvoří s kondenzátorem 15 oscilační obvod, který pracuje na daném vysokém kmitočtu, např. 360 kHz. Zpětná vazba oscilátoru je provedena odbočkou na vinutí 13 a zavedena na mřížku triody 5.



Obr. 4.45 Zapojení vysokofrekvenčního elektronkového generátoru nad 50 kHz

4.7. Literatura

- [1] Langer, E.: Teorie indukčního a dielektrického tepla, Akademie Praha 1979
- [2] Langer, E.; Kožený, J.: Elektrotepelná zařízení indukční, Plzeň VŠSE Skripta 1982
- [3] Kožený, J.: Efektivnost přeměn elektrické energie v užitečné teplo, Plzeň ZČU 1996
- [4] Sajdak, C.; Samek, E.: Nagrzewanie indukcyjne, Slask Katowice 1987
- [5] Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení, Montanex Ostrava 2008, ISBN 978-80-7225-291-6
- [6] Rada, J.; Hradílek, Z.; Kožený, J.; Novák, P.; Andras, J.: Elektrotepelná technika, SNTL Praha 1985
- [7] Hering, M.: Podstawy elektrotermii, Warszawa 1992, ISBN 83-204-1384-2
- [8] Sajdak, C.; Hradílek, Z. a kol.: Obliczenia parametrow oraz symulacja pracy pieców i nagrzewnic elektrycznych, Gliwice 1999, ISBN 0434-0825
- [9] Hradílek, Z.; Buchta, Z.; Rusek, S.; Gavlas, J.: Elektrotepelná zařízení, INEL Praha 1997, ISBN 80-902333-2-5
- [10] Hradílek, Z. a kol.: Elektrotepelná technika Simulace – počítačové programy, VŠB – TU Ostrava 2001, ISBN 80-7078-874-7
- [11] Metaxas, A. C.: Foundations of Electroheat, Cambridge UK 1996
- [12] Hradílek, Z.: Industrial sources of disturbing electromagnetic fields, Greece 2002, pp 798 - 802, ISBN 960-86733-3-X
- [13] Hradílek, Z.; Sajdak, C. a kol.: International research cooperation on the computer study programmes – Congress ICEE, USA Florida, University of Gainesville 2004
- [14] Hradílek, Z.: Elektrotepelná technika, skripta VŠB – TU Ostrava 1996, 1. vydání, ISBN 80-7078-323-0

5. Elektrotepelná zařízení dielektrická a mikrovlnný ohřev

5.1. Dielektrická elektrotepelná zařízení

Dielektrická elektrotepelná zařízení slouží k ohřevu nevodivých materiálů a polovodičů s využitím vysokofrekvenčního elektromagnetického pole. Dielektrická elektrotepelná zařízení jsou analogická se zařízeními indukčními. Teoretické základy indukčních i dielektrických zařízení využívají do značné míry společné poznatky z elektrodynamiky, vyplývající z Maxwellových rovnic. Oba druhy zařízení mají velmi společnou cennou vlastnost, tj. teplo při ohřevu vzniká přímo ve vsázce.

V dielektrických elektrotepelných zařízeních se teplo uvolňuje prostřednictvím elektrických polarizačních jevů v reálném dielektriku ve vysokofrekvenčním elektromagnetickém poli.

5.1.1. Fyzikální princip polarizace

Elektricky nevodivé látky různého skupenství jsou nazývány dielektrika (izolanty). Ideální dielektrika neobsahují žádné volné nosiče elektrického náboje, nevedou elektrický proud, jejich konduktivita je rovna nule. Reálná dielektrika ale mají vždy malé množství volných nábojů, jsou tedy vodivá, i když velmi málo. Ostatní nosiče náboje jsou vnitřními silami vázány na jednotlivé atomy a molekuly a za normálních podmínek zaujímají polohy odpovídající rovnovážným stavům.

Fyzikální princip dielektrického ohřevu souvisí s elektrickou polarizací vázaných nosičů náboje v elektromagnetickém poli. Pokud vložíme dielektrikum do vnějšího elektrického pole, rovnovážný stav vázaných nosičů náboje se poruší. Účinkem sil pole se kladné nosiče náboje přesunou ve směru pole, záporné proti směru. Daná látka, i když nadále obsahuje stejné množství kladných a záporných nábojů, jeví někde převahu kladného nebo záporného náboje. Vytvořil se elektrický dipól, tj. soubor stejně velkých ale opačně orientovaných nosičů náboje. Elektrický dipól je charakterizován pomocí elektrického dipólového momentu p

$$p = ql \quad (5.1)$$

a je mírou asymetrie prostorového rozložení nosičů náboje v dipólu, tj. dvojice nábojů $+q$ a $-q$ ve vzdálenosti l .

Některé materiály, tzv. polární dielektrika, obsahují molekuly (elektrické dipóly) uspořádané tak, že jedna část molekuly nese kladný náboj a druhá část náboj záporný. U těchto molekul existuje asymetrie rozložení nosičů náboje i bez působení sil vnějšího pole, mají tedy permanentní (stálé) elektrické dipólové momenty a jejich orientace je náhodná. Nacházejí-li se v elektrickém poli, natáčí se elektrické dipóly do směru pole. Dochází pouze k částečnému uspořádání dipólů, protože se molekuly nepřetržitě navzájem srážejí. Úplnému uspořádání brání neuspořádaný (tepelný) pohyb. U molekul nepolárních a také v každém atomu splývá střed všech kladných nábojů se středem nábojů záporných, proto permanentní dipólový moment takových molekul a atomů je nulový.

Nezávisle na tom, zda mají, či nemají dielektrika permanentní dipólové momenty, získávají atomy a molekuly umístěné do vnějšího elektrického pole indukované (dočasné) dipólové momenty. Protože elektrony jsou záporně nabitě, posunou se proti směru vektoru intenzity vnějšího elektrického pole. Tím vznikne dipól, jehož dipólový moment má směr souhlasný s vnějším elektrickým polem. Vzniklá asymetrie rozložení nosičů náboje (oddálení středů oblastí kladného a záporného náboje molekuly) a tím i indukovaný dipólový moment zanikají po odstranění tohoto pole.

Všeobecně se těmto uvedeným jevům říká elektrická polarizace dielektrika, která je buď orientační (u dipólů) nebo deformační (u atomů, molekul, iontů). Různá dielektrika mají různou schopnost polarizovat se. Tato vlastnost se vyjadřuje polarizovatelností α a má jednotku $F \cdot m^2$. Polarizovatelnost vyjadřuje podíl velikosti indukovaného dipólového momentu molekuly (atomu, iontu) k intenzitě polarizujícího pole, $\alpha \sim p/E$. [2], [4], [5], [6]

5.1.2. Princip dielektrického ohřevu

Pohyb volných nosičů náboje a přesun vázaných nosičů náboje (dipólů) v dielektriku, které je umístěno v elektrickém poli, je tedy podmíněný jeho polaritou a je rozdílný podle povahy nosičů. Pohyb volných nosičů náboje (vodivostní proud) po zániku pole ustává, nosiče náboje se vrací do původní polohy. Přesun vázaných nosičů náboje (posuvný proud) souvisí s polarizací, po zániku pole se dipóly vrací do původní polohy, ale se zpožděním.

Jakýkoliv pohyb volných a vázaných nosičů náboje dielektrika vlivem vnějšího elektrického pole je spojený se spotřebou energie tohoto pole a její přeměnou na tepelnou formu. Množství vygenerovaného tepla se vyjadřuje prostřednictvím dielektrických ztrát, které patří mezi základní parametry dielektrických materiálů. Podle povahy fyzikálního procesu generování tepla mohou být dielektrické ztráty vodivostní (pohyb volných nosičů náboje, mají povahu Jouleových ztrát), polarizační (souvisí s vázanými náboji a dipóly) a ionizační (výsledek nárazové ionizace). Největší význam při přeměně elektrické energie na užitečné teplo v tuhém dielektriku mají polarizační ztráty.

Vložíme-li mezi elektrody deskového kondenzátoru dielektrikum a připojíme-li na elektrody proměnné napětí U , dochází k polarizaci dielektrika. Dipóly se snaží sledovat změny polarity elektrického pole, snaží se natáčet. Pokud vázané nosiče náboje sledují změny střídavého elektrického pole bez zpoždění, pak takový pohyb nebude spojený s přeměnou vnějšího pole na teplo. Polarizační dielektrické ztráty se rovnají v tomto případě nule. Pokud ale vnitřní struktura dielektrika způsobuje zpoždění pohybu nosičů náboje (dipólů) za změnami intenzity pole, dochází k vzájemnému tření a tento pohyb je spojený s generováním dielektrických ztrát. Důvod zpoždění je buď v odporu prostředí, nebo je vyvolán vlastní hmotností. V takovém případě se energie pole mění na teplo a dielektrikum se ohřívá. Pokud jsou polarizační dielektrické ztráty nenulové, označuje se polarizace jako relaxační (tepelná) polarizace. Polarizační ztráty se projevují jenom ve střídavém elektrickém poli a zvyšují se s rostoucí frekvencí pole až po dosažení určité maximální hodnoty, tzv. relaxační frekvence pole.

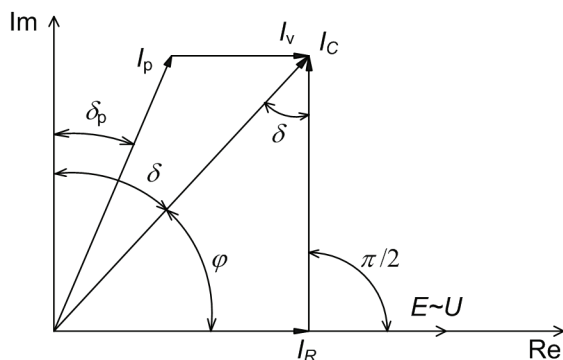
Stupeň polarizace dielektrika závisí na velikosti intenzity vnějšího elektrického pole, do kterého je vloženo dielektrikum. Při překročení určité velikosti intenzity elektrického pole může nastat elektrický průraz dielektrika. V důsledku toho se vytvoří v dielektriku vodivá dráha mezi elektrodami, kterou mohou procházet značné proudy. Dielektrikum se stává vodivým, ztrácí své izolační vlastnosti a poškodí se. Maximální intenzita elektrického pole, při níž ještě nedojde k průrazu, je označována jako elektrická pevnost dielektrika. Elektrická pevnost dielektrika není konstantní, závisí na teplotě, tloušťce dielektrika, vlhkosti, tvaru elektrod apod. a je většinou udávána pro dielektrické materiály v $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ při 50 Hz.

Pokud na dielektrikum působí harmonicky proměnné pole s intenzitou \mathbf{E} o úhlové frekvenci $\omega = 2\pi f$, pole v něm indukuje proud složený z vodivostní a posuvné složky. Fázor hustoty výsledného proudu je dán součtem fázorů obou složek, tj. hustoty vodivostního proudu a hustoty posuvného proudu

$$\mathbf{J}_c = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_p = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = (\gamma + j\omega\varepsilon) \mathbf{E}. \quad (5.2)$$

Ve vztahu je γ konduktivita dielektrika a ε je dielektrická konstanta, permitivita dielektrika, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ (ε_0 je permitivita vakua, ε_r relativní permitivita dielektrika). Relativní permitivita je důležitá vlastnost dielektrika a je mírou polarizovatelnosti vázaných nosičů náboje v dielektriku. Vyjadřuje schopnost dielektrika polarizovat se. Relativní permitivita lineárních dielektrik nezávisí na intenzitě pole, ale závisí nepřímo úměrně na frekvenci pole.

Fázorový diagram proudů v dielektriku, které je umístěno v elektrickém poli s dostatečně vysokou úhlovou rychlostí, je uveden na Obr. 5.1, kde I_v je vodivostní proud a I_p polarizační (posuvný) proud.



Obr. 5.1: Fázorový diagram proudů v dielektriku

Za předpokladu, že ohřívání dielektrikum je homogenní a homogenní je i v něm působící elektrické pole, potom objemová hustota tepelného toku, tj. tepelný tok (množství tepla vygenerované za jednotku času) v jednotkovém objemu, ohřívání dielektrika q_z ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$) lze vyjádřit rovnicí

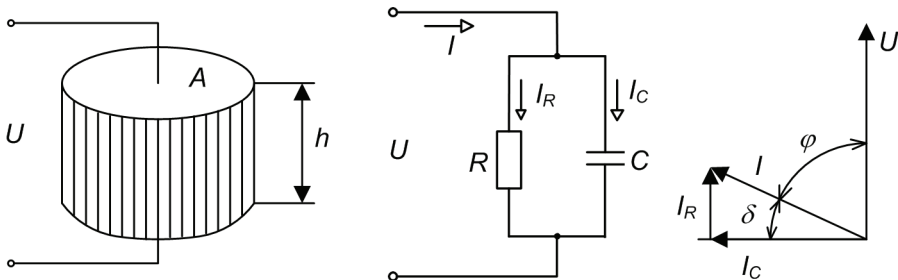
$$q_z = \gamma_{ef} E_{ef}^2 = \omega \varepsilon \operatorname{tg} \delta E_{ef}^2. \quad (5.3)$$

Objemová hustota tepelného toku závisí na parametrech elektromagnetického pole a materiálových vlastnostech dielektrika. Parametry působícího elektromagnetického pole jsou intenzita elektrického pole E a úhlová frekvence ω . Z pohledu zdroje můžeme říct, že tepelný výkon závisí na jeho napětí a frekvenci. Materiálové vlastnosti dielektrika jsou vyjádřeny relativní permitivitou ε_r a ztrátovým činitelem dielektrika $\operatorname{tg} \delta$.

Zvýšení objemové hustoty tepelného toku q_z zvýšením napětí na deskách kondenzátoru je omezeno možným průrazem dielektrika. Ztrátový čísel dielektrických materiálů je velmi malý ($\operatorname{tg} \delta \ll 1$), proto lze tepelný výkon zvýšit jenom zvýšením frekvence zdroje. Proto je frekvence u dielektrických ohřevů vysoká, řádově v MHz a může být v rozmezí 1-300 MHz. [3], [4], [7]

5.1.3. Náhradní schéma deskového kondenzátoru [1]

Pracovním prvkem dielektrických zařízení je zpravidla deskový kondenzátor. Principiální znázornění deskového kondenzátoru s kruhovými deskami, jeho náhradní elektrické schéma a fázorový diagram proudů je na Obr. 5.2. U ideálního kondenzátoru předbíhá proud o 90° před napětím. Ve skutečném kondenzátoru je ale fázový posuv menší v důsledku ztrát v kondenzátoru. Skutečný kondenzátor, deskový kondenzátor se ztrátami, můžeme nahradit paralelním zapojením kondenzátoru a odporu. Kondenzátor s kapacitou C je ideální kondenzátor beze ztrát a odpor R představuje ztráty kondenzátoru a jeho velikost odpovídá ztrátám skutečného kondenzátoru.



Obr. 5.2: Deskový kondenzátor, fázorový diagram proudů a náhradní schéma

Do prostoru mezi elektrodami deskového kondenzátoru tloušťky h a plochy A , který je nabit nábojem q , vložíme dielektrikum s relativní permitivitou ε_r . Relativní permitivita ε_r vyjadřuje pokles intenzity silového pole, tj. udává, kolikrát při stejné hustotě indukčního elektrického toku klesne silové působení E na jednotkový náboj v daném dielektriku oproti silovému působení E_0 na jednotkový náboj ve vakuu, $\varepsilon_r = E_0/E$. Po vložení dielektrika klesne silový účinek na jednotkový náboj ε_r -krát, náboj q se nezmění, ale napětí U klesne ε_r -krát a kapacita kondenzátoru C stoupne ε_r -krát. Uvedené závěry pro velikost intenzity elektrického pole, napětí a kapacitu deskového kondenzátoru platí z následujících vztahů, které jsou rozšířeny o vztah pro rezistanci náhradního obvodu R

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon_r} = \frac{D}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}, \quad U = Eh = \frac{E_0}{\varepsilon_r} h, \quad (5.4)$$

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{h}, \quad R = \frac{1}{\gamma_{ef}} \frac{h}{A}.$$

Ve fázorovém diagramu proudů (Obr. 5.2) je zobrazen proud skutečného kondenzátoru I , který předbíhá před napětím o úhel $\varphi < 90^\circ$. Úhel δ bývá označován jako ztrátový úhel, $\delta = \pi/2 - \varphi$, a představuje ztrátovou složku kondenzátoru. Je to úhel, o který předbíhá proud I před napětím U méně než platí pro ideální kondenzátor. Tangenta tohoto ztrátového úhlu je důležitý parametr dielektrika, který je označován jako ztrátový činitel, a lze ho vyjádřit z fázorového diagramu proudů jako poměr proudů na odporu I_R a na kondenzátoru I_C

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C} = \frac{1}{R\omega C} = \frac{\gamma_{ef}}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r}. \quad (5.5)$$

V uvedeném vztahu konduktivita γ_{ef} je celkovou konduktivitou reálného dielektrika, je v ní zahrnuta složka vodivostních proudů I_v a složka posuvných proudů I_p (Obr. 5.1) v důsledku polarizace vázaných nosičů náboje. Pro konduktivitu dielektrika platí

$$\gamma_{ef} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{RC}. \quad (5.6)$$

Materiál	Relativní permitivita ε_r (-)	Ztrátové číslo $\varepsilon_r \operatorname{tg} \delta \cdot 10^2$ (-)
papír	1,5-2,5	1,9-5
guma	2,5-4,0	1,5-16
dřevo vlhkosti 8-10 %	2-4,5	3-45
dřevo vlhkosti 12-18 %	5-10	30-150
neoprén	4-5,5	40-110
porcelán	4-7	2,8-5,5
polystyrén	2,5-2,6	0,02-0,08

Tab. 5.1 Relativní permitivity a ztrátová čísla některých materiálů

Dielektrikum pro určité elektrické poměry charakterizuje ztrátové číslo $\varepsilon_r \operatorname{tg} \delta$, tj. součin relativní permitivity dielektrika ε_r a ztrátového činitele $\operatorname{tg} \delta$. Ztrátový činitel dielektrika $\operatorname{tg} \delta$ závisí nepřímo úměrně na frekvenci zdroje a souvisí výlučně s jeho dipólovou polarizací. Ztrátový činitel obvykle s frekvencí roste a při určité frekvenci (relaxační frekvenci) dosáhne maxima a při dalším nárůstu frekvence klesá. Je to tím, že konduktivita γ_{ef} se s frekvencí zvětšuje (její část závislá na polarizaci), ale zároveň klesá relativní permitivita ε_r vlivem toho, že slábne náboj polarizace (dipóly se nestačí otáčet). Kromě toho ε_r a $\operatorname{tg} \delta$ závisí na teplotě, na vlhkosti apod. Materiál-

lové vlastnosti, relativní permitivity a ztrátová čísla, některých základních materiálů jsou uvedeny v Tab. 5.1.

Pokud je dielektrikum homogenní a je homogenní i působící elektrické pole, platí podle (5.3) pro tepelný tok (výkon) vztah

$$\Phi = P_t = q_z V = \gamma_{ef} E_{ef}^2 Ah = \gamma_{ef} U_{ef}^2 \frac{A}{h}. \quad (5.7)$$

Pokud dosadíme konduktivitu ze vztahu (5.6) bude tepelný tok

$$\Phi = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta U_{ef}^2 \frac{A}{h} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{RC} U_{ef}^2 \frac{A}{h}. \quad (5.8)$$

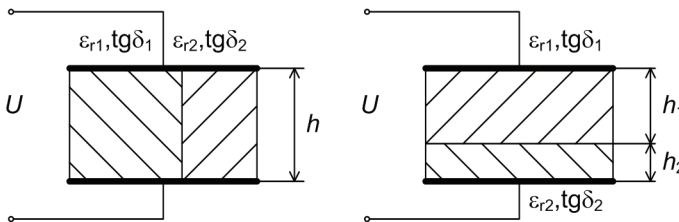
Tento tepelný tok je vlastně činný (ztrátový) výkon kondenzátoru. Pro jalový výkon kondenzátoru platí následující vztah

$$Q = \omega C U_{ef}^2 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r U_{ef}^2 \frac{A}{h} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r E_{ef}^2 Ah. \quad (5.9)$$

Tepelný tok závisí na parametrech elektromagnetického pole a materiálových vlastnostech a lze ho zvýšit především zvýšením frekvence zdroje s ohledem na možný průraz dielektrika. [1], [7], [8]

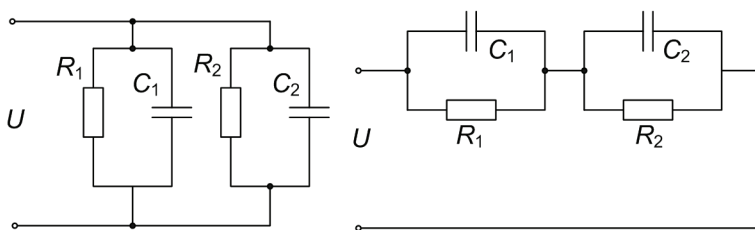
5.1.4. Nesourodá dielektrika

V praktických aplikacích dielektrického ohřevu se často ohřívá materiál složený z více dielektrických materiálů (tzv. nesourodá dielektrika). Pokud budeme předpokládat, že máme dvě různá dielektrika, které mají různé vlastnosti (relativní permitivitu, ztrátový čísel), potom mohou nastat dva případy. Dielektrika jsou spojena příčně nebo podélně (Obr. 5.3).



Obr. 5.3: Příčné a podélné spojení dielektrik

Příčné a podélné spojení dielektrik je vlastně paralelní a sériové zapojení dielektrik a v elektrickém náhradním schématu jsou dielektrika zobrazena paralelní kombinací kondenzátoru a odporu (Obr. 5.4).



Obr. 5.4: Elektrické náhradní schéma nesourodých dielektrik

Pro příčně (paralelně) zapojená dielektrika jsou povrchy dielektrik různé, ale tloušťky jsou stejné ($A_1 \neq A_2$, $h_1 = h_2$). V obou dielektrikách je stejná intenzita elektrického pole $E = U/h$, jiná je ale konduktivita každého dielektrika. Objemové hustoty tepelného toku (tepelné toky v jednotce objemu) jsou podle (5.3) definovány

$$\begin{aligned} q_{z1} &= \gamma_{ef,1} E_{ef}^2 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \operatorname{tg} \delta_1 E_{ef}^2, \\ q_{z2} &= \gamma_{ef,2} E_{ef}^2 = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \operatorname{tg} \delta_2 E_{ef}^2. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Poměr objemových hustot tepelných toků je pro toto zapojení dielektrik dán poměrem ztrátových čísel, tj. objemové hustoty tepelných toků se v ohříváních dielektrických materiálech rozdělí v poměru ztrátových čísel

$$\frac{q_{z1}}{q_{z2}} = \frac{\varepsilon_{r1} \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_{r2} \operatorname{tg} \delta_2}. \quad (5.11)$$

Celková kapacita příčně zapojených dielektrik je dána součtem dílčích kapacit a celková rezistance je dána paralelním zapojením dvou odporů.

Jiná situace platí pro podélné (sériové) zapojení dielektrik. Dielektrika mají stejný povrch ($A_1 = A_2$), ale tloušťky jednotlivých vrstev dielektrik jsou různé ($h_1 \neq h_2$), a proto jsou různé i intenzity elektrického pole obou dielektrik. Poměr objemových hustot tepelných toků je potom

$$\frac{q_{z1}}{q_{z2}} = \frac{\varepsilon_{r1} \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_{r2} \operatorname{tg} \delta_2} \frac{E_{ef,1}^2}{E_{ef,2}^2} = \frac{\varepsilon_{r1} \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_{r2} \operatorname{tg} \delta_2} \frac{U_{ef,1}^2}{U_{ef,2}^2} \frac{h_2^2}{h_1^2}. \quad (5.12)$$

Z uvedeného vztahu můžeme říct, že objemové hustoty tepelného toku se rozdělují v poměru ztrátových čísel, v poměru čtverců napětí jednotlivých dielektrik a převráceném poměru čtverců jejich tlouštěk.

Vyjádríme intenzity elektrického pole pro jednotlivá dielektrika. Napětí na kondenzátoru je dáno vztahem

$$U_{ef} = U_{ef,1} + U_{ef,2} = h_1 E_{ef,1} + h_2 E_{ef,2}. \quad (5.13)$$

Vzhledem k tomu, že se pro podélné zapojení dielektrik rovnají elektrické indukce ($D_1 = D_2$), můžeme napsat

$$D_1 = D_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_{r1} E_{ef,1} = \varepsilon_0 \varepsilon_{r2} E_{ef,2}, \quad (5.14)$$

a potom

$$U_{ef} = h_1 E_{ef,1} + h_2 \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} E_{ef,1}. \quad (5.15)$$

Odtud můžeme vyjádřit intenzity elektrického pole pro jednotlivá dielektrika, která závisí na velikosti napětí, tloušťce dielektrik a permitivitách jednotlivých dielektrik

$$E_{ef,1} = \frac{U_{ef}}{h_1 + \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} h_2}, \quad E_{ef,2} = \frac{U_{ef}}{h_2 + \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} h_1}. \quad (5.16)$$

Poměr objemových hustot tepelných toků pro podélné zapojení dielektrik je potom vyjádřen pouze závislostí na materiálových vlastnostech, relativní permitivitě a ztrátovém činiteli

$$\frac{q_{z1}}{q_{z2}} = \frac{\varepsilon_{r1} \operatorname{tg} \delta_1 \left(h_2 + \frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} h_1 \right)^2}{\varepsilon_{r2} \operatorname{tg} \delta_2 \left(h_1 + \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} h_2 \right)^2} = \frac{\varepsilon_{r2} \operatorname{tg} \delta_1}{\varepsilon_{r1} \operatorname{tg} \delta_2}. \quad (5.17)$$

5.1.5. Aplikace dielektrického ohřevu

Dielektrický ohřev se využívá především v aplikacích tepelného zpracování dielektrických materiálů. Tento způsob ohřevu dosahuje rovnoměrného a přesného prohřátí výrobku a tím se zvyšuje jeho kvalita. Dielektrický ohřev je technologie s vysokofrekvenčním způsobem ohřevu, která je vybavena automatickými řídicími systémy a tím se zjednodušuje jeho obsluha. Výhodou je také, že lze provádět ohřev daleko silnějších vrstev než u ostatních typů ohřevů. Opravy zařízení pro dielektrický ohřev jsou oproti opravám konvenčních zařízení méně časově náročné a je k nim zapotřebí nižší výrobní kapacita. Je nutné ale připomenout, že investiční náklady na dielektrické zařízení jsou poměrně vysoké.

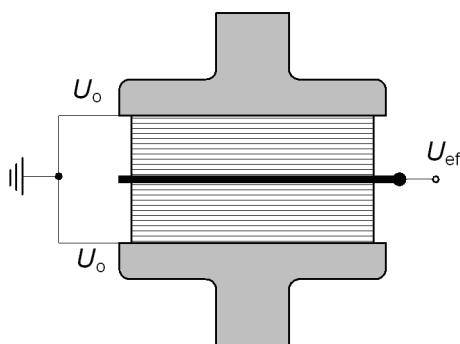
Mezi hlavní aplikace patří:

- výroba překližek,
- sušení dřeva, papíru, textilií,

- předeřívání plastů, zpracování termosetů,
- svařování plastů,
- ohřev v potravinářském průmyslu.

Při výrobě, popř. lisování, překližek se dýhy z bukového dřeva natírají umělou pryskyřicí a vkládají se do lisu ve vrstvě až 40 cm vysoké. Do střední roviny se vkládá elektroda vysokofrekvenčního napětí U_{ef} . Čelisti lisu představují druhé elektrody, které jsou uzemněné. Výkon ohřevu se stanovuje s ohledem na dobu, která je nutná pro cyklus ohřevu. Požadovaného výkonu lze dosáhnout změnou napájecího napětí, popř. změnou frekvence. Výkon zařízení závisí na tloušťce materiálu, který je vkládán mezi elektrody. Elektrody pracovního kondenzátoru slouží nejen jako přívod energie a k tvarování elektrického pole, ale mají také funkci udržování spojovaných částí v potřebné poloze a případně i přenášet požadovaný tlak lisu na spoje. Dielektrická zařízení na výrobu překližek mohou mít výkon až 1600 kW.

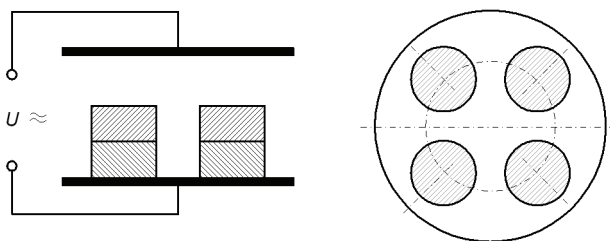
Sušení je technologický proces, při kterém se snižuje vlhkost a nebo úplně odstraňuje tekutina z materiálu, např. u textilií, papírenských produktů, dřevařských výrobků apod. Při dielektrickém sušení se vlhkost snižuje z vnitřku rovnoměrně v celém objemu vsázky, na rozdíl od klasického sušení, kdy se materiál suší postupně od povrchových vrstev směrem do vnitřku materiálu. Provedení je podobné výrobě překližek, materiál je zaváděn mezi elektrody na transportním pásu. Použitý kmitočet bývá okolo 10 MHz. Výkony sušiček papíru jsou 200-1000 kW a účinnost se pohybuje kolem 70 %. Dielektrické sušičky dřeva jsou provozovány v režimu periodickém nebo průběžném. Je to především dáno tím, že dřevěné výrobky jsou náchylné na praskání, a proto koncentrace výkonu musí být omezená, popř. se výkon do dřeva dodává impulzně. Vysušení 1 m³ dřeva vyžaduje 150-500 kWh.



Obr. 5.5: Schéma zařízení na výrobu překližek

Při zpracování termosetů lze s výhodou použít dielektrický ohřev, neboť se jedná o dielektrické materiály. Termosetový prášek je předlisován do tvaru tablet, které se pak vkládají do formy ve tvaru kondenzátoru (Obr. 5.6). Doba předeřívání je asi 1 minuta, vlastní vytvrzování (polymerizace) nastává po delší době. Polymerizační teplota se pohybuje okolo 100 °C a závisí na druhu plnidla. V dielektrickém zařízení se předeřívají tablety vkládají do zápusky v lisu. Obě části jsou elektricky vytápěné a teplota se zvyšuje asi na 140 °C, kdy dochází k polymerizaci. Je-li termoset předlisován, dielektricky předeřívá, snižuje se celková doba na zhotovení

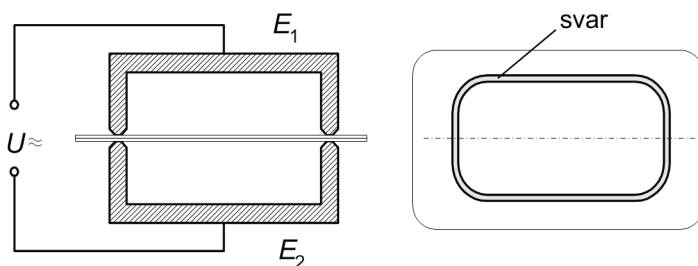
výlisku 2-3x. Zmenšuje se tak i potřebný tlak na lisování a zvyšuje se kvalita výlisku. Energeticky toto řešení představuje nemalou úsporu elektrické energie.



Obr. 5.6: Přehřívání termosetových tablet

Dielektrické (vysokofrekvenční) svařování je v současnosti velmi rozšířená technologie v různých odvětvích, ve velkém rozsahu je použito v automobilovém průmyslu a to jak v plošné, tak i ve 3D variantě. Využívá se pro spojování různých plastů, např. PVC, polyamidu apod. Dielektrické svařování plastů vytváří sváry stejnorodé s maximální pevností a velkou výhodou je rychlost svařování.

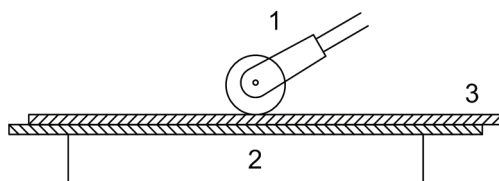
Při dielektrickém svařování plastových fólií (Obr. 5.7) jsou termoplastické fólie vloženy mezi dvě kovové elektrody, které mají požadovaný tvar spoje a ke kterým je připojeno vysokofrekvenční napětí. V materiálu mezi elektrodami se vyvíjí teplo, až do fázové přeměny plastů. Vnější část povrchu materiálu je chlazena dotykem s elektrodami, avšak vnitřní část materiálu dosahuje teploty kolem 300 °C za několik sekund. Tato teplota je dostačující, aby se obě fólie natavily, dojde ke spečení materiálu a vytvoří se požadovaný spoj. Tento pracovní postup svařování je skokový, pracující v přerušovaném, periodickém režimu. V průběhu jedné operace svařování se vytvoří celý nebo část požadovaného spoje.



Obr. 5.7: Dielektrické svařování plastových fólií

Jiný typ dielektrického svařování je na Obr. 5.8 a je vhodný pro nepřetržitý provoz. Svařování u tohoto typu se provádí nepřetržitě tak, že se valí podél švu svařovaného materiálu 3 kovová kladka (elektroda ve tvaru válečku 1) uchycená v rukojeti, která se může držet i v ruce. K rukojeti je ohebným kabelem přivedeno vysokofrekvenční napětí z generátoru o výkonu asi 100 W s kmitočtem 100 ÷ 300 MHz. Druhá elektroda 2 může být také válcová nebo ve tvaru pohybujícího se pásu. Popsané jednoduché zařízení v praxi dostává tvar podobný šicímu stroji (vysokofrekvenční šití). Místo jehly se umístí kladka, nožním pedálem se

kladka spustí na materiál a současně se zavede vf energie. Spojovaný materiál se posouvá vhodnou rychlostí a tím se vytváří potřebný svar.

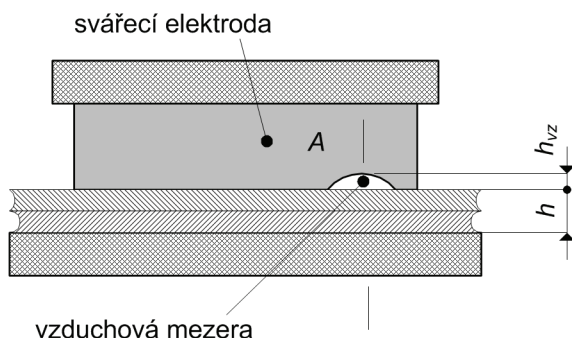


Obr. 5.8: Dielektrické svařování

Komplikace při svařování mohou nastat, pokud mezi dielektrickými materiály, popř. mezi elektrodami a materiálem, vznikne vzduchová mezera (Obr. 5.9), např. nedokonalým přitisknutím obou materiálů nebo vlivem výrobních vad, popř. poškozením elektrod. Podle vztahů odvozených v kapitole 5.1.4 můžeme říct, že napětí U_{ef} přiváděné na elektrody se rozdělí v nepřímém poměru permitivit. Podle (5.16) můžeme pro intenzitu elektrického pole materiálu E a vzduchu E_{vz} napsat

$$E_{vz} = U_{ef} \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{vz} h + \epsilon_r h_{vz}}, \quad E = U_{ef} \frac{\epsilon_{vz}}{\epsilon_{vz} h + \epsilon_r h_{vz}}, \quad (5.18)$$

kde h , ϵ_r je tloušťka a permitivita dielektrika, h_{vz} , ϵ_{vz} je tloušťka a permitivita vzduchové mezery. Vzhledem k tomu, že relativní permitivita vzduchu je přibližně rovna jedné ($\epsilon_{vz} = 1$), bude intenzita elektrického pole, tj. i napěťové namáhání, ve vzduchové mezeře několikanásobně větší než vlastního dielektrického materiálu. Vzhledem k tomu, že elektrická pevnost vzduchu je menší než dielektrických materiálů, např. pro suchý vzduch je max. $2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ a např. pro polystyrén má hodnotu $30\text{-}50 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ($\epsilon_r = 4\text{-}7$), z největší pravděpodobností dojde k průrazu vzduchové mezery. Následně i k průrazu vlastního materiálu s vývinem tepla, přičemž se může vytvořit oblouk. Elektrická pevnost různých materiálů běžně používaných při dielektrickém svařování je uvedena v Tab. 5.2.



Obr. 5.9: Vzduchová mezera při svařování

Další nebezpečí průrazu svařovaných materiálů může být způsobeno zvýšením intenzity elektrického pole na ostrých hranách, zejména u okrajů elektrod, na

břitech, hrotech apod. Stejně nebezpečí vzniká, jestliže se ve svařovaném materiálu vyskytují nečistoty.

Dielektrický ohřev našel uplatnění i v potravinářském průmyslu k rozmrazování potravin, k pečení chleba nebo také při konzervování potravin k jejich pasterizaci a sterilizaci. Nevýhodou dielektrického pečení chleba je, že se na povrchu nevytvoří kůrka. Proto se dielektrická pec kombinuje ve fázi dopečení s infračervenou pecí. U takových kombinovaných pecí se doba pečení zkracuje na polovinu doby klasickým způsobem. [7], [9], [10]

Materiál	E_p (kV·mm ⁻¹)
měkčený PVC	20-30
neměkčený PVC	40-50
polyamid	25-40
polyetylén	50-60
tvrzený papír	30
teflon	40-80
silikon	25-40
polystyren	30-50
suchý vzduch	max. 2

Tab. 5.2: Elektrická pevnost základních materiálů

5.2. Mikrovlnná dielektrická zařízení [1]

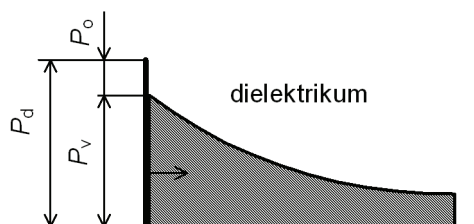
S pokrokem vysokofrekvenční techniky bylo možné začít využívat kmitočtová pásma nad 1 GHz i pro vysokofrekvenční ohřevy. Mikrovlnné teplo umožňuje takové ohřevy, které nebyly možné realizovat ohřevem dielektrickým. Použité záření je v oblasti vlnových délek decimetrových a centimetrových a umožňuje provádět ohřevy látek s prakticky až stonásobně nižším ztrátovým číslem $\varepsilon_r \text{tg} \delta$ než u látek ohříváných dielektricky.

5.2.1. Princip mikrovlnného ohřevu

Mikrovlnný ohřev je zvláštním případem dielektrického ohřevu. Podobně jako u dielektrického ohřevu, se jedná o elektrický ohřev, při kterém teplo vzniká uvnitř dielektrika (polovodiče) v důsledku polarizačních jevů (viz kap. 5.1.1). Energie vysokofrekvenčního pole se přenáší do materiálu prostřednictvím mikrovln a pro objemovou hustotu tepelného toku (tepelný tok v jednotkovém objemu) platí stejný vztah (5.3) jako pro dielektrický ohřev. Po vyčíslení konstant se často uvádí ve tvaru

$$q_z = 55,6 \cdot 10^{-12} f \varepsilon_r \text{tg} \delta E_{ef}^2. \quad (5.19)$$

Z uvedeného vztahu je patrné, že i pro mikrovlnný ohřev je důležitým parametrem frekvence zdroje a na frekvenci závisí ztrátové číslo dielektrika $\varepsilon_r \text{tg} \delta$.



Obr. 5.10: Absorpce výkonu při mikrovlnném ohřevu

Vlivem velmi vysokých frekvencí se dosahuje velkých výkonů bez nebezpečí elektrických průrazů vzduchu kolem dielektrického materiálu, které by nastaly při aplikaci dielektrického ohřevu do 30 MHz. Část dopadajícího záření P_d se od dielektrického materiálu odráží P_o , zbytek P_v vstupuje do materiálu a jeho amplituda exponenciálně klesá, jak je uvedeno na Obr. 5.10. Vztah, popisující průběh intenzity elektrického pole, lze použít pro výpočet energie v určité hloubce materiálu

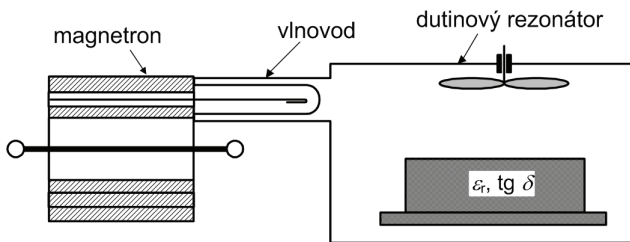
$$E_x = E_0 e^{-x/a}, \quad (5.20)$$

kde E_0 je intenzita elektrického pole na povrchu, x je vzdálenost od povrchu, a je konstanta útlumu (absorpční součinitel) materiálu. Analogicky jako u indukčního ohřevu se zavádí hloubka vniku a , tj. vzdálenost od povrchu, kde dojde k útlumu intenzity elektrického pole na hodnotu $1/e$, tedy zhruba na 37 % hodnoty intenzity na povrchu. Hloubka vniku je podle [8] dána vztahem

$$a = \frac{\lambda_0}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1)}}, \quad (5.21)$$

kde λ_0 je vlnová délka ve vakuu, ϵ_r je relativní permitivita a $\text{tg} \delta$ je ztrátový čísel dielektrika při pracovní frekvenci.

Schématické uspořádání mikrovlnného ohřevu je na Obr. 5.11. Ze zdroje mikrovlnného záření (magnetronu) jsou mikrovlny vyzařovány prostřednictvím antény a směřovány vlnovodem do aplikačního prostoru (dutinového rezonátoru) s minimálními ztrátami. Ohříváný materiál se umístí na podložku, většinou skleněnou nebo keramickou, aby nedocházelo k jejímu ohřevu. Dutinový rezonátor má většinou tvar kvádru, tvar a konstrukce závisí na způsobu použití. Vnitřní stěny dutinového rezonátoru jsou zhotovené z vodivého materiálu, nejčastěji z hliníku nebo nerezové oceli. Průřez vlnovodu je nejčastěji kruhového nebo obdélníkového tvaru, jeho rozměry jsou dány vlnovou délkou přenášeného vlnění. Pro zajištění optimálního přenosu vlnění, přenosu beze ztrát, musí být vnitřní průměr vlnovodu vždy větší než vlnová délka vlnění. Ve vlnovodě je většinou přirozená atmosféra.



Obr. 5.11: Schématické uspořádání mikrovlnného ohřevu

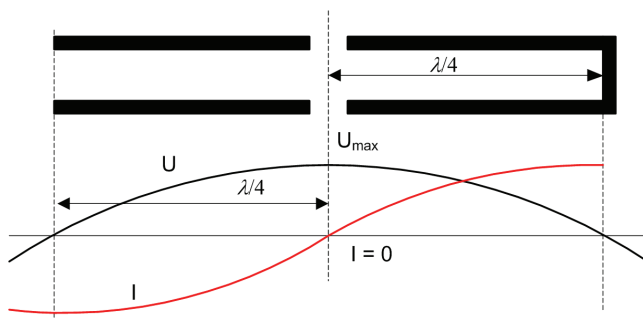
Součástí každého mikrovlnného zařízení jsou tedy tři části:

- zdrojová část (generátor mikrovlnného záření, magnetron),
- přenosová část (vlnovod),
- pracovní část (rezonanční ohřivací prostor, dutinový rezonátor).

V dutinovém rezonátoru se vytváří stojaté elektromagnetické vlnění. Toto stojaté vlnění s pevnými uzly a kmitkami může způsobit nerovnoměrné prohřátí ohřívaného materiálu. V místech, kde je intenzita elektromagnetického vlnění nulová, se totiž nevyvíjí žádné teplo. Je tedy nutné zajistit posun uzlů a kmiten elektromagnetického vlnění vůči ohřívanému materiálu a tak zajistit rovnoměrný ohřev. To lze zajistit dvěma způsoby. Buď se podložka, na které je ohříváný materiál, pohybuje (např. otočný talíř), nebo se do rezonátoru umístí otáčející kovový segment, který v aplikačním prostoru periodicky mění poměry v dutině rezonátoru, čímž dochází k posunu uzlů a kmiten. Většinou se používají současně oba způsoby.

Důležitou roli u mikrovlnného ohřevu hraje i konstrukční řešení vstupního otvoru do aplikačního prostoru. Konstrukce vstupního otvoru musí být provedena tak, aby na dělicí části bylo při provozu maximum intenzity elektrického pole. Pouze v takovém případě je protékající proud dělicí částí nulový. Uzel intenzity elektrického pole se vytvoří krátkým spojením ve vzdálenosti $\lambda/4$ od dělicí části, jak je uvedeno na Obr. 5.12.

Nejen z bezpečnostních a hygienických důvodů, ale i z důvodů rušení radiotelekomunikací, musí být každé mikrovlnné zařízení dokonale navrženo, aby nevyzařovalo energii. [1], [7]



Obr. 5.12: Konstrukce vstupního otvoru do pracovního prostoru

5.2.2. Zdroje mikrovlnného záření

Rozdíly mezi dielektrickým a mikrovlnným ohřevem jsou především způsobené rozdílnými frekvencemi, frekvenční rozsah mikrovln je stanovený hraničními frekvencemi $f \in \langle 0,3; 300 \rangle$ GHz. Pro tak vysoké kmitočty již nelze použít pracovní kondenzátor a hlavním pracovním prvkem mikrovlnných zařízení je magnetron.

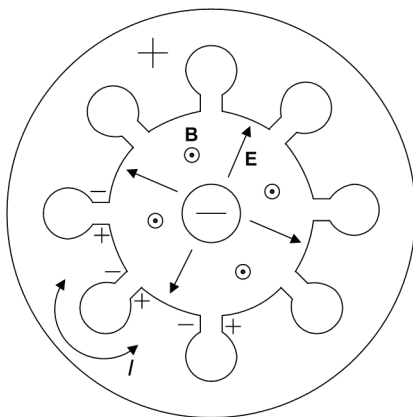
Magnetron je nejběžnější zdroj mikrovlnného záření, který byl konstruován poprvé ve 40. letech 20. století pro vojenské účely v radiotechnice. Je to zdroj vysokých výkonů a pracuje s vysokou účinností.

Magnetron je vlastně speciální výkonová elektronka, klasické elektronky nelze použít pro tak vysoké kmitočty. Jedná se vlastně o vakuovou diodu, která je schopna generovat elektromagnetické záření v oblasti mikrovln, tj. může měnit energii ze stejnosměrného nebo střídavého zdroje v energii vysokofrekvenční. Elektronka nemá připojen žádný vnější oscilační obvod, jak je tomu u klasických oscilátorů. Oscilační obvod tvoří vlastní konstrukce rezonátorů, jejichž rozměry určují rezonanční kmitočet těchto vln. Jelikož jsou rezonátory pevně vyrobeny, nelze frekvenci libovolně měnit.

Magnetron (Obr. 5.13) je tvořen masivní anodou z mědi. Anoda je dutá a v její ose je umístěna žhavená katoda. Anodová elektroda však není jednoduchý válec, ale na vnitřním povrchu je opatřena sudým počtem kruhových otvorů (dutin). Tyto dutiny (kruhové rezonátory) jsou spojené s katodovým prostorem úzkými štěrbinami. Z důvodů zajištění symetrie je vysokofrekvenční pole ve štěrbinách, které spojují obvodové rezonátory s prostorem katoda-anoda, všude stejné. Celý magnetron je vložen mezi póly silného permanentního magnetu a nebo elektromagnetu buzeného ss proudem. Vybuzená vysokofrekvenční energie se odvádí smyčkou, která je vložena do některé z dutin. Smyčka je zakončena anténou, aby vysokofrekvenční energie mohla být dopravena do aplikačního prostoru s minimálními ztrátami.

Princip činnosti magnetronu je následující: Katoda je přímo žhavena s odbočky transformátoru a z jejího povrchu se uvolňují elektrony. Elektrony jsou urychlovány připojeným elektrickým polem směrem k anodě. Feritové magnety, které obklopují magnetron, vytvářejí magnetické pole, jehož indukční čáry jsou kolmé k dráze elektronů a ovlivňují jejich pohyb. Směr indukce magnetického pole B je shodný s osou magnetronu a jsou kolmé na intenzitu elektrického pole E . Trajektorie elektronů se zakřívují a zakřivení stoupá se stoupajícím magnetickým polem. Elektrony se v magnetickém poli nepohybují přímočaře od středu k obvodu, ale stáčí se směrem doleva. To znamená, že nedopadnou doprostřed nejbližšího kovového segmentu, ale na jeho levou část.

Dutiny společně se štěrbinami se chovají jako miniaturní oscilační LC obvody. Štěrbin jsou vlastně kondenzátory a vodivý zbytek dutiny, který spojuje okraje štěrbin, miniaturní cívky. Elektrony nabíjí jeden okraj štěrbin (jednu desku kondenzátoru), takže začne okamžitě protékat proud kolem dutiny (cívky) na druhý okraj štěrbin. Tento proud vyvolá magnetické pole, které potom ve druhé polovině cyklu indukuje opačný proud dutinou. Štěrbin a dutiny vytváří oscilační obvod s vlastní frekvencí. Vyzařování mikrovln způsobuje vybíjení oscilačních obvodů, proto musí být neustále nabíjeny elektrony z katody.



Obr. 5.13 Principiální uspořádání magnetronu

Katoda magnetronu je zpravidla přímožhavená ze střídavého zdroje, stejnosměrné napětí na anodě (10^0 - 10^1 kV) se získává z tyristorového usměrňovače, napájeného z vn transformátoru. Účinnost magnetronů je 60-80 %. Výkon magnetronů se pohybuje v rozmezí 0,8 – 6 kW. Technická životnost magnetronů může být 6000–8000 provozních hodin. V případě potřeby může do jednoho pracovního prostoru pracovat i více magnetronů paralelně. Z ekonomického hlediska je nejvýhodnějším mikrovlnným zdrojem magnetron o výkonu 1,5 kW. Proto se u velkých zařízení paralelně zapojuje 100 i více modulů s magnetrony 1,5 kW. [8], [12]

5.2.3. Aplikace mikrovlnného ohřevu

Výhodou mikrovlnného ohřevu je, podobně jako u dielektrického ohřevu, že teplo vzniká uvnitř materiálu a je možné dosáhnout vyšší teploty uvnitř produktu než na jeho povrchu. Díky tomu, že se materiál ohřívá v celém objemu, dosahuje se vysoké rovnoměrnosti prohřátí a přesné regulace teploty. Také je možné zabránit zahřátí některé části materiálu nad limitní teplotu. Při ohřevu některých materiálů, zejména těch, které obsahují vodu, je nutné respektovat výraznou změnu relativní permitivity na teplotě.

Mezi největší přednosti mikrovlnného ohřevu patří rychlost ohřevu a dávkování dodané tepelné energie. Jednotlivé tepelné ohřevy tedy můžeme provádět s přesně definovaným množstvím energie. Výrobky lze zpracovávat v obalu, protože působení elektromagnetických vln není závislé na tepelné vodivosti, a tak je vnější izolující vrstvy nijak neovlivňují. Mikrovlnný ohřev umožňuje ohřívát materiály různého skupenství a ohřev může probíhat v různém prostředí, např. ve vakuu, v přirozené i ochranné atmosféře při různém tlaku.

V současnosti má mikrovlnný ohřev široké uplatnění v rozmanitých oblastech a technologiích. Využívají se např. v potravinářském, farmaceutickém, chemickém, dřevařském, papírenském průmyslu, v zemědělství, při výrobě keramiky atd.

Nejširší uplatnění mikrovlnného ohřevu je především v potravinářském průmyslu. Jedná se nejen o vaření a pečení pokrmů, ohřev a rozmrazování hotových

jídel, pasterizaci různých druhů baleného trvanlivého pečiva, sterilizace apod., ale i o likvidaci hmyzích škůdců v müsli výrobcích, v sušených jablkách.

V chemickém průmyslu se mikrovlnný ohřev využívá především při vulkanizaci pryže a zpracování plastů, při urychlování chemických reakcí, v zemědělství pro ošetření zemědělských produktů. Při výrobě keramiky se mikrovlnná technologie používá např. k sušení, vypalování, vytvrzování a na úpravu povrchů. Mikrovlnné sušení našlo uplatnění nejen v textilním, papírenském a dřevařském průmyslu, ale i ve stavebnictví, slévárenství apod. [11], [13]

5.3. Literatura

- [1] Baxant P., Drápela J., Lázníčková I.: Elektrotepelná technika. Elektronické skriptum FEKT VUT v Brně, Brno, 2006.
- [2] Halliday D., Resnick R., Walker J.: Fyzika. Část 3 Elektřina a magnetismus. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. VUT v Brně, VUTIU, 2000.
- [3] Hradílek Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. VŠB-TU Ostrava, 2008.
- [4] Hradílek Z.: Elektrotepelná technika. VŠB-TU Ostrava, 1996.
- [5] Krempaský J.: Fyzika. Příručka pro vysoké školy technické. SNTL, Praha, 1988.
- [6] Langer E.: Teorie indukčního a dielektrického tepla. Academia Praha, 1979.
- [7] Novák P.: Elektrické teplo. Základy a teorie elektrických ohrevů a aplikace. Equilibria, s.r.o., Košice, 2010.
- [8] Rada J.: Elektrotepelná technika, SNTL, Praha, 1985.
- [9] <http://dielektrika.kvalitne.cz/zaklad.html>
- [10] http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26181
- [11] Elektro - odborný časopis pro energetiku. http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26310.
- [12] <http://fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzky/mikrov/podr1.htm>
- [13] <http://www.romill.cz/cz/mikrovlny>

6. Obloukové pece, připojení na síť

6.1. Fyzikální princip vzniku elektrického oblouku ionizací plynů

Ionizací elementárních částic, atomů nebo molekul nazýváme takový proces, při kterém vznikají v plynu rozštěpené částice tří druhů. Jsou to elektrony, kladné ionty a záporné ionty.

Jestliže proces ionizace probíhá stupňovitě, pak v plynném sloupci existují ještě nabuzené atomy a molekuly, tj. takové částice, ve kterých je zvýšena vnitřní energie beze změny elektrického náboje.

Základní druhy ionizace elementárních částic jsou stručně objasněny v následujících podkapitolách.

Kontaktní ionizace atomů a molekul

Kontaktní ionizace atomů a molekul nastává na hranici plynné sféry v místě přechodu k ohraničujícímu ji pevnému materiálu (např. u elektrod).

Fotoionizace

Tento druh ionizace nastává při pohlcování atomů zářením. Jak je známo, každé kvantum záření má energii:

$$w_v = h \cdot \nu \quad (6.1)$$

kde w_v je energie kvanta záření, ν je kmitočet záření, h je Planckova konstanta.

Pro ionizaci elementární částice potřebujeme znát ionizační práci:

$$w_i = e_0 \cdot U_i \quad (6.2)$$

kde e_0 je náboj elektronu a U_i je ionizační potenciál

Jestliže bude:

$$w_v \geq w_i \quad (6.3)$$

Bude-li energie kvanta záření větší nebo rovna potřebné ionizační práci, pak se atom ionizuje. Tato podmínka je obvykle splněna pouze u ultrafialového záření.

Většina plynů nebo kovových par nemůže být ionizována jednorázovým pohlcením kvanta energie, nýbrž je pouze stupňovitě nabuzována, takže k fotoionizaci dojde teprve po několikátém procesu. V praxi dochází k tomuto druhu ionizace hlavně v jádře obloukového sloupce za vysokých teplot.

Ionizace elementárních částic při vzájemné srážce

V obloukových výbojích je to nejčastěji se vyskytující způsob ionizace. U tohoto způsobu dále rozlišujeme:

- Ionizaci při srážce částic plynu s elektrony
- Ionizaci při srážce částic plynu s ionty

Ionizace při srážce částic plynu s elektrony

Ionizační práci můžeme vyjádřit vztahem (6.2). V elektrickém poli elektron nabírá kinetickou energii:

$$w_k = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 \quad (6.4)$$

Ve vztahu (6.4) je m_e hmotnost elektronu a v je jeho rychlost. Elektron však pouze tehdy zionizuje atom nebo molekulu, jestliže jeho kinetická energie v okamžiku střetnutí s atomem bude stejně velká nebo větší než ionizační práce:

$$w_k \geq w_i \quad (6.5)$$

Dosadíme-li do předchozí podmínky, pak:

$$\frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2 \geq e_0 \cdot U_i \quad (6.6)$$

Také v tomto případě je možné, že k ionizaci dojde postupným nabuzováním atomu ve stupních, až nahromaděná kinetická energie bude dostačující k vykonání potřebné ionizační práce.

Termická ionizace plynů

Tento druh ionizace je důležitý zejména pro vznik plazmatického stavu ve sloupci oblouku. Jestliže se plyn nachází v uzavřeném objemu, kde vyloučíme vliv vnějších faktorů, jako elektrické pole, záření - potom v tomto plynu vznikají tyto ionizační procesy:

- a) Štěpení neutrálních částic při vzájemných srážkách
- b) Fotoionizace částic vznikající tepelným zářením stěn ohraničujících objem plynu
- c) Ionizace při srážkách neutrálních molekul a elektronů, které jsou v plynu zastoupeny v důsledku prvních dvou citovaných ionizací

Teoreticky všechny tyto procesy musí probíhat při jakékoliv teplotě. Prakticky se však začínají projevovat teprve při teplotách plynu 2000 – 3000 K.

Ionizace při srážce částic plynu s ionty

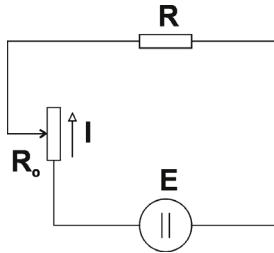
Hmota iontů je asi 2000krát větší než hmotnost elektronů, zatímco elektrické náboje jsou si rovny. Elektrické pole uděluje jak elektronům, tak iontům stejnou energii za podmínky stejně velikých rozdílů tohoto pole. V důsledku velké hmoty mají však ionty menší rychlosti.

V některých případech mohou i ionty dosáhnout dostatečné kinetické energie, aby tato energie vyvolala ionizaci neutrální částice při vzájemné srážce. Ve většině případů je však tato energie natolik malá, že tento druh ionizace můžeme zanedbat.

6.2. Elektrické charakteristiky oblouku

Vznik stejnosměrného oblouku v elektrickém poli

Vznik elektrického oblouku si vysvětlíme na jednoduchém případě elektrického obvodu napájeného ss zdrojem napětí E , obsahujícího regulační odpor R a proměnlivý odpor oblouku R_o (Obr. 6.1).



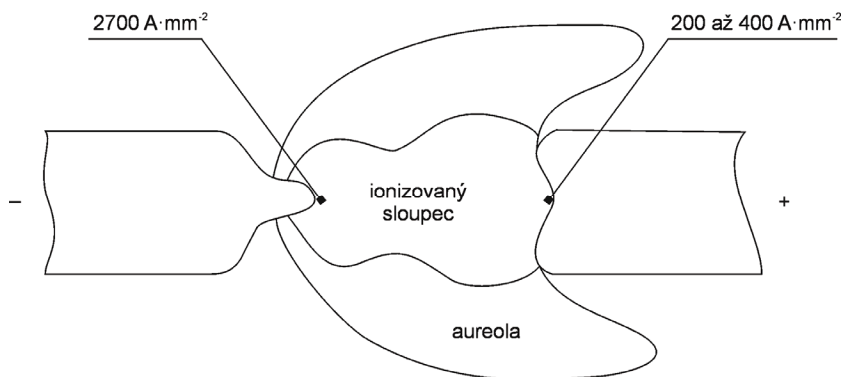
Obr. 6.1: Příklad elektrického obvodu napájeného stejnosměrným zdrojem

Oblouk vzniká mezi dvěma elektrodami. Katoda je zapojena na záporný pól zdroje, anoda na kladný pól. Jestliže přiblížíme obě elektrody ke vzájemnému dotyku, pak obvodem bude protékat proud I , daný veličinami obvodu E , R . Tyto veličiny stanovíme tak, aby proud protékající obvodem byl větší než 0,5 A.

Jestliže oddálíme elektrody od sebe, pak při přerušení vzájemného kontaktu začne mezi nimi vznikat vodivá cesta díky ionizaci prostředí mezi oběma elektrodami. Vodivými prvky mezi elektrodami jsou ionizované páry materiálu obou elektrod a vzduchu. Vzniká elektrický oblouk.

Proud obvodu se zmenšuje při narůstajícím odporu oblouku R_o . Odpor elektrického oblouku R_o se vyznačuje velikou nelineárností a závisí na charakteru oblouku a rychle se mění v rozmezí od nuly až po nekonečno.

Obloukový výboj sestává z ionizovaného sloupce, kterým protéká proud a okolních plynů (aureoly) o vysoké teplotě. Délka oblouku pak ohraničuje elektrody, katodu a anodu (Obr. 6.2).



Obr. 6.2: Elektrický oblouk

Při dalším hoření oblouku se katoda tvaruje do kužele, zatímco u anody se projevuje v její střední části prohloubení. Bezprostředně ke katodě přiléhá katodová oblast vodivého výboje. Délka této oblasti je nepatrná, asi 10^{-5} cm a nezávisí na délce oblouku. V této katodové oblasti probíhají procesy ionizace na elementární částice.

Uprostřed katodové oblasti se nachází tzv. **katodová skvrna**. Hustota proudu v katodové skvrně ($2700 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$) je značně větší než v okolních oblastech povrchu katody. Na katodovou oblast pak navazuje sloupec, tvořící nejdejší část vodivé cesty mezi elektrodami. Skládá se z ionizovaného sloupce obsahujícího ionizované částice, které umožňují průchod proudu mezi elektrodami. V tomto ionizovaném sloupci se transformuje základní část elektrické energie v tepelnou.

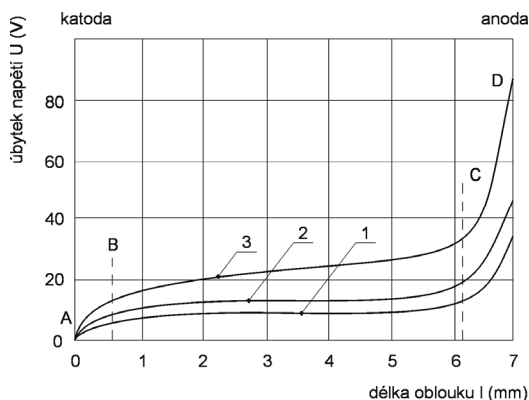
Na tento ionizovaný sloupec navazuje anodová část oblouku. Její délka je rovněž nepatrná a nezávisí na délce oblouku. Podle výzkumů byly laboratorně stanoveny hustoty proudu katodové skvrny v rozmezí $2700 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ až $2900 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ a anodové skvrny v rozmezí $200 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ až $400 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$. [4]

Velmi důležitou oblastí oblouku je právě oblast katody, ze které jsou elektrony působením termoelektrické emise dopravovány k anodě.

Rozdělení potenciálu podél oblouku

Na Obr. 6.3 jsou uvedeny křivky závislosti úbytku napětí na délce oblouku. Největší úbytek napětí spadá do oblasti anody (CD), menší pak do oblasti katody (AB). Anodové a katodové úbytky potenciálu nezávisí na délce oblouku, ani na hodnotě celkového napětí zdroje. Součet obou těchto potenciálů je roven potenciálu ionizace plynu nebo par oblouku. Z toho plyne, že rozdíl potenciálů vodivého sloupce je přibližně roven rozdílu potenciálu přiloženého napětí a ionizačního potenciálu.

Na Obr. 6.3 jsou tři křivky v souvislosti s různým pracovním tlakem v oblouku. Je vidět, že při zvětšení tlaku celková úroveň napětí oblouku narůstá.



Obr. 6.3: Rozdělení potenciálu podél oblouku

Charakteristiky stejnosměrného oblouku

Vzájemné vztahy mezi základními vlastnostmi elektrického výboje nazýváme charakteristikou oblouku. Základní charakteristikou oblouku je **voltampérová charakteristika**.

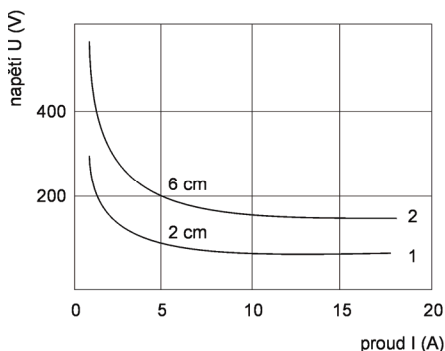
Nejznámější z empirických vztahů vyjadřujících elektrické vlastnosti stejnosměrného (ss) oblouku je Ayrtonové formule:

$$U = a + b + l + \frac{c}{I} + \frac{d \cdot l}{I} \quad (6.7)$$

kde a (V), b ($V \cdot \text{cm}^{-1}$), c (W), d ($W \cdot \text{cm}^{-1}$) jsou konstanty závislé na materiálu elektrod, l je délka oblouku, U je napětí na oblouku a I intenzita proudu.

Podle vztahu Ayrtonové jsou zkonstruovány (Obr. 6.4) dvě voltampérové charakteristiky ss oblouku. Vidíme, že při zvětšení proudu se asymptoticky přibližují k ustálené hodnotě napětí.

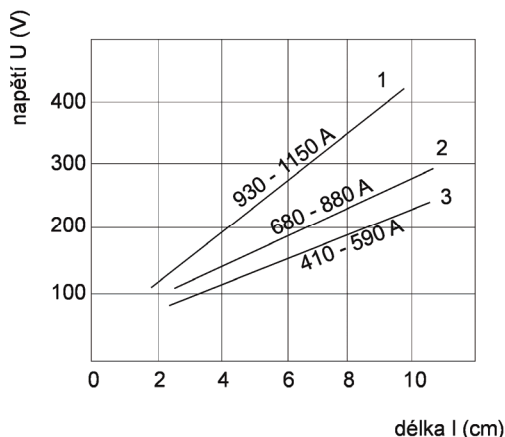
Křivka č. 1 platí pro délku oblouku 2 cm, křivka č. 2 pro délku oblouku 6 cm.



Obr. 6.4: Voltampérové charakteristiky stejnosměrného oblouku

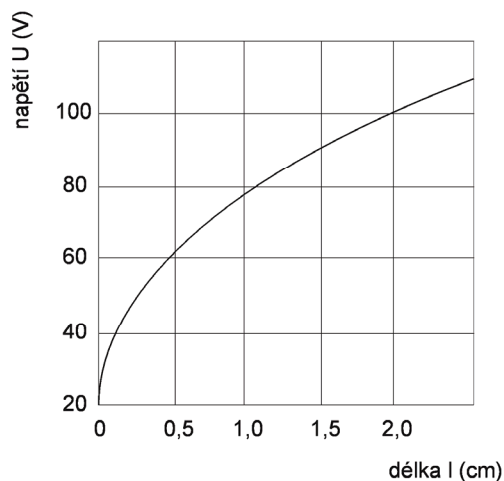
Závislost napětí na délce oblouku je znázorněna na Obr. 6.5 a 6.6

Na Obr. 6.5 je lineární závislost napětí U oblouku na jeho délce pro délky v rozmezí 2 až 10 cm. Velikosti proudů pro křivku 1 – v rozsahu 930 až 1150 A, pro křivku 2 – v rozsahu 680 až 880 A a pro křivku 3 – v rozsahu 410 až 590 A.



Obr. 6.5: Lineární závislost napětí na délce oblouku

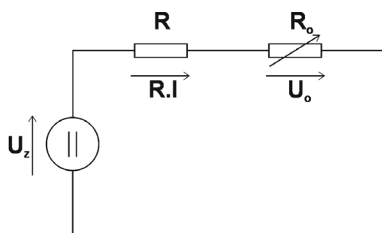
Na Obr. 6.6 je pak nelineární závislost napětí na délce oblouku, projevující se u oblouků menších délek v rozsahu do 2 cm při napětí 20 až 100 V.



Obr. 6.6: Nelineární závislost napětí na délce oblouku

Stabilizace oblouku odporem

Vznik oblouku mezi dvěma elektrodami je vysvětlen na obvodu napájeném ze stejnosměrného zdroje. Obvod obsahuje pevný odpor R a proměnlivý odpor oblouku R_o .



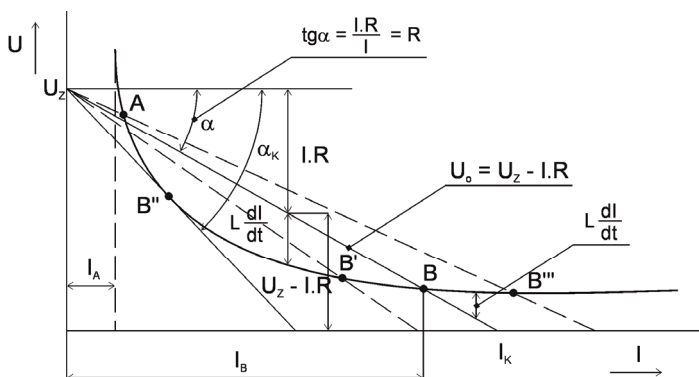
Obr. 6.7: Příklad elektrického obvodu napájeného stejnosměrným zdrojem

Vznik oblouku je vysvětlen oddálením elektrod od sebe a vznikem vodivé ionizované cesty. Pro stabilní hoření oblouku uvádí Sisojan hodnotu $I = 0,5 \text{ A}$. Tato hodnota proudu souvisí se stabilizačním odporem R v obvodu oblouku. [4]

Pro napětí zdroje při konstantním proudu v oblouku platí:

$$U_z = U_o + R \cdot I \quad (6.8)$$

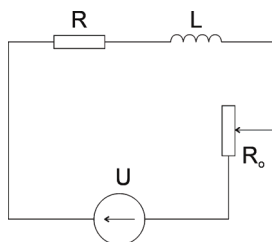
Podle vztahu Ayrtónové (Obr. 6.8) je charakteristikou oblouku hyperbola.



Obr. 6.8: Charakteristika oblouku

6.3. Charakteristiky střídavého oblouku

K odvození charakteristik střídavého oblouku použijeme náhradní schéma elektrického obvodu s obloukem podle Obr. 6.9.



Obr. 6.9: Náhradní schéma elektrického obvodu s obloukem

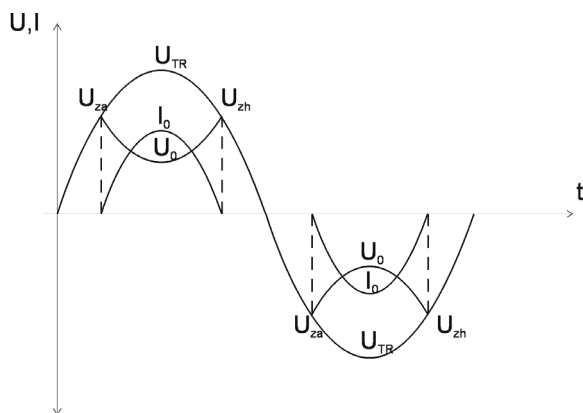
V obvodu jsou zastoupeny prvky střídavého zdroje U , činné odpory obvodu R a R_o a indukčnost obvodu L .

Budeme-li zvyšovat napětí zdroje při konstantní vzdálenosti elektrod, pak při určité hodnotě napětí dojde k průrazu a mezi elektrodami začne protékat elektrický proud prostřednictvím oblouku.

Při periodické, sinusové změně napětí nastávají v hoření oblouku nucené přestávky, a to v tom období, kdy napětí na oblouku bude pod hodnotou U_{min} .

Na Obr. 6.10 je znázorněn průběh napětí a proudu v obvodu, který obsahuje jen ohmický odpor bez indukčnosti.

Jakmile napětí transformátoru U_{TR} dosáhne zápalnou hodnotu oblouku U_{za} , začne obvodem protékat proud, který poteče tak dlouho, dokud napětí transformátoru neklesne pod zhášecí napětí U_{zh} . Zhášecí napětí bývá o něco nižší než napětí zápalné. Tento proces se opakuje při každé půlvlně. Napětí oblouku má přitom sedlo způsobené zápornou charakteristikou oblouku.



Obr. 6.10 Průběh napětí a proudu v obvodu

Stabilizace střídavého oblouku fázovým posunutím

Zapojíme-li do obvodu oblouku sériově indukčnost, nastává nejen fázový posuv mezi napětím a proudem, ale i prodloužení hoření oblouku vlivem indukčnosti tlumivky.

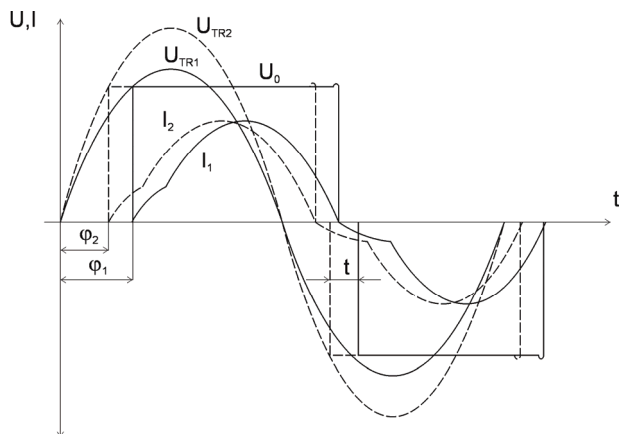
Výpočtem je možno dokázat, že k trvalému hoření oblouku je nutný minimální fázový posuv $\cos\varphi = 0,85$. Na Obr. 6.11 je znázorněn idealizovaný průběh napětí a proudu při $\cos\varphi = 0,85$. Napětí na oblouku je obdélníkové. Toto je charakteristické pro oblouky s velmi vysokými proudy, kde prakticky již nedochází ke změně napětí v závislosti na proudu.

Stabilizace střídavého oblouku zvýšením napětí na transformátoru

Stabilizace střídavého oblouku zvýšením napětí na transformátoru je znázorněno na Obr. 6.11 čárkovaně.

U průmyslových elektrických obloukových pecí nastává kromě změny proudu i změna elektrody. Jestliže v první půlperiodě tvoří katodu uhlíková elektroda, pak v druhé půlperiodě přebírá tuto úlohu tavený materiál. Tento materiál má oproti uhlíkové elektrodě rozdílné elektrické i tepelné vlastnosti. To se projevuje zejména na začátku tavby, pokud je vsázka poměrně studená a katodová skvrna v průběhu první půlperiody se rychle ochlazuje vlivem dobré tepelné vodivosti kovu. Výsledek je pak ten, že v půlperiodě, kdy elektrodu (katodu) tvoří uhlíková elektroda, protéká obvodem větší proud než v druhé půlperiodě, kdy se polarita obrátí.

Studená vsázka pece vyžaduje vlivem horší emisní schopnosti vyšší napětí při menších proudech oblouku. Nerovnoměrnost emise vyvolává silné výkyvy. Dokonce někdy dochází i k přerušení oblouku. To je nutno odstranit novým zkratováním obvodu a následným oddálením elektrod.

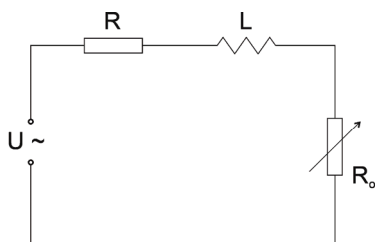


Obr. 6.11: Stabilizace střídavého oblouku

6.4. Teoretické základy elektrických obloukových pecí

Proudový obvod elektrické obloukové pece sestává z konstantního ohmického a induktivního odporu, daného vlastnostmi vodivého materiálu a geometrickým tvarem přívodů a okolních součástí elektrické obloukové pece. Tyto součásti ovlivňují především hodnotu jalových ztrát, a tím i úbytku napětí na svorkách elektrod.

Dále je v proudovém obvodu zastoupen odpor oblouku, který si můžeme nahradit proměnlivým ohmickým odporem (Obr. 6.12).



Obr. 6.12: Příklad elektrického obvodu

Fiktivní odpor oblouku R_o je hodnota proměnlivá. Tuto hodnotu dostaneme, jestliže dělíme napětí na oblouku proudem obvodu pece. Může se měnit od nuly, kdy elektrody jsou ve zkratu až do nekonečna, kdy obvod je přerušený a oblouk nehoří. Poměry v peci se dají dobře znázornit vektorovým diagramem na Obr. 6.13.

Z diagramu na Obr. 6.13 vychází **impedance nakrátko**. Impedance nakrátko určuje proud pece nakrátko. Pracovní bod se pohybuje po přímce BX v závislosti na velikosti odporu oblouku. Odpor pece pak určuje i okamžitou hodnotu impedance pece, kde Z_m je impedance pro maximální výkon pece (Obr 6.13).

$$Z = \sqrt{(R + R_o)^2 + (\omega \cdot L)^2} \quad (6.9)$$

Ve vztahu (6.9) je R_o proměnlivá hodnota odporu oblouku. Z vektorového diagramu je možno určit i účinník pece.

Pro hodnotu $\cos\varphi_K$ (nakrátko - $R_o = 0$) platí:

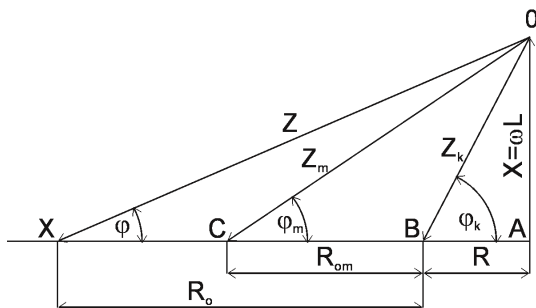
$$\cos\varphi_K = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \quad (6.10)$$

Pro libovolný pracovní bod označený X platí:

$$\cos\varphi = \frac{R + R_o}{\sqrt{(R + R_o)^2 + (\omega \cdot L)^2}} \quad (6.11)$$

Proud oblouku je nepřímo úměrný proměnlivé hodnotě impedance Z.

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R + R_o)^2 + (\omega \cdot L)^2}} \quad (6.12)$$

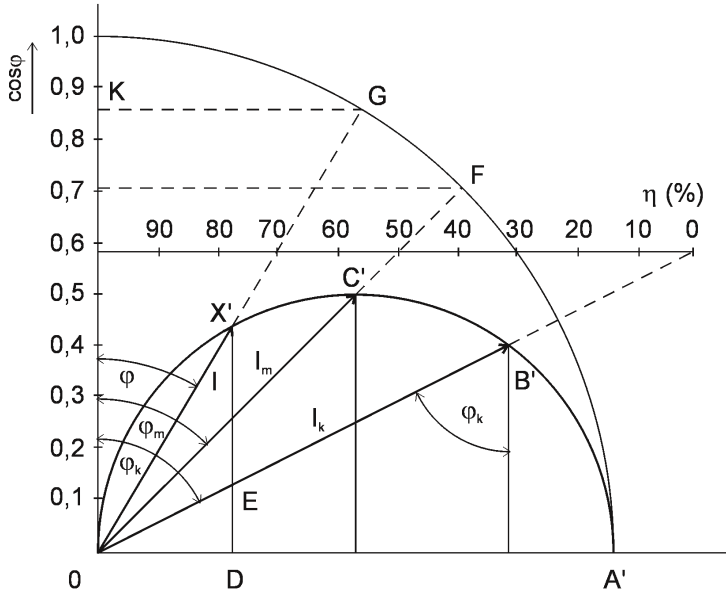


Obr. 6.13: Vektorový diagram

Předpokládáme, že při provozních zkratech pracují magnetické materiály obvodu (tlumivka, cívky transformátoru, vodiče, konstrukce) v přímé části magneti-

zační charakteristiky. Jednotlivé reaktance X nezávisí tedy na procházejícím proudem. Stejně tak i konstantní část činných odporů R (kromě odporu oblouku) nezávisí na procházejícím proudem. Za tohoto předpokladu se budou koncové body vektorů proudu pro různé hodnoty odporu oblouku R_o pohybovat po kružnici.

Na Obr. 6.14 je kružnice s vyznačenými body A' , B' , C' , X' , O' . Tyto jednotlivé body jsou ekvivalentní převrácené hodnotě impedance Z , která se mění závisle na hodnotě odporu oblouku.



Obr. 6.14: Kruhový diagram

Bodu A na Obr. 6.13 odpovídá bod A' na kružnici (Obr. 6.14). Úsečky $OB = Z_K$ (Obr. 6.13) odpovídá úsečka OB' , vyjadřující proud nakrátko. Úsečky OC (Obr. 6.13) odpovídá úsečka OC' (Obr. 6.14) je to bod pro maximální výkon pece. Úsečky OX (Obr. 6.13) tj. libovolný proud oblouku, odpovídá úsečka OX' v kruhovém diagramu

Konverguje-li odpor oblouku R_o k nekonečnu, dostáváme se při přerušení oblouku do bodu O' na kruhovém diagramu. Vyneseme-li vektor napětí U kolmo na průměr kružnice, OA' , pak úhly φ_K , a φ jsou fázovými posuvy mezi napětím a okamžitým proudem pece. Na svislou osu si můžeme vynést měřítko pro hodnoty účinníku pece $\cos\varphi$.

Průsečík prodlouženého vektoru proudu s kružnicí $A'FG$, jejíž poloměr je průměrem kruhového diagramu, udává na svislici (ose y) hodnotu $\cos\varphi$, se kterým pec pracuje při daném proudem.

Účinnost η pro jednotlivé proudy pece dostáváme jako průsečík prodloužených vektorů těchto proudů s úsečkou účinnosti. Úsečku účinnosti zkonstruujeme prodloužením vektoru proudu nakrátko I_K a rovnoměrným rozdělením kolmice z některého bodu tohoto vektoru I_K na svislou osu y .

Zmenšením proudu se nepříznivě ovlivňuje stabilita elektrického oblouku. Kriteériem pro posouzení této stability je poměr:

$$\frac{I}{I_K} = \frac{\text{proud pece pracovní}}{\text{proud pece nakrátko}} \quad (6.13)$$

Zvýšením proudu se zvětší tento poměr I / I_K za cenu snížení teoretické elektrické účinnosti pece.

Z hlediska zpětných vlivů na síť jsou tyto více tlumeny při menším rozdílu, tedy blíží-li se vektor proudu na kruhovém diagramu k bodu B' (Obr. 6.14), odpovídajícímu proudu nakrátko I_K .

Na kruhovém diagramu pak rozlišujeme tři základní oblasti:

- oblast nestabilního chodu – úsek O'X' – dlouhý oblouk
- oblast optimálního chodu – úsek X'C'
- oblast zaručeně stabilního chodu – úsek C'B' – krátký oblouk

Maximální příkon obloukové pece

Účinník elektrické obloukové pece je závislý jednak na pevné složce činného odporu R a reaktance X a dále na hodnotě proměnlivé (odporu oblouku) R_o .

Při dlouhém oblouku (velký odpor, malý proud), viz kruhový diagram na Obr. 6.14, tedy při velkých odporech oblouku je účinník velký a blíží se k jedné. V tomto případě nemá celá změna délky oblouku prakticky žádný vliv na účinník. Jinak je tomu v případě, že velikost odporu R se blíží velikosti reaktance X . Elektrody jdou do zkratu. Pak každá změna odporu oblouku R_o vyvolá i změnu účinníku, a tím i změnu přenosu energie do oblouku.

Podle Obr. 6.13 platí:

$$\text{tg} \varphi = \frac{\omega \cdot L}{R + R_o} \quad (6.14)$$

Z toho:

$$R_o = \frac{\omega \cdot L}{\text{tg} \varphi} - R \quad (6.15)$$

Výkon oblouku:

$$P_o = R_o \cdot I^2 = R_o \cdot \left(\frac{U}{Z} \right)^2 \quad (6.16)$$

Dosadíme-li za impedanci Z (ze ztahu 6.17).

$$\sin \varphi = \frac{\omega \cdot L}{Z} \quad (6.17)$$

pak dostaneme pro výkon:

$$P_o = R_o \cdot \left(\frac{U}{\omega \cdot L} \right)^2 \cdot \sin^2 \varphi \quad (6.18)$$

Za R_o dosadíme ze vztahu (6.15) a úpravou dostaneme:

$$\begin{aligned} P_o &= \frac{U^2}{\omega \cdot L} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - \frac{U^2 \cdot R}{(\omega \cdot L)^2} \cdot \sin^2 \varphi = \\ &= \frac{U^2}{2 \cdot \omega \cdot L} \cdot \sin 2\varphi - \frac{R}{\omega \cdot L} \cdot \frac{U^2}{\omega \cdot L} \cdot \sin^2 \varphi \end{aligned} \quad (6.19)$$

První část vztahu (6.19), tj. příkon do obvodu elektrické obloukové pece:

$$\begin{aligned} \frac{U^2}{2 \cdot \omega \cdot L} \cdot \sin 2\varphi &= \frac{U^2}{\omega \cdot L} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi = \\ &= \frac{U^2}{\omega \cdot L} \cdot \frac{\omega \cdot L}{Z} \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (6.20)$$

Tento výsledný vztah vyjadřuje příkon do celého obvodu včetně celkových ztrát. Maximum této energie dosáhneme při maximu funkce $\sin 2\varphi$, tedy jestliže $\sin 2\varphi = 1$, tzn. $2\varphi = 90^\circ$, tj. $\varphi = 45^\circ$. Největší výkon v obvodu dostaneme tehdy, jestliže při konstantním napětí U bude fázový posuv $\varphi = 45^\circ$. Tedy induktivní odpor obvodu X bude roven odporu $R + R_o$.

$$R + R_o = \omega \cdot L \quad (6.21)$$

Z toho vyplývá účinník pro maximální výkon:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad (6.22)$$

Max. výkon v celém obvodu elektrické obloukové pece je roven:

$$P_{o\max} = \frac{U^2}{2 \cdot \omega \cdot L} \quad (6.23)$$

Závisí tedy jedině na napětí zdroje a indukčnosti přívodů ωL .

Zvýšení výkonu pece se dá při konstantním napětí dosáhnout jedině snížením indukčnosti přívodů. Indukčnost přívodů je však nutná v minimální míře ($\cos\varphi = 0,85$) pro udržení stabilního oblouku a nelze ji libovolně zmenšovat.

Určitým řešením, které napomáhá zvýšení výkonu elektrické obloukové pece, je zařazení sériové kapacity na primární straně napájení elektrických obloukových pecí. Toto opatření umožní stabilizaci hladiny napětí pro elektrický oblouk a zmenší složku ωL , pokud je v induktivní reaktanci dostatečná rezerva vzhledem ke stabilitě oblouku.

Maximální výkon na oblouku

Maximální výkon v obvodu elektrického oblouku není totožný s maximálním výkonem na oblouku. Výkon na oblouku je menší o ztráty v přívodech a ztráty energie elektromagnetickým polem vyzařované do okolí. Maximální výkon na oblouku dostaneme derivací vztahu:

$$\frac{dP_o}{d\varphi} = 0 \quad (6.24)$$

$$P_o = \frac{U^2}{\omega \cdot L} \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi - \frac{U^2 \cdot R}{\omega \cdot L} \cdot \sin^2\varphi \quad (\text{ztráty celkové}) \quad (6.25)$$

$$\frac{dP_o}{d\varphi} = \frac{U^2}{\omega \cdot L} \cdot (\cos^2\varphi - \sin^2\varphi) - \frac{2 \cdot U^2 \cdot R}{(\omega \cdot L)^2} \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi \quad (6.26)$$

Po úpravě:

$$\frac{dP_o}{d\varphi} = \frac{U^2}{\omega \cdot L} \cdot (\cos 2\varphi - \frac{R}{\omega \cdot L} \cdot \sin 2\varphi) \quad (6.27)$$

Uplatníme podmínku pro maximum:

$$\frac{dP_o}{d\varphi} = 0 \quad (6.28)$$

Z toho vyplývá:

$$\cos 2\varphi_m = \frac{R}{\omega \cdot L} \cdot \sin 2\varphi_m \quad (6.29)$$

Nebo:

$$\operatorname{tg} 2\varphi_m = \frac{\omega \cdot L}{R} = \operatorname{tg} 2\varphi_k \quad (6.30)$$

Z Obr. 6.13 a 6.14 vyplývá:

$$\frac{\omega \cdot L}{R} = \operatorname{tg} 2\varphi_k \quad (6.31)$$

V tomto vztahu je φ_k úhel obvodu obloukové pece nakrátko. Tedy:

$$\varphi_k = 2\varphi_m \quad (6.32)$$

Vztah (6.32) je vytvořen na základě srovnání dvou předchozích vztahů.

Maximálního výkonu na oblouku dosáhneme při fázovém posuvu, který má hodnotu $\varphi_k = 2$. Tedy i výkon na oblouku závisí na ohmickém a induktivním odporu přívodů a pro danou konstrukci elektrické obloukové pece je dán vztahem:

$$P_{o\max} = \frac{U^2}{2 \cdot \omega \cdot L} \cdot \sin 2\varphi_m - \frac{R \cdot U^2}{(\omega \cdot L)^2} \cdot \sin^2 \varphi_m \quad (6.33)$$

$\sin 2\varphi_m = \sin \varphi_k$ podle vztahu (6.32)

$$\sin 2\varphi_m = \frac{\omega \cdot L}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \quad (6.34)$$

$$\sin \varphi_m = \sin \frac{\varphi_k}{2} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \varphi_k)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}}} \quad (6.35)$$

Dosažením vztahem (6.34) pro $\sin 2\varphi_m$ do úvodního vztahu pro maximální výkon na oblouku $P_{o\max}$, tj. vztah (6.33), pak dostáváme:

$$P_{o\max} = \frac{U^2}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} - \frac{R}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \cdot \frac{U^2}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} + R} \quad (6.36)$$

Druhá část výrazu vyjadřuje ztráty v obvodu elektrického oblouku:

$$\Delta P_{\text{ztrátové}} = R \cdot I_{\text{max}}^2 = \frac{R}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} \cdot \frac{U^2}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} + R} \quad (6.37)$$

První část výrazu (6.36) je celkový výkon obvodu při maximálním výkonu na oblouku:

$$P_{\text{celkový}} = \frac{U^2}{2 \cdot \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}} < \frac{U^2}{2 \cdot \omega \cdot L} \quad (6.38)$$

Tento výkon je menší než maximálně možný výkon v obvodě daný vztahem 6.23.

Účinnost při maximálním výkonu na oblouku je:

$$\cos \varphi_{\text{max}} = \cos \frac{\varphi_k}{2} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \varphi_k)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}}} \quad (6.39)$$

Tento maximální účinnost je funkcí odporu R a indukčnosti přívodů L . Praktická hodnota tohoto účinnosti pro skutečné pece se pohybuje v rozmezí 0,75 až 0,8 podle poměrů velikostí parametrů R a X přívodů a ztrát přenosem energie do sousedního zařízení.

6.5. Teoretické vztahy pro trojfázovou obloukovou pec

Ke správnému pochopení teoretických závislostí platných pro trojfázovou elektrickou obloukovou pec se podíváme na Obr. 6.15, kde je nakresleno ideální schéma zapojení trojfázové elektrické obloukové pece.

V našich úvahách budeme posuzovat jen část napájecí sítě od sekundárních svorek transformátoru až k tavenině včetně oblouku. Tyto hodnoty lze pak jednoduše přepočítat i na primární stranu.

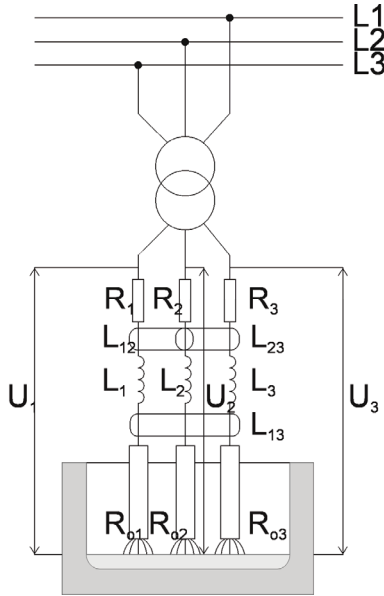
Skutečné obvody trojfázové pece jsme si nahradili náhradními odpory a tlumivkami. Každý proudový obvod pece obsahuje vlastní ohmický odpor přívodů R_1 , R_2 , R_3 a ekvivalentní odpory oblouků R_{o1} , R_{o2} , R_{o3} . Vlastní indukčnost obvodů je nahrazena tlumivkami o ekvivalentní indukčnosti L_1 , L_2 , L_3 .

Vliv proudů protékajících jednotlivými obvody na oba sousední obvody je vyjádřen ekvivalentní vzájemnou indukčností L_{13} , L_{12} , L_{23} . Následující vztah platí pro rovinné uspořádání vodičů.

$$L_{12} = L_{23} > L_{13} \quad (6.40)$$

S určitým zjednodušením lze považovat ohmické odpory R_1, R_2 a R_3 za stejně veliké, jakož i indukčnost L_1, L_2, L_3 za stejně veliké. Hodnoty vzájemných indukčností jsou však různé. Obecně lze říci, že L_{12}, L_{23} (dle Obr. 6.15) jsou stejně veliké, ale přitom větší než L_{13} . Rovněž pro odpory oblouků platí, že $R_{o1} \neq R_{o2} \neq R_{o3}$. Souvisí to s rovinným uspořádáním přívodů krátké cesty.

Při dokonale symetrické peci je napětí v jednotlivých obvodech U_1, U_2, U_3 stejně veliké a dané svorkovým napětím transformátoru. V praxi však podmínka dokonale symetrické pece nemůže být splněna zejména v údobí natavování vsázky, kdy proudy protékající jednotlivými obvody jsou různé a vlivem změny délky oblouku se neustále mění.



Obr. 6.15: Schéma zapojení trojfázové obloukové pece

Zjednodušené rovnice napětí pro trojfázové rovinné uspořádání krátké sítě

Obecně teoretické vztahy pro trojfázovou elektrickou obloukovou pec, jejíž schéma je na Obr. 6.15 můžeme psát takto:

$$\underline{U}_1 = (R_1 + R_{o1}) \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{12} \cdot \underline{I}_2 + j\omega L_{13} \cdot \underline{I}_3 \quad (6.41)$$

$$\underline{U}_2 = (R_2 + R_{o2}) \cdot \underline{I}_2 + j\omega L_2 \cdot \underline{I}_2 + j\omega L_{21} \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{23} \cdot \underline{I}_3 \quad (6.42)$$

$$\underline{U}_3 = (R_3 + R_{o3}) \cdot \underline{I}_3 + j\omega L_3 \cdot \underline{I}_3 + j\omega L_{31} \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{32} \cdot \underline{I}_2 \quad (6.43)$$

Jak jsme již řekli, platí pro ekvivalentní vzájemné indukčnosti:

$$L_{12} = L_{21} = L_{23} = L_{32} = M \quad (6.44)$$

$$L_{13} = L_{31} = N \quad (6.45)$$

přičemž $M > N$

Pro proudy v jednotlivých fázích platí:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \quad (6.46)$$

Jedná se o zapojení do trojúhelníka, proudy se musí vyrovnávat.

Pomocí rovnic pro vzájemné indukčnosti (6.44) a (6.45) můžeme psát rovnice pro napětí ve tvaru:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= (R_1 + R_{o1}) \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega M \cdot \underline{I}_2 - j\omega N \cdot \underline{I}_1 - j\omega N \cdot \underline{I}_2 = \\ &= [(R_1 + R_{o1}) + j\omega(L_1 - N)] \cdot \underline{I}_1 + j\omega(M - N) \cdot \underline{I}_2 = \underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1 + \underline{Z} \cdot \underline{I}_2 \end{aligned} \quad (6.47)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= (R_2 + R_{o2}) \cdot \underline{I}_2 + j\omega L_2 \cdot \underline{I}_2 + j\omega M \cdot \underline{I}_1 - j\omega M \cdot \underline{I}_1 - j\omega M \cdot \underline{I}_2 = \\ &= [(R_2 + R_{o2}) + j\omega(L_2 - M)] \cdot \underline{I}_2 + j\omega(M - M) \cdot \underline{I}_1 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2 \end{aligned} \quad (6.48)$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_3 &= (R_3 + R_{o3}) \cdot \underline{I}_3 + j\omega L_3 \cdot \underline{I}_3 - j\omega N \cdot \underline{I}_2 - j\omega N \cdot \underline{I}_3 + j\omega M \cdot \underline{I}_2 = \\ &= [(R_3 + R_{o3}) + j\omega(L_3 - N)] \cdot \underline{I}_3 + j\omega(M - N) \cdot \underline{I}_2 = \underline{Z}_3 \cdot \underline{I}_3 + \underline{Z} \cdot \underline{I}_2 \end{aligned} \quad (6.49)$$

Impedance Z_1 , Z_2 , Z_3 a Z byly dosazeny za tyto vztahy:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= (R_1 + R_{o1}) + j\omega(L_1 - N) \\ \underline{Z}_2 &= (R_2 + R_{o2}) + j\omega(L_2 - M) \\ \underline{Z}_3 &= (R_3 + R_{o3}) + j\omega(L_3 - N) \\ \underline{Z} &= j\omega(M - N) \end{aligned} \quad (6.50)$$

Pro elektrické obloukové pece s ustáleným hořením oblouku si můžeme dovolit určitá zjednodušení, takže platí:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = R_3 = R \\ R_{o1} &= R_{o2} = R_{o3} = R_o \\ L_1 &= L_2 = L_3 = L \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_3 \end{aligned} \tag{6.51}$$

Dosazením těchto předpokladů do rovnic pro napětí (6.47), (6.48), (6.49) dostaneme rovnici pro napětí:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_3 \tag{6.52}$$

A impedance:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_3 \tag{6.53}$$

To znamená, že fáze 1 a 3 jsou rovnocenné, rozdíl je pouze ve střední fázi.

Vznik živé a mrtvé fáze

Nesymetrie v obvodech elektrické obloukové pece si objasníme na základě vztahů (6.47), (6.48) a (6.49) pro napětí, které po zjednodušení dovolují hlubší pohled na základní průběhy. Násobením těchto fázových napětí příslušnými proudy dostáváme zdánlivý výkon v jednotlivých fázích. Tyto výkony se rozloží prakticky na dvě složky:

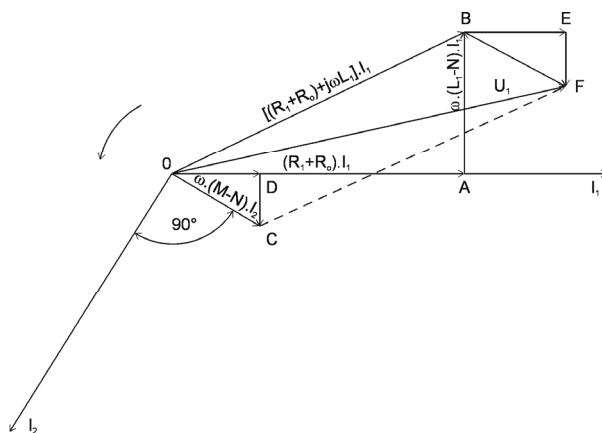
První složka je vlastní zdánlivý výkon fáze:

$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{I}_1^2, \quad \underline{Z}_2 \cdot \underline{I}_2^2, \quad \underline{Z}_3 \cdot \underline{I}_3^2 \tag{6.54}$$

Druhá složka u první a třetí fáze pak udává vliv proudů sousedních fází, zredukovaný na vliv střední fáze

Pro fázi jedna je tento výkon dán součinem $Z \cdot I_1 \cdot I_2$ a pro třetí fázi součinem $Z \cdot I_2 \cdot I_3$. To tedy znamená, že vliv sousední fáze se zredukoval na vliv střední fáze 2.

Jak je známo, v magneticky svázaných obvodech střídavého proudu nastává vždy přenos elektrické energie z jedné fáze do druhé prostřednictvím magnetického pole. V našem případě odevzdává energii fáze vektorově předbíhající fázi následující. Je to obvyklý jev v trojfázových soustavách, které jsou vždy vázány magnetickým polem. V symetrických třífázových obvodech bývá tento vliv anulován, v rovinném uspořádání musí být respektován vliv střední fáze na první krajní fázi (Obr. 6.16).

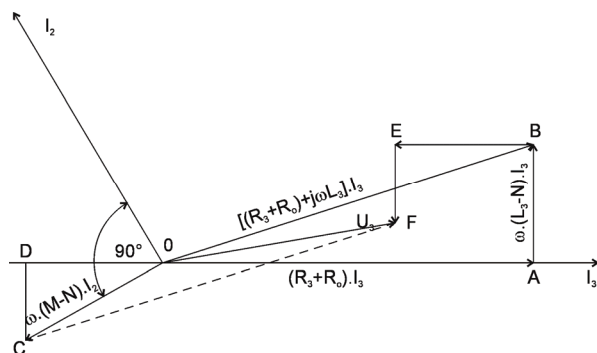


Obr. 6.16: Fázorový diagram – vznik mrtvé fáze

Vektor napětí \underline{U} se skládá ze součtu ohmické složky vyznačené na úsečce OA a dané ohmickým odporem obvodu a z induktivní složky na úsečce AB dané induktivním odporem zmenšeným ještě o vliv proudu střední fáze. Tato část napětí indukovaného proudem I_2 , mající vliv na napětí první fáze, je dána vektorem na úsečce OC, kolmým na směr proudu I_2 . Rozložením tohoto napětí do směru proudu I_1 a kolmo ke směru proudu I_1 vidíme, že vliv proudu střední fáze je takový, jako by zvětšoval ohmický odpor první fáze, a sice o hodnotu OD (odpovídá BE). Induktivní odpor se zatím zmenší o hodnotu úměrnou úsečce DC (odpovídá EF). Postupným vektorovým sčítáním všech těchto dílčích napětí dostáváme výsledný vektor napětí \underline{U}_1 na úsečce OF. Tento vektor napětí \underline{U}_1 je větší než původní vektor daný vztahem:

$$[(R_1 + R_{o1}) + j\omega L_1] \cdot \underline{I}_1 \approx \text{úsečce } 0B \quad (6.55)$$

Vektorový obrazec ukazuje, že první fáze odevzdává část své energie do fáze střední, a proto se chová tak, jako by měla větší zdánlivý odpor v obvodu než fáze střední. Jelikož napětí na svorkách transformátoru je pro všechny tři fáze stejné, protéká tímto obvodem menší proud. Výkon na oblouku napájeném z první fáze je menší. Tuto fázi nazýváme „mrtvou fází“. U třetí fáze je jiná situace (Obr. 6.17):



Obr. 6.17: Fázorový diagram – vznik živé fáze

Jak jsme si odvodili, napětí této fáze je dáno součtem ohmické a induktivní složky a složky s vlivem proudu střední fáze. V tomto případě je střední fáze odevzdávající, jelikož vektor proudu I_3 je v zpoždění za vektorem proudu I_2 . Střední fáze odevzdává prakticky všechnu energii, kterou přijala z fáze první. Vliv střední fáze na fázi třetí se projevuje zdánlivým zmenšením ohmického i induktivního odporu, což vyvolává zvýšení proudu i výkonu v tomto obvodu.

Na Obr. 6.17 vektor napětí ovlivňující střední fázi $I_2 j\omega \cdot (M-N)$, úměrný úsečce 0C, se opět rozkládá na činnou a jalovou složku napětí 0D a DC a zmenšuje původní vektor napětí na napětí U_3 , úměrné úsečce 0F.

$$[(R_3 + R_o) + j\omega L_3] \cdot I_3 \approx \text{úsečce 0B} \quad (6.56)$$

Tuto fázi s vyšším proudovým zatížením nazýváme „živou fází“.

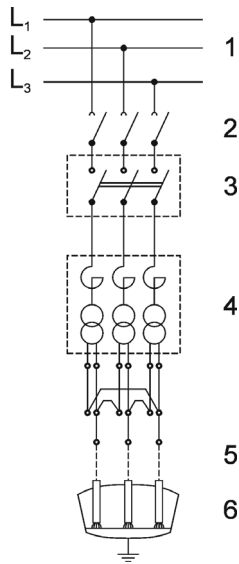
Z toho vyplývá, že při praktických řešeních obloukových pecí pracuje střední fáze normálně, jedna z krajních fází je zatížena méně, tj. fáze mrtvá. Druhá krajní fáze je zatížena proudově více, tj. fáze živá. Která z obou krajních fází přebere úlohu mrtvé či živé fáze, závisí čistě na zapojení trojfázového systému. Přehozením směru otáčení se úlohy vymění.

6.6. Zařízení trojfázových pecí

Elektrické zařízení se podílí podstatnou částí na pořizovacích nákladech elektrických obloukových pecí a značně ovlivňuje jejich chod. Jednotlivé části elektrického zařízení obloukových pecí si můžeme rozdělit nejlépe podle jejich funkce:

- Silnoproudý elektrický obvod
- Obvod automatické regulace pohybu elektrod
- Měřicí přístroje, ochrany, blokování a signalizace
- Řídicí počítač

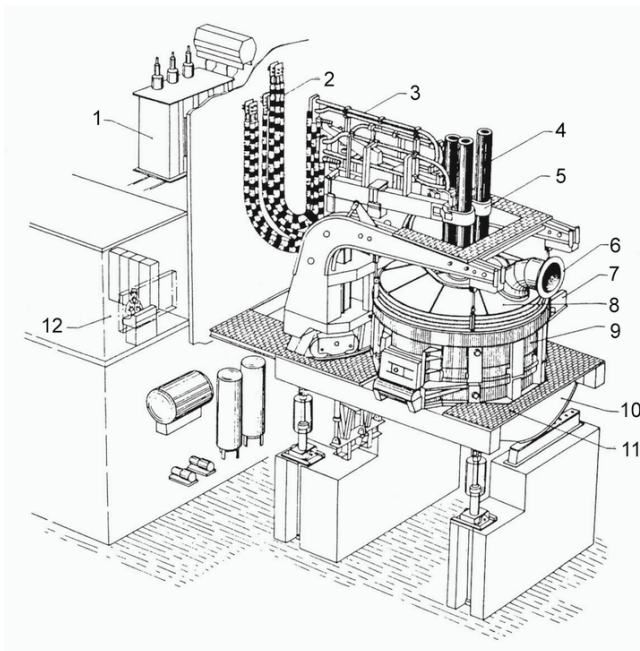
Nejdůležitější skupinu tvoří silnoproudý obvod. Představuje převážnou část hodnoty elektrického zařízení pece a má podstatný vliv na chod pece. Druhou podstatnou částí je obvod automatické regulace pohybu elektrod. Úkolem silového obvodu je přivést elektrickou energii do pracovního prostoru pece a přeměnit ji na teplo. Silový obvod trojfázové obloukové pece je schematicky znázorněn na Obr. 6.18.



Obr. 6.18: Silový obvod trojfázové obloukové pece

Popis silového obvodu trojfázové elektrické obloukové pece (Obr. 6.18):

1 - Napájecí síť; 2 - Odpojovač; 3 - Vysokonapěťový výkonový vypínač; 4 - Pecní transformátor a tlumivky; 5 - Krátká síť; 6 - Elektrody



Obr. 6.19: Trojfázová elektrická oblouková pec

Popis trojfázové elektrické obloukové pece Obr. 6.19.

1 - Pecní transformátor; 2 - Ohebné kabely chlazené vodou; 3 - Horizontální trubkové vodiče chlazené vodou; 4 - Elektrody; 5 - Držáky elektrod; 6 - Odvod plynů z pecního prostoru; 7 - Odtok oceli při překlopení; 8 - Vodou chlazené víko pece; 9 - Pecní prostor; 10 - Mechanismus naklánění pece; 11 - Montážní plošina; 12 - Řídicí pracoviště. [3]

6.7. Napájecí síť vysokého napětí

Z hlediska energetiky jsou elektrické obloukové pece jedním z největších odběratelů elektrické energie, soustředěné do jednoho bodu elektrické rozvodné sítě hutního závodu. Napájecí síť vn elektrických obloukových pecí je zatěžována nepravidelně proměnlivými špičkami proudů, které se pohybují od nulových hodnot při přerušení oblouku až po trojnásobek jmenovitého proudu při zkratu elektrod s taveninou. Toto nepravidelné kolísání proudů způsobuje na příslušných impedancích napájecí sítě kolísání napětí, které nepříznivě ovlivňuje ostatní elektrická zařízení, napájená z téže soustavy. Navíc způsobuje toto kolísání snížení elektrického výkonu předávaného obloukem do taveniny.

Velmi citlivé na toto proměnlivé kolísání napětí jsou zejména rentgenová zařízení, televizory, systémy přenosu dat. Proto požadavky na napájecí síť vysokého napětí elektrických obloukových pecí jsou přesně vymezeny a dány především výkonem pecního transformátoru a způsobem tavení.

Důležitým činitelem pro posouzení napájecí sítě vn elektrických obloukových pecí je zkratový výkon v místě zapojení pecí na energetický systém. Především je nutno oddělit systém napájení elektrických obloukových pecí od spotřebičů, zejména těch, které jsou citlivé na změny napětí.

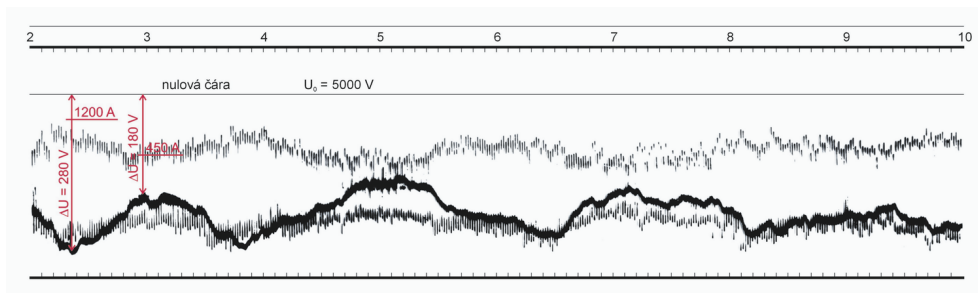
V některých případech však nemůžeme toto oddělení provést. Jde především o menší ocelářské závody napájené vysokým napětím 22 kV a nižším, kde na společných přípojnicích jsou zapojeni ještě další odběratelé. V těchto případech je nutno provést výpočet, zda zkratový výkon v místě napojení elektrické obloukové pece zaručuje udržení rušivých účinků na síť v přijatelných mezích.

Příčiny rušivých vlivů obloukových pecí v napájecí síti vn

Energetická soustava, napájející závody s provozem elektrických obloukových pecí, je často vystavena rušivým účinkům nepravidelně kolísajícího napětí. Původ tohoto nepravidelně proměnlivého kolísání napětí je nutno hledat především v nepravidelném proudovém zatížení elektrických obloukových pecí. Toto zatížení způsobuje na impedancích sítě poklesy napětí, jež vedou ke kolísání napětí a ke zpětnému vlivu elektrických obloukových pecí na energetickou soustavu. Při zkoumání změn zatížení napájecí soustavy elektrickými ocelářskými pecemi bylo dokázáno, že kolísání proudů, která vznikají při natavování, jsou v podstatě překrýváním dvou typů proudových impulsů. [14]

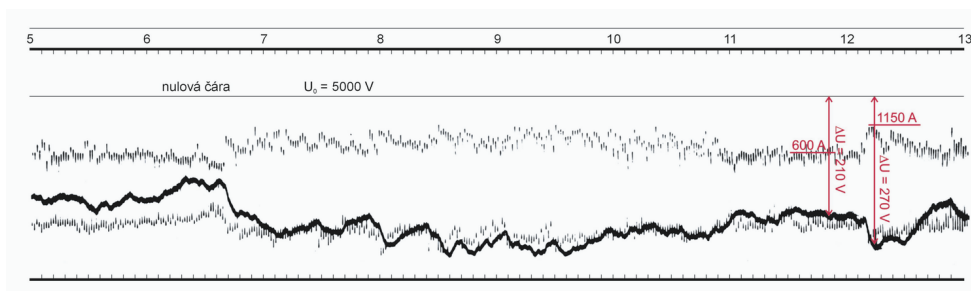
První typ změn proudového zatížení vzniká s četností 0,5krát až jednou za vteřinu a to především v prvních 30ti minutách tavby. Zkratový proud při zapálení oblouku mezi elektrodou a vsázkou je tak velký, jako ustálený střední proud pece. Pokud je vsázka studená, neustále se tento zkratový stav opakuje. Dále může

vzniknout zkratový proud nahodilým kontaktem kusu vsázky s elektrodou, například dodatečným sesutím vsázky.



Obr. 6.20: Oscilografické průběhy napětí a proudu- první typ změn

Druhý typ změn proudového zatížení se vyskytuje 2 až 20krát za vteřinu. Intenzita proudu přitom kolísá v rozsahu ± 15 až ± 50 % své jmenovité hodnoty.



Obr. 6.21: Oscilografické průběhy napětí a proudu – druhý typ změn

Zdá se, že tato kolísání proudu nepodléhají jednoznačné zákonitosti, protože se stále mění jak ve své amplitudě, tak i četnosti. Důsledkem těchto nepravidelných změn proudu je tedy kolísání napětí, které se projevuje v primárních obvodech elektrických obloukových pecí. Při výzkumech kolísání napětí v primárních obvodech vysokého napětí u elektrických obloukových ocelářských pecí byly sejmuty oscilograficky průběhy napětí a proudu při natavování 6ti tunové elektrické obloukové pece, napájené pecním transformátorem 5 MVA, 5 kV/nn (Obr. 6.20 a Obr. 6.21).

Záznam proudu byl sejmut proudovou smyčkou oscilografu 12LS-RFT-DDR z proudového měniče na primární straně pecního transformátoru. Jeho záznam s 50 Hz frekvencí je uveden ve střední části každého obrázku. Záznam napětí byl sejmut z napěťového měniče napěťovou smyčkou téhož oscilografu. Vstupní signál napětí byl upraven ve speciálním přístroji se Zenerovými diodami. Tento přístroj nám umožnil upravit napětí v měřeném obvodu pro záznam tak, že je možno sledovat přímo obalovou křivku napětí, jehož hodnoty se mění v přímé souvislosti se změnami proudu.

Na Obr. 6.20 je záznam proměnné hodnoty proudu (50 Hz) a záznam odpovídající proměnné hodnotě napětí (silná čára). Při vyšším proudovém zatížení se

zvýší úbytek napětí od nulové čáry. V případě vyznačeného proudu $I = 1200 \text{ A}$ činí tento úbytek napětí $U = 280 \text{ V}$. Změny v křivce napětí souvisejí zřejmě s uvedenými změnami prvního typu.

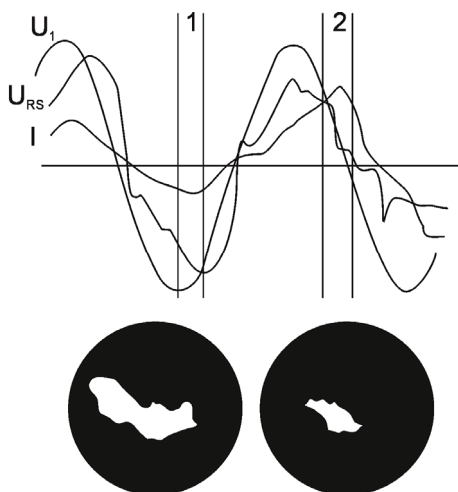
Na Obr. 6.21 je záznam proměnné hodnoty proudu (50 Hz) a záznam odpovídající proměnné hodnotě napětí (silná čára). V levé části záznamu je vidět menší proudové zatížení, které se skokem zvyšuje, takže v pravé části záznamu dochází při proudu $I = 1150 \text{ A}$ k úbytku napětí $U = 270 \text{ V}$. Změny v křivce napětí ve střední části obrázku souvisejí zřejmě se změnami druhého typu, které především působí rušivě na napájecí energetickou soustavu. Změny proudu tohoto druhu leží u pásma necitlivosti automatické regulace posuvu elektrod, takže jsou při tradičním vybavení automatické regulace elektrické obloukové pece nepostizitelné.

Příčiny vzniku druhého typu rušivých změn

Soubor rušivých účinků nepravidelně kolísajícího napětí, které má svoji podstatu zejména v proudových změnách druhého typu, nazýváme „flicker efektem“. Na základě výzkumu kolísání napětí v napájecí síti vn elektrických obloukových pecí je možno říci, že rušivý účinek kmitání napětí pozorovatelný při odchylkách 0,5 % jmenovité hodnoty napětí a četnosti výskytu 6 – 8 kmitů za sekundu. Tento rušivý účinek způsobuje blikání světla žárovkových svítidel, nepříznivě ovlivňuje rentgenová zařízení, televizi a počítače napájené z téže soustavy.

První příčina vzniku kolísání

Vychází z teorie oblouku – je zaznamenáván vliv rozdílné ionizace zóny elektrického oblouku. Z toho vyplývá, že intenzita proudu elektrického oblouku se náhle mění od jedné půlvlny ke druhé, aniž by byla změna délky elektrického oblouku na příslušných snímcích rozeznatelná (Obr. 6.22).



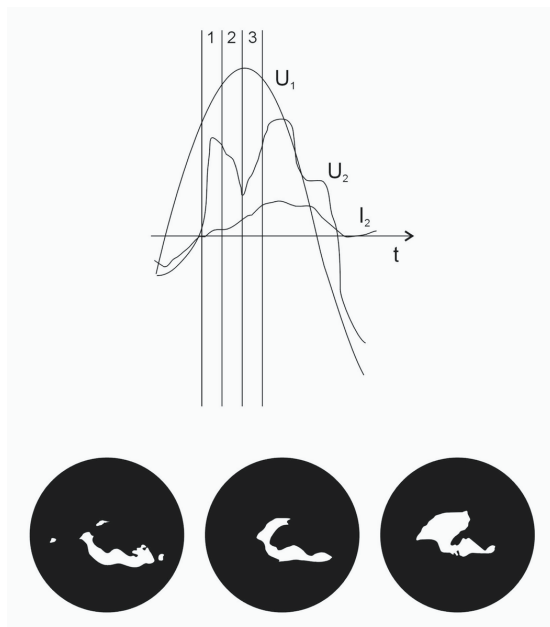
Obr. 6.22: Vliv rozdílné ionizace zóny elektrického oblouku

Přenos proudu v elektrickém oblouku se děje pomocí elektronů a iontů, které vznikají ionizací. Koncentrace těchto nositelů proudu ve sloupci elektrického oblouku podléhá změnám. Vsázka sestává z kusů nejrůznějšího metalurgického složení.

Elektrický oblouk hoří na kusu, který se náhodou nalézá pod grafitovou elektrodou. Vlivem vysokých teplot patního bodu tento kus zkapalní a částečně se vypaří. Jednotlivé součástky kusu mají různé body tavení a body varu, takže vždy podle nejbližší okolní teploty se jeden nebo druhý materiál vypaří. Silným místním přehříváním může toto vypařování přísady v oceli probíhat explozivně. Stoupající páry se vysokou teplotou obloukového sloupce ionizují a tím zvyšují koncentraci nositelů v elektrickém oblouku, který nyní může přenést vyšší proud. Vliv složení vsázky na podmínky ionizace elektrického oblouku se projevuje zvláště na počátku tavby a se stoupající teplotou kovu se zmenšuje.

Druhá příčina vzniku kolísání

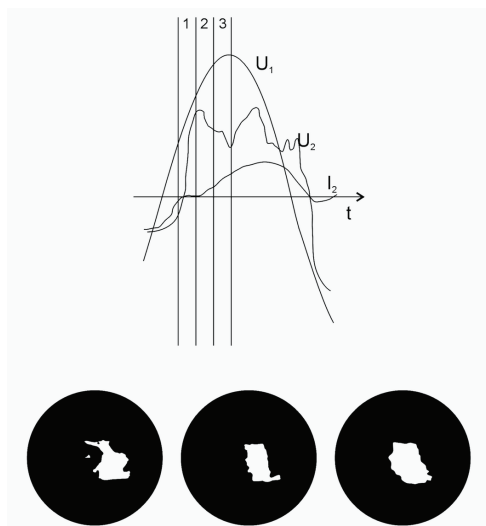
Je zjištění, plynoucí z filmových snímků, že elektrický oblouk v rozdílných časových úsecích přeskakuje od jednoho kusu vsázky ke druhému. Přitom oblouk hoří stále na vyčnívajících špičkách nebo hranách. Intenzita proudu elektrického oblouku se na synchronizovaném oscilografickém záznamu změnila vždy teprve tehdy, až elektrický oblouk přskočil na jiný kus. Zmenší-li se délka elektrického oblouku, zvyšuje se proud a naopak. Z měření vyplývá, že skoky elektrického oblouku z jednoho kusu vsázky na druhý se uskutečňují v odstupech pěti až maximálně dvaceti period, to znamená 0,1 až 0,4 sekundy. Přeskočení elektrického oblouku se uskuteční tehdy, když špička nebo hrana kusu vsázky se pod vlivem vysoké teploty elektrického oblouku zaoblí. Tyto procesy jsou znázorněny na Obr. 6.23 a Obr. 6.24.



Obr. 6.23: Přeskočky elektrického oblouku z jednotlivých kusů vsázky na druhé

Na Obr. 6.23 jsou patry z fotografického snímku přeskoky elektrického oblouku z jednotlivých kusů vsázky na druhé během jedné periody. Na Obr. 6.24 je již patrné, že špička kusu z Obr. 6.23 je již odtavena.

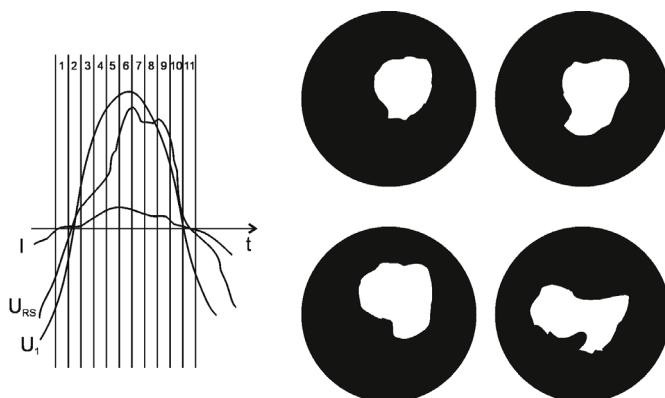
Tyto pohyby elektrického oblouku jsou hlavní příčinou kolísání proudu elektrického oblouku. Změny amplitudy proudu, vyvolané těmito zmíněnými vlivy, jsou svou frekvencí výskytu 2 až 10krát za vteřinu hlavní příčinou blikání světla (flicker effect).



Obr. 6.24: Vliv změny délky oblouku po zaoblení špiček vsázky

Třetí příčina vzniku kolísání

Třetí příčinou je smyčkový pohyb oblouku, při kterém se oblouk prodlužuje. Amplituda proudu se během tohoto pohybu zmenší. Fotograficky i oscilograficky je smyčkový pohyb elektrického oblouku znázorněn na Obr. 6.25.



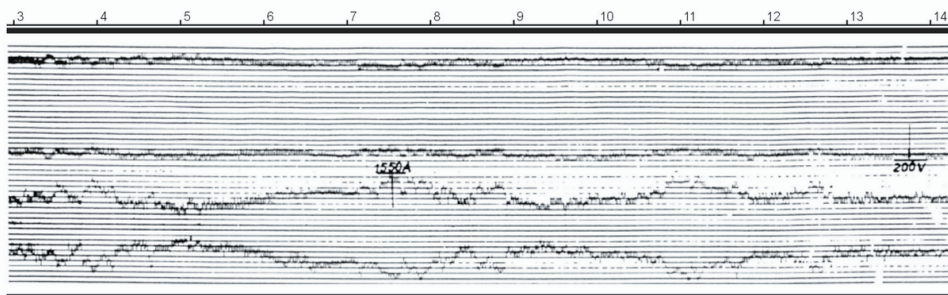
Obr. 6.25: Vliv smyčkového pohybu oblouku působením sil elektromagnetického pole

Na Obr. 6.25 je oscilografický snímek proudu elektrického oblouku I a napětí stejné fáze na primární a sekundární straně pecního transformátoru U_1 a U_2 a fotografické snímky elektrického oblouku zfilmované v úsecích 4, 6, 8 a 10. Vychýlení oblouku patrné z Obr. 6.25 je důsledkem zesíleného magnetického pole sousední fáze. Toto zesílené magnetické pole sousední fáze vzniká průtokem většího proudu nesymetricky zatížených elektrod. Každá elektroda pracuje samostatně podle okolností vyskytujících se v bezprostředním okolí hoření jejího oblouku. Hodnota proudu může při počátku natavování dosáhnout až zkratové hodnoty proudu, zatímco sousední elektroda pracuje se střední hodnotou proudu. Tento provozní stav trvá tak dlouho, až kus působící zkrat na elektrodě je opálen, nebo až regulace elektrodu zvedne. Všechny tři popsané vlivy kolísání proudu se libovolně překrývají (superponují) a vedou k takovému kolísání proudu, které co do velikosti amplitudy a četnosti nelze přesně definovat. Všechny popsané vlivy se nejsilněji projevují v počátku natavování a jsou tím slabší, čím je vsázka více natavena.

Vliv vyšších harmonických je patrný na Obr. 6.22 oscilografického záznamu proudu a napětí v sekundárním obvodu ocelářské pece. Křivky jsou deformovány především 3. a 5. harmonickou. Elektrická oblouková pec je velkým generátorem vyšších harmonických do napájecích elektrických sítí.

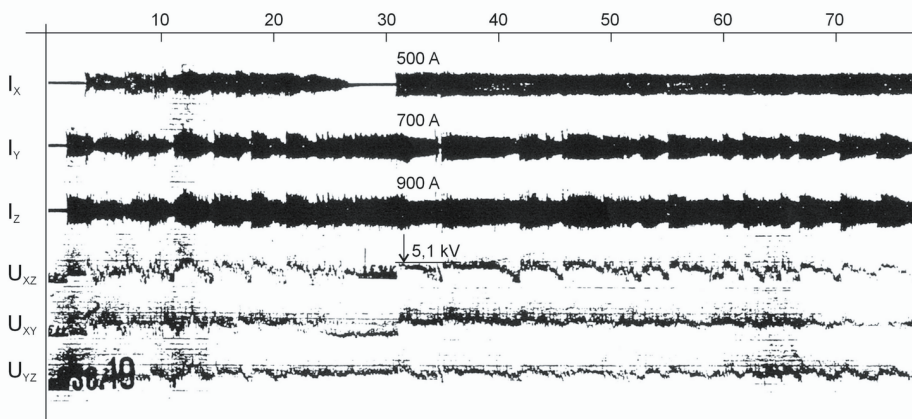
Kolísání napětí a proudová nesymetrie v primárních obvodech ocelářských obloukových pecí

Nepřavidelné kolísání proudu během natavování vsázky způsobuje na impedancích sítě poklesy napětí, které vedou ke kolísání napětí, jakožto zpětné reakci obloukové pece na napájecí síť (Obr. 6.26).



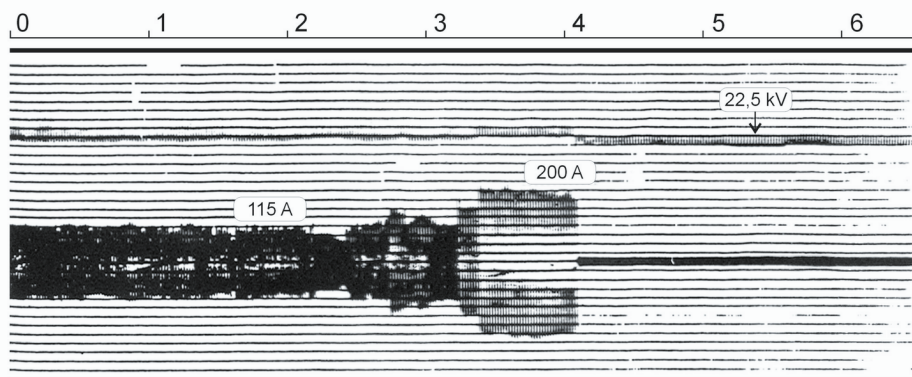
Obr. 6.26: Časová závislost proudu I a napětí U střední fáze nízkého napětí – sekundární strana 5 MVA pecního transformátoru

Takovéto kolísání napětí bylo oscilograficky sejmuto u elektrické obloukové ocelářské pece ve Vítkovicích v Ostravě. Kolísání napětí v obvodech vysokého napětí je na Obr. 6.27.



Obr. 6.27: Časová závislost proudů a napětí na třech fázích měřených na sekundární straně transformátoru 10 MVA, 22/5 kV

V horní části vidíme záznam nesymetricky kolísajícího proudu všech tří obvodů obloukové pece na primární straně pecního transformátoru 5 MVA, 5/0,4 kV. Ve spodní části obrázku je záznam příslušných napětí vn, která kolísají v rytmu proudových nárazů na napájecí síť. Při zkratu elektrody se vsázkou dochází k vypnutí výkonovým vypínačem (Obr. 6.28).



Obr. 6.28: Časová závislost proudu I a napětí U živé fáze na primární straně (22 kV) 40 MVA pecního transformátoru. Vypínač vypíná při překročení maximálního proudu

Nesymetrické zatížení jednotlivých obvodů v elektrické obloukové ocelářské peci má svůj původ především v častých zkratech elektrody a vsázky a v nestabilním hoření oblouku vlivem různých ovlivňujících faktorů. Tato nesymetrie se přenáší i do napájecí energetické soustavy. U sledované elektrické obloukové ocelářské pece byla změřena proudová nesymetrie v napájecí rozvodně na přípojnicích 5 kV. Měření bylo prováděno při odděleném napájení samotné elektrické obloukové pece. Nesymetrie byla zjišťována metodou souměrných složek (sousedné a

zpětné), které byly snímány pomocí filtrů souměrných složek a v průběhu natavování zapisovány registračními přístroji. Průběh natavování byl prováděn proudovými nárazy o četnosti asi 15 až 20 rázů za minutu. Při vyhodnocení byla planimetricky zjištěna hodnota sousledné a zpětné složky proudu (I_1 a I_2) a z nich hodnota průměrné nesymetrie v příslušném intervalu dle vztahu:

$$\rho = \frac{I_1}{I_2} \cdot 100 \quad (6.57)$$

Kolem této střední hodnoty kolísala nesymetrie v rytmu proudových nárazů. Proto byla planimetricky zjištěna v příslušných intervalech rovněž průměrná šířka pásma výkmitu ρ_i (%). Ze záznamu bylo vyhodnoceno šest asi 15ti minutových intervalů. Vyhodnocením měření sousledné a zpětné složky byla vyhodnocena průměrná nesymetrie $\rho = 45,6$ %. Z uvedeného rozboru lze usoudit, že elektrické obloukové pece působí rušivě na napájecí soustavu nepravidelně proměnlivým kolísáním napětí, velkou proudovou nesymetrií a z hlediska energetiky špatným účinníkem $\cos\varphi = 0,7$. [8]

Možnosti snížení rušivých účinků elektrických obloukových pecí na napájecí síť vn

Omezení zkratových a velkých proudů. Protože nejvyšší úbytky vznikají při největších proudech, je snahou omezit právě tyto špičky. Toho se dosahuje zapojením tlumivky do série s pecním transformátorem. Z důvodu stability střídavého oblouku je nutné připojení indukčnosti. Ke zkratovým a velkým proudům dochází především při natavování vsázky. Po natavení vsázky se předřazená tlumivka vyřadí. Je rovněž možné provést tlumivku jako několikastupňovou.

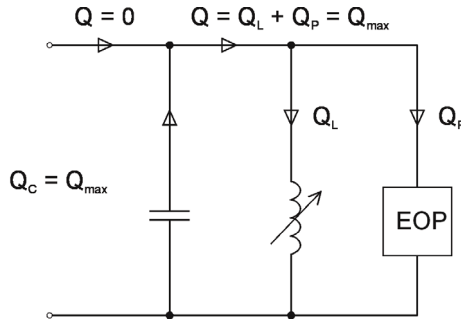
Zvětšení zkratového výkonu v místě připojení. Zkratový výkon je veličina primárního významu pro velikost kolísání napětí v síti. Pro stávající elektrické obloukové pece lze podle výkonu pecního transformátoru zjistit požadovanou velikost zkratového výkonu v místě připojení a síť dle toho upravit. Zvýšení zkratového výkonu v místě připojení se provádí:

- Zesílením sítě, což znamená zdvojení přívodů, zvětšení transformátoru, dále připojení nového generátoru a podobné úpravy; toto řešení je sice nákladné, ale v dnešní době se přesto používá, především proto, že stávající obloukové pece byly většinou dodatečně připojovány na stávající přívody, které je v dnešní době stejně nutno rekonstruovat, protože již nevyhovují
- Připojením synchronního kompenzátoru do vhodného místa sítě
- Sériovou kompenzací
- Paralelní kompenzací

Nepřímá kompenzace

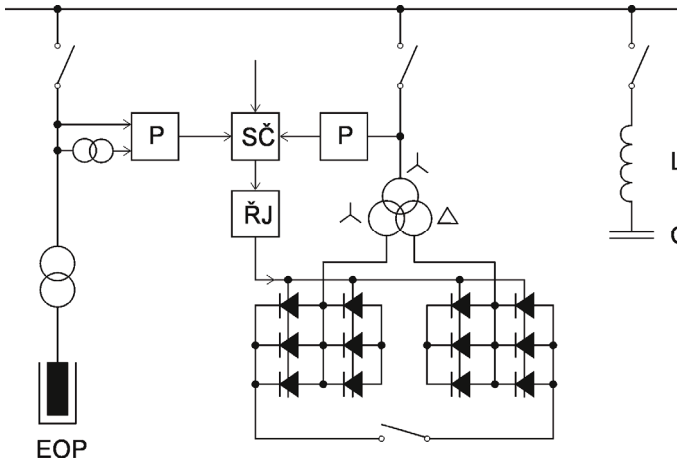
Tento způsob kompenzace udržuje odběr jalové energie konstantní na maximální hodnotě. Nedochozí sice ke kolísání napětí, ale účinník je trvale velmi špatný,

proto se připojuje paralelně statický kondenzátor takové hodnoty, aby vykompenzoval celý jalový příkon.



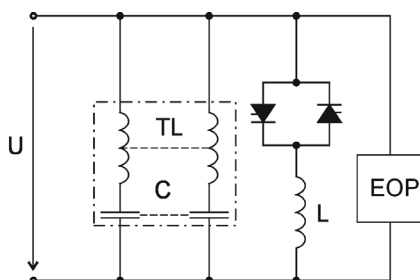
Obr. 6.29: Schéma zapojení nepřímé kompenzace

Pro nepřímou kompenzaci se nabízí možnost využít řízený statický usměrňovač jako spotřebič proměnného induktivního výkonu (Obr. 6.30). Funkce spočívá v tom, že součet spotřeby pece a usměrňovače je konstantní a tento je kompenzován statickým kondenzátorem. Toto zařízení bylo teoreticky propracováno a odzkoušeno na modelu. Z konstrukčního hlediska je tento kompenzátor jednoduchý a představuje zřejmě nejehospodárnější provedení, které vyhovuje svými dynamickými vlastnostmi.



Obr. 6.30: Schéma kompenzačního zařízení s řízeným statickým usměrňovačem

Kromě společných nevýhod všech zařízení pracujících na principu nepřímé kompenzace vyznačuje se tato koncepce tím, že proud odebraný ze sítě má dvánáctipulzní průběh, čímž se usměrňovač stává zřídlem harmonických. Dále je třeba poznamenat, že i tato koncepce kompenzuje pouze souslednou složku. Jako další možnost se jeví použití pouze jedné tlumivky řízené tyristory pro každou fázi, jejíž proud základní harmonické je měněn antiparalelně zapojenými tyristory (Obr. 6.31).

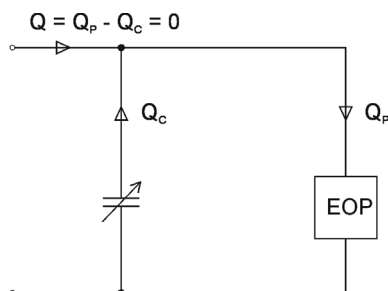


Obr. 6.31: Schéma kompenzačního zařízení s antiparalelně zapojenými tyristory

Toto zapojení je zdrojem vyšších harmonických. Proto je účelné paralelně připojenou kondenzátorovou baterii rozdělit na několik částí a každou část kondenzátorové baterie doplnit sériovou tlumivkou na rezonanční obvod, naladěný na některou z harmonických, které vznikají a takto je odfiltrovat.

Přímá kompenzace

Přímou kompenzací, jak je naznačeno na Obr. 6.32, je možno měnit výrobu induktivní energie v kompenzátoru v synchronismu se spotřebou elektrické oboukové pece. V podstatě jde o paralelní kompenzaci.

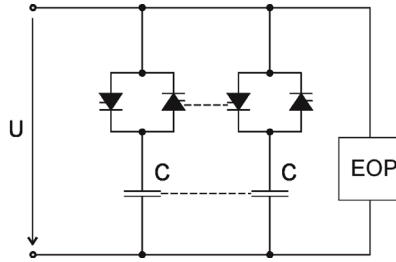


Obr. 6.32: Schéma zapojení přímé kompenzace

Připojení pevné kondenzátorové baterie není vhodné, protože v době, kdy výkon obloukové pece klesne pod instalovanou velikost baterie, by pec pracovala s kompenzátoem jako celkem s kapacitním účinníkem, což není žádoucí. Lze tedy pevnou kondenzátorovou baterii použít pouze ke kompenzaci proudu naprázdno pecního transformátoru, případně ke kompenzaci tzv. stálé složky spotřeby Q_c . Jako nejdokonalejší se jeví tyristory spínané kondenzátorové baterie (Obr. 6.33). Tento přímý způsob stupňovité kompenzace byl znám již dávno. Byl však problém s realizací spínače, který by vyhovoval jednak svou rychlostí a zároveň i trvanlivostí při spínaných výkonech.

Vhodným spínacím elementem je dvojice antiparalelně zapojených tyristorů. Takové zařízení nemá žádné pohyblivé části a proto i vysokou životnost. Při vhodně zvoleném spínacím režimu nedochází ke vzniku harmonických. Zařízení má zcela tichý chod a nevyžaduje prakticky údržbu. Zařízení je možno realizovat jednak jako symetrické nebo i pro kompenzaci nesouměrného zatížení. Dopravní

zpoždění dosahuje maximálně 10 ms, podobně jako u některých předchozích zařízení. [8]



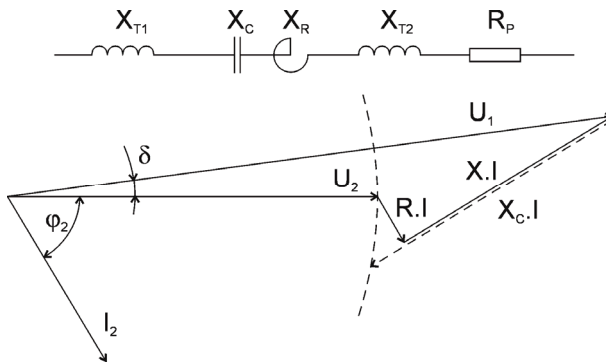
Obr. 6.33: Schéma zapojení přímé kompenzace s thyristory spínané kondenzátorové baterie

Sérioparalelní kompenzace elektrické obloukové pece

Sériová kompenzace řeší zejména zvýšení a stabilizaci napětí v síti, zatímco paralelní kompenzaci dosáhneme zlepšení účinníku omezením zdánlivého proudu o příslušnou složku jalového proudu, dodaného kondenzátorovou baterií přímo na místě spotřeby.

U elektrických obloukových pecí dochází jak ke kolísavým poklesům napětí v napájecí síti, tak i ke značné spotřebě jalové energie v zařízeních nutných pro provoz obloukových pecí (tlumivky, transformátory apod.). Již z tohoto důvodu je opodstatněno zařazení kombinované, sérioparalelní kompenzace. Je zde však ještě další důvod ke vzájemnému spolupůsobení.

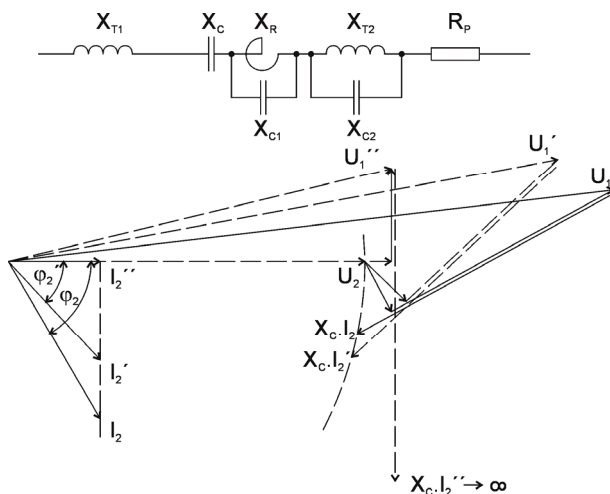
Na Obr. 6.34 je nakreslen vektorový diagram napětí a proudu při provozu elektrické obloukové pece.



Obr. 6.34: Vektorový diagram napětí a proudu při provozu elektrické obloukové pece

Čárkovaně je vyneseno vektor napětí $X_c \cdot I$, tedy velikost napětí, které by bylo nutno vykompenzovat sériově zařazeným kondenzátorem, aby byla splněna podmínka $\Delta U = 0$.

Jestliže zařadíme do obvodu znázorněného na Obr. 6.34 v horní části paralelní kondenzátor C_1 , kompenzující spotřebu jalové energie tlumivky X_R , pak vektorový diagram napětí a proudů dozná těchto změn (Obr. 6.35).



Obr. 6.35: Vektorový diagram serio-paralelní kompenzace při provozu elektrické obloukové pece

Zdánlivý proud I_2 zmenší svoji hodnotu na I_2' a rovněž úhel φ_2 se zmenší na φ_2' . Vektorový diagram úbytků napětí, odpovídající činnému odporu pecního obvodu a jeho reaktanci, je znázorněn plnou čarou (Obr. 6.35). Dochází tedy proti původnímu stavu při proudu I_2 k natočení vektorového obrazce úbytků napětí a ke zmenšení obou složek úbytků napětí. Přesto však vektor $X_C \cdot I_2'$ odpovídající velikost přídavného napětí na sériovém kondenzátoru, je větší než v předchozím případě (Obr. 6.34), máme-li na mysli zachování podmínky $\Delta U = 0$. Tento jev je způsoben zmenšením úhlu φ_2 a celkovým natočením vektorového obrazce úbytků napětí. Takže vektor $X_C \cdot I_2'$ protíná kružnici, vyznačující geometrické místo bodů o velikosti napětí U_2 ve vzdálenějším bodě.

Jestliže teoreticky vykompenzujeme účinník pecního obvodu až na $\cos\varphi = 0$, pak při nulovém úhlu bude vektor reaktančního úbytku napětí kolmý k vektoru napětí U_2 . Obě složky reaktančního napětí i činného úbytku napětí ΔU budou mít v tomto případě nejmenší hodnotu. Přesto však vektor $X_C \cdot I_2''$ neprotíná kružnici označující geometrické místo bodů o napětí U_2 a tedy konverguje k nekonečnu.

$$X_c \cdot I_2'' \rightarrow \infty \quad (6.58)$$

V případě, kdy $\varphi_2'' = 0$, není možno splnit podmínku $\Delta U = 0$. Lze tedy konstatovat, že činná složka úbytku napětí podstatně ovlivňuje svojí hodnotou velikost kompenzačního výkonu sériového kondenzátoru stejně tak, jako úhel φ_2 mezi proudem a napětím pecního obvodu. Můžeme tedy napomáhat celkovému efektu sériové kompenzace napětí paralelní kompenzací účinníku jen za toho předpokladu, že činná složka úbytku napětí je mnohem menší než složka reaktančního úbytku

napětí. Potom stačí vykompenzovat reaktanční úbytek napětí podle zvoleného stupně kompenzace a malý činný úbytek napětí ponecháme nevykompenzován.

Při velmi malém činném úbytku napětí kompenzované sítě s elektrickými obloukovými pecemi je současná paralelní kompenzace účinníku velmi výhodná a poskytuje značné velké nákladů na kompenzační výkon sériových kondenzátorů.

Závěrem lze tedy říci, že sériová kompenzace je tím účinnější, čím je větší úhel mezi vektory napětí a proudu, tedy horší účinník. [11]

Odpojovač

Slouží pouze k odpojení celého elektrického zařízení obloukové pece od proudů vysokého napětí při opravách nebo revizi zařízení. Jinak nemá přímý vliv na elektrické obloukové pece, a proto se jím dále nebudeme podrobněji zabývat.

Vysokonapětový výkonový vypínač

Úkolem vysokonapětového vypínače je spínat a rozpojovat silový obvod na počátku a konci tavby, během tavby, při nebezpečném přetížení transformátoru a v havarijních případech. Výkonové vypínače jsou vysoce namáhány. Často se jimi provádí 60 až 70 sepnutí během 24 hodin. Na jejich plynulé a bezporuchové práci závisí funkce celého elektrického zařízení pece. Tak např. nevypnutí déle trvajícího zkratu mezi elektrodou a taveninou může mít za následek vážné poškození nebo i zničení elektrického zařízení vlivem účinků zkratových proudů. Nejčastěji používanými typy jsou tlakovzdušné vakuové SF₆ vypínače.

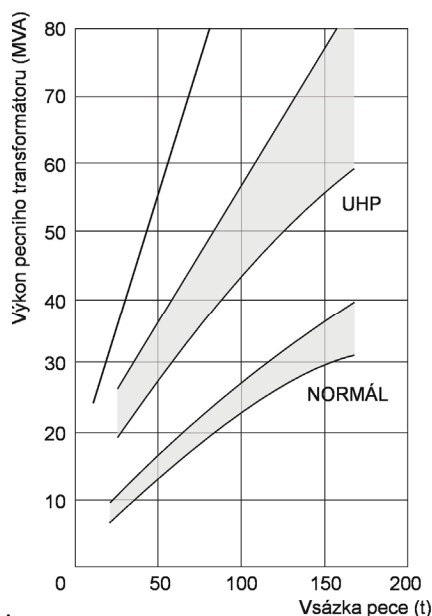
Pecní transformátory a tlumivky

Výkonem pecního transformátoru je omezen příkon tepla do pece a tím i výkon pece. Projevuje se to zejména v etapě natavování vsázky, kdy doba trvání tohoto procesu závisí především na množství dodaného tepla. Volba výkonu pecního transformátoru se provádí podle velikostí vsázky pece a zvoleného provozního režimu (Obr. 6.36).

Pecní transformátory u elektrických obloukových pecí se značně liší od normálních silových transformátorů, jelikož pracují se značně proměnlivým zatížením při častých zkratech. Specifickým rysem je poměrně nízké sekundární napětí a vysoký sekundární proud. Poněvadž požadavky na množství energie přiváděné do pece v průběhu tavby se značně mění, musí umožňovat transformátor regulaci sekundárního napětí v širokých mezích.

Regulace napětí na sekundární straně by byla velmi obtížná pro vysoké hodnoty sekundárních proudů (10 až 60 kA) u běžných pecí středního výkonu. Proto se provádí změnou počtu závitů primárního vinutí. Přepínání primárního vinutí v zapojení z trojúhelníka do hvězdy je umožněno zdvojnásobení počtu napětíových stupňů. U většiny našich stávajících obloukových pecí se používají transformátory s přepínáním napětíových stupňů při vypnutém výkonovém vypínači, modernější také pod zatížením.

Zvolený režim tavení s velmi vysokou produktivitou (UHP) se vyznačuje krátkým obloukem. Poměr výkonů pecních transformátorů pro režim UHP a normální režim je 2,1 až 2,4 (Obr. 6.36.)



Obr. 6.36: Poměr výkonů pecních transformátorů pro režim UHP a normální režim

Tlumivky

Tlumivky, které jsou zapojeny v napájecí síti mezi výkonovým vypínačem a pecním transformátorem, mají za úkol omezit hodnotu zkratových proudů při dotyku elektrod s taveninou. Nacházejí se ve společné nádobě s transformátorem a mohou mít několik stupňů reaktance. Tlumivka bývá obvykle zařazena při spojení primáru transformátoru do trojúhelníka, tedy při vyšších stupních napětí. Při přepnutí do hvězdy pak dojde k vyřazení tlumivky. Ideální stav by byl v případě plynu- lého ovládnání reaktance tlumivky.

Zápornou stránkou tlumivek u elektrických obloukových pecí je zhoršení celkové účinnosti elektrických obloukových pecí. S nižším stupněm reaktance nebo s úplně vyřazenou tlumivkou se pracuje zejména v druhé části natavování, tj. v údobí, kdy oblouk je kratší, stabilnější a kdy zkraty jsou méně časté. Práce s nižší reaktancí tlumivky umožňuje zvýšit výkon elektrického oblouku, a tím urychlit natavení při současném snížení spotřeby energie. K tomu je ovšem nutné, aby bylo možno ovládat jak přepínání stupňů reaktance tlumivky, tak i její úplné vyřazení.

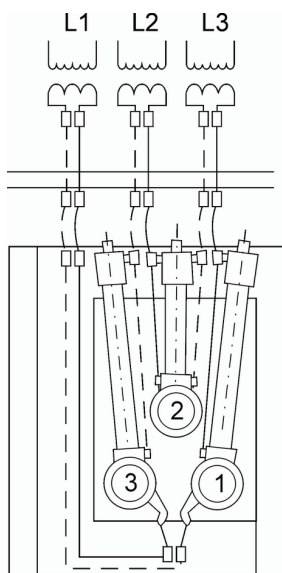
Krátká cesta

Krátkou cestou nazýváme elektrické vedení od vývodů sekundárního vinutí pecního transformátoru do pracovního prostoru pece. Konstrukce krátké cesty se mohou svým provedením u jednotlivých pecí lišit. Vždy však můžeme rozdělit tuto krátkou cestu na následující části:

- pásovou část
- ohebná lana
- vodiče ramen držáků elektrod
- držáky elektrod
- elektrody a spojky

Krátkou cestou protékají velké proudy, takže i když odpory v krátké cestě jsou nepatrné, řádově $10^{-3} \Omega$, jsou ztráty ve vedení značné. Při proudu 10^4 A činí úbytek napětí na odporu $10^{-3} \Omega$ 10 V. Za jednu hodinu tak ztrácíme 100 kWh energie. Ještě výraznější vliv na úbytek napětí má reaktance krátké cesty. Ta sice nezpůsobuje bezprostředně ztrátu energie, avšak snižuje podstatně napětí na samotném elektrickém oblouku a tím snižuje i výkon přiváděný do pracovního prostoru pece.

Na reaktanci jednotlivých fází má vliv nejen délka jejich vodičů, ale i jejich vzájemná poloha a poloha okolních ocelových konstrukcí hal a jeřábů. Nerovnoměrné rozdělení výkonů v jednotlivých fázích má nepříznivý vliv na práci pece a životnost vyzdívky. Nejvýhodnějším opatřením pro zmenšení nesymetrie je provedení bifilárního vedení krátké cesty (Obr. 6.37).



Obr. 6.37: Bifilární provedení krátké cesty

Podmínkou provedení bifilárního spojení jsou vhodné vývody sekundárního vinutí pecního transformátoru dosažitelné mimo vlastní transformátor. Dokonalé vyrovnání indukčnosti lze provést však jen při bifilárním spojení až po elektrody a při spojení vývodů sekundárního vinutí transformátoru až na elektrodách. Tato zapojení naznačuje Obr. 6.37.

V menších rudnotermických a ocelářských pecích asi do výkonu 15 MVA je krátká cesta provedena pásovinou s přívodem ohebnými lany v paralelním svazkovém uspořádání.

Pro větší obloukové pece se provádí krátká cesta z měděných trubek, chlazených průtokem vody.

Elektrody

Elektrody, uzavírající část elektrického zařízení, jsou velmi důležitým článkem elektrických obvodů elektrických obloukových pecí. Tepelné ztráty v elektrodách, jakož i cena spotřebovaných elektrod, tvoří značnou část provozních nákladů.

Hlavní požadavky na elektrody jsou:

- Dobrá elektrická vodivost
- Vysoká mechanická pevnost
- Vysoká oxidační teplota
- Malý obsah popele a síry

K obloukovému ohřevu se prakticky používají tři druhy elektrod:

- Elektrody uhlíkové
- Elektrody grafitové
- Elektrody násypné (Söderbergovy)

Uhlíkové elektrody se vyrábějí ze směsi antracitu, koksu, přírodního grafitu a pryskyřice vypalováním při 1200 °C – 1300 °C.

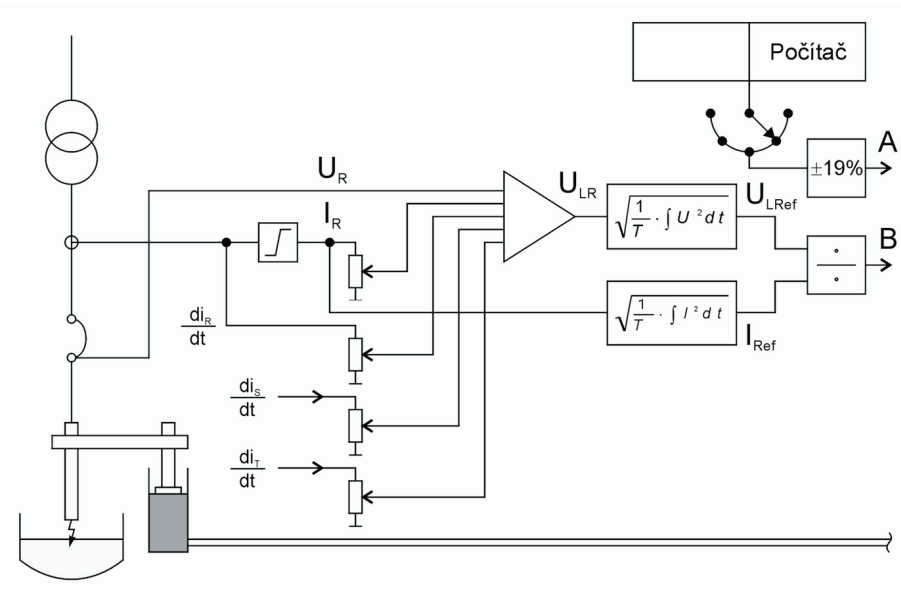
6.8. Řízení obloukových pecí počítačem

Řídící počítače pronikají stále intenzivněji do nerůznějších oblastí technické praxe. S postupným zdokonalováním vlastností počítačů se vyvíjí i způsob jejich využívání. V posledním desetiletí se začínají uplatňovat počítače stále více i k přímému řízení výrobních pochodů. To je umožněno využitím techniky integrovaných obvodů, vývojem dokonalejších periférií počítače pro styk s vnějším prostředím a zdokonalováním logické struktury počítačů. Počítač, který má potřebné vlastnosti k přímému řízení výrobních pochodů v reálném čase, nazýváme **řídící počítač**. Podstata stanovení optimálního režimu práce obloukové pece spočívá v tom, že pro různé kombinace napěťových stupňů a proudu oblouků se propočte chování řízené soustavy v následujícím časovém intervalu a vyčíslí se očekávaná hodnota kritériální funkce. Režim, u kterého se nalezne minimum této funkce, je pak zadán jako optimální.

V řídícím počítači budeme počítat aktuální induktivní a rezistanční změny proudu a napětí. Tyto se odečtou od změřené hodnoty napětí U_{OR} , U_{OS} a U_{OT} na transformátoru a dostaneme aktuální napětí oblouku. Napětí na oblouku je dáno rovnicemi (6.59). [8]

$$\begin{aligned}U_{LR} &= U_{OR} - U_{XR} - U_{RR} \\U_{LS} &= U_{OS} - U_{XS} - U_{RS} \\U_{LT} &= U_{OT} - U_{XT} - U_{RT}\end{aligned}\tag{6.59}$$

Metoda BBC s mikroprocesorem



Obr. 6.38: Schéma řízení obloukové pece počítačem

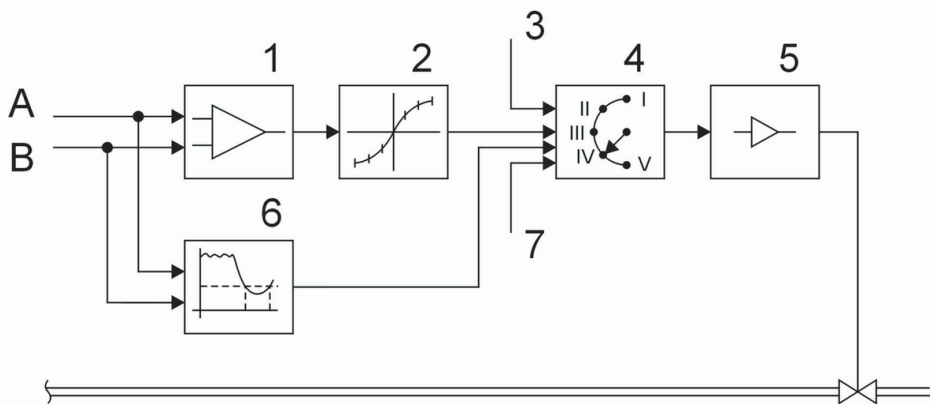
Induktivní úbytky napětí:

$$\begin{aligned}
 U_{XR} &= -\frac{di_R}{dt} \cdot \frac{A+C}{2} + \frac{di_S}{dt} \cdot \left(A - \frac{B}{2}\right) + \frac{di_T}{dt} \cdot \left(C - \frac{B}{2}\right) \\
 U_{XS} &= \frac{di_R}{dt} \cdot \left(A - \frac{C}{2}\right) - \frac{di_S}{dt} \cdot \frac{A+B}{2} + \frac{di_T}{dt} \cdot \left(B - \frac{C}{2}\right) \\
 U_{XT} &= \frac{di_R}{dt} \cdot \left(C - \frac{A}{2}\right) + \frac{di_S}{dt} \cdot \left(B - \frac{A}{2}\right) - \frac{di_T}{dt} \cdot \frac{C+B}{2}
 \end{aligned} \tag{6.60}$$

Konstanty A, B a C závisí na geometrickém uspořádání elektrovedné cesty proudů. Rezistanční úbytky napětí:

$$\begin{aligned}
 U_{RR} &= i_R \cdot R_R \\
 U_{RS} &= i_S \cdot R_S \\
 U_{RT} &= i_T \cdot R_T
 \end{aligned} \tag{6.61}$$

Konstanty R_R , R_S , R_T , jakož i A, B a C, jsou nastaveny pro danou pec pevně na digitálním potenciometru. Impedanční regulátor elektrod je tak řízen pomocí aktuálního napětí na oblouku.



Obr. 6.39: Regulační obvod

Legenda k Obr. 6.39:

1- Regulátor provádí korekce v nastavení proudu nebo změnu v napěťovém stupni mezi aktuálním stavem v peci a zadaným režimem v bloku 2; přípouští toleranci $\pm 19\%$ proudu / oproti jmenovitému; 2- Funkce zobrazující optimální zadaný provozní režim; 3- Ruční regulace; 4- Logika priorit (Manuální řízení 3 elektrod, Manuální řízení 1 elektrody, Automatický pohyb při zkratu, Zpomalení pohybu elektrod, Automatická regulace); 5- Výstupní zesilovač; 6- Logika krátkého spojení; 7- Zajištění při zlomení elektrody.

6.9. Automatická regulace polohy elektrod

Automatická regulace polohy elektrod je důležitou částí elektrického zařízení elektrických obloukových pecí, neboť podstatně ovlivňuje jejich chod a hodnoty technickoekonomických ukazatelů. Úkolem automatické regulace polohy elektrod je zachovávat po určitou dobu konstantní množství energie přiváděné do pracovního prostoru pece nezávisle na neustále se měnících podmínkách.

Na regulátoru požadujeme především dostatečnou rychlost regulace, aby byl co nejdříve nastaven po výchylce znovu optimální stav. Jelikož však prakticky nemáme regulátor s okamžitou odezvou, vzhledem k setrvačnosti hmot zvedaných částí a zpoždění v samotném systému regulátoru, musíme počítat s určitou dobou odezvy, tj. dobou, která uplyne od vydání povelu k novému nastavení v okamžiku, kdy elektroda skutečně zaujme novou polohu.

V této době může však v peci nastat již zase nový stav vzhledem k velmi rychlým změnám při hoření oblouku. Jsou to především změny při přeskokování paty oblouku z jednotlivých kusů vsázky na druhé vlivem hoření oblouku na špičkách a hranách, dále vlivem rozdílné ionizace zóny hoření oblouku a smyčkovým pohybem oblouku při změnách proudového zatížení v sousedních obvodech. Na změny tohoto charakteru není schopna automatická regulace polohy elektrod reagovat okamžitě. Pracuje tedy v určitém pásmu necitlivosti. Reaguje pouze na změny

proudu a napětí, které leží mimo toto pásmo. Necitlivost je vymezená oblast, uvnitř které změna regulované veličiny nevyvolává změnu polohy elektrody.

Pro regulátory elektrických obloukových pecí se necitlivost obvykle vztahuje ke změnám intenzity proudu a vyjadřuje se v procentech podle výrazu:

$$h = \frac{I_n - I_d}{I_n + I_d} \cdot 100 \quad (6.62)$$

kde I_d je intenzita proudu, při které se elektroda začne pohybovat dolů; I_n je totéž pro pohyb nahoru.

Zmenšením pásma necitlivosti by mohlo dojít ke snížení stability regulace. Proto, zvláště v době natavování vsázky, jsme nuceni v zájmu zvýšení stability pracovat s větší necitlivostí regulátoru.

Nejrozšířenějším systémem regulace je proudovo-napěťová, nebo také diferenciální regulace, při níž se regulátor snaží udržet nastavený poměr napětí a proudu konstantní. Výhodou proudovo-napěťové regulace je schopnost zapálit samočinně oblouk a dále, že narušení regulované veličiny v jedné fázi nepůsobí na regulátory ostatních fází. [10]

6.10. Tavicí obloukové pece na ocel

Ocelářské obloukové pece mají vanu vyzděnou zásaditou vyzdívkou. Obsah vsázky činí až 100 tun oceli. Elektrické příkony dosahují desítek MW. Optimální provozní režim elektrických obloukových ocelářských pecí závisí na celé řadě technologických faktorů, konstrukci pece, jakosti elektrod, složení vyzdívky, atd.

Hlavním ovlivňujícím faktorem je však správně zvolený elektrický režim pece. Regulací tohoto režimu je možno provádět buď změnou napětí přiváděného na elektrody pece a nebo změnou délky oblouku - tedy proudu.

První způsob se používá běžně při jednotlivých etapách tavby v elektrické obloukové peci a má přímou návaznost na metalurgický proces.

Druhý způsob je vymezen činností automatické regulace pohybu elektrod, která v daném napěťovém stupni udržuje konstantní, optimální příkon elektrické energie do taveniny.

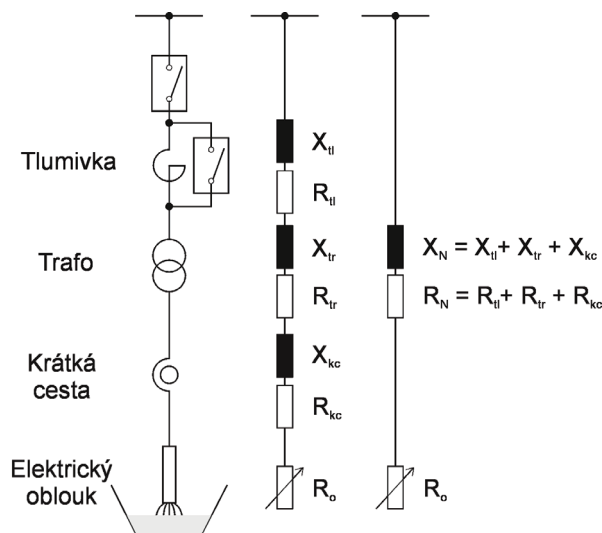
Pracovní charakteristiky

Pro správné pochopení optimálního chodu elektrické obloukové pece se seznámíme se závislostí hlavních elektrických veličin pecních obvodů, tj. výkonu, účinníku, účinnosti, na nezávisle proměnném proudu.

Elektrické charakteristiky elektrické obloukové pece lze stanovovat buď výpočtem nebo graficky pomocí kruhového diagramu elektrické obloukové pece, případně měřením na konkrétních zařízeních elektrických obloukových pecí.

Vyjáďřeme si silový obvod elektrického zařízení elektrické obloukové pece jednoduchým náhradním schématem podle Obr. 6.40. Jednofázově jsou v sérii zapojeny jednotlivé prvky elektrického zařízení elektrické pece. Postupným zjed-

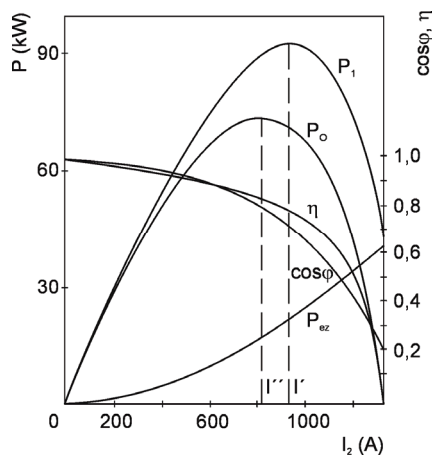
nodušením dostáváme transformované náhradní schéma pro odpory R_N , X_N , R_o , vycházíme tak samozřejmě z určitých zjednodušení, která v praxi nelze opominout



Obr. 6.40: Náhradní schéma elektrického zařízení obloukové pece

Napětí sítě je symetrické a nezávislé na zatížení. Impedance jednotlivých fází (vyjma odporu elektrického oblouku) jsou stejné a nezávislé na proudu. Odpor elektrického oblouku je lineární. Proud transformátoru při chodu naprázdno je nulový. Hodnoty náhradních odporů X_N a R_N se zpravidla zjišťují při měření nakrátko.

Vlastní elektrické charakteristiky je pak možno sestavit pomocí kruhových diagramů. Příklad teoretických charakteristik je na Obr. 6.41



Obr. 6.41: Teoretické pracovní charakteristiky

Na charakteristikách je možno vyznačit proud odpovídající maximálnímu primárnímu výkonu I' i maximální proud na oblouku I'' . Tento proud je někdy mylně

považován za optimální proud odpovídající největší rychlosti tavení. Avšak určovat optimální hodnotu proudu pouze podle teoretických charakteristik představuje velmi zúžený přístup.

Především uvedené zjednodušující předpoklady nelze v praxi akceptovat. Dále je nutno uvažovat také tepelné ztráty (zvláště ke konci tavení), které jsou větší než ztráty elektrické a ovlivňují tak rychlost tavení a měrnou spotřebu elektrické energie. Tyto tepelné ztráty lze pokládat za konstantní a v podstatě nezávislé na elektrických veličinách. Výkon kompenzující tyto tepelné ztráty se odečítá od výkonu elektrického oblouku. Užitečný výkon se tedy rovná:

$$P_{už} = P_1 - P_{ez} - P_{tz} \quad (6.63)$$

kde P_{tz} je výkon kompenzující tepelné ztráty; P_{ez} je kompenzující elektrické ztráty.

Energetickou účinnost tavení lze vyjádřit vztahem:

$$\eta_{en} = \frac{P_{už}}{P_1} \cdot 100 \quad (6.64)$$

Měrná spotřeba elektrické energie w bude rovna:

$$w = \frac{W_{už}}{\eta_{en}} \quad (6.65)$$

kde $W_{už}$ je energie spotřebovaná na roztavení jedné tuny bez uvažování ztrát.

Vztah pro rychlost tavení je dán poměrem celkového užitečného výkonu spotřebovaného pouze k roztavení vsázky k příkonu užitečné energie:

$$G = \frac{P_{už}}{W_{už}} \quad (6.66)$$

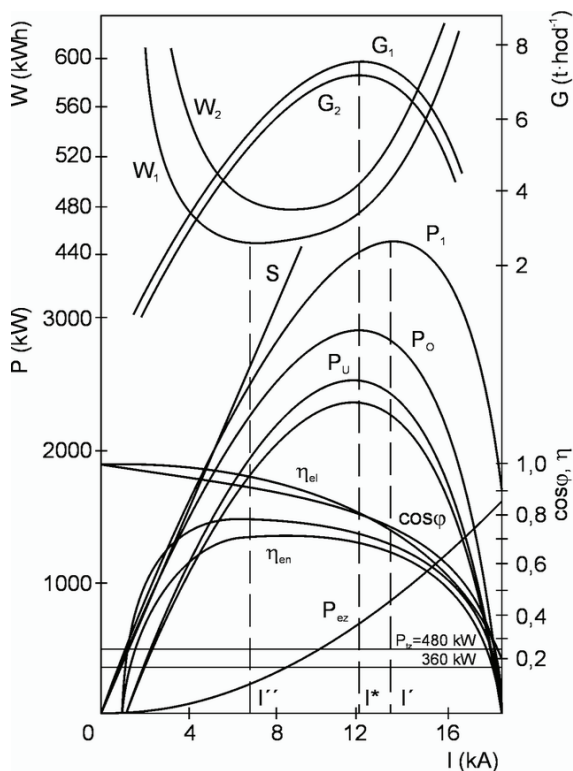
Vidíme tedy, že uvažování vlivu tepelných ztrát dovoluje vyjádřit energetickou účinnost, měrnou spotřebu energie a rychlost tavení jako funkci proudu. Na Obr. 6.42 jsou pracovní charakteristiky 10-ti tunové elektrické obloukové pece pro stupeň napětí 220 V.

Z grafu lze zjistit hodnotu proudu I'' , které odpovídá maximální energetická účinnost η_{en} a minimální měrná spotřeba energie w_1 , w_2 . Přitom platí, že $I'' < I^*$. To znamená, že režim minimální spotřeby se dosahuje při nižším příkonu než režim maximální rychlosti tavení.

Je možno tedy říci, že uvedenými charakteristickými hodnotami proudů I'' a I^* je pro daný napěťový stupeň a pro danou hodnotu tepelných ztrát vymezena oblast pracovních režimů.

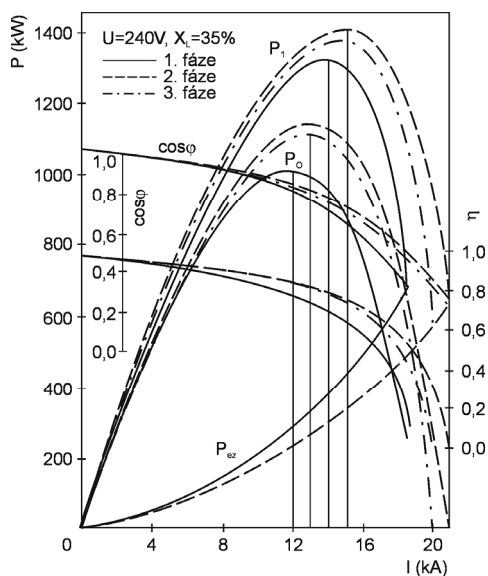
Mimo tuto oblast je podle teoretických pracovních charakteristik neracionální pracovat. Je možné uvažovat rovněž vliv vyšších tepelných ztrát na jednotlivé závislé proměnné veličiny.

Z grafických závislostí je patrné, že vyšší tepelné ztráty mají za následek snížení rychlosti tavení, zvýšení měrné spotřeby a posunutí jejího minima k vyšším proudovým intenzitám. Poloha maxima rychlosti tavení však vyšší tepelných ztrát ovlivňována není. Na Obr. 6.43 jsou graficky znázorněny charakteristiky na základě měření na skutečné obloukové peci 10 t v ocelárně ve Vítkovicích.



Obr. 6.42: Pracovní charakteristiky desetitonové elektrické obloukové pece pro stupeň napětí 220 V

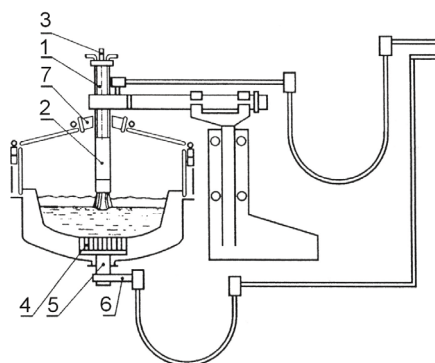
Na Obr. 6.43 jsou charakteristiky zjišťovány pro každou jednotlivou fázi zvlášť. Jsou zde určité rozdíly mezi jednotlivými fázemi, projevující se zejména při vyšších proudech. Je to dáno právě vlivem uvedených zjednodušujících předpokladů, kdy každý obvod příslušné fáze pracuje samostatně a navíc je zde uplatňován také vliv živé a mrtvé fáze. [10]



Obr. 6.43: Pracovní charakteristiky naměřené na reálné desetifázové obloukové peci

6.11. Stejnsměrné elektrické obloukové pece

Novou technologií v oblasti využití obloukového tepla je stejnsměrné napájení obloukových pecí (Obr. 6.44).



Obr. 6.44: Schéma stejnsměrné obloukové pece

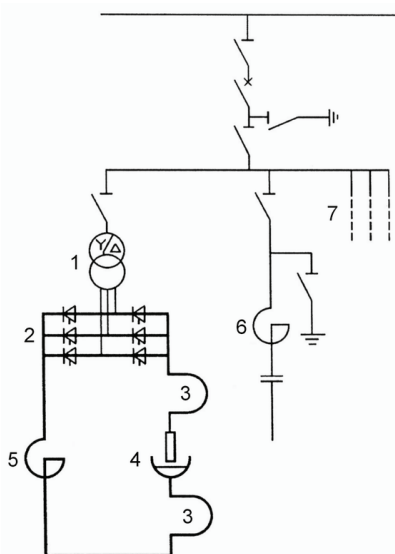
Popis stejnsměrné obloukové pece (Obr. 6.44):

1 - chlazení elektrody; 2 - grafitová část elektrody; 3 - přívod Ar nebo N_2 ; 4 - vodivé dno (anoda); 5 - dnová elektroda; 6 - obvod napájení stejnsměrným proudem; 7 - keramický uzávěr elektrody.

Mezi transformátor a obloukovou pec je umístěn usměrňovač. Elektrovodná cesta i vlastní pec se odlišují od tradičního způsobu střídavého napájení. Napájecí zdroj je složen z regulačního transformátoru a vlastního transformátoru s pevným převodem na nízké napětí. Dále je zařazen plně řízený šestipulzní usměrňovač v můstkovém zapojení, který zaručuje dobré využití výkonu transformátoru a vyhovuje dynamickým požadavkům obloukové pece.

Ve stejnosměrné části obvodu napájení pece je tlumivka na stejnosměrný proud. Tato tlumivka omezuje namáhání tyristorů provozními zkraty a napomáhá stabilizaci oblouku.

Zařízení pro kompenzaci účinníku a filtraci vyšších harmonických není u stejnosměrných pecí nutností. Použije se pouze v případě, kdy místní napájecí soustava má nedostatečný zkratový výkon v místě napojení stejnosměrné obloukové pece (Obr. 6.45). [10]



Obr. 6.45: Schéma elektrického zapojení stejnosměrné obloukové pece

Popis elektrického zapojení stejnosměrné obloukové pece (Obr. 6.45):

1 - regulační transformátor; 2 - šestipulzní můstkový usměrňovač; 3 - krátká cesta napájení; 4 - oblouková pec; 5 - tlumivka; 6 a 7 - filtračně kompenzační zařízení.

Vlastní vana obloukové pece na stejnosměrný proud musí mít vodivé dno a speciální konstrukci pro vyvedení proudu obvodem systémem dnových elektrod. Největší výhodou stejnosměrných obloukových pecí je podstatné snížení spotřeby grafitových elektrod, které dosahuje v některých případech až 50 %. Do 30 tun vsázky se konstruují pece s jednou elektrodou. Tyto pak vykazují menší opotřebení vyzdívek v peci vzhledem k rovnoměrné vzdálenosti elektrody od stěn pece. Další výhodou je odstranění rušivých vlivů na napájecí síť, zejména dynamických odchylek napětí. Hlučnost provozu se sníží ze 110 dB na 90 dB ve srovnání se střídavým napájením. Stejnosměrná oblouková pec se provozuje s dlouhým obloukem, a tedy

co nejvyšším stupněm napětí v napájecím transformátoru. Dlouhý oblouk vyžaduje užití pěnové strusky. Elektricky vodivé dno stejnosměrné pece potřebuje provoz s tekutou vsázkou ihned při startu tavení. Proto se ponechává v peci po odlití část tekuté oceli, která umožní spojení obvodu elektrovodné cesty. Výhodou je možnost rekonstrukce stávajících střídavých obloukových pecí na stejnosměrné se zachováním původního napájecího transformátoru. [10]

6.12. Literatura

- [1] Metaxas, A.C. Foundations of Electroheat. Cambridge, UK 1996, ISBN 0-471-95644-9.
- [2] Rada, J.; Hradílek, Z.; Kožený, J.; Novák, P.; Andras, J. Elektrotepelná technika. SNTL/ALFA, Praha 1985.
- [3] Hering, M. Podstawy elektrotermii cz. Warszawa 1998. ISBN 83-204-2319-8.
- [4] Sisojan, G.A. Električeskaja duga v eliktričeskoj peči. Moskva – Metalurgia 1974.
- [5] Kurbil, A. Elektrotermiczne urzadzenia lukowe. Warszawa 1988
- [6] Novák, P. Příspěvek k teorii napajecích obvodov oblúkových oceliarských pecí. Habilitační práce Košice VŠT 1978
- [7] Novák, P. Elektrické teplo. Equilibria, s.r.o., 2010. ISBN 978-80-89284-48-1
- [8] Hradílek, Z. Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení. MONTANEX, a.s. Ostrava 2008.
- [9] Hering, M.; Sajdak C.; Wciślik, M. a kol.: Computer aided design of electroheat devices – Gliwice 2002, ISBN 83-7335-062-4
- [10] Hradílek, Z.; Buchta, Z.; Rusek, S.; Gavlas, J.: Elektrotepelná zařízení – INEL Praha 1997, ISBN 80-902333-2-5
- [11] Hradílek, Z.: Vynález – autorské osvědčení č. 166447 – Zapojení pro kompenzaci napětí a účinníku u spotřebičů s nepravidelným nestejně velkým špičkovým proudovým zatížením
- [12] Hradílek, Z. a kol.: Elektrotepelná technika Simulace – počítačové programy – VŠB – TU Ostrava 2001, ISBN 80-7078-874-7
- [13] Hradílek, Z.: Řešení energetických problémů obloukových pecí v síti vysokého napětí – Habilitační práce – VŠB – TU Ostrava 1977
- [14] Hradílek, Z.: Energetické problémy ocelářských obloukových pecí – Doktorská disertační práce – ČVUT Praha 1985
- [15] Hradílek, Z.: Energy savings using reactor with controlled power regime EAF – Elektrowärme Int. Vulkan Verlag Essen 1997
- [16] Sokanský, K.: Volně hořící elektrický oblouk – Monografie 1998 VŠB – TU Ostrava, ISBN 80-7078-556-X
- [17] Hradílek, Z. Optimal measurement on the model of electric arc. Elektrowärme International. Vulkan Verlag Essen BDR 1995 B-167-168-No3.
- [18] Hradílek, Z. Energy saving using reactor with controlled power regime EAF. XIII. World Congress BNCE. U.I.E 1996. Birmingham U.K. Proceeding p. 35-43. ISBN 1-86126007.
- [19] Hradílek, Z.; Gavlas, J.; Král, V. Computer programme for regimme working characteristic electrical arc furnaces. Polsko, Mezibrodzine zywieckie. Sborník s.20-26. ISBN 83-86923-66-0
- [20] Hradílek, Z.; Gavlas, J.; Král, V. Optimisation of electric regimme of electric arc furnaces using computer program. Polsko, Pozań 1998. Sborník s.197-200.

7. Elektrotepelná zařízení plazmová, laserová, elektronová a infračervená

Ve druhé polovině 20. století jsou zvyšovány požadavky nejen na kvalitu a množství vyráběných produktů, ale i na snižování energetické náročnosti výroby tavicích procesů a různých procesů tepelného zpracování.

Tavicí procesy v obloukových a indukčních pecích při výrobě ocelí a jejich slitin mají řadu výhod ve srovnání s palivovými pecemi. Při výrobě vysokokvalitních legovaných ocelí ale tyto pece nesplňují požadavky kladené na rovnoměrnou krystalizaci, homogenní rozložení různých příměsí apod. Ani obloukové vakuové pece nenašly v metalurgii široké uplatnění, a proto se hledaly jiné principy tavení, které splňují náročné požadavky na kvalitu produktů.

V dalších kapitolách jsou uváděna elektrotepelná zařízení pro plazmový, elektronový, laserový a infračervený ohřev. Budou popsány základní principy, elektrotepelná zařízení pro jednotlivé typy ohřevů a různé technické aplikace, především z oblasti elektrotepelné techniky.

7.1. Plazmová elektrotepelná zařízení

Plazma v jeho nespočetných formách a technologických aplikacích je všude kolem nás. Různé typy plazmatu a jeho jedinečné vlastnosti (je vodivý, reaguje na elektrické a magnetické pole, může být účinným zdrojem radiace) podmiňují jeho použití v mnoha aplikacích důležitých pro náš život a svět kolem nás.

7.1.1. Plazma

Vlastnosti plazmatu jsou odlišné od vlastností plynů a kapalin, a proto je plazma často nazýváno čtvrtým skupenstvím hmoty.

Pokud dodáme látce energii, látka postupně přechází z pevného skupenství do kapalného a dále do plynného. S dalším zvyšováním kinetické energie částic látky (molekul, atomů) dochází k tomu, že molekuly se při vzájemných srážkách rozpadají na menší molekuly či atomy. Tento proces se nazývá disociace molekul. U atomů pak podle jejich kinetické energie mohou při vzájemných srážkách nastat dva případy. Při menších hodnotách jejich kinetické energie dochází ke změnám v jejich elektronovém obalu a atomy přecházejí do excitovaného stavu (stavu s vyšší energetickou hladinou). Excitovaný stav částic není stabilní a tyto částice přechází samovolně zpět do základního stavu. Přitom se energie, která je do excitovaného stavu uvedla – excitační energie, uvolní vyzářením kvanta energie – fotonu. Při velkých hodnotách kinetické energie atomů jsou během srážek z atomového obalu uvolňovány elektrony a dochází k ionizaci atomů. V plynu tak vznikají elektricky nabitě částice – volné elektrony a kladné ionty. Při záchytu elektronu neutrálním atomem vznikne záporný iont. Neutrální částice a ionty jsou souhrnně nazývány těžké částice, neboť jejich hmotnost je mnohem větší než hmotnost elektronů. Látka v plazmatickém skupenství tedy obsahuje těžké částice, volné elektrony a fotony. Typickým projevem plazmatu je ionizovaný stav a intenzivní vyzářování.

Změny energie jednotlivých částic, případně vznik a zánik srážejících se částic nazýváme elementárními procesy, jejichž existence je podmínkou vzniku, udržení a zániku plazmatu elektrických výbojů. Za nejjednodušší elementární proces pokládáme urychlování elektronů a iontů elektrickým polem. Přes neuspořádaný termický pohyb elektronů a iontů je přeložen uspořádaný pohyb proti směru nebo ve směru elektrického pole. Pohyb způsobený elektrickým polem se nazývá drift a má zanedbatelný vliv pro tepelný pohyb částic. Rychlost driftového pohybu je totiž mnohem menší než rychlost elektronů a iontů mezi jednotlivými srážkami.

V důsledku přítomnosti nabitých částic v plazmatu a jejich vzájemnému elektrickému působení se částice ovlivňují na větší vzdálenost než v elektricky neutrálním plynu. Toto vzájemné elektrické působení je jednou z podmínek existence plazmatu, bývá označováno jako kolektivní chování plazmatu.

Druhou podmínkou existence plazmatu je podmínka kvazineutality, tj. že plazma se navenek jeví jako elektricky neutrální. Počty nabitých částic v plazmatu mohou být libovolné, ale celkový kladný a záporný náboj musí být co do velikosti stejný. Na počtu neutrálních částic přitom nezáleží. Prostorové rozložení nábojů v plazmatu ale není rovnoměrné. Okolo kladných iontů vytvoří elektrony shluky, tzv. elektronové mraky, které elektricky stíní náboj kladných iontů. Vznikají oblasti, tzv. Debyeovy sféry, uvnitř kterých není splněna podmínka elektrické neutrality. Střední rozměr těchto oblastí se nazývá Debyeova délka λ_D .

Po zavedení Debyeovy délky můžeme plazma definovat jako ionizovaný plyn (soubor nabitých a neutrálních částic) v objemu s délkovým rozměrem L značně větším než je Debyeova délka ($\lambda_D \ll L$) a splňující podmínku kvazineutality. Mechanismus Debyeova stínění platí jenom tehdy, pokud je v nábojovém oblaku dostatek částic N_D . Pokud se vyskytuje pouze jedna nebo dvě částice, nemůže být pojem Debyeova stínění platný. Proto musí platit podmínka $N_D \gg 1$.

Abychom mohli nazvat ionizovaný plyn plazmatem, musí splňovat i třetí podmínku. Tato podmínka souvisí se srážkami mezi částicemi v ionizovaném plynu, tj. musí platit nerovnost $\omega\tau > 1$. V této nerovnosti je ω frekvence typických oscilací plazmatu a τ je střední doba mezi srážkami s neutrálními atomy.

Protože plazma obsahuje volné nabitě částice, je na rozdíl od plynů elektricky vodivé. Prostřednictvím nabitých částic v plazmatu můžeme na plazma působit elektromagnetickým polem a plazma může od elektrického a magnetického pole přijímat energii, popř. energii odevzdávat.

Typy plazmatu

Plazma je nejběžnější formou hmoty v celém vesmíru jak svou hmotností, tak objemem. S plazmatem se setkáváme na každém kroku, je všude kolem nás. Většina vesmíru je vlastně plazma, uvádí se, že více než 99 % vesmíru je plazma. Jsou to především hvězdy, mlhoviny, meziplanetární prostor. Hvězdy, včetně Slunce, jsou vlastně velké plazmatické koule. Množství nenabitých částic v plazmatu se výrazně mění, od 95 % v nízké ionosféře až po méně než 1 % ve slunečním větru, v nepřetržitém toku plazmatu ze Slunce.

Existuje velké množství plazmatických systémů a rozsah stupnice pro teplotu a koncentraci (hustotu) částic je opravdu široký. V podmínkách na Zemi byla pro uměle vytvořené plazma naměřena teplota kolem 0 K (pro krystalické „non-neutral“

plazma = čistě elektronové plazma nebo čistě iontové plazma) a naopak magnetické termojaderné plazma může dosahovat hodnot řádově 10^8 K. Pro kosmické plazma lze uvažovat teploty od 10^2 K (aurora) do teploty 10^7 K (sluneční jádro). Koncentrace částic se mění v širokém rozmezí, v pozemských podmínkách se pohybuje v rozmezí $(10^7 - 10^{32}) \text{ m}^{-3}$, pro kosmické plazma je v rozmezí $(10^0 - 10^{30}) \text{ m}^{-3}$. Plazma se vyskytuje v širokém rozmezí tlaků. Přestože základní parametry plazmatu se mohou měnit v širokém rozmezí, charakteristika plazmatu může být velmi podobná.

V plazmatu dochází k interakcím mezi částicemi a interakce mezi nabitými a neutrálními částicemi v plazmatu jsou důležité pro určení jeho chování. Druhy atomů (molekul) v plazmatu, poměr ionizovaných částic k neutrálním a energie částic mají za následek široký rozsah typů plazmatu, jejich vlastností a chování. Ve slabě ionizovaném plazmatu převažují neutrální částice, takže nabitě částice se daleko více srážejí s neutrálními částicemi než mezi sebou. Procentuální zastoupení nenabitých částic pro úplně ionizované plazma může být menší než 1 %.

Existuje několik kritérií, podle kterých se rozlišují různé typy plazmatu. Nejobecnější dělení plazmatu je dělení na přirozené (přírodní) plazma, např. (vesmírné plazma, mezihvězdný plyn, ionosféra Země apod.), a na plazma uměle vytvořené, především v elektrickém výboji. Vedle dělení plazmatu na přirozené a uměle vytvořené se můžeme setkat s rozlišením plazmatu na rovnovážné a nerovnovážné plazma. Rovnovážné plazma bývá také označováno jako termické (izotermické) plazma nebo jako termální plazma a nerovnovážné plazma jako neizotermické (v angličtině se uvádí „thermal plasma“ a „non-thermal plasma“).

Dodáním energie plazmatu dojde ke zvýšení kinetické energie částic. Může být dodána energie tepelná (termické plazma), elektrickým polem (vznikne typicky nerovnovážné plazma) nebo elektromagnetickým polem (RF plazma).

Termické plazma (např. vysokotlaký elektrický oblouk) je plazma, které je ve stavu lokální termodynamické rovnováhy (tj. teplota všech částic je stejná, teplota elektronů je stejná jako teplota těžkých částic, $T_e = T_i$) nebo se tomuto stavu blíží. Termické plazma dosahuje teplot až 10^4 K s elektronovými koncentracemi $(10^{21} - 10^{26}) \text{ m}^{-3}$. Nerovnovážné (neizotermické) plazma je plazma s velkou odchylkou od kinetické rovnováhy, tj. $T_e \gg T_i$. Často také bývá označováno jako „studené“ plazma, kvůli nízké teplotě těžkých částic. Nerovnovážné plazmatické systémy pracují většinou za nízkých tlaků, $p < 10$ kPa.

Další dělení plazmatu je podle teploty plazmatu. Plazma pak bývá často označováno jako nízkoteplotní nebo vysokoteplotní plazma. Nízkoteplotní plazma dosahuje teploty maximálně 10^5 K a nepředpokládá se v nich existence jaderných reakcí (štěpení jader na protony, neutrony atd.). Pod pojmem vysokoteplotní plazma se rozumí termojaderné plazma, které je obvykle tvořeno plyny lehkých prvků (vodík, deuterium, tritium, helium, lithium apod.), s teplotami 10^7 až 10^8 K, při kterých lze předpokládat termojaderné reakce.

Pro elektrotepelné aplikace má význam především plazma nízkoteplotní termické. [1]-[4]

7.1.2. Aplikace plazmového ohřevu

K technickému využití termického plazmatu se nabízí zejména možnosti kombinace řady až extrémně vysokých parametrů dosažitelných jinými tepelnými zdroji vesměs jen jednotlivě:

- extrémně vysoké teploty (ve srovnání s jinými tepelnými zdroji),
- extrémně vysoké gradienty teplot v malém prostoru,
- vysoká dynamika ohřevu,
- extrémně vysoké rychlosti proudu plazmatu i při podzvukovém proudění,
- vysoká entalpie plazmatu,
- vysoká kinetika ohřevu, popř. i následného ochlazení.

Důležitá je rovněž možnost generovat plazma prakticky libovolného složení vhodnou volbou pracovního plynu, popř. řízené směsi plynů, které mohou být navíc i velmi čisté (ve srovnání se spaliny klasických hořáků).

Elektrickým obloukem vytvořené termické plazma se využívá v nespočetných technologických aplikacích, např. při tepelné modifikaci povrchových vlastností, nástřik materiálů v práškové formě či ve formě par, při syntéze keramických materiálů se specifikovanými vlastnostmi nebo při destrukci škodlivých látek a odpadů.

Využití plazmatu pro různé technologie dalo vzniknout novým technologiím, označované souhrnně jako plazmové technologie. Plazmové technologie patří mezi nejdynamičtěji rozvíjející se oblasti techniky a hrají důležitou roli v rozvoji nových materiálů a nových výrobních postupů, které jsou výkonnější, méně škodí životnímu prostředí. Ve srovnání s jinými tepelnými zdroji využívají plazmové technologie extrémně vysokých teplot a vysokých rychlostí proudu plazmatu (i při podzvukovém proudění).

Možnosti využití plazmových technologií je široké [5]-[9], přes klasické, moderní až po špičkové plazmové technologie. Jednotlivé aplikace jsou uvedeny v následujícím přehledu:

- Klasické plazmové technologie:
 - plazmové tavení, plazmatický nástřik, plazmové (suché) leptání, plazmové řezání, plazmové svařování.
- Moderní plazmové technologie:
 - změna vlastností materiálů, vznik a výroba nových materiálů s překvapivými vlastnostmi, likvidace perzistentních a toxických látek, zpracování nebezpečných odpadů, přepracování a recyklace odpadů.
- Špičkové plazmové technologie:
 - oblast nanotechnologií, vakuové plazmové technologie.

Plazmové pece se v elektrometalurgii používají především na tavení, popř. na přetavování, těžkotavitelných kovů za účelem zvýšení čistoty výsledného produktu. Rozšířené jsou především plazmové pece pracující s obloukovými (elektrodovými) plazmatrony, které v základních rysech kopírují konstrukci obloukových pecí. Zdrojem tepla v plazmových tavicích pecích je nízkoteplotní plazma vysoké teploty a rychlosti, které se generuje v plazmatronu. Plazmatron nahrazuje funkci elektrod, které nahličují vsázku, pracovní plyn vytváří neutrální ochrannou atmosféru. Plazmové pece mají mnoho výhod, vedle vysoké teploty a rychlosti plazmatu je to i vysoká koncentrace tepelného výkonu v plazmatu, jednoduchá regulovatelnost, vysoká čistota plazmatu a tedy i plazmových procesů.

Plazmatický nástřik je metoda, která umožňuje díky vysoké teplotě plazmatu nanášet všechny druhy materiálů od čistých kovů až po těžko tavitelné materiály (např. keramiky, cermety). Vysoká teplota a rychlost dopadajících částic vedou ke vzniku povlaku s velmi jemnou a hustou strukturou a s vysokou adhezí k základnímu materiálu. Při plazmatickém nástřiku hoří elektrický oblouk mezi vodou chlazenou katodou (většinou wolframovou) a válcovou anodou (např. měděnou), tvořící zároveň trysku plazmového hořáku. Plyn (obvykle argon nebo jiný inertní plyn s několika procenty plynu zvyšujícího entalpii plazmatu, např. H_2 , He, N_2) je přiváděn axiálně do hořáku, na jehož druhém konci vystupuje plazma s vysokou teplotou (až 20000 K) a entalpií. Do něj se pomocí nosného plynu přivádí nanášený materiál ve formě prášku. Teplota a rychlost proudu plazmatu závisí zejména na konstrukci hořáku, energetickém příkonu a použitém plynu. Existují tři základní typy plazmatického nástřiku: atmosférický plazmatický nástřik (APS), vakuový plazmatický nástřik (VPS) a nástřik pomocí vysokofrekvenčního plazmatu (RF plazma).

Plazma lze použít nejen k nanášení vrstev na povrch materiálů, ale i k odstraňování materiálů z povrchu. V takovém případě mluvíme o plazmovém (suchém) leptání. Tato technologie umožňuje vytvořit podstatně jemnější struktury, než lze získat klasickým mokřím leptáním. Plazmového leptání hraje důležitou roli při výrobě čipů v elektronice a bez této technologie bychom stěží měli k dispozici výkonné počítače a paměťové čipy.

Další plazmová technologie, plazmového řezání, má řadu výhod, především je to možnost použití této technologie pro řezání všech vodivých materiálů, dále vysoká kvalita řezu, vysoká řezná rychlost, velmi dobrá automatizace a možnost řezání plazmatem pod vodou. Nevýhodou je pouze širší řezná spára a omezená tloušťka materiálu. Při využití plazmatu pro plazmové řezání může hustota energie v paprsku plazmatu dosáhnout hodnoty až $2 \cdot 10^6$ W/cm². Pro řezací proces je nejdříve zapálen pilotní oblouk mezi tryskou a katodou prostřednictvím vysokého napětí. Tento energeticky slabší pilotní oblouk připraví částečně ionizaci dráhu mezi plazmovým hořákem a obráběným předmětem. Dotykem pilotního oblouku s obráběným předmětem je automaticky zvýšen výkon hlavního oblouku. Tento dotyk se nazývá letmé nařiznutí nebo letmý propich. Díky vysoké teplotě plazma expanduje a proudí s nadzvukovou rychlostí ve směru obráběného předmětu (anoda). Teplota plazmatu při úniku z trysky může dosahovat až 30000 K a rychlost až rychlosti zvuku. Tryska je chlazená kolující vodou a při některých procesech se dokonce řezaný materiál umísťuje pod vodu. Voda chrání trysku před natavením, brání hluku a nepříjemnému dýmu. Druh plynu, který proudí do trysky a který je následně obloukem zahříván, se liší podle použití, ale nejčastěji se používají

argon, dusík, vodík, kyslík a jejich směsi. Rekombinací atomů a molekul mimo plazmovou trysku se uvolní přijatá energie a zvyšuje se tepelný účinek plazmatu na obráběný předmět.

Plazmové svařování umožňuje svařovat materiály nejrůznějších vlastností a rozměrů. Proudů tekoucí obloukem se pak pohybují od 0,1 A pro svařování materiálů tenčích než 0,1 mm až po proudy 200 A, které dokážou svařovat materiály tloušťky až 15 mm. Opět se jedná o elektrický oblouk, který vznikne přivedením napětí mezi wolframovou elektrodou a svařovaný materiál. Tryska je měděná a opět ji chladí cirkulující voda. Proud plazmatu v tuto chvíli neřeže, ale vytváří jakousi stínící obálku. Jako stínící plyn se používá především směs argonu a vodíku.

Plazma je vynikajícím prostředkem pro úpravu povrchů materiálů. Na jedné straně lze plazmatem upravit povrch na molekulární úrovni, takže bude schopen snadné vazby s jinými látkami. Na druhé straně lze vhodnou volbou pracovního plynu pokrývat povrch jinými vrstvami. Získají se tak nové materiály s překvapivými vlastnostmi, popř. se změní nebo zlepší některá z jeho vlastností. Schopnost plazmatu ovlivňovat vlastnosti povrchů pochází z vysoké energie elektronů, které jsou schopné přerušit chemické vazby. Vedle úpravy povrchů je možné plazma využít i pro čištění nebo likvidaci perzistentních a toxických látek nebo rozklad škodlivých látek na ekologicky bezpečné produkty. K tomu se používají buď různé typy výbojů v plynech a kapalinách, nebo přístroj zvaný plazmatron. Principem tohoto zařízení je, že plazma opouští výstupní trysku vysokou rychlostí a díky vysoké teplotě a reaktivitě plazmatu odpad rozkládá na jednoduché molekuly či samotné atomy.

V současné době se začíná plazma prosazovat i v tzv. nanotechnologiích. Jako nanotechnologie se obecně označuje vědní obor výzkumu a vývoje, který se zabývá cíleným vytvářením a využíváním struktur materiálů v měřítku několika nanometrů alespoň v jednom rozměru (0,1-100 nm). Konstrukčními prvky nanotechnologie jsou molekuly a dokonce i samotné atomy. Nanotechnologie zahrnují oblasti vědy a technologie, jejichž cílem je přesné ovládání jednotlivých atomů a molekul tak, aby vznikl nějaký objekt (např. čip, který je tisíckrát menší než struktury vyráběné doposud běžnou technologií) nebo struktura s novými vlastnostmi (elektrickými, optickými, fyzikálními apod.). Využití nanotechnologií je velmi rozsáhlé a již má uplatnění v mnoha oblastech, např. v elektronice, strojírenství, textilním průmyslu, chemickém průmyslu, zdravotnictví, elektrotechnickém průmyslu apod.

7.1.3. Plazmatrony

Plazmové technologie využívají jako zdroje termického plazmatu zařízení, které bývá označováno jako plazmatron nebo také plazmomet, plazmový hořák nebo generátor termického plazmatu. [5], [6]

Jednotlivé typy plazmatronů se rozlišují podle různých hledisek. Určujícím kritériem je způsob generování plazmatu, podle kterého rozlišujeme obloukové plazmatrony (plazmatrony s elektrodami) a dále indukční a dielektrické plazmatrony (plazmatrony bez elektrod). Indukční plazmatrony vytváří a udržují plazma metodou indukčního ohřevu a jsou zpravidla napájeny z vysokofrekvenčních zdrojů s pracovními frekvencemi 1-30 MHz. Dielektrické plazmatrony jsou nové typy plazmatronů, u nichž je princip analogický dielektrickým zařízením. Podrobněji se

budeme zabývat obloukovými plazmatrony.

Generování plazmatu v obloukových plazmatronech (dále bude uváděno zkráceně plazmatron) je podobné generování obloukového výboje (plazmatu oblouku) v obloukových pecích. Rozdíl je v plazmatvorném prostředí. V plazmatronech se plazma generuje a udržuje v prostředí plazmatvorných plynů a v širokém rozsahu tlaků, v obloukových pecích prostřednictvím elementárních procesů v parách elektrod a v plynech z okolního prostředí, většinou při atmosférickém tlaku. Navíc v plazmatronech tvar proudu plazmatu, způsob odevzdávání energie a ohřev proudícího pracovního plynu závisí na konstrukci plazmatronu.

Plazmatron je tedy zdroj termického plazmatu a je založen na ohřevu pracovní látky (plynu, kapaliny) elektrickým obloukem. Plazmatrony musí splňovat následující požadavky:

- teplota plazmatu tisíce až desetitisíce stupňů (do 50000 K),
- vlastnosti plazmatu musí odpovídat požadované aplikaci,
- regulovatelný proces ohřevu (možnost měnit parametry plazmatu),
- dostatečně dlouhý nepřetržitý provoz (řádu hodin až stovek hodin),
- dostatečně vysoká účinnost.

Ke splnění výše uvedených požadavků mají tato zařízení s elektrickým obloukem následující výhodné vlastnosti:

- možnost realizace vysokoteplotního proudu plazmatu o velkém výkonu (o vysokém obsahu entalpie),
- využití standardních zdrojů elektrického výkonu (rotační soustrojí motor-ss generátor, řízené tyristorové usměrňovače, řízené polovodičové měniče),
- ohřev plynu i při vysokých tlacích (až do 10 MPa),
- možnost plynulé regulace parametrů plazmatu během provozu zařízení.

Dalšími kritérii dělení plazmatronů je např. druh napájení, technologické působení, pracovní médium nebo způsob stabilizace oblouku v plazmatronu. Dělení podle uvedených kritérií je uveden v následujícím přehledu.

Podle druhu napájení:

- se stejnosměrným proudem (převažující),
- se střídavým proudem (většinou třífázovým, speciální).

Podle technologického působení:

- s nezávislým obloukem (samostatná anoda),
- se závislým obloukem (anodou je opracovaný materiál).

Podle pracovního (stabilizačního) média:

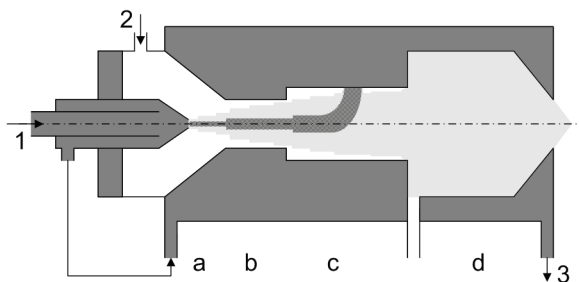
- plynové,

- kapalinové.

Podle způsobu stabilizace tvaru sloupce oblouku:

- s intenzivně chlazenou stěnou (Maeckerův hořák),
- s intenzivním axiálním ofukováním oblouku,
- s vírovou stabilizací oblouku,
- s kapalinovou stěnou.

Příklad typického konstrukčního uspořádání plazmatronu se stejnosměrným napájením, s nezávislým obloukem je naznačeno na Obr. 7.1. a představují ho následující části: a - katoda a katodový prostor, b - kanál plazmatronu (kanál oblouku), c - anoda s charakteristickou anodovou patou, d - uklidňovací komora, 1, 3 – přívod a odvod chladicí vody, 2 – přívod pracovního plynu.



Obr. 7.1: Konstrukční uspořádání plazmatronu se ss napájením

Katoda emituje nosiče proudu v oblouku (elektrony), do katodového prostoru se obvykle přivádí plynné pracovní médium. Materiál katody je nejčastěji thoriovaný wolfram nebo hafnium.

V kanálu plazmatronu, tj. v hlavním pracovním prostoru, hoří obloukový výboj způsobující ohřev a přechod pracovního média do plazmatického stavu. Kanál plazmatronu je charakterizován vysokou objemovou hustotou energie řádově 10 až 100 MW·m⁻³, proto musí být intenzivně chlazen a je buď jednoduchý, nebo odstupňovaný.

Místo dopadu elektronů urychlovaných elektrickým polem podél oblouku, anodová pata, představuje lokálně místo s vysokým tepelným zatížením. Aby nedošlo k destrukci stěny anody, musí být tato anodová pata neustále přemisťována po povrchu anody a to přinejmenším tangenciálním prouděním pracovního plynu, případně posílením magnetickým polem. Oblast, v níž se pohybuje anodová pata, tvoří konstrukčně tzv. anodový prostor, z něhož již může proud plazmatu proudit do volného prostoru.

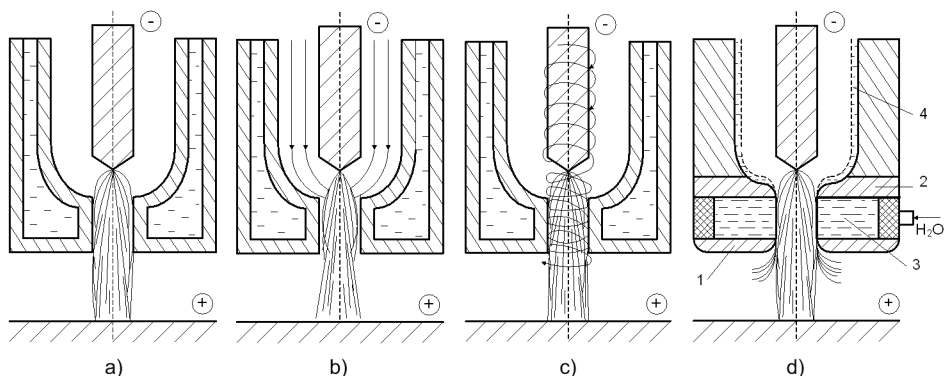
Uklidňovací (stagnační, mísící) komora slouží k homogenizaci plazmového proudu, popř. ke zvýšení tlaku v obloukovém prostoru. Uklidňovací komora s výstupním konfuzorem nebo s Lavalovou tryskou využívá tlaku ke zvýšení výtokové rychlosti proudu plazmatu.

V plazmatronech se tedy využívá elektrického oblouku, jehož tvar je stabilizo-

ván různými způsoby tak, aby trvale hořel v definovaném prostoru, Tento prostor je obvykle válcový kanál nebo tryska, kde je oblouk ofukován pracovním plynem nebo parami kapaliny. Plazma se tvoří nepřetržitě ve sloupci oblouku ze stabilizačního média a proudí pak z výstupního otvoru ve formě paprsku plazmatu.

Vliv tvarové stabilizace oblouku se projevuje především usměrněním a vymezením výbojové dráhy oblouku a účinným chlazením vnějších vrstev. V průmyslově využívaných plazmatronech dochází přitom k makroskopickému urychlování plazmatu ve směru osy oblouku. Plyn (kapalina) mezi obloukem a stěnou se ohřívá jen teplem z povrchových vrstev oblouku a jeho teplota je velmi malá ve srovnání s teplotou oblouku. Tento chladnější plyn zmenšuje průřez sloupce oblouku, proto při stejné hodnotě proudu v oblouku roste jeho hustota a tím i jeho teplota. Pokud je potřeba zvýšit teplotu oblouku, je třeba zintenzivnit chlazení jeho povrchových vrstev nebo zmenšit průřez kanálu plazmatronu.

Sloupec oblouku při stabilizaci stěnou (Obr.7.2a) vyplňuje trysku až k její stěně, která ochlazuje okrajové vrstvy plynu. K zajištění axiálního transportu tepelné energie proudícím plynem se tento plyn dodává v malém množství do elektrodové komory.



Obr. 7.2: Způsoby tvarové stabilizace oblouku

Stabilizace s intenzivním axiálním ofukováním (Obr.7.2b) se liší se od stabilizace stěnou tím, že množství axiálně proudícího plynu je tak velké, že mezi horkým jádrem výboje a stěnou trysky je relativně chladná vrstva plynu. Pracovní plyn je nutno přidávat rovnoměrně po celém obvodu mezikruží kolem katody, anodový kanál musí být krátký, jinak hrozí nebezpečí kontaktu oblouku se stěnou.

Vírová stabilizace oblouku (Obr.7.2c) je účinnější stabilizace než u předcházejících dvou typů. Tangenciální vstup plynu do katodového prostoru dodá axiálnímu proudu pracovního média v anodovém kanálu rotační složku, která úměrně roste podél poloměru kanálu – v ose kanálu je nulová, což vede k tomu, že oblouk se drží v ose, kde je nejméně ochlazován. Rotace plynu pokračuje i v trysce a při hoření oblouku se lehčí horké plyny vlivem odstředivé síly dostávají blíže k ose výboje, zatímco ke stěnám se dostává chladnější plyn.

Při stabilizaci kapalinovou stěnou (Obr.7.2d) se do plazmového hořáku nepřivádí pracovní plyn, oblouk hoří v kanálu tvořeném rotující kapalinou – nejčastěji vodou, přiváděnou pod vysokým tlakem tangenciálně ve více místech podél kon-

strukčního pláště anodového kanálu. Vytvoří se vodní vír s dvojným průměrem, vír s malým průměrem volného otvoru ve stabilizační komoře 3 a vír s větším průměrem v elektrodové komoře 4. Trysky 1 a 2 jsou chráněny vrstvou vody, která při stejných průměrech obou trysek odtéká do stabilizační komory rovnoměrně na obě strany. Na konci anodového kanálu musí být většina kapaliny opět odsávána. Plazma se tvoří z páry odpařované energií oblouku z kapalinového povrchu. Výhodou je levný provoz.

Dalším kritériem klasifikace typu elektrického oblouku je mechanismus katodové emise. U katod z grafitu a těžko tavitelných kovů (wolfram apod.) jsou elektrony emitovány termickou emisí. Jejich provedení je ve formě tyčí a nevhodnějším materiálem je thoriovaný wolfram pro svou vysokou elektronovou emisi a nízký stupeň eroze v neoxidační atmosféře. Pro oxidační prostředí se používají hafniové katodové tablety zalisované do měděného tělesa katody, jsou však drahé a výstupní práce pro emisi elektronů je značně vyšší. Grafitové elektrody se vyznačují vysokým stupněm eroze a používají se jako posuvné elektrody, např. u vodou stabilizovaného oblouku. Teplota a proudová hustota na povrchu katodového kráteru dosahují pro $W+ThO_2$ při proudech 1 kA až 10 kA a pro grafit v rozmezí proudů 5 kA až 100 kA hodnot $T > 3000$ K, respektive 10^7 až 10^8 A·m⁻².

U katod z materiálů s nižší teplotou tavení, jako je měď, její slitiny a ocel, jsou elektrony emitovány v důsledku vysoké intenzity elektrického pole na povrchu elektrody. Vzhledem k nižším teplotám na emitujícím povrchu elektrody dosahuje hodnot 10^7 až 10^8 Am⁻² při přípustném proudovém zatížení 0,05 kA až 2 kA. Provedení elektrod je ve tvaru válcových kanálů a pro zajištění rotace pat oblouku jsou vybaveny obvykle cívkami pro vytvoření magnetického pole v obloukovém prostoru.

Volba materiálu elektrod úzce souvisí s použitým pracovním plynem. Z tohoto hlediska je nejvýhodnější argon díky velmi nízké erozi elektrod v inertní atmosféře. K dosažení vyšší účinnosti přenosu tepla a vyšší hustoty výkonu se používají směsi argonu s plyny, které mají vyšší hodnoty měrné entalpie a tepelné vodivosti jako H₂, He nebo N₂. Výrazná eroze elektrod v oxidační atmosféře, která se vytváří v obloukové komoře vodou stabilizovaného oblouku, je hlavním problémem průmyslové aplikace tohoto velmi perspektivního typu plazmatronu. Zatím je tento problém řešen posuvnou, uhořívající, grafitovou katodou a vnější měděnou anodou ve formě vodou chlazeného rotujícího kotouče.

Při použití vzduchu, případně jiné oxidační atmosféry, jako pracovního média u plynem stabilizovaného oblouku je snížení eroze elektrod řešeno vytvořením ochranné inertní atmosféry v oblasti katody. Spotřeba argonu je minimalizována na ztráty vzniklé únikem pro vytvoření nepatrného přetlaku vůči hlavnímu plynovému okruhu. Snížení eroze válcové anody je zajištěno rozptýlením tepelného zatížení po celém obvodu anodového válce rotací paty oblouku kombinovaným působením tangenciálního přívodu hlavního plynu a magnetického pole cívky instalované na anodě.

Pro samotný provoz plazmatronu jsou jeho nedílnou součástí další technologická příslušenství: vodní hospodářství (pro chlazení), plynové hospodářství (zdroj pracovního média), elektrický napájecí obvod, vlastní zdroj, stabilizační prvky (rezistance, induktor). Mimoto jsou nezbytná i další pomocná zařízení, jako např. zapalovací obvod k inicializaci oblouku, případně magnetická rotace anodové paty oblouku pomocí cívky navinuté na anodě v prostoru anodové paty.

7.2. Elektronová elektrotepelná zařízení

7.2.1. Fyzikální princip elektronového ohřevu

Můžeme říct, že elektronový ohřev je analogií plazmového ohřevu. Funkci proudu plazmatu generovaného v plazmatronu nahrazuje elektronový paprsek, což je svazek elektronů, který má velkou kinetickou energii. Elektronový paprsek se generuje v elektronovém generátoru (elektronovém dělu) v prostředí vakua a technologické teplo se získává z kinetické energie elektronů. [10], [11]

Všechny možnosti elektronových technologií vycházejí z vlastností elektricky nabitých částic. Prakticky významné jsou většinou jen elektrony, protože se dají poměrně snadno uvolnit z obalu atomového jádra a pak účelově ovládat. Mohou se pohybovat v krystalické mřížce některých látek, vodičů, jako elektrický proud s magnetickými a tepelnými účinky, nebo zcela volně ve vakuu, kde je dokážeme elektromagnetickým polem řídit a různým způsobem využít.

Fyzikální princip elektronových zařízení spočívá v přeměně elektrické energie na teplo dopadem urychlených elektronů na daný materiál (vsázku), kterému urychlené elektrony předávají svoji kinetickou energii. Urychlené (prvotní) elektrony dopadnou na vsázku a pronikají do ní. Podle množství energie dodané za čas na určitou plochu (plošná hustota výkonu) může mít elektronový svazek různé účinky, od pouhého tepelného ovlivnění, přes natavení, až po odpaření materiálu. Hloubka proniknutí elektronů je několik mikrometrů (i při urychlovacím napětí 40-100 kV), tj. dochází pouze k povrchovému ohřevu a dále se teplo přenáší jen vedením (v tekuté vsázce i prouděním). Rychlost pronikání elektronového svazku pod povrch může být mnohonásobně větší než rychlost šíření tepla vedením.

Urychlené elektrony jsou na své dráze silně brzděny, protože dochází k vzájemným srážkám s částicemi (atomy a molekulami) plynu. Aby nebyly elektrony brzděny srážkami, děje se celý proces ve vysokém vakuu s tlakem 10^{-2} - 10^{-4} Pa. V takovém prostředí se elektrony mohou pohybovat bez srážek s molekulami plynu po dráze dlouhé v průměru několik metrů (střední volná dráha). Energie urychlených elektronů dosahuje 10-200 keV.

Při prostupu elektronů vsázkou dochází k vzájemnému působení s krystalickou mřížkou jako celkem i s jednotlivými mikročásticemi (atomy, molekulami a elektrony) krystalu. Výsledkem je interakce polí všech těchto částic a dochází k vzrůstu jejich kmitání. Toto kmitání se navenek projevuje zvýšením teploty v daném místě.

V elektrickém poli získávají elektrony kinetickou energii

$$W = \frac{m_e v^2}{2} = eU, \quad (7.1)$$

kde m_e je hmotnost elektronu, v je rychlost elektronu, e je náboj elektronu a U je urychlovací napětí. V dostatečně vysokém vakuu je pravděpodobnost srážek elektronů s částicemi plynu malá. Rychlost elektronů můžeme vyjádřit rovnicí

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} \doteq 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U}. \quad (7.2)$$

Z uvedené rovnice je vidět lineární závislost rychlosti elektronů na urychlovacím napětí U ; pro urychlovací napětí 1 V je rychlost elektronů $593 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Dopadající výkon je přímo úměrný nejen napětí, ale i počtu elektronů n dopadajících na daný materiál za 1 sekundu

$$P = n \frac{m_e v^2}{2} = neU = IU. \quad (7.3)$$

Vztah pro výpočet rychlosti elektronů (7.2) platí pro urychlující napětí do 40 kV, kdy je možné zanedbat vliv relativity, protože dosahované rychlosti elektronů jsou poměrně malé vzhledem k rychlosti světla.

Elektrony při pronikání pod povrch pevné látky všechnu svoji kinetickou energii předají na relativně krátké dráze. Početně i měřením lze dokázat, že v pevné látce proniknou elektrony do hloubky a dané vztahem

$$a = 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{U^2}{\rho}, \quad (7.4)$$

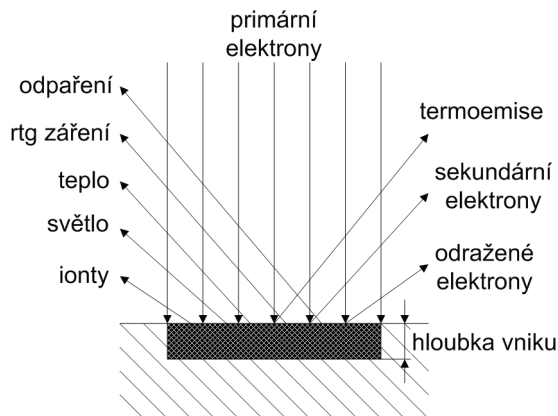
kde ρ je hustota v $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a U je urychlovací napětí v kV. Hloubkou vniku elektronů rozumíme dráhu elektronů v materiálu, na které předají svou kinetickou energii částicím pevné látky v zasaženém objemu. To se projeví v první fázi zvyšováním jeho teploty, které podle okolností může vést ke změnám skupenství a dalším jevům.

Při dopadu elektronového paprsku na povrch pevné látky dochází k mnoha jevům (Obr. 7.3) a ne všechna kinetická energie prvotních (primárních) elektronů se přemění na teplo. Dochází tak ke ztrátám, což vede ke snížení účinnosti ohřevu. Jak bylo uvedeno, střetávají se prvotní elektrony na své cestě ohřívanou vsázkou nejen s atomy a molekulami krystalu, ale i s elektrony (volnými i vázanými) uvnitř vsázky, které mají mnohem menší energii, ale stejnou hmotnost. Při srážce vázaného elektronu vsázky s prvotním elektronem, získá vázaný elektron energii, kterou využije k přechodu na vyšší energetickou hladinu. Zde nezůstane dlouho a vrací se rychle na původní hladinu s vyzářením kvanta energie W na frekvenci

$$f = W/h, \quad (7.5)$$

kde h je Planckova konstanta. Frekvence tohoto záření je vysoká, spadá do oblasti rtg záření a na ohřevu se nepodílí. Také při srážkách prvotních elektronů s volnými elektrony vsázky může dojít k vyzářením rtg záření. Jistá část energie dodaná primárními elektrony se tedy spotřebuje na vyzářené světlo a teplo, popř. ionizaci. Při některých srážkách prvotních elektronů s elektrony vsázky může dojít k vyrazení

prvotního elektronu nebo elektronu vsázky ven ze vsázky. Nastává tzv. sekundární emise elektronů a dochází ke snížení účinnosti ohřevu. K dalším ztrátám může dojít, pokud je prvotní elektron vyražen ven ze vsázky a vykonal pouze pružné srážky, tj. změnil pouze směr pohybu a zůstává mu původní energie. Nastal jeho úplný odraz a téměř celá energie elektronu není využita k ohřevu vsázky.



Obr. 7.3: Povrchové jevy

Jaký podíl mají jednotlivé typy ztrát v celkových ztrátách při ohřevu urychlenými elektrony v elektronové přetavovací peci je uveden v následujícím přehledu:

- ztráty v elektronovém dělu a při vedení elektronového svazku (asi 1 %),
- ztráty v evakuovaném prostoru před vsázkou (1-15 %), ztráty rychle rostou, jestliže je vakuum nízké,
- ztráty způsobené odrazem elektronů od vsázky (asi 25 %),
- ztráty sekundární emisí elektronů ze vsázky (asi 1 %),
- ztráty rtg zářením (1 ‰ – 1 %),
- tepelné ztráty sáláním ohřívané vsázky (20-30 %),
- energie odvedena vodou při chlazení krystalizátoru (zbytek do 100 %).

7.2.2. Elektronová zařízení

Základní částí elektronového zařízení je elektronové dělo, které představuje zdroj řízeného elektronového svazku, tj. slouží ke generaci, urychlení a zaostření svazku elektronů. V praxi vyžadujeme od elektronového zdroje, aby poskytoval koherentní svazek elektronů, což znamená, že by elektrony měly vycházet z bodového zdroje, měly by mít stejnou energii a dokonce by se měla jejich průvodní vlna nacházet ve stejné fázi. [12]-[17]

Elektronový paprsek je tvořen volnými elektrony a k jeho vytvoření potřebujeme termoemisní zdroj. Takovým zdrojem může být termoemisní katoda žhavená průchodem elektrického proudu. Množství emitovaných a využitelných elektronů, tj. emisní proud, závisí na vlastnostech materiálu katody, velikosti jejího povrchu

a teplotě. Kinetickou energii potřebnou k emisi elektronů z katody, tj. k překonání tzv. potenciálové bariéry existující při povrchu kovu, dodáme ohřevem katody na vysokou teplotu. Nejvyšší použitelná teplota je dána hlavně požadavky na životnost katody omezenou odpařováním. Katoda je většinou zhotovena z wolframu (méně často z tantalu), důvodem je právě nutnost vysoké teploty tavení použitého kovu. Katoda bývá přímo nebo nepřímo žhavená, tj. bez pomocné katody a nebo prostřednictvím pomocné katody. Technický život katody je různý a pohybuje se zhruba od 10-100 provozních hodin.

Samotná žhavená katoda nevytvoří požadovaný elektronový paprsek. Elektronům získaných emisí z katody je nutné dodat kinetickou energii, docílit, aby svazek elektronů byl co nejmenšího průměru, umožnit, aby se paprsek odklonil od své přímé dráhy a změnil místo dopadu. Toho dosáhneme vhodným tvarem urychlujícího elektrického pole, tj. vhodným tvarem elektrod, které jej vytváří. K tomu je zapotřebí celá řada systémů, např. pro urychlování, fokusaci, vychylování elektronového paprsku. Celé konstrukční uspořádání je potom označováno jako elektronové dělo.

Konstrukci elektronových děl ovlivňuje především tvar a uspořádání elektrodového systému, u katod i způsob žhavení. Podle uspořádání elektrodového systému existují elektronová děla:

- s axiálním systémem,
- se systémem prstencové katody (blízké nebo vzdálené),
- s příčným elektronovým paprskem.

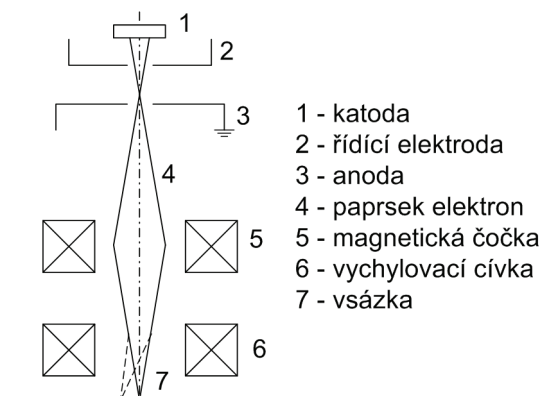
Elektronová děla můžeme rozdělit i podle funkce, resp. polohy přetavovaného kovu vzhledem k elektrickému poli děla. Provedení, kdy vsázka je mimo pole děla (vsázka není anodou), umožňuje vsázku dostatečně vzdálit od elektrických obvodů a vyloučit možnost sekundárních výbojů v poli. Konstrukce děla, kdy vsázka není anodou, bývá označována také jako dělo s nezávislým elektronovým paprskem. Elektronová děla, kde vodivá vsázka plní funkci anody a musí být v blízkosti katody, jsou děla se závislým elektronovým paprskem.

Nejuniverzálnějším dělem zůstává elektronové dělo s axiálním systémem (tzv. axiální dělo), které lze konstruovat pro výkony od několika kilowattů do výkonu 1,2 MW. Ve velkých a výkonných zařízeních se používají výhradně jen axiální děla, pro malé a střední výkony děla s prstencovou (kruhovou) katodou. Životnost katody děla s prstencovou katodou je mnohem menší než u axiálního děla, ale mají velmi dobrou tepelnou a elektrickou účinnost, což je způsobeno tím, že anodou je přímo vsázka. Analogicky podle obloukových zařízení bychom mohli nazvat elektronová děla, kde anodou je vsázka, elektronová děla se závislým (přímým) působením, elektronová děla s nezávislým (nepřímým) působením mají samostatnou katodu i anodu.

K zabezpečení potřebného vakua (10^{-2} - 10^{-6} Pa) slouží vakuová zařízení, čerpadla, resp. vývěvy. Kromě vytvoření a udržení potřebného vakua v libovolném čase technologického procesu zároveň odčerpávají vyprodukované plyny a páry v pracovních komorách.

Elektronové dělo s axiálním systémem

Elektronové dělo s axiálním systémem, používá jako zdroje elektronů termoemisní katodu, která bývá pro menší výkony (kolem 25 kW) přímo žhavená (Pierceovo dělo) a má tvar vlákna z wolframového nebo tantalového drátu nebo pásku. Pro vyšší výkony (do 150 kW) se používá nepřímé žhavení katody, tj. plošná katoda z wolframu nebo tantalu je žhavená elektricky z pomocné katody, nebo kompaktní katoda žhavená sálavým teplem. Životnost tohoto děla bývá až 300 hodin, tzn. při tavicích procesech asi 400 taveb.



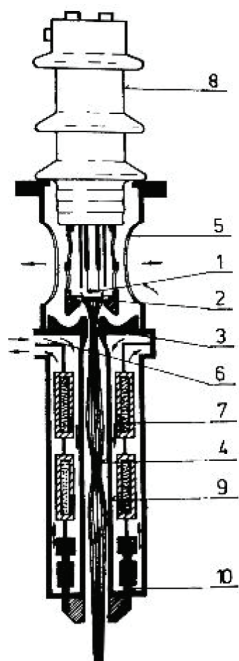
Obr. 7.4: Zjednodušené schéma elektronového Pierceova děla

Na Obr. 7.4 je zjednodušeně znázorněna funkce elektronového Pierceova děla. Katoda 1 je umístěna na vysokonapěťovém izolátoru a je na ni přiveden záporný pól urychlovacího napětí. Anoda 3 je na zemním potenciálu, má tvar válcové elektrody s otvorem uprostřed. Elektrony se urychlují elektrickým polem (vysokým napětím) mezi katodou a anodou. Mezi katodou a anodou je umístěna řídicí elektroda 2, která formuje svazek paprsků tak, aby procházel přes otvor uprostřed urychlovací anody. Řídicí elektroda je také umístěna na vysokonapěťovém izolátoru a má záporné předpětí vůči katodě. Změnou tohoto předpětí se řídí proud elektronového svazku 4. Katoda, anoda a řídicí elektroda tvoří elektrostatickou čočku. Cívka 5 (magnetická čočka) vytváří magnetické pole, kterým je svazek elektronů směrován na malou plošku vsázky 7. Změnou proudu v magnetické čočce lze elektronový paprsek zaostřit. Vychylovací cívka 6 provádí odklon do požadovaného směru. Dovoluje vychýlení ve dvou osách (např. x, y) a umožňuje přesné nastavení svazku elektronů do místa svaru nebo i k řízení jeho polohy.

Výhodou Pierceova děla je, že je zabudováno mimo vakuový prostor pece a je snadno vyměnitelné. Pro zvýšení celkové produkce pece pracují elektronové pece se čtyřmi a více elektronovými děly. Paralelní spoluprací více děl lze získat výkony pecí i nad 1 MW, hmotnosti ingotů dosahují až 20 t a měrná spotřeba elektrické energie se pohybuje kolem 900 kWh t^{-1} . Výhodou pecí s více děly je možnost provozu i při výpadku některého děla, což umožňuje dokončit tavicí proces bez přerušování.

Vymezením dopadu elektronového svazku lze dosáhnout dopad na velmi malou plochu $1-0,01 \text{ mm}^2$, ve které se uvolní velké množství tepla. Tepelný efekt je

určen rychlostí elektronů, dále závisí na velikosti urychlovacího napětí a na množství elektronů, které bombardují danou plochu, jak plyne ze vztahu (7.3). Větší množství elektronů lze dosáhnout zvýšením intenzity proudu žhavení vlákna, případně zvětšením emitující plochy.



- 1 – pomocná přímo žhavená katoda
- 2 – hlavní katoda
- 3 – anoda
- 4 – elektronový paprsek
- 5 – otvory pro evakuaci
- 6 – chlazení
- 7 – magnetická cívka
- 8 – izolátor
- 9 – vodící trubky
- 10 – magnetické vychylování

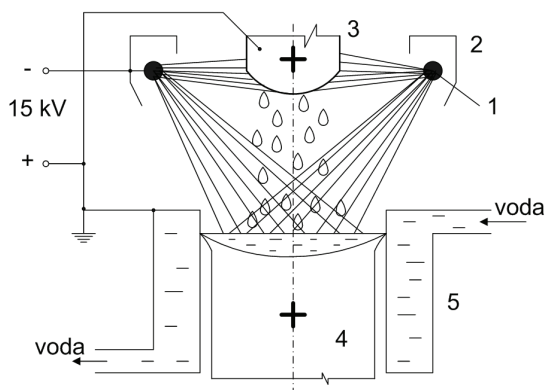
Obr. 7.5: Elektronové Pierceovo dělo [4]

Elektronové dělo s axiálním systémem s nepřímou žhavenou katodou (Obr. 7.5) má pomocnou katodu 1 pro žhavení hlavní katody 2 dopadem elektronů. Hlavní katoda je pro pomocnou katodu anodou s napětím asi +5 kV. Hlavní katoda se ohřívá a emituje další elektrony, jejichž počet závisí na materiálu a teplotě katody. S hlavní katodou je spojena elektroda, která tvaruje elektrické pole tak, aby elektrony prolétly otvorem v anodě. Elektrony jsou urychlovány anodou 3. Anoda je dutá a má napětí okolo +30 kV. Za anodou je cívka se železným jádrem s mezerou, kolem níž je magnetické pole soustřeďující elektrony do úzkého svazku, tzv. magnetická (fokusační) cívka 7. Fokusační cívky soustřeďují paprsek elektronů 4 a zabraňují jeho rozptylu. Celý systém děla je ve vzduchotěsném plášti, s bezpečnostním uzávěrem vakua a místem pro připojení vakuových čerpadel. Prostor pod anodou směrem ke vsázce je už bez elektrického pole, elektronový paprsek dopadá na vsázku setrvačností, s kinetickou energií až do 100 keV. Oblast fokusačních cívek musí být chlazená vodou 6, aby se jejich vinutí napájená ss proudem nepřehřívala a nespálila. Systém obsahuje další cívky pro fokusaci a vychýlení paprsku 10, popř. na spodní, výstupní části děla bývá připevněno ještě další zařízení s cívkami pro magnetické rozprostření elektronů na danou plochu. Těleso děla s anodou je uzemněno a je neizolovaně namontováno na pracovní prostor se vsázkou. Vysoké napětí je izolováno izolátory 8.

Aby zrychlení elektronů bylo intenzivní, nesmí docházet ke srážkám elektronů s částicemi prostředí, proto se celý proces odehrává ve vakuu. Některá provedení mají labyrintová těsnění, která oddělují prostor nejvyššího vakua kolem elektrod od prostoru nižšího vakua, kde jsou již jen fokusační cívkky. Protože v aplikační komoře (peci) může být a skutečně bývá vakuum opět o něco nižší, je před výstup z elektronového děla zařazeno ještě jedno labyrintové těsnění.

Elektronové dělo se systémem prstencové katody

Elektronové dělo se systémem prstencové katody má hlavní katodu ve formě wolframového drátu (vlákna) stočeného do kruhu (prstence). Hlavní katoda je umístěna do středu tzv. Wehneltova válce, který má záporné předpětí a díky jeho působení se okolo emitující katody vytvoří mrak elektronů. Ty jsou postupně odsávány z Wehneltova válce k anodě. Existují různá konstrukční řešení, např. se systémem blízké nebo vzdálené prstencové katody.

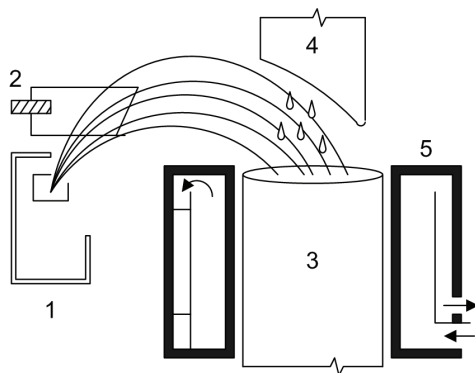


Obr. 7.6: Elektronové dělo se systémem blízké prstencové katody

Princip elektronového děla se systémem blízké prstencové katody je znázorněn na Obr. 7.6. Hlavní katoda 1 je přímo žhavana střídavým proudem. Žhavicí zdroj musí být izolován od země na plné anodové napětí 10-15 kV. Urychlovací katoda 2 je vodivě spojena s katodou a pomáhá usměrňovat elektrony na vsázku. Anodu tvoří vsázka, tj. kovová tyč 3, která se má přetavit a ingot 4, který vzniká v krystalizátoru 5 chlazeném vodou. Nevýhodou tohoto řešení je anodické zapojení taveniny. Dochází jak k odtavování kovové tyče, tak i povrchu ingotu. Vznikají tak páry, které zaplňují pracovní prostor. Katoda je přímo vystavena parám a odstříkujícím kapkám taveniny, snižuje se její životnost a poměrně rychle se zničí. Navíc se v prostoru mezi katodou a anodou nedá udržet potřebné vysoké vakuum.

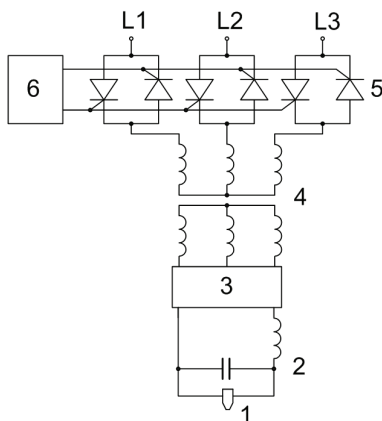
Elektronové dělo se systémem vzdálené prstencové katody odstraňuje nedostatek blízké katody. Katoda se oddaluje od taveného kovu a dává se do míst, kde nehrozí rozstřík kovu ani dosah jeho par. V systému je navíc anoda, která uzavírá jednotlivé prvky katody a zajišťuje tak ochranu žhavého vlákna. Odstraňuje jakékoliv elektrické pole mezi dělem a taveninou. Odtavovací anoda je uzemněna. Směrování elektronového paprsku a seřízení dopadu na odtavovací anodu a hladinu taveniny je dosahováno magnetickým polem, které vytvoří dvojice cívek. První

z nich se umístí několik centimetrů nad odtavovací anodou a druhá v blízkosti ingotu. Urychlovací napětí a výkony elektronového děla se vzdálenou prstencovou katodou bývají vyšší než u systému s blízkou katodou.



Obr. 7.7: Elektronová pec s příčným elektronovým svazkem

Elektronové dělo se zdroji, vakuovým zařízením a příslušenstvím tvoří elektronovou pec. Existují i jiná konstrukční řešení tavicích a přetavovacích pecí, např. s příčným elektronovým svazkem (Obr. 7.7). Je to další vývojový typ odvozený od předcházejících typů. Elektrodový systém 1 tvoří přímo žhavená katoda, Wehneltova elektroda a anoda. Katoda je zhotovena z wolframového drátu stočeného do tvaru U a je horizontálně uložena ve Wehneltově prstenci. Urychlovací anoda je v bezprostřední blízkosti katody. Generovaný elektronový paprsek je vychylován příčným magnetickým polem cívek 2 do tavicího prostoru a dopadá na povrch ingotu 3 a přetavovaného materiálu 4. Tavicí prostor je mimo dosah působení elektrického pole. I v tomto případě je katoda chráněna před vlivem par kovů a stříkající taveniny, protože je umístěna mimo osu tavicího prostoru. Přetavovaný ingot tuhne v krystalizátoru 5.



Obr. 7.8: Schéma napájení elektronového děla

Jeden z možných způsobů napájení elektronových děl je uveden na Obr. 7.8.

Elektronové dělo 1 je připojeno na sekundární vinutí transformátoru přes filtry 2 (tlumivka a kondenzátor) a usměrňovače 3. Na svorkách elektronového děla se získá usměrněné a dostatečně vyhlazené napájecí napětí. Sekundární napětí vn transformátoru 4 se reguluje tyristory 5, které jsou řízeny obvodem 6.

7.2.3. Aplikace elektronového ohřevu

Z technologického hlediska lze elektronový paprsek použít pro:

- termické procesy – tavení těžkovitých kovů a chemicky aktivních materiálů, svařování, řezání, pájení, vrtání dlouhých děr malých průměrů, tepelné zpracování těžkovitých kovů, spékání těžkovitých kovů (při práškové metalurgii) atd.;
- netermické procesy – elektronový paprsek slouží k vyvolání chemické reakce. Týká se především oblasti litografických technologií, které se používají v elektrotechnice při výrobě čipů. Je možné vytvořit na čipu až 200 000 strukturálních detailů, čehož nelze jinými technologiemi dosáhnout.

Elektronové tavicí pece se používají k přetavování – rafinaci kovů. Výchozím materiálem může být ingot, tyčový materiál. Elektronové tavení se používá pro žárovzdorné kovy – W, Mo, Ta, Ni a také při výrobě polovodičů, kde je potřeba vysoké čistoty. Ovládním výkonu elektronového děla lze udržet teplotu lázně velmi vysokou na dlouhou dobu, protože elektronové dělo má velkou hustotu příkonu.

Výhody elektronových pecí:

- možnost regulace teploty taveniny ve velmi širokých mezích,
- výroba kvalitního materiálu v důsledku nízkého tlaku v peci,
- proces tavení může být trvale opticky sledován.

Nevýhody elektronových pecí:

- zvýšené vypařování kovů s vysokou tenzí par (Mn, Cr, Ti),
- nízká tepelná účinnost (<15 %), vysoká měrná spotřeba energie,
- složitější konstrukce i provoz zařízení,
- pec je zdrojem rentgenového záření.

Obrobitelnost materiálu elektronovým paprskem je dána jeho fyzikálními vlastnostmi a nezávisí na mechanických vlastnostech. Elektronový paprsek lze použít pro opracování především těžkoobrobitelných materiálů, jako žárovzdorných ocelí, austenitických ocelí používaných při stavbě jaderných reaktorů, slitin zinku s niobem, hliníkových a titanových slitin, křemíku, drahokamů, tantalu, wolframu a speciálních slitin používaných v letectví a kosmonautice.

Elektronový paprsek vniká do materiálu do určité hloubky, kde se pohyb elektronů zastaví. Vzniklá tepelná energie koncentrovaná pod povrchem způsobuje erupční odpařování materiálu. Částičky vypařujícího se materiálu se pohybují značnou rychlostí z otvoru. Vzniklé páry odpařeného materiálu jsou zionizovány

a způsobí nové zaostření paprsku v pracovním místě. Opakováním tohoto procesu dojde k úběru materiálu.

Ze všech uvedených technologií je svařování elektronovým paprskem zřejmě nejrozšířenější. Zaostřený svazek zahřívá materiál spojovaných součástí na teplotu vyšší, než je teplota tavení. Dojde k promísení taveniny na rozhraní, většinou bez přídavku materiálu, a po vychladnutí vzniká pevný spoj. Elektronový svazek má schopnost pronikat pod povrch vysokou rychlostí. To umožňuje vytvářet velmi hluboké průvary, které navíc vynikají minimální šířkou tepelně ovlivněné oblasti. Dosahovaný poměr hloubky k šířce svaru je až 30:1. Průvary dosahované v současnosti špičkovými zařízeními jsou více než 150 mm hluboké. Charakteristickými rysy elektronového svařování jsou malá deformace součástí po vychladnutí, minimální převýšení svarového kovu a tím ušetření případného opracování povrchu svaru, pevnost svaru blízká pevnosti základního materiálu, velká přesnost a reprodukovatelnost, stálá vysoká kvalita svarů, možnost svařování obtížně svařitelných kovů a svařování kombinací různorodých kovů, které nelze často jinými metodami svařit. Elektronový paprsek je vhodný pro svařování obtížně svařitelných nebo vůbec nesvařitelných materiálů. Svary jsou bez trhlinek, málo porézní a metalurgicky čisté. Je možno svařovat jak tenké výrobky o tloušťce 1 mm, tak provádět i svary hluboké až 40 mm. Elektronové svařování může probíhat pod vysokým vakuem, pod částečným vakuem, popř. bez vakua.

Elektronové řezání je v současné době nahrazováno řezáním laserem.

Elektronový paprsek se používá pro vrtání děr malých průměrů, od průměru 0,015 mm, rychlostí až 4 000 děr za sekundu. Při vrtání hlubokých děr, s poměrem délky k průměru díry až 100, musí být průměr paprsku 2-4x menší, než je požadovaný průměr vrtané díry. Tolerance vyvrtané díry je 5-20 % jejího průměru.

Elektronový svazek dokáže vysokou rychlostí zahřát malý objem materiálu a spolu s rychlým vychylováním svazku a velmi dobrou regulovatelností a reprodukovatelností celého procesu přináší nové možnosti v tepelném zpracování kovů. Do skupiny tepelného zpracování v tuhé fázi, tedy v případech, kdy nedochází k roztavení materiálu, patří tvrzení a žihání. Při povrchovém tvrzení se využívá toho, že po velmi krátkou dobu trvajícím ohřevu tenké povrchové vrstvy dochází k rychlému odvodu tepla z horké zóny do hloubky materiálu a tím k zakalení povrchové vrstvy materiálu. Žihání se uplatní zejména při lokální povrchové rekryсталizaci. Dojde-li při procesu k roztavení materiálu, jde o zpracování v tekuté fázi.

7.3. Laserová elektrotepelná zařízení

7.3.1. Laser

Mezi největší objevy 20. století patří objev laseru. Jeho název vznikl z prvních písmen anglického názvu *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, který vystihuje základní princip tohoto zařízení. Podle anglického názvu můžeme říct, že laser je zesilovač světla pracující na principu stimulované emise.

Laser je všeobecný název pro kvantové generátory elektromagnetického záření určitých, přesně definovaných vlastností, původně jen ve frekvenčním pásmu světla. Tento název se později přijal i pro kvantové generátory záření v jiných frek-

venčních pásmech, např. rtg záření, γ -záření. Pro aplikace v tepelných technologiích jsou vhodné lasery ve frekvenčních pásmech optického záření (v infračervené, viditelné nebo ultrafialové oblasti spektra), a proto se také pro lasery používá označení optický kvantový generátor.

Laser je generátor přísně monochromatického, velmi intenzivního a prostorově omezeného svazku světelných paprsků. Monochromatické záření je elektromagnetické záření jedné přesně určené frekvence. Optické záření generované laserem je soustředěné do velmi úzkého intervalu vlnových délek a je do značné míry koherentní. Koherentní světlo má v určitém místě a určitém okamžiku stejnou vlnovou délku a stejnou fázi. Běžné zdroje vyzařují světlo nekoherentní, laser je zdrojem světla koherentního. Samotný laser se vyznačuje vysokou zářivostí a malou rozbíhavostí (divergencí) laserového svazku.

Teorie laseru je založena na kvantovém popisu jak vlastního systému laseru, tak okolního prostředí. Abychom porozuměli, na jakém principu je založena konstrukce laseru, musíme se seznámit se základními poznatky atomové a kvantové fyziky. [10], [14], [19]

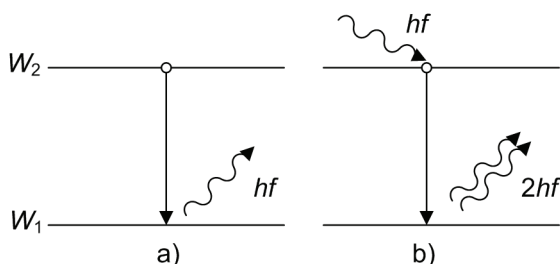
7.3.2. Fyzikální podstata laseru

Částice (atomy, molekuly, ionty, elektrony) nemohou mít jakoukoli energii, ale mohou se vyskytovat jen v určitých energetických stavech, na určitých energetických hladinách. Podle kvantové teorie může částice přijímat nebo vydávat energii jen skokově, v určitých kvantech. Např. elektromagnetická energie pole se může vyzařovat (emitovat, generovat) nebo pohlcovat (absorbovat) pouze po určitých minimálních kvantech – fotonech.

V základním stavu má částice nejnižší energii. Jestliže částici dodáme dostatečnou energii (např. zahřátím nebo ozářením), přejde z nižší energetické hladiny na vyšší, dojde k její excitaci neboli vybuzení. Způsob, kterým se elektrony dostanou (vybudí) na excitovanou hladinu se nazývá čerpání. V excitovaném stavu však částice zůstává jen velmi krátkou dobu a po vyzáření jednoho nebo několika fotonů se vrací do základního stavu. Při kvantovém přechodu ze stavu s vyšší energií W_2 do stavu s nižší energií W_1 ($W_2 > W_1$) předá částice rozdíl energií $\Delta W = W_2 - W_1$ okolnímu prostředí. V opačném případě částice energii ΔW přijme. Kvantové přechody částic mohou být zářivé nebo nezářivé. Zářivé přechody tvoří podstatu funkčních mechanismů v laserech. Při zářivém kvantovém přechodu je buď vyzařováno, nebo absorbováno kvantum energie (foton). V souladu s Planckovým zákonem je kvantum energie dáno podle (7.5) vztahem

$$\Delta W = h f, \quad (7.6)$$

kde h je Planckova konstanta, f je frekvence záření, které částice při přechodu z jedné energetické hladiny do druhé absorbuje nebo vyzáří. Částice, které jsou vybuzeny, představují tzv. aktivní částice. Na nižší energetickou hladinu mohou částice přeskočit dvěma způsoby, stimulovanou nebo spontánní emisí (Obr. 7.9).



Obr. 7.9: Spontánní emise a), stimulovaná emise b)

Lasery pracují na principu stimulované emise (Obr. 7.9b) elektromagnetického záření aktivních částic buzených vnějším zdrojem energie s frekvencí rovnou frekvenci některého kvantového přechodu. Směr šíření, frekvence, fáze i polarizace stimulovaného záření a stimulujícího (budícího) záření jsou shodné. Charakteristickým rysem stimulovaného záření je úzká spektrální čára, časová a prostorová koherence, vysoká směrovost a velká intenzita záření.

Naproti tomu při spontánní emisi (Obr. 7.9a) není nezbytná přítomnost vnějšího zdroje energie. Vybuzené částice přechází z vyšší energetické hladiny na hladinu s nižší energií samovolně. Směr šíření, fáze i polarizace vysílaného záření jsou náhodné.

Laser je zdroj záření s velkým výkonem. Velký výkon je pro činnost laserů velmi důležitý proto, aby se dosáhla převaha stimulované emise nad spontánní. Pravděpodobnost stimulované emise je úměrná počtu fotonů přítomných v systému, tj. intenzitě záření. Zvyšováním intenzity záření se tedy automaticky dosahuje převahy stimulované emise nad spontánní.

Základními technickými prvky laseru jsou:

- aktivní prostředí,
- optický rezonátor,
- zdroj budící energie.

Aktivní prostředí je soubor částic, které jsou schopné po přivedení energie z vnějšího zdroje generovat stimulované záření. Aktivním prostředím může být pevná látka (krytal, sklo, polovodič), plyn nebo směs plynů, kapalina.

Aby došlo k zesílení emise stimulovaného záření, je nutné, aby v aktivním prostředí byl přebytek aktivních částic. Jelikož jsou částice rovnoměrně rozptýleny v aktivním prostředí, je nutné, aby dráha, kterou proběhnou fotony byla co nejdelší. Proto se aktivní prostředí umísťuje do optického rezonátoru. Příkladem optického rezonátoru je Fabryův-Perotův rezonátor, což je optický systém tvořený dvěma rovnoběžnými, rovinnými, zpravidla skleněnými deskami v určité vzdálenosti, ve kterém dochází k mnohonásobnému odrazu a mnohosvazkové interferenci. Rezonátorem je zpravidla soustava dvou zrcadel (otevřený rezonátor). Jedno ze zrcadel má nulovou propustnost, celé záření odráží zpět, druhé zrcadlo je polopropustné a umožňuje, aby část záření opustila aktivní prostředí ve formě laserového paprsku. Vyzářování nastává pouze na rezonančních frekvencích použitého rezonátoru.

Zdroj budící energie, nebo-li zařízení sloužící k přečerpání elektronů, se volí podle druhu aktivního prostředí. Pokud je aktivním prostředím krystal nebo sklo, jsou vhodné optické zdroje, tj. xenonové nebo kryptonové výbojky, u nichž spektrum záření musí být shodné s aktivním prostředím. Pro plynové aktivní prostředí se používá elektrický výboj, generovaný buď jednosměrným napětím do 15 kV, nebo impulsním napětím až 40 kV s trváním až několik ms. Pro polovodičové aktivní prostředí se používá proud elektronů. Zdrojem budící energie mohou být i chemické reakce.

Aby se částice v aktivním prostředí laseru udržely ve vybuzeném stavu a měly zesilující efekt, je třeba splnit několik podmínek:

- 1) energetické stavy s energií W_2 musí mít více částic než energetické stavy s energií W_1 , tj. $N_2 > N_1$;
- 2) částice ve vybuzeném stavu musí zůstat delší dobu (až 10^{-3} s), tj. až 10^5 delší čas, než jakou mají vybuzené částice Jouleovým teplem (řádově 10^{-8} s);
- 3) částice aktivního prostředí laserů musí mít minimálně 3 energetické hladiny.

Pravděpodobnost, že foton vyvolá emisi, je stejná jako pravděpodobnost, že dojde k jeho absorpci. Pokud by nebyla splněna 1. podmínka, převažovala by absorpce nad emisí a původní záření by se nezesílilo, ale zeslabilo. Požadované rozložení částic je ale v tepelné rovnováze opačné, tj. stavy s větší energií jsou obsazeny řídkěji než stavy s menší energií. Proto se někdy říká, že pro činnost laseru je nutné vytvořit inverzní stav (inverzi). Jiná formulace této podmínky souvisí s teplotou, tj. pro činnost laserů jsou nevyhnutelné záporné absolutní teploty.

Vybuzený stav, ve kterém může částice setrvávat delší dobu, se nazývá metastabilní stav. Přechody mezi energetickými hladinami se řídí výběrovými pravidly a podle těchto pravidel jsou zářivé kvantové přechody z metastabilních stavů zakázány. Pravděpodobnost kvantového přechodu je malá, proto si částice v metastabilním stavu uchovávají excitační energii poměrně dlouhou dobu.

Pro vytvoření inverzního obsazení elektronů na energetických hladinách atomů a následné získání stimulované emise, musí mít částice aktivního prostředí alespoň tři energetické hladiny (Obr. 7.10a). Čerpání elektronů se uskutečňuje ze základní hladiny o energii W_1 na hladinu o energii W_3 . Životnost v tomto pásmu je velmi krátká a elektrony rychle přeskakují na hladinu s energií W_2 , kde zůstanou delší dobu. Elektrony jsou v metastabilním stavu. Rychlý přechod elektronů z pásma W_3 na metastabilní hladinu W_2 je charakteristický tím, že se uskutečňuje bez jakéhokoliv kvanta záření (nezářivý přechod). Vlastní stimulovaná emise se uskutečňuje mezi hladinami W_2 a W_1 . Hladina W_2 musí být od základní hladiny dostatečně vzdálena, aby nedocházelo k jejímu zaplňování v důsledku tepelných kmitů prostředí. Nedostatkem tříhladinového systému je principiálně malá účinnost vzhledem k tomu, že k dosažení inverze musí být ze základní hladiny vybuzena více než polovina částic. Činnost tříhladinového laseru proto vyžaduje velmi intenzivní čerpání.



Obr. 7.10: Systém tří a čtyř energetických hladin

Větší účinnosti se dosáhne využitím čtyřhladinového systému (Obr. 7.10b). Čerpání probíhá mezi hladinami $W_1 \rightarrow W_4$, kvantové přechody mezi hladinami $W_4 \rightarrow W_3$ a $W_2 \rightarrow W_1$ jsou rychlé, spontánní a nezářivé. Hladina W_3 je metastabilní. K emisi fotonů (laserovému záření) dochází mezi hladinami W_3 a W_2 . Na hladině W_2 je podstatně méně elektronů jako v základním stavu, a proto k dosažení inverze mezi hladinami W_3 a W_2 je potřeba méně energie. Pokud zvolíme dostatečně nízkou teplotu, aby elektrony byly v ustáleném stavu shromážděny jen na hladině W_1 a aby úroveň W_2 byla skoro prázdná, dosahuje se inverze podstatně snáze, jde o inverzi proti skoro prázdné hladině. Hladina W_2 musí být dostatečně vzdálena od základní hladiny, aby nedocházelo k jejímu obsazování v důsledku tepelných kmitů prostředí. Je zvolen takový systém, aby přímý přechod $W_3 \rightarrow W_1$ byl zakázán.

7.3.3. Typy laserů

Všechny lasery pracují na stejném principu, tj. stimulované emisi, ale mohou se lišit konstrukcí a vlastnostmi. Existují různá kritéria dělení. Podle použitého aktivního prostředí se lasery dělí na:

- pevnolátkové (např. rubínový, vláknový, Nd:YAG laser),
- plynové (He-Ne, CO₂, Ar, excimerový laser),
- polovodičové,
- kapalinové (laser s organickým barvivem).

Zvláštní druh tvoří lasery s volnými elektrony, kde jsou aktivním prostředím urychlené elektrony s energií 10 MeV až 10 GeV. Urychlené elektrony se pohybují v periodickém magnetickém poli, které nutí elektrony kmitat v příčném směru. Elektrony při svém pohybu po zakřivených drahách vyzařují elektromagnetické vlnění.

Podle druhu činnosti se lasery dělí na kontinuální a impulsní. Kontinuální laser pracuje v režimu trvalého vysílání laserového záření a impulsní laser v režimu impulsního vyzařování. Impulsní lasery dosahují vyšší výkonů, tj. $10^3 - 10^{16}$ W, výkon

kontinuálního laseru je $10^{-3} - 10^3$ W. Kontinuální lasery ale mají vyšší stupeň koherence a užší spektrální čáru, což je důležitá vlastnost pro některé speciální aplikace (např. holografie, interferometrie).

Podle počtu energetických hladin lze lasery dělit na tříhladinové (např. rubínový laser), čtyřhladinové (např. Nd^{3+}) a vícehladinové (např. plynové lasery).

Dalším kritériem dělení laserů může být např. vlnová délka, způsob čerpání částic (výbojka, elektrický výboj, proud elektronů, chemické reakce).

Pro elektrotepelné technologie se nejvíce uplatňují pevnolátkové a plynové lasery (CO_2 laser).

Pevnolátkové lasery

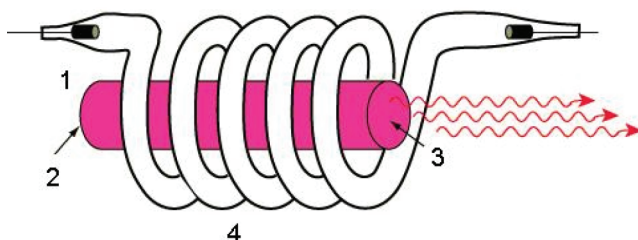
Aktivním prostředím pevnolátkových laserů jsou dielektrické krystaly nebo skla obsahující ionty vzácných zemin (Nd^{3+} , Er^{3+} , Ho^{3+} , Dy^{2+}) nebo přechodových prvků (Cr^{3+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Ti^{3+}).

Rubínový laser je první pevnolátkový laser, který zkonstruoval a uvedl do provozu Theodore H. Maiman v roce 1960. Aktivním prostředím je monokrystal rubínu ve tvaru válce, generující koherentní záření o vlnové délce 694,3 nm (červené světlo). Monokrystal rubínu ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,05\% \text{Cr}_2\text{O}_3$) má průměr kolem 1 cm a délku 5-10 cm. Jedná se o iontový laser, kdy aktivním prostředím jsou ionty chrómu, a k jeho funkci se využívá tři energetických hladin rubínu.

Pevnolátkové lasery jsou buzeny opticky. Základní otázkou buzení optických generátorů je využití dodaného světelného toku. Použité zdroje nejsou monochromatické, mají široké spektrum vyzařování, přičemž k buzení aktivního prostředí se využívá jen úzká část spektra. Pro impulsní provoz se používají xenonové výbojky různých tvarů (tyčové, spirálové). Pro kontinuální provoz jsou využívány bodové xenonové vysokotlaké výbojky.

Během působení dostatečně silného optického záření (asi 0,5-1 ms) absorbuje rubín přes absorpční pás žlutozelené, popřípadě modrofialové světlo. Tak se přečerpávají atomy chrómu ze základního stavu do stavu metastabilního. Čela rubínového válečku jsou pokryta materiálem s vysokým koeficientem odraznosti a tvoří zrcadla rezonátoru. Jedno ze zrcadel je totálně odrazné, druhé je polopropustné. Pokud jsou ztráty v rezonátoru menší, než je zesílení v aktivním prostředí, stane se rubín zdrojem stimulovaného záření. Toto záření se projeví krátkým zábleskem, vycházejícím z polopropustného čela Fabryova-Perotova rezonátoru, který je tvořen pokovenými čely rubínového výbrusu. Záblesk začíná se zpožděním za začátkem čerpacího impulsu xenonové výbojky a trvá obvykle 1-2 třetiny doby čerpacího impulsu výbojky.

Na Obr. 7.11 [20] je schéma jednoho z prvních rubínových laserů, kde je rubín buzen spirálovitou xenonovou výbojkou. Základem rubínového laseru je monokrystal rubínu (aktivní prostředí) 1, rezonátor 2, 3 a budící xenonová výbojka 4. Monokrystal rubínu a výbojka (popř. několik výbojek) jsou umístěny v budící dutině, která má nejčastěji tvar eliptického válce, v jehož jednom ohnisku je umístěna výbojka a ve druhém aktivní prostředí. Její vnitřní část je vysoce lesklá, odrazná plocha, aby se co nejvíce světla z výbojky dostalo do rubínu, tj. aby světlo výbojky bylo maximálně využito k buzení.



Obr. 7.11: Rubínový laser

Celková účinnost rubínových laserů je menší než 1 %. Většina energie se rozptýlí v krystalu ve formě tepla, dochází k posunu energetických hladin a k přerušení generace laserového záření. Proto je důležitou součástí rubínových laserů chlazení.

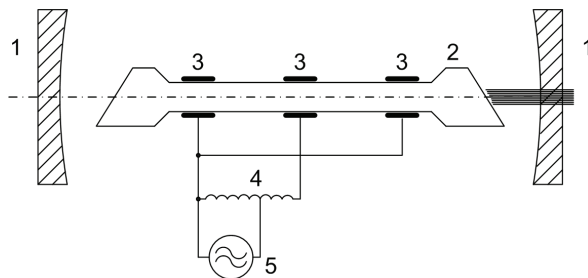
Nd:YAG laser je v současnosti nejrozšířenější pevnolátkový laser, jehož aktivním prostředím je krystal Nd:YAD. Generuje záření za pokojové teploty v impulsním i kontinuálním režimu v infračervené oblasti spektra (vlnová délka 1,064 μm).

Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů je v plynném stavu a inverze se dosáhne mezi energetickými hladinami některých složek plynu, tj. atomů (atomární laser), iontů (iontový laser) nebo molekul (molekulární laser). Existuje mnoho typů plynových laserů, mezi nejvýznamnější patří helium-neonový laser (He-Ne laser) vysílající záření o vlnové délce 632,8 nm, 1,15 μm nebo 3,39 μm a CO₂ laser (10,6 μm nebo 9,6 μm). První plynový laser (He-Ne) byl zkonstruován v roce 1961.

Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu, ale byly vyvinuty plynové lasery pracující v impulsním režimu. Rozbíhavost výstupního laserového svazku je menší než u pevnolátkových laserů a také šířky spektrálních čar jsou zpravidla mnohem menší. Nevýhodou je poměrně malá hustota částic v plynu, proto vysokovýkonové plynové lasery mívají buď velké rozměry, nebo rychlý průtok plynu bývá zajišťován optickým rezonátorem. Plynové lasery bývají buzeny nejen elektrickým výbojem, ale i chemickou reakcí, fotodisociací, rychlou expanzí plynu, průchodem svazku rychlých elektronů nebo opticky.

He-Ne laser je atomární plynový laser a aktivním prostředím jsou vybuzené aktivní atomy neonu, které jsou excitovány v doutnavém elektrickém výboji ve směsi budícího plynu, helia a neonu. Elektrony výboje předávají při nepružných srážkách část své kinetické energie vnitřním stavům atomů, a tím způsobí přechod na vyšší energetické hladiny. He-Ne laser může podle naladění rezonátoru generovat záření jak ve viditelné, tak i v infračervené oblasti spektra. Z konstrukčního hlediska se ustálily dvě varianty optického rezonátoru, vnitřní a vnější. Vnitřní optický rezonátor je umístěn uvnitř výbojové trubice, nevýhodou je ale postupné rozšívání povrchu zrcadel produkty výboje.



Obr. 7.12: Schéma He-Ne plynového laseru

U vnějšího optického rezonátoru (Obr. 7.12) jsou zrcadla 1 oddělena od výbojového prostoru, jsou umístěna vně trubice 2. Trubice (dlouhá asi 1 m) je ukončena okénky skloněnými pod tzv. Brewsterovým úhlem (úhel, při kterém dochází k polarizaci světla při odrazu), takže výstupní svazek je lineárně polarizovaný. Tím se zajistí, že elektrická složka pole má minimální ztráty na rozhraní sklo-vzduch. Pro každý laserový přechod je možné najít jiné optimální parametry výbojky, tj. vnitřní průměr, složení a tlak plynu. Trubice umožňující práci laseru na libovolném přechodu má průměr 5-10 mm, celkový tlak plynu v trubici je nízký asi 100-200 Pa, proud je 25-50 mA. V trubici jsou elektrody 3, mezi kterými vznikne čerpací výboj buď vysokofrekvenční (napájení přes autotransformátor 4, generátor 5 má výkon asi 100 W při frekvenci 27,12 MHz), nebo stejnosměrný (2 kV, 50 mA).

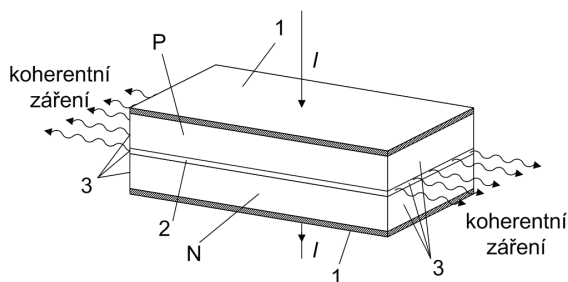
CO₂ laser je molekulární plynový laser, jehož aktivním prostředím je směs CO₂ N₂ a He při tlaku několika kilopascalů, generující infračervené záření. Pro tepelné aplikace se používá většinou tento typ laseru, patří mezi nejrozšířenější lasery vůbec. Má totiž ze všech laserů největší energetickou účinnost (asi 10-15 %) a dosahují se jím trvalé výkony až 30 kW. Konstrukce CO₂ laseru je tvořena výbojovou trubicí (vnitřní průměr několik cm) naplněnou uvedenou směsí, otevřený rezonátor (dvě zrcadla). K elektrodám je připojen vn zdroj, který udržuje podélný doutnavý výboj. Výstupní svazek vychází polopropustným zrcadlem. Existuje mnoho variant, nízkovýkonové typy (10⁻³ – 10 W) mají malé rozměry a velkou životnost. Pro výkony desítky až stovky wattů je trubice dlouhá i několik metrů. Výkony až desítky kilowattů se pak získávají ve velkoobjemových systémech. Výboj se napájí buď stejnosměrným proudem, nebo i přímo proudem střídavým ze sítě 50 Hz.

Polovodičové lasery

Funkce polovodičového laseru je založena na vzniku stimulované emise optického záření v polovodičích při kvantových přechodech elektronů z vodivostního do valenčního energetického pásu a existenci zářivé rekombinace nosičů náboje elektronů a děr.

Pro generování koherentního záření je zapotřebí zajistit, aby se v aktivním prostředí laseru dosáhlo inverze a dále, aby vznikla kladná zpětná vazba. Inverze se dosahuje nejčastěji injekcí nosičů náboje přechodem PN (injekční laser). Injekční polovodičové lasery umožňují přímou modulaci výkonu optického záření elektrickým proudem *I*. Kladné zpětné vazby se dosáhne úpravou polovodičové fotodiody do formy Fabryova-Perotova rezonátoru ohraničeného dvěma polopropustnými zrcadly (Obr. 7.13). Pro polovodičové diody jsou vhodné polovodiče s tzv. přímým

přechodem, u nichž probíhá zářivá rekombinace bez spoluúčasti kmitů krystalové mřížky.



Obr. 7.13: Základní uspořádání polovodičového laseru

Podstatou polovodičového laseru je světlo emitující dioda. V přechodu PN diody při průchodu proudu v propustném směru vzniká luminiscence – spontánní emise. Je-li přechodová vrstva umístěna v rezonátoru, nastává přechod k stimulované emisi, který je charakterizován zúžením spektrální čáry. Rezonátor je vytvořen vyteštěním čelních ploch.

Nejpoužívanějším polovodičovým laserem je laser s dvojitou heterostrukturou, jejímž základem je ternární polovodič (vytvořený ze tří materiálů) (GaAl)As, pracující v pásmu $0,7 \div 0,9 \mu\text{m}$ a prahový proud je řádově $10 \div 100 \text{ mA}$.

Typický výkon polovodičových laserů je řádu jednotek miliwattů při kontinuálním provozu za pokojové teploty a několikrát větší při impulsním provozu nebo nižších teplotách, typický mezní modulační kmitočet je řádu GHz. Polovodičové lasery GaAs generují záření v pásmu $0,84 \mu\text{m}$ a kvaternární InGaAsP v pásmu $1,3 \div 1,5 \mu\text{m}$.

7.3.4. Aplikace laseru

Využití laserů je obrovské, uplatnění našly ve většině oblastí lidské činnosti, nejen v průmyslu, ale i v lékařství, biologii, mikroelektronice, výpočetní technice, měřicí technice, ve vojenských aplikacích atd. Většina laserů, se kterými se lze běžně setkat, jsou lasery malého výkonu, např. laserová ukazovátka, laserové tiskárny, kopírky, optické mechaniky, zabezpečovací zařízení pro laserové efekty, ale lasery se také používají při přenosu informací.

Technologické využití laserů je založené na využití schopnosti laserů koncentrovat energii záření v prostoru, čase i spektrálním intervalu a na interakci záření s látkou. Optický svazek vystupující z laseru lze soustředit na malou plochu (průměr $10\text{-}100 \mu\text{m}$), což má za následek zvýšení intenzity optického záření na $10^{12} \div 10^{16} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Laserový paprsek je schopen opracovávat kovové i nekovové materiály. Další velkou předností použití laserů je možnost opracování bez mechanického kontaktu s materiálem, opracování obtížně přístupných míst a opracování materiálů, které běžnými způsoby nejsou možné.

Laserový ohřev principiálně znamená pohlcení laserového paprsku v ohřivaném materiálu a následná přeměna jeho energie na energii tepelnou

(technologické teplo). U kovů proniká paprsek laseru do hloubky pouze 10^{-7} - 10^{-8} m, teplo tedy vzniká v nepatrné povrchové vrstvě, odkud se šíří vedením. Záření laseru proniká téměř bezdrátově vzduchem i dalšími plyny. Proto lze ohřev provádět v libovolné atmosféře a dosti daleko od laseru. Ohřev laserem lze dobře řídit, a tím nastavit vhodné průběhy teplot a potřebnou hloubku. Rozhodující je měrný výkon paprsku a doba ohřevu (pohyb paprsku po povrchu). Čím vyšší je teplotní vodivost materiálu, tím rychleji se musí ohřát povrchová vrstva, aby se předešlo předčasnému vyrovnání teplot. Měrný povrchový příkon musí být tím větší pro danou hloubku, čím rychleji se teplo odvádí směrem do hloubky.

Při interakci záření s pevnou látkou se látka nejprve ohřeje, pak taví a nakonec dojde k jejímu odpaření. Tyto jevy jsou základem technologického využití laserů, které zahrnuje laserové řezání, vrtání, svaření, kalení, využití laserů v mikroelektronice, dekoraci skla laserem aj.

Pro laserové řezání jsou nejpoužívanější kontinuální CO_2 lasery se středním výkonem do 15 kW. V místě dopadu laserového paprsku se materiál taví a je z řezu odfukován proudem plynu. Přitom nevzniká téměř žádný odpad a materiál při řezání ani není třeba upínat, proto se tímto způsobem dají s vysokou přesností řezat i křehké nebo snadno deformovatelné materiály, například textil, papír. Pro řezání kovů (titan, oceli s nízkým obsahem uhlíku, nerezové oceli) se na místo řezání přivádějí reaktivní plyny (např. kyslík), pro nekovové materiály (keramiku, plast, dřevo) inertní plyn.

Laserové vrtání je založeno na odstraňování materiálu odpařováním. Používají se impulsní lasery s délkou impulsu menší než 2 ms, např. rubínový laser nebo Nd:YAG laser. Výhodou laserového vrtání je možnost vytvořit malé otvory o průměru 10-100 μm i v místech, kde je to pomocí jiných metod nemožné.

Při laserovém svařování se pomocí optického záření roztaví materiál do požadované hloubky. V porovnání s laserovým řezáním a vrtáním vyžaduje menší intenzitu záření optického svazku a větší délku laserového impulsu. Ve srovnání s ostatními podobnými technologiemi (pájení, obloukové a odporové svařování, svařování elektronovým svazkem) má laserové svařování řadu výhod: nedochází ke kontaktu s elektrodou, lokalizovaný ohřev a rychlé chladnutí, schopnost svařovat různé materiály a tvary, schopnost svařovat materiály v dané atmosféře nebo zatavené uvnitř optického transparentního materiálu. Laserové svařování dovoluje vytvářet i velmi jemné a kvalitní sváry, celý proces je možno řídit počítačem. Díky soustředění energie na nepatrnou plošku lze svařovat i materiály s vysokou teplotou tání. Nejčastěji se používá Nd:YAG lasery a kontinuální CO_2 lasery.

Kalením se ohřeje kov na tzv. kalící teplotu a po té se prudce ochlazuje. Tím získává lepší mechanické a fyzikální vlastnosti. Laserové kalení využívá k rychlému ohřevu optického záření laserů. Výhodou laserového kalení je možnost lokalizovaného tepelného zpracování i na místech, které jsou jinými způsoby nemožné a prakticky bezdeformační zpracování. Využívají se CO_2 lasery o výkonech několika kilowattů. Nevýhodou laserového kalení jsou relativně vysoké pořizovací náklady a malá energetická účinnost. Má ale mnoho výhod a zvláštností, k nimž patří především malé množství přiváděného tepla, dobrá regulovatelnost a možnost lokálního kalení, velmi rychle (během několika sekund) lze ohřát povrchovou vrstvu do hloubky několika desetin milimetru.

Využití laserů v mikroelektronice (např. laserové rýhování, laserové značkování aj.) je založeno na odstranění tenké vrstvy materiálu formou jeho odpaření, k čemuž dochází následkem ozáření laserovým paprskem. Lasery se používají např. k opravě polovodičových pamětí, kdy jsou laserem odpojeny poškozené obvody a místo nich připojené jiné. Laserem jsou opravovány také poškozené matrice pro litografii, odstraňovány nečistoty z povrchu materiálu atd. [10], [18]

Dekorace skla laserem je tepelné zpracování povrchu skla pomocí laserového záření. Kdy v místě dopadu záření dojde k částečnému odpaření skloviny a k jejich povrchovému popraskání. Na jejich hranách dochází k rozptýlu dopadajícího světla, a tím se docílí zářivého vzhledu. Pro dekoraci se používají lasery vyzařující infračervené světlo, které je sklem dobře pohlcováno, např. CO₂ lasery.

V praxi se používají impulsní rubínové lasery k vrtání tvrdých materiálů, v lékařství, v laserové lokaci družic atd. Nd:YAG laser má široké použití, v průmyslu se používá hlavně pro laserové obrábění, řezání, značení a svařování a také v medicíně, ve fyzice, v biologii, ve vojenských aplikacích. Polovodičové lasery nachází široké uplatnění v optoelektronice (optické vysílače) pro své malé rozměry a shodnost rozměrů svazku s rozměry optických elementů, zvláště vláknových, dále ve výpočetní technice (optické paměti), spotřební elektronice (přehrávače s kompaktními disky), robotice (senzory) aj.

7.4. Infračervená elektrotepelná zařízení

7.4.1. Infračervené záření

Infračervené záření (IR záření, zkratka z anglického infrared) je elektromagnetické záření, které se šíří přímočaře prostřednictvím kulové vlny. Vlnové délky leží v optickém pásmu, tj. v části elektromagnetického spektra, pro kterou platí zákony optiky. Jedná se zejména o Kirchhoffův zákon, Planckův zákon, Wienův zákon, Stefan-Boltzmannův zákon.

Infračervené záření je neviditelné elektromagnetické záření, jehož spektrum vlnových délek je v rozmezí $\lambda \in \langle 0,74; 2000 \rangle \mu\text{m}$, frekvenční rozsah je v rozmezí $f \in \langle 3 \cdot 10^{11}; 3,8 \cdot 10^{14} \rangle \text{ Hz}$. Tato oblast vlnových délek se někdy dělí na blízkou oblast (0,74-2,5 μm), střední oblast (2,5-50 μm) a dalekou (vzdálenou) oblast (50 μm až 2 mm). Infračervené záření s vlnovými délkami v blízké oblasti je způsobeno atomy plynu nebo ionty příměsi v krystalu při kvantových přechodech mezi excitovanými elektronovými stavy. Infračervené záření ze střední oblasti odpovídá kvantovým přechodům mezi vibračními stavy molekul, zatímco infračervené záření z daleké oblasti rotačním kvantovým přechodům molekul. Infračervené záření má vlnovou délku větší než viditelné světlo (0,38-0,78 μm), ale menší než je vlnová délka mikrovln (3 mm až 30 cm). Rozhraní jednotlivých oblastí nejsou striktně definována a v jiné literatuře se mohou lišit.

7.4.2. Princip vzniku infračerveného záření

Infračervené záření má výrazné tepelné účinky. Pro člověka je sice neviditelné, ale registrujeme je jako tepelný vjem. Povrchy těles zahřívá absorpce libovolného elektromagnetického záření, ale např. objekty při pokojové teplotě emitují

nejvíce záření v infračerveném pásmu 8-12 μm .

Princip vzniku infračerveného záření lze zjednodušeně popsat takto: Mějme těleso, které energii pouze vyzařuje – tzv. absolutně černé těleso. Dodáme energii (např. elektrickou), která způsobí zvýšení intenzity pohybu molekul tvořící těleso. Rychleji kmitající a vibrující částice mají teď více energie a mohou přecházet na vyšší energetické hladiny. V tomto stavu se dlouho neudrží, neboť se jedná o nestabilní stav. Při vzájemných srážkách molekuly přecházejí na nižší vibrační a rotační energetické hladiny a přebytečnou energii vyzařují do okolního prostředí jako záření. Energie, kterou částice při srážce ztratí, se rovná energii vzniklého kvanta záření. Hodně rozkmitané atomy a molekuly vyzařují vysokoenergetická kvanta, tj. viditelné světlo a UV záření. Málo rozkmitané molekuly vyzařují nízkoe-nergetická kvanta, tj. infračervené záření.

Infračervené záření budeme pro účely ohřevů označovat takové záření tuhých těles, jejichž elektromagnetické záření při dopadu na jiné těleso je více méně pohlceno a změněno na tepelnou energii, která způsobí ohřev takto ozářeného tělesa. Infračervené záření tedy vyvolává tepelné účinky po dopadu na pohlcující materiál, čímž tento materiál ohřívá. Další šíření tepla v materiálu je důsledkem procesů vedení tepla. Při nižších teplotách než 600 K je již záření velice slabé a začíná se uplatňovat ve větší míře přenos tepla prouděním. Infračervené záření proniká pouze do nepatrné hloubky materiálu vzhledem k vysokým frekvencím, při kterých se infračervené záření vyskytuje.

Zářivá energie je závislá na absolutní teplotě zářiče, velikosti plochy a emisivitě. Absolutní teplota povrchu zářiče rozhodujícím způsobem ovlivňuje infračervené záření. Aby se energie vyzařovala především v oblasti infračervené, je nutné teplotu udržovat maximálně do 2000 K, kdy infrazářič již začíná produkovat i část viditelného světla. Je třeba si uvědomit, že výkon infrazářiče se mění se 4. mocninou absolutní teploty. Tzn., že při změně absolutní teploty na polovinu klesne celkový vyzařený výkon 16krát. Zvýšení výkonu při stejné teplotě lze dosáhnout pouze zvýšením vyzařovací plochy, což může být v řadě případů složité. S plochou roste výkon přímo úměrně. Výkon infračerveného záření můžeme zvýšit i povrchovou úpravou zářiče, čímž změníme emisivitu.

7.4.3. Zdroje infračerveného záření

Zdroje infračerveného záření (infrazářiče) dělíme podle různých kritérií, podle způsobu generování infračerveného záření, podle teploty povrchu zářiče, resp. podle vlnové délky vyplývající z povrchové teploty, a tím i barvy povrchu zářiče:

- podle způsobu generování infrazářen

- zdroje teplotní – buzené Jouleovým teplem,
- zdroje výbojové – buzené elektrickým výbojem,
- radiotechnické,

- podle teploty (resp. vlnové délky) povrchu zářiče

- zdroje nízkoteplotní (dlouhovlnné) – $\vartheta_p = 400\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda_{\text{max}} = 3\text{-}4\text{ }\mu\text{m}$,
- zdroje středoteplotní (středovlnné) – $\vartheta_p = 700\text{-}1200\text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda_{\text{max}} = 2\text{-}3\text{ }\mu\text{m}$,

- zdroje vysokoteplotní (krátkovlnné) – $\vartheta_p = 1200-2500 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $\lambda_{\max} = 1-2 \text{ }\mu\text{m}$,

- podle barvy povrchu zářiče (vyplývající z povrchové teploty)

- tmavé zářiče,
- světlé (svítivé) zářiče.

Z infrazářičů (podle způsobu generování záření) mají praktické uplatnění především teplotní infrazářiče, které jsou buzeny Jouleovým teplem (průchodem proudem). Pokud se tepelná energie získává z elektrické energie, potom konverzní prvky nazýváme elektrické zdroje infračerveného záření (elektrické infrazářiče). Tento infrazářič má dva konstrukční prvky:

- aktivní prvek – např. wolframová spirála, která emituje záření,
- pasivní prvek – reflektor, který usměrňuje záření.

Reflektor jsou většinou tenké ocelové plechy s vysokou odrazností, která se dociluje vhodnou povrchovou úpravou (leštění, galvanické nanášení povlaků apod.). Pokud je zářič umístěn v baňce, reflexní vrstva může být nastříkaná na vnějším i vnitřním povrchu.

Princip elektrických infrazářičů je velmi jednoduchý. Elektrický proud prochází tělesem s vysokým odporem. Těleso se zahřívá a vyzařuje infračervené paprsky, které se šíří přímočaře prostorem. Teplo vzniká teprve při dopadu na vsázku a ohřívá ji. Na povrchu vsázky se energie infračerveného záření znovu mění na teplo. Jde tedy o dvojnásobnou přeměnu energie – tepelná-zářivá a zářivá-tepelná. Tato přeměna charakterizuje infračervený ohřev, je to nepřímý způsob ohřevu vsázky. Vzniklé záření se odráží do požadovaného prostoru pomocí reflexních ploch. [21], [22]

Tmavé elektrické infrazářiče patří do kategorie nízkoteplotních zdrojů, vyzařují při větších vlnových délkách. Do této skupiny patří např. elektrické sálavé panely.

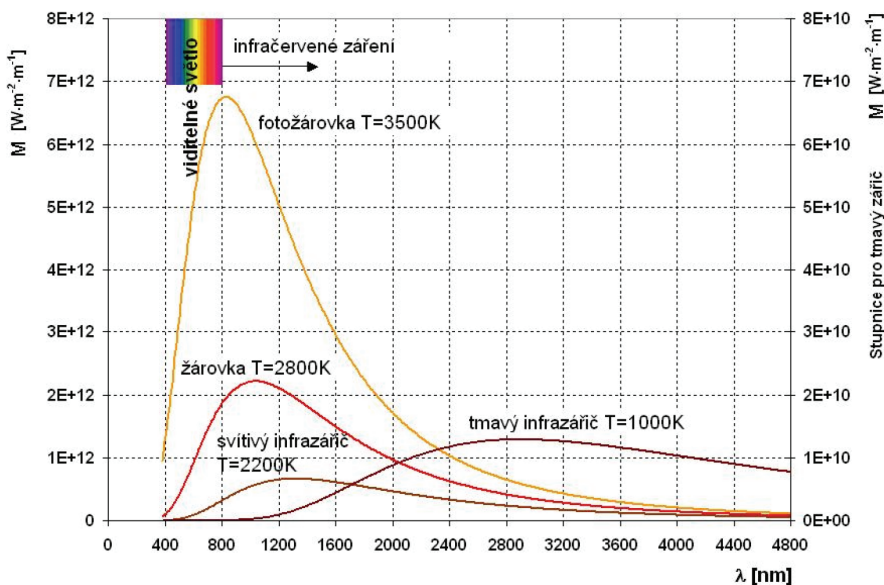
Světlé infrazářiče jsou vysokoteplotní a jsou tedy zdrojem krátkovlnného záření. Existuje mnoho konstrukčních typů těchto infrazářičů, jsou uvedeny jenom některé z nich:

- Infrazářič s kovovým pouzdem má Ni-Cr drát uložený v žáruvzdorné a elektricky izolační hmotě, která je obalena kovovou trubicí. Při plném napětí dosáhne pouzdro povrchovou teplotu 650 – 980 $^\circ\text{C}$.
- Infrazářič s reflektorovou žárovkou je vybaven wolframovým vláknem. Vláknem je uzavřeno v tepelně odolném, průhledném, mléčném nebo červeném skleněném obalu, který je zevnitř částečně postříbený, a tím tvoří účinný reflektor.
- Infrazářič s křemíkovou trubicí má stočený Ni-Cr drát, který je upevněn uvnitř nevakuované Si trubice, která je uzavřena porcelánovými nebo kovovými bloky.
- Infrazářič s trubicovitou Si lampou se skládá z trubice z taveného křemíku, která je naplněna inertním plynem. Uvnitř trubice je stočené wolframové vlákno, oddělené od stěn trubice tantalovými přepážkami.

Konce vlákna jsou uložena v utěšňovacím materiálu na koncích obalu. Vlákno pracuje při teplotách okolo 2230 °C, povrchová teplota obalu je cca 590 °C.

Mezi klasické světelné infrazářiče patří žárovky, které mají sníženou provozní teplotu vlákna (pod 2000 °C). Maximum záření se pohybuje na vlnové délce $1,2 \div 1,3 \mu\text{m}$. Tím se zvýší celkový podíl infračerveného záření a současně zvýší životnost ve srovnání s obyčejnou žárovkou. Obyčejná žárovka je nedokonalým světelným infrazářičem, až 88 % vyzařuje do infračervené oblasti a jen 12 % energie do světelné oblasti. Pro různé účely mají světelné infrazářiče ve tvaru žárovek baňky z různých druhů skel, např. z křemenného, rubínového, hořčíkového.

Intenzita záření je závislá na teplotě zářiče a vlnové délce záření. Zářivá energie je závislá na teplotě zářiče a na velikosti plochy zářiče. Snižuje-li se teplota pevného tělesa, posunuje se maximum křivky zářivosti v závislosti na vlnové délce směrem k větším vlnovým délkám. Podíl viditelného záření se zmenšuje a při teplotě asi 700 °C se záření nalézá jen v oblasti neviditelného spektra. Charakteristické průběhy záření v závislosti na vlnové délce pro některé typy zdrojů infračerveného záření jsou uvedeny na Obr. 7.14.



Obr. 7.14: Charakteristické průběhy záření pro základní typy infrazářičů [11]

7.4.4. Aplikace infračerveného ohřevu

Infračervená elektrotepelná zařízení se zhotovují buď s pracovní komorou, nebo bez ní, tj. buď jako pece, nebo ohříváče. Pece s infračerveným ohřevem jsou konstrukčně podobné odporovým pecím s nepřímým ohřevem, kde funkci klasických topných článků plní infrazářiče. Infračervené pece musí mít vnitřní stěny pece zhotovené a nebo upravené z materiálů o vysoké odraznosti. Jsou provozovány s přirozenou i řízenou atmosférou a také v prostředí technického vakuu.

Infračervený ohřev má široké použití především pro svou jednoduchost, spolehlivost a dobrou účinnost. Infrazářiče jsou používány především pro sušení laků v automobilovém průmyslu, sušení v průběžných pecích, v keramickém průmyslu, v textilním průmyslu apod. Ve všech případech jde o sušení velkých ploch malých tloušťek. V zemědělství se používá v podobě umělých líhni a při sušení zrna atd. Elektrické infrazářiče patří z hlediska předávání tepla sáláním k neefektivnějším způsobům vytápění. Okamžitě po zapojení infrazářiče do sítě se získá velmi efektivní zdroj vytápění.

7.5. Literatura

- [1] Aubrecht, V.: Fyzika a diagnostika plazmatu. Elektronická skripta. FEKT VUT v Brně, Brno 2002.
- [2] Boulos, M. I., Fauchais, P.: Thermal Plasmas. Fundamentals and Applications. Volume 1, Plenum Press, New York, 1994.
- [3] Chen, F. F.: Úvod do fyziky plazmatu. Academia, Praha, 1984.
- [4] Coalition for Plasma Science. <http://www.plasmacoalition.org>
- [5] Gross, B.: Technika plazmatu. Učební texty vysokých škol, VUT Brno, 1985.
- [6] Gross, B., Grycz, B., Miklóssy, K.: Technika plazmatu. SNTL, Praha 1967.
- [7] Houdková Šimůnková, Š., Enžl, R., Bláhova, O.: Žárové nástřiky moderní technologie povrchových úprav. 8.4. Plazmatický nástřík. Projekt FRVŠ 2003 [online]. http://www.kmm.zcu.cz/CD/content/8_4.html
- [8] Moderní technologie pro zpracování materiálů. Předmět Obecná technologie. SUPŠ Turnov. <http://konstrukce.webz.cz/sups/7too1.html>
- [9] Nanotechnologie na VŠB-TUO. Nanotechnologie [online]. 2007. <http://nanotechnologie.vsb.cz/>
- [10] Novák P.: Elektrické teplo. Základy a teorie elektrických ohřevů a aplikací. Equilibria, s.r.o., Košice, 2010.
- [11] Baxant P., Drápela J., Lázníčková I.: Elektrotepelná technika. Elektronické skriptum FEKT VUT v Brně, Brno, 2006.
- [12] Dupák J., Viček I.: Elektronové dělo pro svařování v přístrojové technice. Jemná mechanika a optika, roč. 44, 1999, p. 239–241, ISSN 0447-6441.
- [13] Hradílek Z.: Elektrotepelná technika. VŠB – TU Ostrava, Ostrava, 1996.
- [14] Rada J.: Elektrotepelná technika, SNTL, Praha, 1985.
- [15] Řasa J., Kerečaninová Z.: Nekonenční metody obrábění – 6.díl. Obrábění paprskem elektronů. MM Průmyslové spektrum, 2008, č.6, dostupné z <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-2>.
- [16] Zobač L.: Příručka pro uživatele svářeček. <http://ebt.isibrno.cz/knihy/prirucka>.
- [17] Zobač M.: Elektronový svazek v technologiích. <http://ebt.isibrno.cz/cs/elektronovy-svazek-v-technologieich>
- [18] Krempaský J.: Fyzika. Příručka pro vysoké školy technické. SNTL, Praha, 1988.
- [19] Vrbová M. a kol.: Oborová encyklopedie. Lasery a moderní optika. Prométheus, Praha, 1994.
- [20] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [21] Energetik.cz – Energetické centrum. <http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/vyuziti/infrazarice.html>
- [22] <http://www.kaspo.cz/vse- o-infravytapani/kde- se-vsude-daji-pouzit-infrazarice>.

8. Elektrické vytápění

8.1. Problematika tepelné pohody člověka v místnosti

Hlavním úkolem vytápění je zajistit v uzavřených místnostech příznivé tepelné poměry v chladném zimním období, kdy je venkovní teplota nižší než požadovaná teplota v místnostech a kdy také ostatní povětrnostní vlivy (např. vítr) způsobují ochlazování místností. Jde o zajištění tzv. tepelné pohody.

To znamená, že musí být dosaženo takových tepelných poměrů, aby se člověk cítil příjemně. Tepelnou pohodu člověka ovlivňuje jeho zdravotní stav, stáří, druh činnosti, kterou vykonává. Pocit dobré tepelné pohody je v podstatě dán rovnováhou tepelného režimu člověka, nutnou k udržení stálé teploty těla 37 °C.

Důležitou složkou tepelného režimu člověka je sdílení tepla z povrchu těla do okolí, které se řídí fyzikálními zákony, a lze je proto vyjádřit matematicky. Při látkových přeměnách probíhajících v lidském těle se uvolňuje určité množství tepla, které závisí především na intenzitě fyzické námahy a na hmotnosti člověka. Toto teplo musí být odváděno do okolí. Tepelná rovnováha, tj. stav, při kterém okolí odebírá lidskému tělu tolik tepla, kolik člověk právě produkuje, je proto prvním a nezbytným předpokladem tepelné pohody.

Lidské tělo je ochlazováno vedením, prouděním, sáláním a kromě toho také vypařováním potu a dýcháním. Při malé fyzické námaze je větší část tepla z povrchu těla odváděna prouděním a sáláním – suché ochlazování těla. Dosažení tepelné rovnováhy při suchém ochlazování, bez nadměrného pocení, je druhým předpokladem tepelné pohody člověka.

Jestliže stoupne teplota okolí nad určitou hranici nebo se zvětší produkce tepla při fyzické námaze, nedostačuje suché ochlazování a pro zajištění tepelné rovnováhy se nadbytečné teplo odvádí vypařováním – mokré ochlazování těla.

Podmínku tepelné rovnováhy lze obecně vyjádřit

$$\Phi_M = \Phi_V + \Phi_D + \Phi_K + \Phi_S \quad (8.1)$$

kde Φ_M je tepelný tok vyprodukovaný lidským tělem (W), Φ_V je tepelný tok odváděný vypařováním, Φ_D je tepelný tok odváděný dýcháním, Φ_K je tepelný tok odváděný konvekcí (prouděním), Φ_S je tepelný tok odváděný sáláním.

Tepelný tok konvekcí a sáláním prochází nejprve vrstvou oděvu, je jím veden, teprve na vnějším povrchu dochází k přestupu tepla do okolí.

Rovnice tepelné rovnováhy pak přejde na tvar

$$\Phi_M - \Phi_V - \Phi_D = \alpha \cdot S \cdot (T_h - T_r) = \Phi_K + \Phi_S \quad (8.2)$$

kde α je propustnost oděvu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), S celková plocha povrchu těla (m^2), T_h teplota povrchu těla (K), T_r teplota povrchu oděvu (K).

8.1.1. Tepelný stav prostředí

O tepelných pocitech člověka v uzavřených místnostech rozhoduje tedy několik faktorů stupeň fyzické námahy (vnitřní produkce tepla Φ_M), tepelně izolační schopnost oděvu (tepelná propustnost α), teplota okolního vzduchu ϑ_v , účinná teplota okolních ploch ϑ_p , vlhkost okolního vzduchu (relativní vlhkost), rychlost proudění vzduchu.

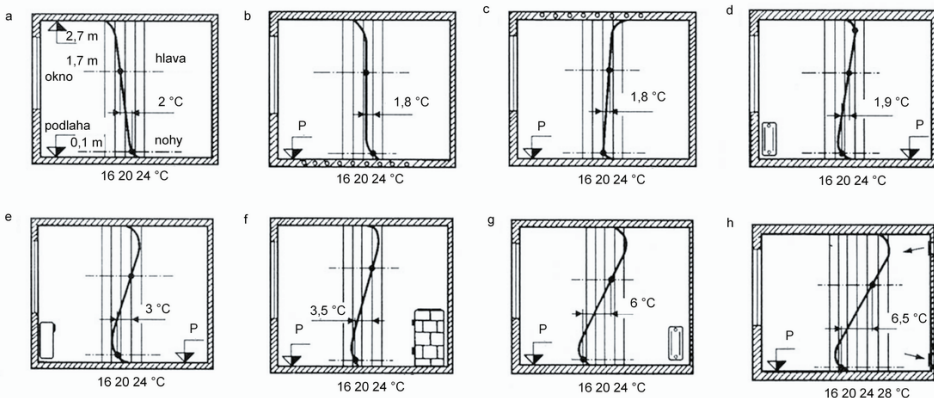
Faktory ϑ_v , ϑ_p , vlhkost a rychlost proudění vzduchu charakterizují tepelný stav prostředí, který se projevuje výsledným tepelným účinkem prostředí na člověka. Většinou se ale snažíme vyjádřit tepelný stav prostředí jedinou, snadno měřitelnou veličinou.

Teplota vzduchu v místnosti

K posouzení tepelného stavu nám poslouží především teplota vzduchu ϑ_v měřená v oblasti pobytu člověka. Teplotu vzduchu lze považovat za uspokojivé měřítko tepelného stavu prostředí tam, kde se jedná o prostředí téměř klidného vzduchu a kde se teplota okolních ploch jen nepatrně liší od teploty vzduchu. Za těchto okolností se teplota vzduchu také shoduje s výslednou teplotou ϑ_r .

Teplota vzduchu ϑ_v většinou není v celé místnosti stejná, a proto je nutné posuzovat taktéž její místní změnu, nerovnoměrnost. Velice důležitá je především vertikální nerovnoměrnost teploty vzduchu ve vytápěných místnostech, která vzniká vlivem nesteromerného přívodu tepla a nesteromerného ochlazování jednotlivých stěn, podlahy a stropů místností. Vertikální rozložení teplot v místnosti při různých způsobech vytápění je znázorněno na Obr. 8.1.

Z hlediska příjemného pocitu je rozhodující teplota dolní vrstvy vzduchu v místě nohou (ve výšce 0,1 m nad podlahou). Dále nás zajímá teplota vzduchu v úrovni hlavy (ve výšce 1,7 m nad podlahou) a následně pak rozdíl těchto dvou teplot, který má velký vliv na tepelnou pohodu v místnosti.



Obr. 8.1: Vertikální rozložení teplot v místnosti při různých způsobech vytápění

a- ideální vytápění, b- podlahové vytápění, c- stropní vytápění, d- teplovodní vytápění, e- konvektorové vytápění, f- lokální vytápění kachlovými kamny, g- teplovodní vytápění (radiátor na vnitřní stěně), h- teplovzdušné vytápění.

Ideální vytápění (Obr. 8.1a) je takové, kdy je teplota v místě nohou přibližně 21 °C a ve výšce hlavy stojícího člověka přibližně 19 °C. Z hlediska tepelné pohody by tedy neměl být rozdíl teplot v místě hlavy a v místě nohou větší než 2,0 °C u stojícího člověka a 1,5 °C u sedícího člověka. Pro jednotlivé způsoby vytápění je příslušný teplotní rozdíl vždy vyznačen na Obr. 8.1. Z obrázku je zřejmé, že z hlediska vertikálního rozložení teplot je nejvýhodnější podlahové vytápění (Obr. 8.1b).

Účinná teplota okolních ploch

Aby bylo možné posuzovat výsledný sálavý účinek okolních ploch jednou veličinou, zavádí se tzv. účinná teplota okolních ploch ϑ_p . Tato teplota je definována jako společná teplota všech okolních ploch, při níž by celkový tepelný tok sáláním mezi povrchem těla a okolními plochami byl stejný jako ve skutečnosti. Pro účinnou teplotu okolních ploch bude v případě, kdy se teploty jednotlivých okolních ploch příliš neliší, platit vztah

$$\vartheta_p = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot \vartheta_i \quad (8.3)$$

kde φ_i jsou poměry osálení jednotlivých okolních ploch plochou lidského těla (-), ϑ_i jsou teploty okolních ploch (°C).

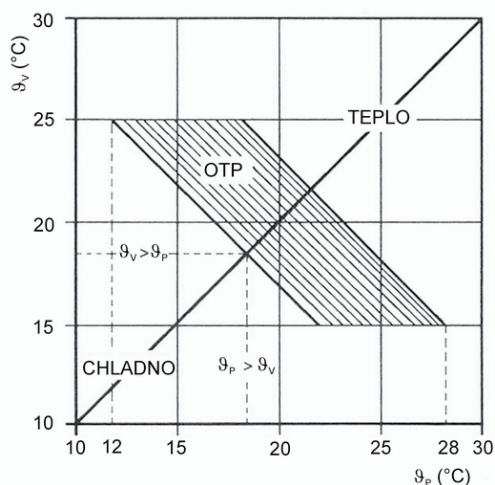
Účinná teplota tedy závisí na teplotách všech okolních ploch a na poměrech osálení, vztahených k ploše lidského těla. V praxi se však od tohoto požadavku upouští a hodnoty se vztahují k elementární kouli, bodu, umístěné obvykle uprostřed objektu.

Výsledná teplota prostředí místnosti

Vydeme-li ze vztahu pro tepelnou rovnováhu vyjádřenou pomocí tepelných toků k povrchu těla S a využijeme-li zjednodušení pro součinitele prostupu tepla konvekcí a sáláním $\alpha_k = \alpha_s$ (při proudění vzduchu rychlostí menší než 0,3 m·s⁻¹), dostaneme pro výslednou teplotu prostředí, potřebnou pro zajištění tepelné pohody, rovnici ve tvaru

$$\vartheta_i = 0,5 \cdot \vartheta_v + 0,5 \cdot \vartheta_p \quad (8.4)$$

Z toho vyplývá, že tepelná pohoda člověka závisí při dané vnitřní produkci tepla a dané tepelné propustnosti oděvu pouze na teplotě vzduchu a účinné teplotě okolních ploch. Poměr obou teplot ϑ_v a ϑ_p však nemůže být zcela libovolný. Předpokládá-li se, že v místnostech, kde se požaduje výsledná teplota $\vartheta_i = 18,5$ až 21,5 °C, má být teplota vzduchu ϑ_v v mezích od 15 do 25 °C, může se účinná teplota okolních ploch ϑ_p měnit v mezích od 12 do 28 °C. Tato „oblast tepelné pohody“ je názorně vyznačena šrafováním na Obr. 8.2. [1].



Obr. 8.2: Oblast tepelné pohody

8.2. Praktický výpočet otopných zařízení

Z hlediska dimenzování otopné soustavy je zapotřebí znát maximální hodnotu tepelných ztrát budovy, tj. množství tepla, které projde z vnitřního prostředí místností o teplotě ϑ_i do chladnějšího venkovního prostředí s teplotou ϑ_e . Na tuto nejvyšší hodnotu v roce je nutno otopnou soustavu dimenzovat. Při výpočtu tepelných ztrát se vychází z ČSN 06 0210 výpočet tepelných ztrát budov.

Vhodnost objektu pro elektrické vytápění se posuzuje na základě vypočtených tepelných ztrát a spotřeby tepla na 1 m^2 obytné plochy. Pro výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění jsou nutné tyto podklady

- situační plán, ze kterého je zřejmá poloha budovy vzhledem ke světovým stranám, výška a vzdálenost okolních budov, nadmořská výška místa stavby a převládající směr a intenzita větru,
- půdorysy jednotlivých podlaží budovy se všemi hlavními rozměry, včetně rozměrů oken a dveří, nejméně v měřítku 1:100,
- řezy budovou s udáním všech hlavních výšek (světlá a konstrukční výška místností, výška parapetů apod.),
- údaje o materiálech a konstrukci stěn, podlah, stropů a střech pro zjištění nebo výpočet součinitele prostupu tepla,
- údaje o materiálu a konstrukci oken a dveří potřebné k výpočtu tepelné ztráty prostupem a infilrací,
- údaje o využití jednotlivých místností pro určení vnitřní teploty ϑ_i ,
- popis zamýšleného způsobu vytápění jednotlivých místností.

8.2.1. Obecný postup výpočtu tepelných ztrát

Celková tepelná ztráta místnosti Φ_c podle ČSN 06 0210 se rovná součtu tepelné ztráty prostupem stěnami Φ_p a tepelné ztráty větráním Φ_v snižená o trvalé tepelné zisky Φ_z

$$\Phi_c = \Phi_p + \Phi_v - \Phi_z \quad (8.5)$$

Tepelná ztráta prostupem stěnami se určuje z tepelné (základní) ztráty připočítáním přírážek podle vztahu

$$\Phi_p = \Phi_o \cdot (1 + p_1 + p_2 + p_3) \quad (8.6)$$

kde Φ_o je základní tepelná ztráta prostupem tepla (W), p_1 je přírážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí (-), p_2 přírážka na urychlení zátopy (-), p_3 přírážka na světovou stranu (-).

Základní tepelná ztráta Φ_o je rovna součtu tepelných toků prostupem jednotlivými stěnami ohraničujícími vytápěnou místnost do venkovního prostředí nebo sousedních místností

$$\begin{aligned} \Phi_o &= \alpha_1 \cdot S_1 \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{e1}) + \alpha_2 \cdot S_2 \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{e2}) + \dots + \alpha_n \cdot S_n \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{en}) \\ &= \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot S_j \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{ej}) \end{aligned} \quad (8.7)$$

kde S_j je plocha ochlazované stěny (m^2), α_j je součinitel prostupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), ϑ_i je výpočtová vnitřní teplota ($^{\circ}C$), ϑ_{ej} je teplota na vnější straně j-té stěny ($^{\circ}C$).

Je-li u některé ze stěn teplota na vnější straně vyšší než teplota ve vytápěné místnosti, má tepelný tok touto stěnou zápornou hodnotu. V tomto případě jde o tepelný zisk Φ_z , který zmenšuje základní tepelnou ztrátu Φ_o .

V Tab. 8.1 jsou uvedeny hodnoty výpočtové vnitřní teploty ϑ_i pro různé typy místností.

Druh vytápěné místnosti	Vnitřní teplota ϑ_i ($^{\circ}C$)
obývací místnosti, jako obývací pokoj, ložnice, pracovny, dětské pokoje	20
kuchyně	20
koupelny	24
klozety	20
předsíně, chodby	15

Tab. 8.1: Hodnoty výpočtové vnitřní teploty ϑ_i pro různé typy místností

Přirážka na vyrovnání vlivu chladných stěn p_1 umožňuje zvýšení teploty vnitřního vzduchu tak, aby při nižší povrchové teplotě ochlazovaných stěn ϑ_p bylo ve vytápěné místnosti dosaženo požadované vnitřní teploty ϑ_i , pro kterou je základní tepelná ztráta počítána. Tato přirážka závisí na průměrném součiniteli prostupu tepla všech stěn místnosti α_c , který lze vyjádřit vztahem

$$\alpha_c = \frac{\Phi_o}{\sum S \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e)} \quad (8.8)$$

kde $\sum S$ je celková plocha všech konstrukcí, které ohraničují vytápěnou místnost (m^2), ϑ_e je výpočtová venkovní teplota pro určitou oblast daná normou ($^{\circ}C$).

Přirážku na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí p_1 lze pak stanovit ze vztahu $p_1 \sim 0,15 \cdot \alpha_c$ nebo přibližně určit z Tab. 8.2.

α_c ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	do 0,1	0,1 - 0,9	0,9 - 1,5	1,5 - 2,0
p_1	0	0,03 - 0,12	0,15 - 0,21	0,25 - 0,30

Tab. 8.2: Přirážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí p_1

S přirážkou na urychlení zátupu p_2 se v bytové výstavbě, nemocnicích apod. počítá jen v případech, kdy ani při nejnižších venkovních teplotách nelze zajistit nepřerušovaný provoz vytápění. Za normálních okolností se s přirážkou p_2 nepočítá. Pro přerušovaný provoz se volí podle doby vytápění takto $p_2 = 0,1$ při denní době vytápění delší než 16 hodin, $p_2 = 0,2$ při denní době vytápění kratší než 16 hodin.

O výši přirážky na světovou stranu p_3 rozhoduje poloha nejvíce ochlazované stavební konstrukce místnosti, při více ochlazovaných konstrukcích poloha jejich společného rohu. Hodnoty přirážky p_3 udává Tab. 8.3.

Sv. str.	J	JZ	Z	SZ	S	SV	V	JV
p_3	-0,05	0	0	0,05	0,1	0,05	0,05	0

Tab. 8.3: Výše přirážky p_3 podle světové strany

Tepelná ztráta větráním Φ_v vyjadřuje ztrátu tepla způsobenou přirozeným větráním infiltrací nebo při nuceném podtlakovém větrání a vypočte se, podle vztahu

$$\Phi_v = c_v \cdot V_v \cdot (\vartheta_i - \vartheta_e) \quad (8.9)$$

kde c_v je objemová tepelná kapacita vzduchu při teplotě $0^{\circ}C$, $c_v = 1300 J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$, V_v je objemový tok větracího vzduchu ($m^3 \cdot s^{-1}$).

Jak je vidět, výpočet tepelných ztrát budov podle ČSN 06 0210 je poměrně složitý. Pro předběžný odhad tepelných ztrát, při rozhodování o způsobu vytápění,

vystačíme s přibližným určením tepelných ztrát dle Tab. 8.4. Tabulka udává tepelné ztráty na 1 m³ vytápěného prostoru. Celková tepelná ztráta budovy je pak rovna součtu tepelných ztrát jednotlivých místností. [1]

Způsob ochlazování místností	Tepelné ztráty (W)
Střední místnost (z obou stran vytápěné místnosti):	
a) nad nevytápěným sklepem a shora chráněná vytápěnou místností	34 – 47
b) nad vytápěnou místností a shora též vytápěná místnost	30 - 40
c) nad vytápěnou místností a shora ochlazovaná půdou	37 - 53
Rohová místnost s okny v obou stěnách:	
a) nad nevytápěným sklepem a shora chráněná vytápěnou místností	40 - 58
b) nad vytápěnou místností a shora chráněná vytápěnou místností	35 - 49
c) nad vytápěnou místností a shora ochlazovaná půdou	44 - 65
d) nad nevytápěným sklepem a shora ochlazovaná půdou	47 - 73
Koupelna	40 - 80
Předsíň	15 - 30
Schodiště	18 - 35
Průměrná tepelná ztráta v 1 m ³ vytápěného prostoru rodinného domku	35 - 60

Tab. 8.4: Přibližné určení tepelných ztrát

8.2.2. Výpočet tepelných ztrát - Norma ČSN EN 12831

Norma stanoví postup výpočtu dodávky tepla nutné pro vytápění a dosažení potřebné vnitřní teploty. Novým prvkem je započítání tepelných mostů, naopak v normě není uvažováno s žádnými tepelnými zisky. To může být problémem při výpočtu u nízkoenergetických až pasivních domů.

$$\Phi_i = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} \quad (8.10)$$

kde Φ_i je tepelná ztráta prostupem a větráním (W), $\Phi_{T,i}$ je navrhována tepelná ztráta prostupem konstrukcí (W), $\Phi_{V,i}$ je navrhována tepelná ztráta větráním (W).

Tepelná ztráta prostupem a tepelné mosty

Navrhována tepelná ztráta prostupem se určí podle vztahu

$$\Phi_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (\vartheta_{int,i} - \vartheta_e) \quad (8.11)$$

kde $H_{T,ie}$ je tepelná ztráta prostupem přímo do venkovního prostředí (W·K⁻¹), $H_{T,iue}$ je tepelná ztráta prostupem přes nevytápěný prostor (W·K⁻¹), $H_{T,ig}$ je tepelná ztráta prostupem do zeminy (W·K⁻¹), $H_{T,ij}$ je tepelná ztráta prostupem přes prostor vytá-

pěný na výrazně jinou teplotu ($W \cdot K^{-1}$), $\vartheta_{\text{int},i}$ je výpočtová vnitřní teplota ($^{\circ}C$), ϑ_e je výpočtová venkovní teplota ($^{\circ}C$).

Pojem tepelný most je hlavní novinkou v nové normě a charakterizuje tepelnou ztrátu prostupující stěnou v místě styku dvou různých konstrukcí. Tepelný most je charakterizován lineárním činitelem prostupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) a také jeho délkou (m).

$$H_{T,ie} = \sum_k S_k \cdot U_k \cdot e_k + \sum_l \Psi_l \cdot l_l \cdot e_l \quad (8.12)$$

kde S_k je plocha stavební části v m^2 , e_k , e_l jsou korekční činitele vystavení povětrnostním vlivům (-), U_k je součinitel prostupu tepla stavební částí ve $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, l_l je délka tepelného mostu v m, ψ_l je činitel prostupu tepla tepelného mostu ve $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Tepelné ztráty větráním

Pro určení tepelné ztráty větráním se vychází z rovnice

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (\vartheta_{\text{int},i} - \vartheta_e) \quad (8.13)$$

kde $H_{V,i}$ je součinitel tepelné ztráty větráním ($W \cdot K^{-1}$).

$$H_{V,i} = 0,34 \cdot V_i \quad (8.14)$$

kde V_i je výměna vzduchu ve vytápěném prostoru ($m^3 \cdot h^{-1}$).

Pro určení V_i je důležitý zejména fakt, jestli se jedná o přirozené nebo nucené větrání. Při přirozeném větrání je dostatečná výměna vzduchu dána infiltrací obvodovým pláštěm budovy a hygienickým množstvím vzduchu, který se musí vyměnit.

$$V_{\text{min},i} = n_{\text{min}} \cdot V_i \quad (8.15)$$

kde n_{min} je minimální intenzita výměny venkovního vzduchu za hodinu (h^{-1}), V_i je objem vytápěné místnosti (m^3).

Minimální intenzita výměny vzduchu je pro základní obytnou místnost 0,5 a pro koupelnu 1,5 h^{-1} .

Navrhovaný tepelný výkon

$$\Phi_{\text{HL},i} = \Phi_{T,i} + \Phi_{V,i} + \Phi_{\text{RH},i} \quad (8.16)$$

kde $\Phi_{\text{HL},i}$ je navrhovaný tepelný výkon (W), $\Phi_{T,i}$ je tepelná ztráta prostupem konstrukcí (W), $\Phi_{V,i}$ je tepelná ztráta větráním (W), $\Phi_{\text{RH},i}$ je zátopový výkon nutný při přerušovaném vytápění (W).

Zhodnocení porovnání norem ČSN 06 0210 a ČSN EN 12831

Největší rozdíl v obou normách je tepelná ztráta přestupem konstrukcí, která se zejména odlišuje přítomností a nebo absencí tepelných mostů. Dalším prvkem, který normy rozděluje je u normy ČSN EN 12831 absence tepelných zisků ve výpočtu a to už buď trvalých (přítomnost osob) nebo proměnných (sluneční záření).

Je tedy nutné k výpočtu přistupovat velmi detailně, aby bylo zaručeno správné navržení zdroje tepla pro dodržení optimálního poměru investice k provozním nákladům, protože poddimenzováním se dosáhne úspory investic na úkor vyšších provozních nákladů a naopak [14].

8.2.3. Výpočet topného příkonu

Pro výpočet příkonu tepelného zdroje je rozhodující zvolený způsob elektrického vytápění, režim vytápění na jmenovitou, popřípadě tlumenou teplotu, způsob nuceného větrání. Skutečný instalovaný elektrický příkon topidel smí být vyšší oproti vypočtenému celkovému příkonu maximálně:

- a) o 20 % pro příkon do 50 kW,
- b) o 10 % pro příkony vyšší než 50 kW.

Jestliže vychází vypočtený příkon elektrického topidla v intervalu první třetiny rozdílu příkonu typové řady topidla, volí se typ s nižším příkonem. Výpočet topného příkonu má svá specifika pro každý způsob elektrického vytápění. V dalším textu rozebereme způsoby výpočtu topného příkonu zvláště pro přímotopné, akumulční a smíšené (hybridní) elektrické topné systémy.

Přímotopné elektrické vytápění

Příkon konvekčního nebo sálavého topidla P_k se stanoví ze vztahu

$$P_k = \Phi_c \cdot K \quad (8.17)$$

kde P_k je příkon konvekčního nebo sálavého topidla (W), Φ_c je celková tepelná ztráta objektu (W), K je koeficient průběhu vytápění, volí se hodnota 1,0 pro nepřerušovaný provoz, 1,1 pro topnou přestávku do 4 hodin, 1,2 u přestávky delší než 4 hodiny, 1,4 při občasném použití.

Akumulční elektrické vytápění

Při tomto způsobu vytápění se využívá odběr elektrické energie ve vybraných, zpravidla nočních hodinách (nabíjení od 22 do 6 hodin) a ve zdůvodněných případech ve vybraných denních hodinách (dobíjení po 2 hodinách a více). Příkon akumulčního tepelného zdroje lze stanovit z celkové denní potřeby tepla Φ_d , jejíž velikost závisí na celkových tepelných hodinových ztrátách Φ_c , požadované době vytápění na plnou teplotu t_v a době tlumeného vytápění t_t . Do doby vytápění t_v se zahrnuje i doba náběhu na požadovanou teplotu. Dimenzování elektrického příkonu je stejné pro souvislou i rozloženou nabíjecí dobu $t_n = 8$ hodin.

Provozní režimy vytápění pro výpočet příkonu zdroje tepla se stanoví z doby plného vytápění t_v na $\vartheta_1 = 20$ °C. Akumulční vytápění se navrhuje pro provozní

režim daný dobou t_v (h) kuchyně 10 h, kuchyně s jídelnou 12 h, obývací pokoje 14 h, dětské pokoje 14 h, ostatní místnosti 12 h.

Dimenzování akumulčních topidel se provádí podle vztahu

$$P_a = \Phi_d \cdot k_v \quad (8.18)$$

kde P_a je příkon akumulčního topidla (kamen) (W), k_v je součinitel provozu (h^{-1}) viz. Tab. 8.5.

Topná přestávka t_s (h)	Součinitel provozu k_v (h^{-1})		
	Dynamická s ventilátorem III.	Statická s regulační klapkou II.	Statická bez regulační klapky I.
0	0,14	0,18	0,20
2	0,15	0,23	---
4	0,17	0,31	---
6	0,19	(0,50)	---
8	0,22	(1,25)	---

Tab. 8.5: Hodnota součinitele provozu

Denní potřeba tepla

$$\Phi_d = \Phi_c \cdot t_v \quad (8.19)$$

Elektrické ústřední akumulční vytápění se navrhuje pro plné vytápění po 12 hodin. Zbývající denní provoz je buď tlumený, nebo přerušovaný. Celková denní potřeba tepla Φ_d pro teplovodní systémy se stanoví podle následujícího vzorce

$$\Phi_d = \Phi_{dd} + \Phi_{dn} \quad (8.20)$$

$$\Phi_{dd} = \frac{\Phi_c}{\eta} \cdot (t_{vd} + t_{td} \cdot f) \quad (8.21)$$

$$\Phi_{dn} = \frac{\Phi_c}{\eta} \cdot (t_{vn} + t_{tn} \cdot f) \quad (8.22)$$

kde Φ_{dd} je potřeba tepla v denní době (Wh), Φ_{dn} je potřeba tepla v noční době (Wh), t_{vd} je požadovaná doba vytápění na plnou teplotu v době denní (h), t_{vn} je požadovaná doba vytápění na plnou teplotu v době noční (h), t_{td} je požadovaná doba tlumeného vytápění v době denní (h), t_{tn} je požadovaná doba tlumeného vy-

tápění v době noční (h), f je koeficient vlivu stavební konstrukce, považuje se roven 0,3 pro těžkou, 0,4 pro středně těžkou a 0,5 pro lehkou konstrukci, η je účinnost topného zařízení 0,95.

Potřebný příkon se pak stanoví ze vzorce

$$P_a = \frac{\Phi_d}{t_n} \quad (8.23)$$

Smíšené (hybridní) elektrické vytápění

Smíšené vytápění sestává z akumulární a přímotopné části. Akumulační vytápění odebírá elektřinu nejvýše 8 hodin denně v noční době stanovené dodavatelem elektřiny. Přímotopné vytápění pracuje při nižších venkovních teplotách v denní mimošpičkové době (např. od 11 do 17 hodin).

Smíšené vytápění umožňuje připojit více elektrických vytápěcích zařízení k dosavadní rozvodné síti, neboť soudobost odběru je nižší než u čistě akumulárního vytápění. Důležité je i zmenšení rozměrů zařízení, a tím i snížení pořizovacích nákladů.

Návrh elektrického hybridního topidla se provádí zvlášť pro akumulární a zvlášť pro přímotopnou část.

$$P_h = 0,6 \cdot P_a \quad (8.24)$$

kde P_h je příkon hybridního topidla (W), P_a je příkon akumulárního topidla vypočítaný podle vztahu pro akumulární topidla a pro nabíjecí dobu $T_n = 8$ hodin (W).

Přímotopná část hybridního topidla se stanoví podle vztahu

$$P_{ph} = 0,4 \cdot P_a \quad (8.25)$$

Příkon přímotopné části však musí krytí nejméně 90 % tepelné ztráty místnosti. Ústřední akumulární zdroj tepla pro smíšené vytápění se dimenzuje na 60 % příkonu čistě akumulárního ústředního vytápění s osmihodinovou nabíjecí dobou. Příkon přímotopné části hybridního systému musí být nejméně o 10 % vyšší, než je tepelná ztráta místnosti, a rovná se asi polovině příkonu čistě akumulárního zdroje s osmi hodinami nabíjení [1].

8.3. Elektrické vytápěcí systémy

Nerovnoměrnost denního odběru, vyplývající z běžného životního rytmu člověka, vedla ke snaze využít volné elektrárenské kapacity v době mimo špičkové zatížení soustavy. To umožnilo nejprve zavádění akumulárních spotřebičů pro vytápění nebo přípravu teplé užitkové vody, které byly zapínány pouze v noci. Další vývoj však ukázal, že pouze s akumulárním teplem by možnosti elektrizační soustavy byly brzy vyčerpány, a proto dnes elektroenergetika nabízí i přímotopné a hybridní systémy.

8.3.1. Akumulační elektrické vytápění

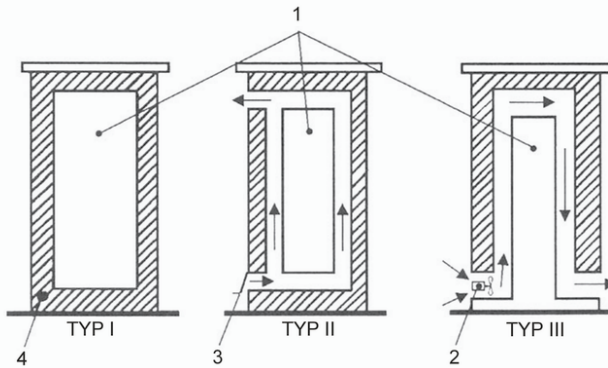
Při tomto způsobu vytápění se využívá odběr elektrické energie ve vybraných, zpravidla nočních hodinách (nabíjení od 22 do 6 hodin) a ve zdůvodněných případech ve vybraných denních hodinách (dobíjení po 2 hodinách a více).

Elektrická energie se přeměňuje na teplo v odporových topných člancích nebo kabelech, které jsou uloženy v akumulacním materiálu. Ten má tvar topidla, kotle nebo je betonovou částí stavební konstrukce, zpravidla podlahy. Vytápění vyžaduje spolehlivou znalost doby vytápění t_v na výpočtovou vnitřní teplotu ϑ_i , do které se zahrnuje i doba tzv. náběhu na plnou teplotu a doba tlumeného vytápění t_t .

Existuje několik možných způsobů elektrického akumulacního vytápění.

Akumulační topidla

Jako akumulacní materiál se užívá zpravidla magnezit a šamot. Podle konstrukčního provedení a způsobu sdílení tepla při vytápění místností (vybíjení topidla) se rozlišují tři typy akumulacních topidel tak, jak jsou znázorněny na Obr. 8.3 [12].



Obr. 8.3: Tři typy akumulacních topidel

1- akumulacní látka, 2- ventilátor, 3- regulační klapka, 4- tepelná izolace

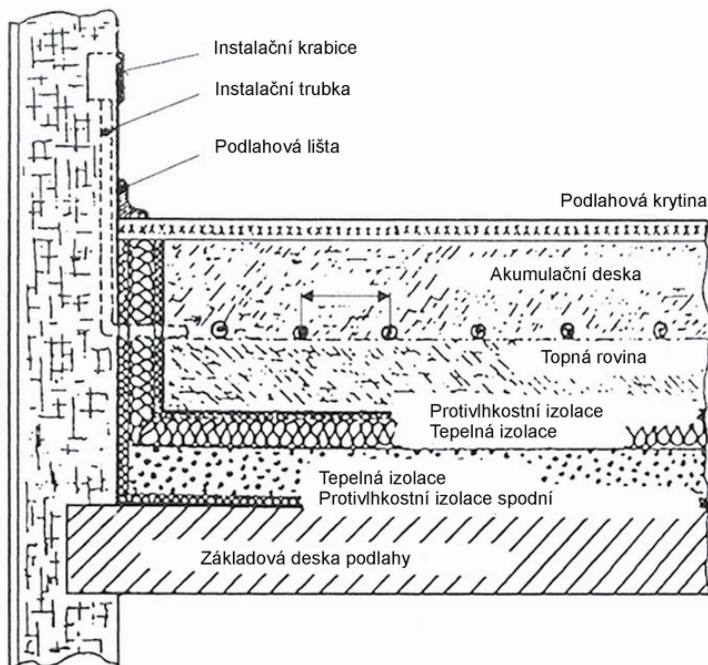
Ústřední elektrické akumulacní vytápění sestává z tradiční teplovodní otopné soustavy – z elektrického, zpravidla odporového zdroje tepla a z vodního akumulátoru. Teplo se z akumulátoru dopravuje do vytápěné místnosti. Potlačuje se tak základní zásada elektrického vytápění, kterou je přivedení energie až do vytápěné místnosti s maximální regulovatelností její přeměny.

Dalším možným typem akumulacního vytápění je tzv. velkoplošné podlahové akumulacní vytápění. Zdrojem tepla jsou topné kabely uloženy v betonové mazačině podlahové konstrukce. Povrchová teplota podlahy nemá překročit 25 °C. Podmínkou uplatnění vytápění je dlouhá životnost a její garance.

Ryze akumulacní soustava elektrického podlahového vytápění, nabíjená výhradně nočním proudem po dobu 8 hodin, je vhodná především pro nové a rekonstruované objekty využívané pouze v dopoledních hodinách, maximálně časných odpoledních hodinách. Pro celodenně vytápěné místnosti se příliš nehodí. Je cha-

rakteristická dobrou spodní tepelnou izolací (kombinace pěnového polystyrénu a minerální vláknité izolace) a zejména velkou tloušťkou akumulční desky (90 až 150 mm). Topná rovina s topnými kabely se umísťuje do spodní poloviny akumulční desky Obr. 8.4.

Tento systém má charakter jako statická akumulční kamna a vzhledem k tepelné setrvačnosti akumulční vrstvy a teplotnímu omezení nášlapné vrstvy je vhodné jej doplnit vhodným přímotopným systémem, který umožní pružnou regulaci požadované teploty.



Obr. 8.4: Akumulční elektrické podlahové vytápění

8.3.2. Přímotopné elektrické vytápění

Skládá se z rozvodu, z přímotopných topidel s topnými tělesy nebo elektrodami a z regulačního obvodu pro zajištění optimálního cyklu vytápění. Podle umístění zdroje tepla a způsobu sdílení tepla můžeme elektrické přímotopné systémy rozdělit takto:

Lokální

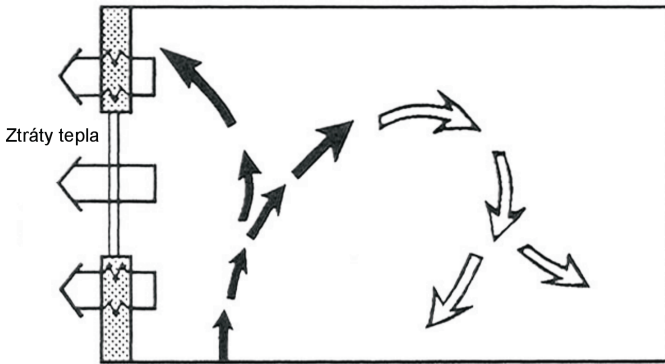
- konvektory a teplovzdušná topidla,
- elektrické podlahové topné kabely,
- sálavé topné systémy.

Centrální

- teplovodní elektrické kotle.

Konvekční elektrické vytápění

Konvektory jsou elektrická topidla, která přeměňují veškerou přivedenou elektrickou energii na teplo. Spodní částí přichází do konvektoru studený vzduch z horní části odchází ohřátý vzduch, který pak přirozenou cirkulací vyhřívá celou místnost Obr. 8.5.



Obr. 8.5: Cirkulace vzduchu v místnosti

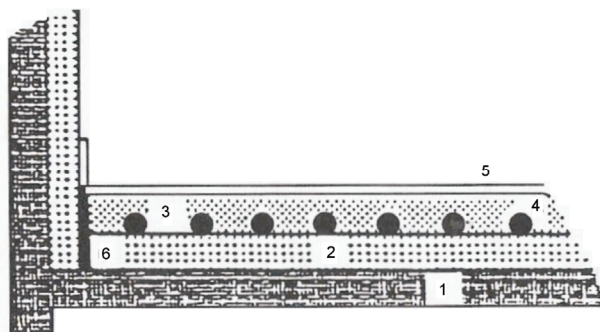
Konvekční topidla s přirozenou konvekcí jsou pojízdná, přenosná nebo určená k pevné instalaci na stěnu. Jsou to buď radiátory s ohřivanou náplní, zpravidla olejovou, nebo konvektory s topným odporem. Jde většinou o trubkové topné těleso z nerez oceli s nalisovanými hliníkovými lamelami, upravené pro tichý provoz. Okolní vzduch se ohřívá přirozeným prouděním kolem topného tělesa. Moderní konvektory jsou vybaveny kvalitní regulací s možností centrálního řízení jejich provozu. Konvekční topidla s nucenou konvekcí jsou přenosné nebo nástěnné přímo-topné spotřebiče, ve kterých je kolem topných odporů vzduch proháněn za pomoci ventilátoru.

Podlahové vytápění topnými kabely

Velkoplošné podlahové systémy, zhotovené zalitím speciálních elektrických topných kabelů do betonové podlahy jsou na Obr. 8.6, jsou oblíbené především pro vysokou účinnost, rovnoměrné rozložení tepla po celé ploše, výborné využití vytápěného prostoru, poměrně snadnou realizaci a vytvoření tepelné pohody při nižší teplotě vzduchu než např. u konvektorů.

Sálavé elektrické vytápění

Zatímco u konvekčního vytápění je tělesem ohříván především vzduch, který předává teplo při proudění po povrchu ohřivaného předmětu, u sálavého vytápění dochází k přenosu tepla hlavně zářením Obr. 8.7. Každé těleso vyzařuje do svého okolí elektromagnetickou energii. Ze široké škály vlnových délek nás zajímají jen ty, které mohou předměty pohlít a změnit v energii tepelnou.



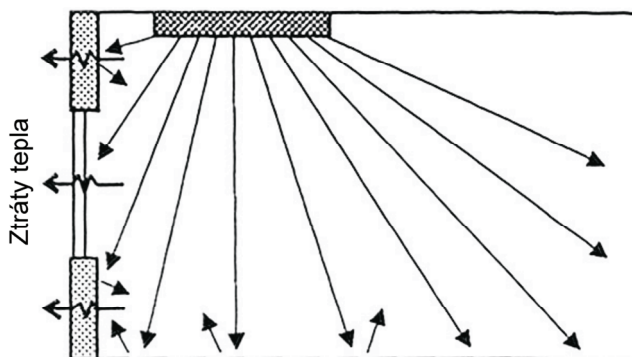
Obr. 8.6: Podlahové vytápění topnými kabely

1- podkladový beton, 2- polystyren (asi 40 mm), 3- betonová vrstva (30-50 mm), 4- topné kabely, 5- dlažba, 6- napojení izolace

Sálavá topidla mohou být infračervené zářiče, jejichž topné těleso má povrchovou teplotu vyšší než 250 °C a sálání je usměrněno reflektorem ve stanoveném směru.

Nízkoteplotní sálavé vytápění se zabezpečuje sáláním povrchu ploch zahřátých na 25 až 40 °C. Na strop a stěny se zpravidla upevňují speciální fólie nebo panely. V takto vytápěné místnosti je nižší teplota vzduchu a vyšší relativní vlhkost než při vytápění konvekčními otopnými tělesy. Také spotřeba energie je nižší, především z důvodu vytápění na nižší požadovanou teplotu v místnostech. Úspora energie oproti konvekčnímu vytápění se pohybuje zhruba mezi 18 až 24 %.

Použití sálavých panelů je velmi široké. Jsou určeny pro vytvoření tepelné pohody dílen o světlých výškách do 3,2 m, pro chov ušlechtilých zvířat, temperování skleníků apod. Pro vytápění bytových prostor jsou určeny panely s nižšími jmenovitými příkony.



Obr. 8.7: Sálavé elektrické vytápění

Vytápění pomocí teplovodních elektrokotlů

Elektrokotle je možné využít pro vytápění novostaveb, ale jsou taktéž velice vhodné jako náhrada kotlů na pevná paliva v systémech ústředního teplovodního vytápění rodinných domků a řadovek.

Teplovodní elektrokotle – topným médiem je voda, která je ohřívána v uzavřené nádobě, kotli, ze které je pak rozvedena trubkami do radiátorů či podobného zařízení v jednotlivých místnostech. Ohřev vody v kotli je zajišťován buď topnými tělesy založenými na odporovém principu, tedy klasický odporový kotel, nebo pomocí elektrod – elektrodový kotel, ve kterém teplo vzniká průchodem elektrického proudu vodou (elektrolytem) mezi elektrodami.

8.3.3. Smíšené (hybridní) elektrické vytápění

Smíšené vytápění se skládá z akumulační a přímotopné části. Akumulační vytápění odebírá elektřinu nejvýše 8 hodin denně v noční době stanovené dodavatelem elektřiny. Přímotopná část vytápěcího systému pracuje při nižších venkovních teplotách v denní mimošpičkové době. Lze předpokládat, že v budoucích letech najde tento způsob elektrického vytápění mnohem více uživatelů, než tomu bylo doposud.

Smíšené otopné systémy mohou být navrženy takto:

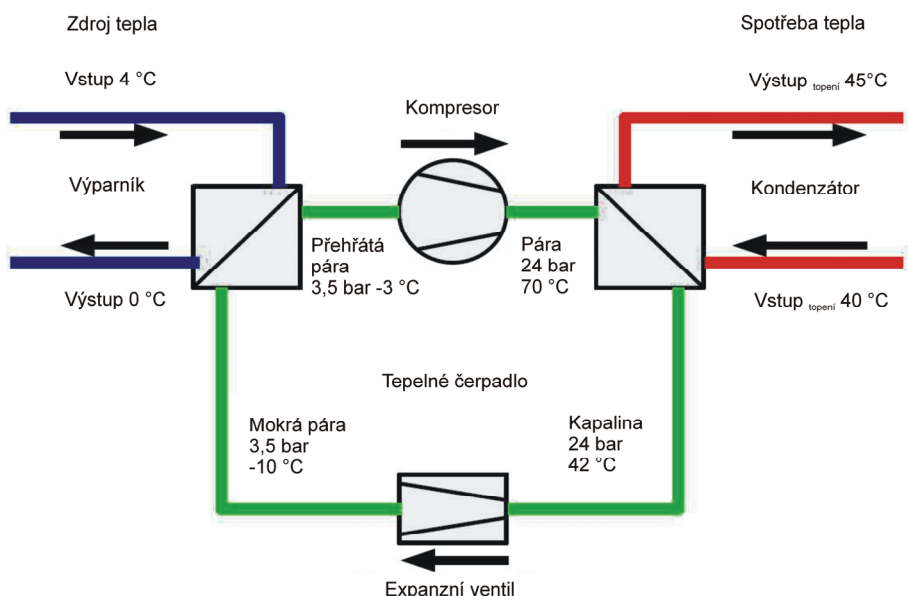
- elektrické hybridní topidlo,
- kombinace ústředního akumulačního vytápění s přímotopnými topidly,
- kombinace velkoplošného podlahového akumulačního vytápění s přímotopnými topidly.

Smíšené vytápění umožňuje připojit více elektrických vytápěcích zařízení k dosavadní rozvodné síti, neboť soudobost odběru je nižší než u čistě akumulačního vytápění. Důležité je i zmenšení rozměrů zařízení, a tím i snížení pořizovacích nákladů.

Ústřední akumulační zdroj tepla pro smíšené vytápění se dimenzuje na 60 % příkonu čistě akumulačního ústředního vytápění s osmihodinovou nabíjecí dobou. Příkon přímotopné části musí být nejméně o 10 % vyšší, než je tepelná ztráta místnosti, a rovná se asi polovině příkonu čistě akumulačního zdroje s osmi hodinami nabíjení [1].

8.4. Tepelná čerpadla

Princip činnosti tepelného čerpadla je shodný s obrácenou činností kompresorové chladničky. Výparník odnímá teplo z prostředí s relativně nízkou teplotou a přenáší jej do vytápěcí soustavy s vyšší teplotou prostřednictvím kondenzátoru. Jde o uzavřený Carnotův cyklus viz. Obr. 8.8.



Obr. 8.8: Princip funkce tepelného čerpadla

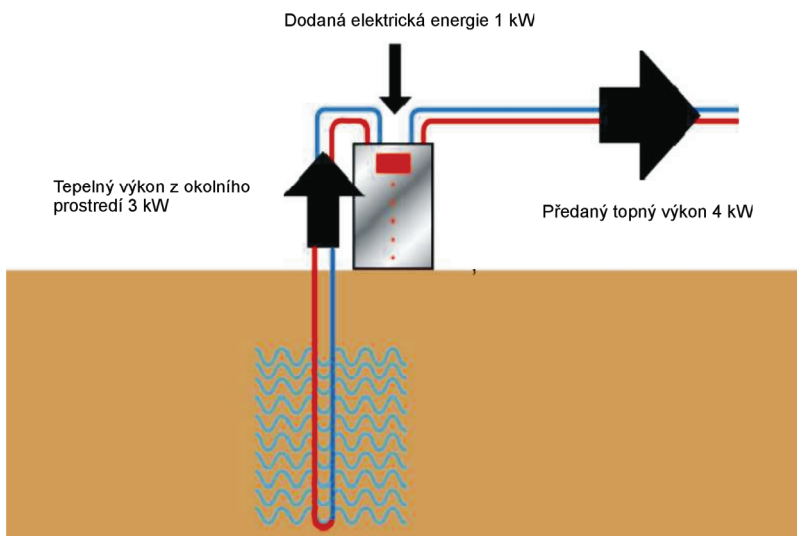
Teplosné médium se odpařuje při nízkém tlaku ve výparníku. Potřebné teplo k odpařování se odnímá z okolí – z vody potoka nebo ze spodní vody, ze země, z venkovního vzduchu. Páry se nasávají do kompresoru a stlačují. Stlačením značně ohřáté páry se vedou do kondenzátoru, kde je jim teplo odnímáno. Páry v kondenzátoru kondenzují a odevzdávají výparné teplo topné soustavě. Zkondenzované médium se vede z kondenzátoru přes expanzní ventil zpět do výparníku. Protože je v něm nízký tlak, médium se začne prudce odpařovat při nízké teplotě, když odnímá teplo. Celý cyklus se opakuje. Do tohoto tepelného cyklu se část energie dodává přes kompresor stlačováním, větší část je však odnímána z prostředí s nízkou teplotou (tekoucí voda, ovzduší atd.) a přenášena do prostředí s teplotou vyšší, vytápěného prostoru. Kompresor vlastně slouží k transformaci teploty teplosného média při přenosu tepla.

U tepelného čerpadla se udává výkonové číslo, které se vypočítá podle vzta-
hu

$$\varepsilon = \frac{P_p}{P_d} \quad (8.26)$$

kde ε je výkonové číslo (-), P_p je výkon předaný do topného systému (W), P_d dodaný elektrický výkon (W).

Výkonové číslo je větší než 1, pohybuje se mezi 1 až 6. Záleží na vlastní účinnosti kompresoru s jeho motorem, na teplosném médiu a hlavně na rozdílu teplot ve výparníku a kondenzátoru. S rostoucím rozdílem těchto teplot klesá. V praxi není teplota výparníku nižší než 0 °C, jinak se zhoršuje přestup tepla tvořící se námrazou, teplota v kondenzátoru je nejvýše 60 °C až 75 °C.



Obr. 8.9: Princip topného faktoru tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo ochlazuje okolí výparníku, proto musí být umožněn přístup nového tepla. Ideální je umístit výparník v tekoucí vodě. Rozměrově vyjde výparník pro tekoucí vodu malý. Výparník umístěný v zemi vyjde zhruba se stejnou plochou, jako je plocha vytápěných místností, pro výparník umístěný ve vzduchu je potřebná plocha ještě větší. Z kondenzátoru tepelného čerpadla se užité teplo odebírá obvykle vodou, která se s teplotou 45 °C až 50 °C rozvádí do velkoplošných radiátorů ve vytápěných místnostech.

Tepelná čerpadla se osvědčují ve velkých jednotkách (řádově stovky kilowattů až megawattů). Mimořádně výhodná je kombinace umělá lední plocha – tepelné čerpadlo – plavecký bazén. Výparník ochlazuje plochu kluziště a kondenzátor ohřívá vodu v bazénu [1].

8.4.1. Druhy tepelných čerpadel

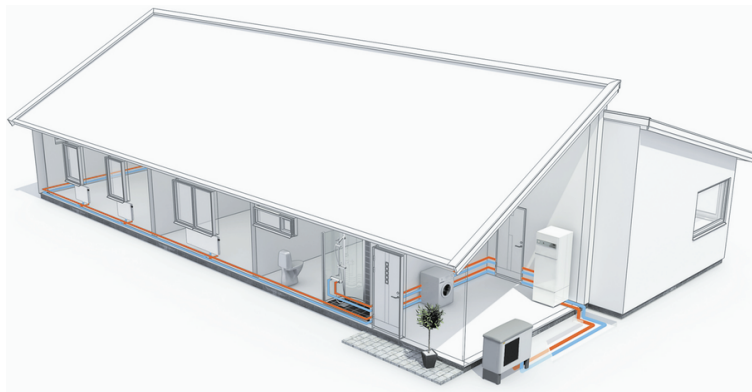
Druhy tepelných čerpadel jsou definovány dvou slovným názvem vzájemně odděleným lomítkem, kde první definuje přírodní zdroj tepla pro tepelné čerpadlo a druhé nosné médium, které předává teplo do objektu.

Vzduch-voda

Tepelná čerpadla vzduch-voda nevyžadují nákladné zemní práce, a proto jsou investičně podstatně méně náročné. Nevýhodou je poměrně silná závislost na teplotě okolního vzduchu v průběhu celého roku. Zvyšuje-li se teplota venkovního vzduchu, roste i výkon tepelného čerpadla a naopak. Důsledkem toho je nutná instalace výhradně v tzv. bivalentním provozu, kdy při kriticky nízkých teplotách se zajišťuje potřebná tepelná energie z náhradního zdroje [5],[6].

Odpadní vzduch – odpadním vzduchem se zde rozumí vzduch odváděný větracím systémem objektu. Zde je relativně vysoká teplota, a proto je vněm akumu-

lováno velké množství energie. Spotřeba tepla na ohřev větracího vzduchu tvoří třetinu až polovinu celkové spotřeby tepla na vytápění. Množství větracího vzduchu je zpravidla omezené, a proto je i zde zapotřebí nasazení bivalentního provozu.



Obr. 8.10: Tepelné čerpadlo typu vzduch-voda [7]

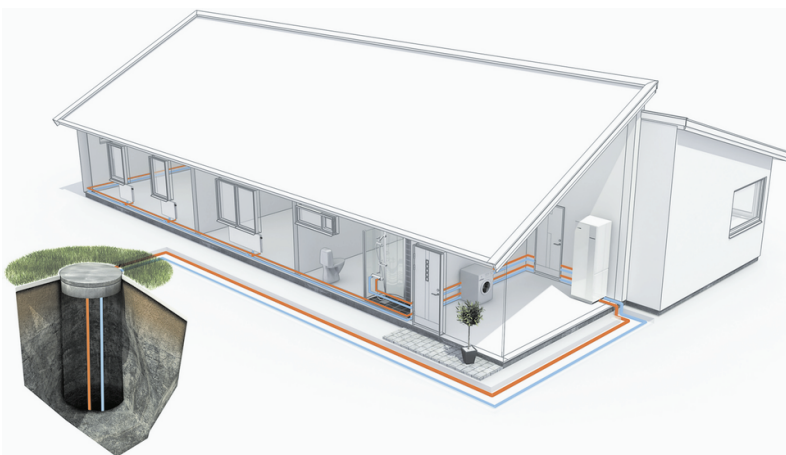
Vzduch-vzduch

Vzduch je médiem, které odebírá teplo z vnějšího okolí, a následně je tepelný výkon předáván vnitřnímu vzduchu objektu. Instalace těchto čerpadel se objevuje jen zřídka. Své uplatnění nachází v menších objektech (chaty, chalupy). Často se využívají jako rekuperační zařízení, avšak jejich systém je již složitější [5].

Země-voda

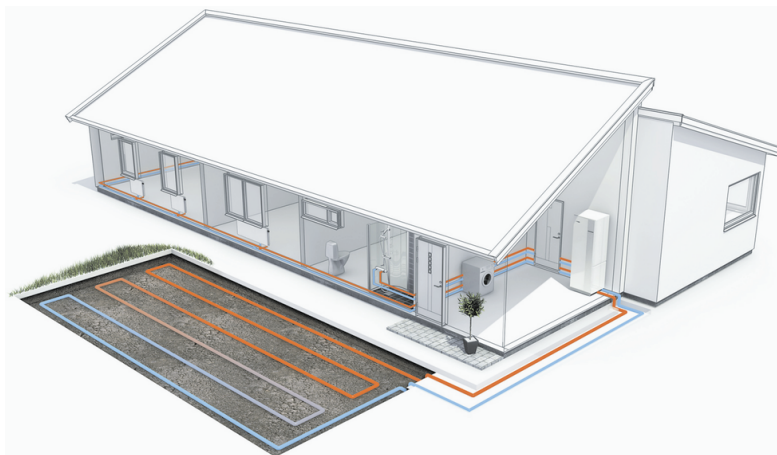
U tepelných čerpadel země-voda se získává tepelná energie ze zemské půdy a topným jednotkám je předávána prostřednictvím vody cirkulující v sekundárním okruhu. Jedná se o nejstabilnější tepelná čerpadla a jsou schopna při správném návrhu zajistit dostatek energie v průběhu celého roku. Hlavní nevýhodou jsou zemní práce, které jsou nezbytnou součástí instalace. To má dopad na navýšení pořizovacích nákladů. Podle způsobu čerpání energie z primárního okruhu se lze s těmito tepelnými čerpadly setkat v provedení s geotermálním vrtem nebo plošným kolektorem [6].

Geotermální vrt – tato tepelná čerpadla využívají nízkopotenciální energii uloženou v zemi. S rostoucí hloubkou roste i velikost teploty hornin. Hloubka vrtu se pohybuje maximálně do 150 m. Není-li vrt schopen zajistit požadovanou energii, navrhuje se více vrtů pro jeden společný systém. Z důvodu dostatečně vysoké teploty se doporučuje minimální hloubka 50 m. S moderními technologiemi není realizace tohoto vrtu náročná, ale je zpravidla nejnákladnější investicí v rozpočtu celého tepelného čerpadla. Výhodou je, že se nevyžaduje velká nezastavěná plocha, jak je tomu v případě plošných kolektorů. Další předností je nezávislost provozu na vnějších klimatických podmínkách, z čehož vyplývá možnost nasazení téměř ve všech oblastech (teplota vrtu se pohybuje okolo 10 °C po celý rok). Na 1 kW výkonu tepelného čerpadla je potřeba 12 až 18 m hluboký vrt, což pro 10 kW tepelné čerpadlo odpovídá hloubce cca 140 m (nebo 2 x 70 m) [5].



Obr. 8.11: Tepelné čerpadlo s geotermálním vrtem [7]

Plošný kolektor – zde se využívá naakumulovaná sluneční energie uložená pod povrchem země. Výkopy pro uložení primárního okruhu vyžadují poměrně náročné a zdoluhavé práce, ale ve srovnání s geotermálními vrty se dají pořídit poměrně levně. Využívání pozemku nad tímto kolektorem je v mnoha případech omezené a je nezbytné to mít na vědomí. Oproti geotermálnímu vrtu se zde dosahuje nižšího topného faktoru a navíc v průběhu roku jeho hodnota kolísá, neboť kolísá i teplota zeminy [5],[6].



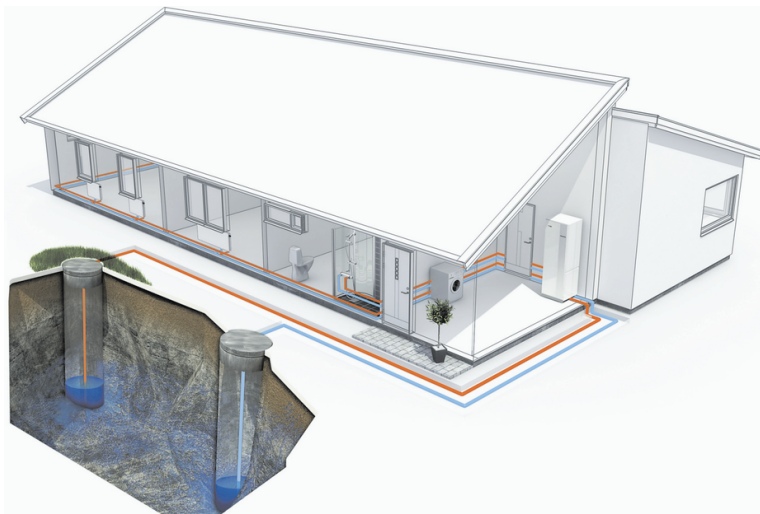
Obr. 8.12: Tepelné čerpadlo s plošným kolektorem [7]

Voda-voda

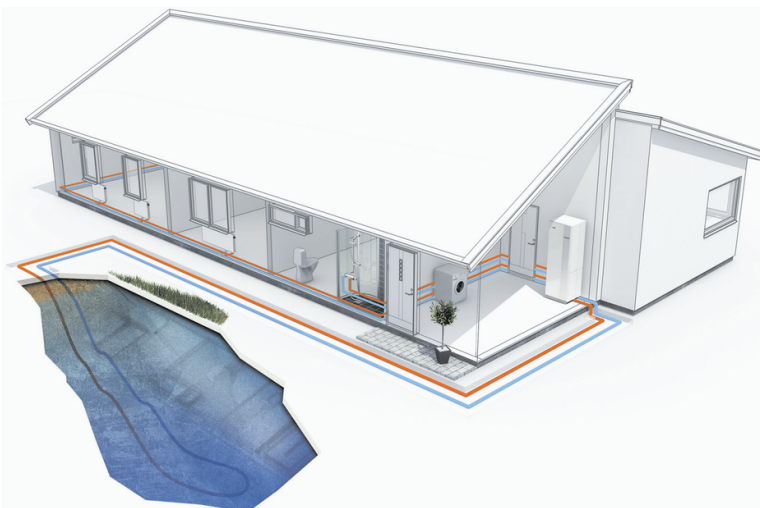
U tepelných čerpadel voda-voda se v průměru dosahuje nejvyšší hodnoty topného faktoru, ale možnost instalace je značně omezena nedostatkem lokalit s výskytem potřebných vod. Podle místa výskytu těchto vod se tepelná čerpadla rozdělují na povrchová nebo podzemní.

Podzemní – voda je nejteplejším přírodním zdrojem tepla, který má stabilní teplotu kolem 10 °C ve všech ročních obdobích (v některých případech je teplota i vyšší). Z technického hlediska je zapotřebí dvou studní, jedná se o studny tzv. topnou a vsakovací. Topná představuje nízkopotenciální zdroj tepla a do vsakovací se ochlazená voda vrací zpět do země. U topné studny je důležité si ověřit vydatnost spodní vody, která by pro rodinný dům měla být minimálně 0,5 l·s⁻¹. Naopak vsakovací studna musí být schopna stejné množství vody pojmout.

Povrchová – povrchovou vodou se rozumí řeky, rybníky a jiné vodní plochy. Tato tepelná čerpadla se vyskytují jen vzácně. Povrchové vody jsou značně závislé na kolísání teploty vzduchu [5].



Obr. 8.13: Tepelné čerpadlo s výskytem spodních vod [7]



Obr. 8.14: Tepelné čerpadlo s výskytem povrchové vody [7]

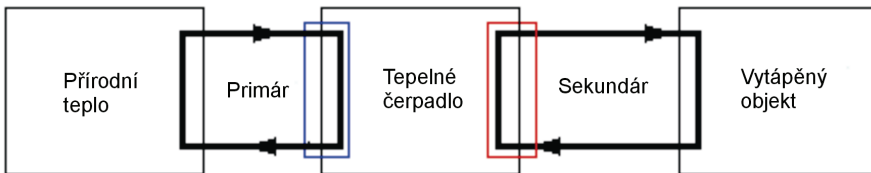
Energetické piloty

Jedná se o typ tepelného čerpadla, které čerpá nízkopotenciální energii ze stavební konstrukce resp. základů budov. Využití se nachází především u staveb, u kterých se požadují hluboké základy. Konkrétně se jedná o výškové budovy nebo budovy situované na nevhodném podloží. Tuto technologii je možné použít pouze u novostaveb, dodatečná realizace není technicky možná. Při nedostatku nízkopotenciální energie se systém kombinuje se systémem hlubinných vrtů [8],[6].

8.4.2. Provoz tepelných čerpadel

Celkové tepelné ztráty objektu, jsou pouze jedním z faktorů určujících vhodný výběr tepelného čerpadla. Dimenzovat tepelné čerpadlo na maximální potřebný výkon je obvykle neekonomické. Jeho správný energetický provoz má vliv nejen na fungování celého systému, ale i na celkové pořizovací a provozní náklady. Podle procentního pokrytí tepelných ztrát objektu výkonem tepelného čerpadla a typu náhradního zdroje se rozeznávají tři provozní stavy tepelných čerpadel.

Monovalentní provoz – v tomto provozu tepelné čerpadlo pokrývá potřebné teplo objektu i v nejnepříznivějších obdobích, což je v době nízkých venkovních teplot. Jedná se tedy o 100% pokrytí tepelných ztrát tepelným čerpadlem jako jediným zdrojem tepla. Z technických a ekonomických důvodů se tento způsob provozu používá především u tepelných čerpadel typu země/voda nebo voda/voda. Takto navržený provoz má své opodstatnění pouze za předpokladu dokonalé izolace objektu s minimálními tepelnými ztrátami [5],[6].

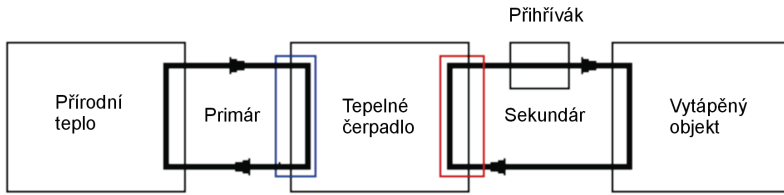


Obr. 8.15: Schéma tepelného čerpadla v monovalentním provozu

Na Obr. 8.15 je znázorněné principiální schéma monovalentního provozu tepelného čerpadla, které je tvořeno třemi bloky, které jsou tepelně provázané primárním a sekundárním okruhem. Přírodní teplo se přečerpává za pomoci principu tepelného čerpadla do vytápěného objektu bez doplňkového zdroje tepla.

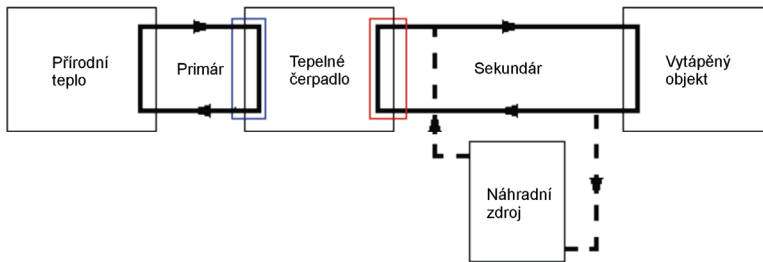
Monoenergetický provoz – v tomto provozu se do sekundárního okruhu připojuje malý záložní elektrický zdroj tzv. přihřívák, který má za úkol pokrýt odběrové špičky potřebného tepelného výkonu v nejméně chladných dnech v roce. Monoenergetický provoz má nejlepší poměr mezi investičními a provozními náklady ze všech provozů tepelných čerpadel [6].

Na Obr. 8.16 je znázorněné principiální schéma monoenergetického provozu tepelného čerpadla, které je tvořeno čtyřmi bloky, které jsou tepelně provázané primárním a sekundárním okruhem. Na rozdíl od monovalentního provozu je zde navíc čtvrtý blok (přihřívák) na sekundárním okruhu. Přírodní teplo se přečerpává za pomoci principu tepelného čerpadla do vytápěného objektu, přičemž se jako dohřev uplatňuje i pomocný zdroj tepla (přihřívák).

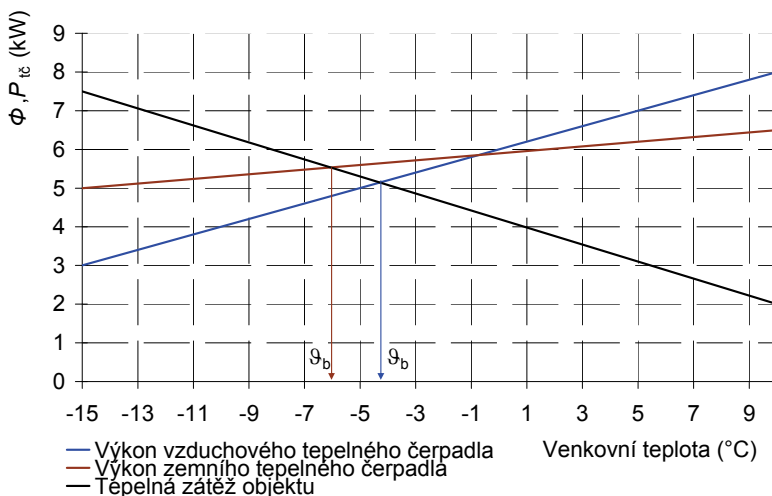


Obr. 8.16: Schéma tepelného čerpadla v monoenergetickém provozu

Bivalentní provoz – tento provoz je obdobný jako provoz monoenergetický. Tepelná čerpadla se rovněž dimenzují se sníženým výkonem a výkonové špičky pokrývají jiné tepelné zdroje. Rozdíl je v tom, že systém kombinuje dva nezávislé zdroje tepla. Zpravidla nedochází k paralelnímu chodu obou tepelných zdrojů. Při poklesu venkovní teploty pod bivalentní teplotu se tepelné čerpadlo vyřadí z provozu a celkovou tepelnou zátěž objektu pokrývá náhradní zdroj, který tepelnou energii nezískává z energie elektrické. Příkladem může být kotel na fosilní paliva. Velkou předností je možnost zálohovat tepelné čerpadlo v případě poruchy nebo výpadku elektrické energie. [6]



Obr. 8.17: Schéma tepelného čerpadla v bivalentním provozu



Obr. 8.18: Stanovení bodu bivalence

8.4.3. Stanovení bodu bivalence

Bod bivalence udává teplotní rozhraní, do kterého je ekonomické nebo technicky možné provozovat tepelné čerpadlo. Při nižších teplotách než je bod bivalence se uplatňuje bivalentní nebo monoenergetický provoz. Toto vyhodnocení je graficky znázorněno na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** (Φ je celková tepelná zátěž objektu (kW), P_{tc} je výkon tepelného čerpadla (kW)). Svislice spuštěna na osu x, která je stanovena průsečíkem křivek celkové tepelné zátěže objektu a výkonu tepelného čerpadla, udává mezní teplotu bivalence ϑ_b [6].

8.4.4. Příprava teplé užitkové vody

Systém přípravy TUV vyžaduje nejen samotnou nádobu (zásobník), ale i další prvky jako jsou armatury, vhodná úprava regulace. To vše vyžaduje další navýšení nákladů. Při návrhu je důležité tyto náklady vyčíslit a porovnat s jiným způsobem ohřevu. V případě elektrického ohřevu se nesmí zapomenout na zvýhodněnou sazbu. Někteří prodejci nabízejí tepelná čerpadla, která mají přípravu teplé užitkové vody již v sobě integrovanou. U novostaveb, kde není žádný stávající systém na přípravu TUV, je příprava tepelným čerpadlem zpravidla výhodnější. V případě, kde se nevyžaduje příprava TUV tepelným čerpadlem, bývá zvykem alespoň zajistit technické možnosti pro budoucí připojení TUV. Může k tomu vést rostoucí cena energie (elektrická energie a plyn) nebo navýšení odběru teplé vody [5].

Aby bylo možné určit potřebný objem ohříváče užitkové vody, je zapotřebí především znát alespoň počet osob, pro které má sloužit. Spotřeba vody na jednu osobu a den se udává v rozmezí 40 až 60 l. To odpovídá navýšení vypočtených tepelných ztrát o 0,2 kW.

8.4.5. Provoz se slunečními kolektory

Kombinace provozu tepelného čerpadla se solárními panely je stále více žádaná. Sluneční kolektory umožňují akumulovat energii slunečního záření v takové míře, aby bylo jimi možné zajistit přípravu TUV. Současná moderní technologie umožňuje připravovat teplou vodu po celý rok. V tomto celoročním provozu jsou kolektory naplněny nemrznoucí směsí, tzn. že teplá voda neprochází přímo kolektorem, proto je vhodné, aby zásobník teplé vody měl v sobě již zabudovaný výměník. V zimní období je tedy provoz slunečních kolektorů možný, ale je neekonomické navrhovat tento systém jako samostatný. Proto, aby bylo možné dosáhnout požadované výstupní teploty teplé vody, se běžně instalují náhradní zdroje tepla tzv. dotopné, které pokryjí nedostatek energie. V tomto případě se jedná o tepelné čerpadlo. V letním období může nastat opačný problém, kdy nádoba TUV dosáhne maximální teploty (přibližně 85 °C) a energie ze solárních panelů není již potřeba. V praxi se to řeší instalováním akumulární nádoby, která je ohřívána těmito kolektory. Účinnost kolektorů klesá s rostoucí teplotou, proto je výhodné ohřívát větší množství vody na nižší teplotu a ne menší množství vody na teplotu vyšší [6].

8.4.6. Akumulace tepelné energie

Uskladnění tepla do akumulárních vodních nádrží má efektivní využití zejména u systému pracujících s nízkopotenciální energií, jako jsou tepelná čerpadla nebo solární termické kolektory. U tepelných čerpadel je využití akumulace zejména

na pro překlenutí doby, kdy není k dispozici nízký tarif elektrické energie. Akumulace je také využita k omezení spínání tepelného čerpadla při nižších venkovních teplotách, kdy se nabíjí akumulátor a z něj poté je odebíráno teplo topným systémem. Tím je prodlužována životnost tepelného čerpadla. Dalším systémem, kde je nutností využít akumulaci tepla, jsou solární termické kolektory, které slouží pro přípravu TUV a přitápění. Akumulace je zde nezbytná z důvodu nepravidelnosti slunečních zisků a umožňuje efektivně využít tyto energetické zisky ze solárních kolektorů v kooperaci s dalším zdrojem pro vytápění. Tyto způsoby akumulace se dají nazvat krátkodobé. Akumulovat tepelné zisky je možné i dlouhodobě a to zejména během letního období a následně je využívat během topné sezony [15].

8.5. Literatura

- [1] Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení, Montanex Ostrava 2008, ISBN 978-80-7225-291-6
- [2] ČSN 060210 Výpočet tepelných ztrát budov
- [3] ČSN EN 12831 Výpočet tepelných ztrát budov
- [4] ČSN 730540-3 Tepelná ochrana budov
- [5] Srdečný, K.; Truxa, J.: Tepelná čerpadla, ERA Brno 2005, 1. vydání, ISBN 80-7366-031-8
- [6] Karlík, R.: Tepelné čerpadlo pro váš dům, GRADA – Publishing Praha 2009, ISBN 978-80-247-2720-2
- [7] TermoWatt s.r.o.: Tepelná čerpadla, princip fungování, typy. Dostupné z [www: http://www.termowatt.cz/](http://www.termowatt.cz/)
- [8] EXTON s.r.o.: Energetické piloty. Dostupné z [www: http://www.gerotop.cz](http://www.gerotop.cz)
- [9] Mrázek, J. a kol.: Moderní vytápění bytů a rodinných domků, SNTL – Praha 1989
- [10] VIESSMANN: Tepelná čerpadla – nabídka firmy
- [11] Kožený, J.: Sálavé vytápění ECOSUN, učební text ZČU Plzeň 1994
- [12] Hradílek, Z.; Buchta, Z.; Rusek, S.; Gavlas, J.: Elektrotepelná zařízení, IN – EL Praha 1997, ISBN 80-902333-2-5
- [13] Cihelka, J. a kol.: Vytápění, větrání a klimatizace, SNTL Praha 1985, 3. vydání
- [14] Šrámek, J.; Hradílek, Z.: Improvement efficiency of the design heating, sborník ELNET Ostrava 2011, ISBN 978-80-248-2510-6
- [15] Humm, O.: Nízkoenergetické domy, Grada Praha 1999, 1. vydání, ISBN 80-7169-657-9

9. Klimatizace, úspory energie

9.1. Klimatizace

Počátky klimatizace, založené na přirozených principech proudění, přenosu tepla i vlhkosti, nalezneme již v minulosti. V některých oblastech Indie za horkého období bylo využito intenzivního stabilního proudění větru k úpravě teploty a vlhkosti v palácových stavbách. Přes otvory na návětrné straně budov byly zavěšovány vlhčené rohože z trávy k adiabatickému chlazení (vypařováním) přiváděného vzduchu až na teploty 20-30 °C. Rohože byly vlhčeny ručně, nebo z perforovaných žlabů, zásobovaných gravitačně vodou z rezervoáru.

Historicky první záznamy o komfortní klimatizaci (s využitím větrání a chlazení vzduchu) jsou od amerického lékaře a technika Dr. Johna Gorrie (1802-1855), který v roce 1844 navrhl, postavil a provozoval zařízení pro komfortní chlazení s větráním v prvním klimatizovaném nemocničním oddělení [3]. K podstatnému pokroku v klimatizační technice přispěly vědecké práce z oblasti termodynamiky vlhkého vzduchu. V roce 1911 došlo v USA k uznání klimatizace jako samostatného inženýrského oboru.

Klimatizace se tradičně zabývá tepelnou a vlhkostní úpravou vzduchu, větráním (výměnou znehodnoceného vnitřního vzduchu za vzduch venkovní, čerstvý) a prouděním vzduchu, spojeným s filtrací vzduchu. Jde o strojní úpravu vzduchu zajišťující požadované parametry prostředí (teplotu, vlhkost, proudění, čistotu vzduchu). Některá klimatizační zařízení nejsou úplná, zajišťují jen chlazení a ohřívání nebo ohřívání a vlhčení vzduchu. S klimatizací je spojeno větrání.

Klimatizační zařízení plní podle svého provedení funkce:

- výměnu vzduchu v místnosti vzduchem vnějším s odvodem škodlivin, tzn. řízené větrání,
- filtraci vzduchu, eventuálně jeho další speciální úpravy (ionizaci, sterilizaci ap.),
- chlazení nebo vytápění místností, což představuje úpravu teploty vzduchu,
- zvlhčování nebo odvlhčování vzduchu v místnosti tzn. úpravu vlhkosti vzduchu.

Stav vzduchu v místnostech může být určen ze dvou hledisek - buď požadavky osob (klimatizace pro komfort) nebo požadavky technologickými. Tyto požadavky definují parametry vzduchu (teplotu, vlhkost) buď ve velmi úzkých mezích pro všechny parametry, nebo se připouští širší rozmezí určujících parametrů.

U klimatizací pro komfort se jako hlavní určující veličiny tepelného a vlhkostního stavu prostředí zpravidla uvádějí teplota vzduchu, jeho relativní vlhkost, rychlost proudění, intenzita turbulence a střední radiační teplota. Tento typ klimatizace zajišťuje vždy i větrání.

U klimatizací pro technologie jsou určujícími veličinami zpravidla pouze teplota vzduchu a relativní vlhkost vzduchu. Pro většinu zařízení jsou vyžadovány v úzkém tolerančním pásmu.

Klimatizace můžeme třídit podle druhu tekutiny k přenosu tepla a chladu v budově (systémy vzduchové, vodní, kombinované vzduch/voda, chladivové). Dále je můžeme třídit podle počtu místností - zón, ve kterých klimatizační systém upravuje prostředí a v nichž dochází k individuálním změnám tepelné a vlhkostní zátěže (systémy jednozónové a vícezónové) [16].

Hlavní rozdělení klimatizačních systémů:

- a) Vzduchové systémy
 - jednobanárový systém s konstantním průtokem vzduchu,
 - jednobanárový systém s proměnným průtokem vzduchu,
 - dvobanárový systém s konstantním průtokem vzduchu,
 - dvobanárový systém s proměnným průtokem vzduchu.
- b) Vodní systémy
 - systém s ventilátorovými konvektory,
 - systém s chladicími/otopnými plochami (např. stropy).
- c) Kombinované systémy vzduch-voda
 - indukční systém (dvou, tří, čtyřtrubkový - pro rozvod vody, jednobanárový pro rozvod vzduchu).
- d) Chladivové systémy
 - jednozónový systém (split) s konstantním průtokem chladiva,
 - vícezónový systém (multisplit) s konstantním průtokem chladiva,
 - vícezónový systém (multisplit) s proměnným průtokem chladiva.

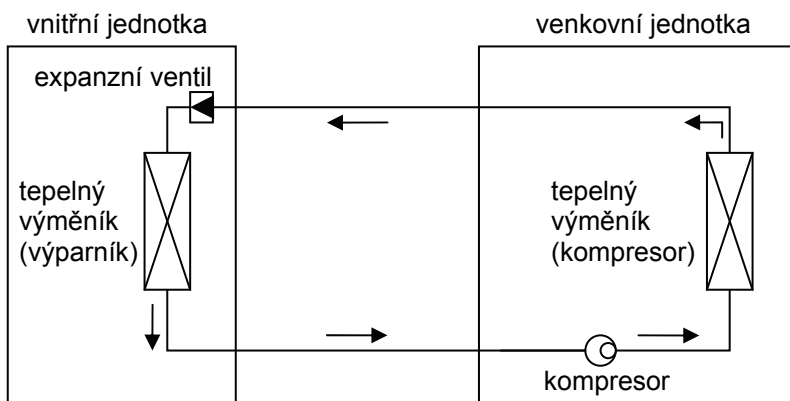
9.1.1. Provozní režimy, funkce

Každé klimatizační zařízení obsahuje prvky umožňující tvorbu chladu, což je základním úkolem každé klimatizace. Toto zařízení pro výrobu chladu může v případě nižších teplot než je teplota interiérů pouze větrat tímto chladnějším vzduchem a tímto dochází jak k úsporám elektrické energie, tak i prodloužení životnosti zařízení. Pro výrobu chladu se používají klimatizace nejčastěji kompresorový chladicí okruh, který pracuje na principu chladničky kdy teplo přechází samovolně z látky o vyšší teplotě na látku o teplotě nižší.

Princip chlazení pomocí kompresoru

Tento princip chlazení založený na změně skupenství tepla bývá označován také jako výroba chladu a zařízení, které chlad vyrábí, se nazývá jako zdroj chladu.

Proces začíná v kompresoru umístěném ve venkovní jednotce, kde se stlačují studené páry chladiva o nízkém tlaku. Z kompresoru vystupuje chladivo o vysokém tlaku a vysoké teplotě. Je přiváděno do výměníku tepla - kondenzátoru, který je ochlazován venkovním vzduchem za pomoci ventilátoru, a chladivo je tak odebíráno teplo. Přitom dochází ke kondenzaci. Za kondenzátorem je chladivo již v kapalném stavu. Potrubím se kapalně chladivo přivádí do vnitřní jednotky. Zde prochází škrtkící kapilárou, případně expanzním ventilem, který snižuje tlak chladiva. Teplota chladiva prudce klesne pod teplotu chlazeného prostoru. Chladivo o nízké teplotě a nízkém tlaku dále postupuje do výměníku tepla – výparníku. Plochou stěnou výparníku chladivo odebírá teplo z okolního vzduchu, který je tudíž hnán ventilátorem. Na stěnách výparníku se kapalně chladivo odpařuje. Z výparníku odchází chladivo v plynném stavu o nízkém tlaku a nízké teplotě. Potrubím je dopraveno z vnitřní jednotky zpět do venkovní jednotky ke kompresoru a celý cyklus se opakuje (Obr. 9.1).

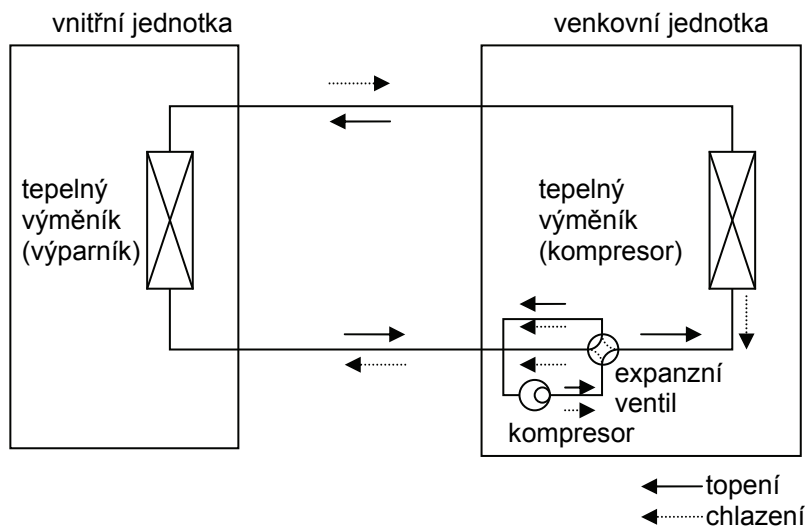


Obr. 9.1: Princip chlazení [2]

Princip topení

U klimatizací mluvíme o systému tepelného čerpadla vzduch-vzduch. Venkovní jednotka je vybavena 4cestným (reverzním) ventilem, který otočí směr proudění chladiva mezi vnitřní a venkovní jednotkou. Princip je podobný jako při chlazení, ale chladivo prochází obráceně. Do výměníku vnitřní jednotky přichází stlačené horké chladivo a vzduch v místnosti se ohřívá. Při takovém způsobu vytápění dochází k úspoře až 60% energie ve srovnání s běžným elektrickým vytápěním.

Využití klimatizace v tomto režimu je vhodné pro přitápění v přechodném období na jaře a na podzim, protože nejúčinnější je do teploty venkovního vzduchu 0 °C. Při teplotách nižších namrzá vzdušná vlhkost na vnější jednotce. Pokud je funkčně zajištěno její odmrazování, je možné klimatizaci používat v režimu topení až do teplot -15 °C.



Obr. 9.2: Princip topení u klimatizace [2]

Funkce odvlhčování a filtrace vzduchu

Klimatizace slouží i jako čistička vzduchu. Vzduch se zbavuje prachu, pachů a alergenů. Vzduchové filtry zachycují prach, pachy a jiné škodlivé částice obsažené ve vzduchu. Základním filtrem je filtr elektrostatický, který je kladně nabitý a zachycuje záporně nabitý prach. Aktivní uhlíkový filtr zachycuje cigaretový kouř, pachy a pyl. Katalyzátorový filtr zachycuje různé chemické a škodlivé částice ve vzduchu. Některé značky a typy klimatizací jsou navíc vybaveny moderními technologiemi pro ničení bakterií, osvěžování vzduchu apod.

V režimu klimatizace dochází ke srážení vzdušné vlhkosti na tepelném výměníku vnitřní jednotky. Ta odkapává do sběrné nádoby. Tento kondenzát odtéká buď samospádem, nebo je nutné ho pomocným čerpadlem odčerpávat.

9.1.2. Provedení kompresorů, chladicí kapalina

- Kompresor s konstantními otáčkami – regulace se provádí dvoustavově zapnuto/vypnuto.
- 2 kompresory s konstantními otáčkami, ale různým výkonem – zapíná se vždy pouze jeden podle aktuálního požadavku na chladicí výkon.
- Kompresor s proměnnými otáčkami – jeho otáčky jsou regulovány střídačem. Výhodou je úspornější provoz, nižší rozběhový proud, nižší hlučnost.

Chladicí kapalina (chladivo)

Nejdůležitějším parametrem chladicí kapaliny jsou její fyzikální vlastnosti. Je to jednak schopnost přijímat a vydávat teplo, dále pak schopnost stlačitelnosti, tedy

tlaku. Schopnost stlačitelnosti nemusí být vysoká, naproti tomu je žádoucí, aby schopnost přijímat a vydávat teplo (výparné teplo) byla co největší. Tlak chladicí kapaliny v klimatizačním okruhu se udržuje o něco vyšší než v okolním prostředí aby nedošlo k nasátí okolního vzduchu do systému a tím k nepříznivým změnám v pracovním procesu klimatizace. Dalšími požadovanými vlastnostmi je nejedovatost chladicí kapaliny a její nehořlavost. Chladicí kapalina nesmí způsobovat korozi.

Mezi nejstarší chladicí kapaliny patří čpavek. Čpavek je ovšem hořlavý a jedovatý, proto jej nelze používat v klimatizacích, které jsou umístěny v objektech s přítomností člověka a dnes se již nepoužívá. Nejběžnějšími chladivými jsou halogenové uhlovodíky. Tyto chladiva mají značení, jejíž číslo popisuje kombinaci atomů uhlíku, vodíku a fluoru, a to R407c, R134A a R410a. V současné době je nejvíce používanými chladivými R407C a R410a. Chladivo R410a má až o 50% vyšší objemovou chladivost než R407c, současně však pracuje s vyššími tlaky. Požaduje proto potrubí se silnější tloušťkou stěn.

9.1.3. Vzduchové systémy

Tyto systémy představují klasická technická řešení. Teplonosnou látkou zprostředkující přenos tepla a chladu mezi zdroji a klimatizovanou místností k pokrytí tepelné zátěže je vzduch vedený vzduchovody. Z důvodu malé tepelné kapacity vzduchu jsou k přenosu tepelné energie nutné větší objemové průtoky. Z uvedené skutečnosti vyplývá, že k zajištění vnitřního prostředí jsou nutné větší výměny vzduchu v místnostech, s ní spojená vyšší rychlost proudění vzduchu vnitřním prostorem a zejména rozměrná potrubí vedená mezi místem úpravy vzduchu (strojovnou) a klimatizovanou místností. Vzduchové systémy se aplikují v řadě variant provedení zejména pro velké místností občanských a průmyslových budov. Vzduchové systém dělíme na:

Nízkotlaké

- Ústřední - vzduch rozvádí do jednotlivých klimatizovaných místností se stejnou úrovní mikroklimatu. Rychlost proudění vzduchu v potrubí se pohybuje do $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Úprava vzduchu formující interní mikroklima probíhá v zařízeních úpravy vzduchu, tvořených zpravidla sestavnými klimatizačními jednotkami umožňujícími i aktuální zpětné využití tepla. Jsou vhodné pro konferenční a koncertní sály, divadla, kina, obchodní domy, restaurace, jídelny, dále pro výrobní prostory, objekty určené pro chov zvířat, laboratoře.
- Zónové – tyto systémy jsou vhodné pro rozlehlé budovy a provozy průmyslových objektů např. tovární haly, výstavní pavilóny, operační komplexy, tj. pro prostory s různými požadavky na úroveň vnitřního prostředí jednotlivých zón.
- Jednotkové - jednotky se instalují přímo do klimatizovaných prostorů a nevyžadují tudíž strojovnu vzduchotechniky ani potrubní síť. Vyznačují se úpravou vzduchu probíhající přímo v klimatizovaném prostoru.
- Speciální - slouží ke tvorbě interního mikroklimatu v prostorách s přesně danými požadavky na stav vnitřního prostředí a malými tolerancemi jejich kolísání, zpravidla teplotami.

Vysokotlaké

Rychlost vzduchu proudící vzduchovody mezi strojovnou a klimatizovanou místností překračuje v hlavních úsecích rozvodu $12-20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vyšší rychlost umožňuje zmenšit průřezy vzduchovodů a minimalizovat prostorové nároky vzduchotechniky. Na druhou stranu je tento systém hlučnější a má vyšší provozní náklady. Distribuční systém tvoří část vysokotlaká a nízkotlaká. Před vstupem do klimatizované místnosti se tlak vzduchu redukuje jednotkami napojenými na tlakové části potrubí

- Jednokanálové – používaly se v budovách s většími místnostmi se stejnými požadavky na interní mikroklima, např. obchodní domy.
- Dvoukanálové - byly používány u budov s většími prostory a různými požadavky na stav vnitřního prostředí, např. jednotlivá podlaží obchodních domů.

9.1.4. Vodní systémy

Teplonosnou látkou je voda dopravovaná potrubní sítí ze strojovny do koncových prvků, kterými jsou ventilátorové konvektory tzv. fancoily. Uvedené jednotky upravují vzduch v každém z klimatizovaných prostorů budov. Čerstvý vzduch se do klimatizovaných místností přivádí vzduchovody z ústřední strojovny, nebo je přímo nasáván fancoily z vnějšího prostředí. Průtok čerstvého vzduchu je odvozen z minimálních dávek vnějšího vzduchu pro klimatizovaný prostor.

Výhodou vodních systémů je minimalizace průřezu vzduchovodů a možnost individuální regulace stavu mikroklimatu jednotlivých místností. Systémy se aplikují v řadě variant, zejména v občanských stavbách. Aktuálním technickým řešením vodních soustav je modifikace s velkoplošnými teplosměnnými prvky - tzv. chladicí strop.

Chladicí strop

Tento klimatizační vodní systém chlazení lze charakterizovat jako plochý trubkový výměník tepla zavěšený zpravidla pod stropem klimatizované místnosti. Výměníkem protéká chladná voda, která odnímá teplo a pokrývá tak část eventuálně celou tepelnou zátěž prostoru. Pokud celou tepelnou zátěž pokrývá chladicí strop, pak se do jednotlivých klimatizovaných místností přivádí jen vzduch, jehož objemový průtok vyplývá z hygienicky nutné dávky k výměně vzduchu za čerstvý. Teplota povrchu chladicího stropu se obvykle pohybuje okolo 19 až $20 \text{ }^\circ\text{C}$ dle teploty chladicí vody a požadované úrovně mikroklimatu. Modifikační chladicího stropu je chladicí podlaha.

Chladicí strop má oproti jiným systémům řadu výhod. Zásadní spočívá v zajištění stavu prostředí bez proudění vzduchu vyvolávající průvan pociťovaný uživateli zejména u vzduchových systémů. Teplo se v případě chladicích stropů přenáší v rozhodující míře sáláním mezi povrchy s různou teplotou a jeho přenos není vázán na proudění vzduchu.

9.1.5. Chladivové systémy

Teplonosnou látkou je chladivo, které přenáší teplo pomocí skupenských změn tvořících tzv. tepelný cyklus. Soustavy pracují běžně v režimu chlazení, některé umožňují i vytápění. V základním chladicím režimu provozu probíhá ve vnitřní jednotce vypařování chladiva, při kterém se odnímá teplo vzduchu klimatizované místnosti a ve vnější kondenzátorové jednotce se pak odevzdává kondenzační teplo okolnímu vzduchu. Typickým chladivovým systémem je varianta označována jako split.

9.1.6. Kombinované systémy vzduch-voda

Vzduch je do jednotky přiváděn přes trysku a vlivem indukce je z místnosti přisáván vnitřní cirkulační (sekundární) vzduch. Poměr sekundárního ku primárnímu vzduchu určuje indukční poměr, který bývá v rozmezí 2 - 5. V indukční jednotce je výměník tepla (chladič a ohřivač), který upravuje sekundární vzduch dle požadavku. Po smísení v indukční jednotce je vzduch přiváděn do místnosti. Průtok čerstvého vzduchu je odvozen z minimálních dávek vnějšího vzduchu klimatizované místnosti.

9.1.7. Typy klimatizačních jednotek

Klimatizační jednotky lze dělit do několika skupin. Podle možnosti přemístění na mobilní a nepřenositelné, trvale instalované. Podle umístění na okenní klimatizační zařízení, nástěnné, podstropní, podokenní a kanálové a oddělené klimatizace – Split systémy. Podle požadovaných vlastností na zařízení s ohřevem, vlhčením, chlazením, cirkulací, vodní pračkou a dalšími, obvykle v různých kombinacích.

Mobilní klimatizační zařízení

Výhodou mobilních klimatizačních jednotek je jejich přemístitelnost. Některé klimatizace se skládají ze dvou částí (dělené), jiné jsou kompaktní (monoblok). U dělených klimatizací je vnější část umístěna ve vnějším prostředí co nejbližší vnitřní části a je propojena hadicí pro přesun vzduchu. Kompaktní mobilní klimatizace postrádají vnější část, která je umístěna spolu s vnitřní částí v jednom celku a odvod teplého vzduchu je zajištěn hadicí, která je vyvedena do exteriéru. Průměr přívodní hadice bývá 0,1 m. Pro přesun po interiéru je klimatizace vybavena kolečky. Hlučnost klimatizace je v rozmezí 50-54 dB(A).

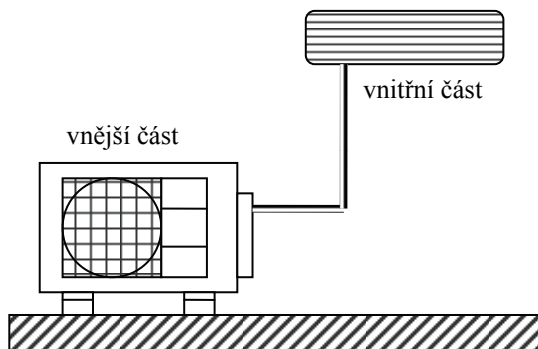
Okenní klimatizace

Tyto klimatizace jsou vyráběny jako jeden celek. Okenní klimatizace je uzpůsobena tak, aby se dala zabudovat do oken nebo zdí a to tak, že část klimatizace je v interiéru a část v exteriéru. Tyto klimatizace upravují vzduch pouze v místnosti, kde jsou nainstalovány. Proto jsou konstruovány pro nižší výkony, pro běžné užívání cca 2-6 kW, u větších hal až 10 kW.

Klimatizační systém split - jednozónový

Jsou nejrozšířenějším druhem klimatizačních zařízení. Jsou složené ze dvou dílů – části venkovní a vnitřní. Bývají trvale namontovány a instalovány. Velkou

výhodou je nízká hlučnost díky umístění kompresoru ve vnější jednotce. Chladicí výkon těchto zařízení bývá v rozmezí 2-20 kW (Obr. 9.3).



Obr. 9.3: Dvoudílná klimatizace split

Vnitřní část vhání chladný nebo teplý vzduch do místnosti. Bývá napojena na 230V. Z hlediska umístění vnitřní části klimatizace rozlišujeme na:

- 1) **Nástěnné jednotky** jsou nejpoužívanější. Montují se na zeď, proud ochlazeného vzduchu směřuje přímo vpřed od klimatizace. Podle počtu chladicích jednotek okruhů se rozlišují jako duální (dvě jednotky), trojnásobné (tři jednotky), čtyřnásobné a vícenásobné, obecně se označují jako multisplit. Umísťují se do výše 2-3 metry nad zemí, záleží na výšce stropu. Dálkovým ovládním nebo ručně můžeme měnit jak výkon jednotky, tak i směr proudění vzduchu.
- 2) **Podstropní jednotky** se umísťují se pod strop. Mívají nastavitelné žaluzie, takže lze vzduch vyfukovat různými směry. Rovněž otáčky ventilátorů se dají nastavovat. Dodávají se o výkonu 2-13 kW. Jedna jednotka o chladicím výkonu 5 kW dokáže klimatizovat místnost o objemu přibližně 130 m³. Pokud má místnost větší objem, mohou se instalovat dvě nebo více jednotek.
- 3) **Podokenní jednotky** se umísťují pod okno nebo na jiné místa blízko podlahy. Většina podokenních jednotek nahrazuje ústřední vytápění a slouží převážně na výrobu tepla. Pro obytné místnosti se vyrábějí obvykle o výkonu 2-8 kW. Tak jako u podstropních jednotek můžeme osadit do větších místností dvě a více jednotek.
- 4) **Kazetové jednotky** klimatizaci tvoří kazeta, která je zabudovaná ve stropě a to tak, že je vidět pouze výfuková část. Bývají většinou čtvercového tvaru. Počet výdechů vzduchu bývá různý, u čtvercových klimatizací až čtyři. Jejich nevýhodou je vyšší pořizovací cena.
- 5) **Kanálové jednotky** bývají umístěny pod stropem. Vnitřní jednotka je umístěna v mezistropě, vzduch bývá rozváděn potrubím po místnostech. Bývá často umístěna v restauračních zařízeních. Jejich výkon se pohybuje v rozmezí 5 - 20 kW, pro místnosti o velikosti až 600 m³.

Vnější část jednotky se umísťuje napevno na vnější stěny nebo balkóny, popřípadě střechy domů. Umísťují se pokud možno co nejbližší vnitřní části klimatizace aby potrubí, ve kterém proudí chladicí kapalina, bylo co nejkratší. Uživatelé většinou preferují jednu vnější jednotku k jedné vnitřní jednotce ale mohou být i dvě či více. Záleží na důležitosti chlazeného zařízení v interiéru. Vlhkost, která se tvoří na stěnách trubek s chladicí kapalinou vlivem rozdílných teplot trubek a okolí se odvádí pomocí další tenké trubky proto, aby vysrážená voda netekla po obvodové zdi.

Klimatizační systém multisplit - vícezónový

Na jednu venkovní jednotku je připojeno několik (zpravidla až pět) vnitřních jednotek. Regulace tepelného výkonu se provádí podle termostátů v místnostech uzavíráním přívodu chladiva do vnitřních jednotek s následným vypínáním kompresoru venkovní jednotky. Některé systémy mají ve venkovní jednotce několik malých samostatných kompresorů pro jednotlivé vnitřní jednotky, nebo skupiny vnitřních jednotek. Regulace výkonu chlazení je pak zjednodušená, reguluje se podle individuálních potřeb.

Klimatizační systém multisplit s proměnným průtokem VRV (Variable Refrigeration Volume)

Na jednu venkovní jednotku je připojen větší počet vnitřních jednotek (30 i více). Výměníky tepla ve vnitřních jednotkách jsou opatřeny škrticími ventily pro řízení průtoku chladiva podle termostátů v každé místnosti. Kompresor ve venkovní jednotce je provozován s proměnnými otáčkami (frekvenčním měničem) v závislosti na potřebném chladicím výkonu. Systém VRV se vždy doplňuje vzduchovým jednokanálovým systémem pro přívod venkovního vzduchu podle hygienických požadavků.

9.2. Možnosti úspor energie - nejen při vytápění

9.2.1. Úspory energie v domě

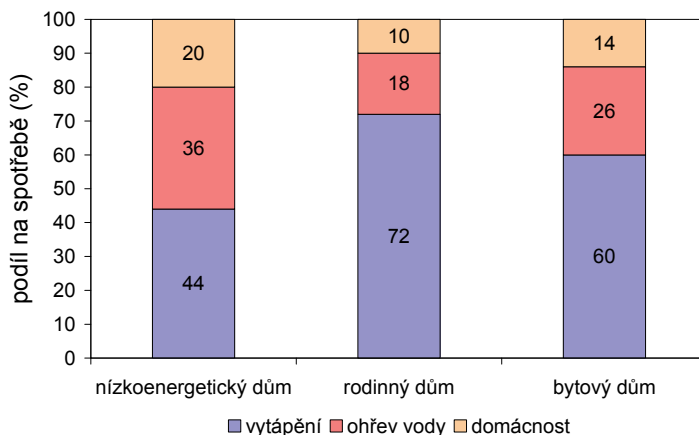
Úspory energie jsou dost často spojeny s rekonstrukcí domu, takže mohou přinést i zvýšení komfortu nebo úrovně bydlení. Téměř vždy se také sníží zátěž životního prostředí. Protože však energie nikdy není zadarmo, čekáme od úspor energie i úspory finanční. Je třeba si ujasnit, co všechno úspory energie obnášejí a přinášejí.

Velká, ne-li největší část energie, kterou za celý život spotřebujeme, souvisí s bydlením. Energii, kterou spotřebováváme při bydlení, využíváme pro tyto tři hlavní účely:

- na vytápění,
- ohřev vody,
- provoz spotřebičů v domácnosti.

Do poslední kategorie patří zejména osvětlení, vaření, praní, chlazení, žehlení a provoz elektroniky.

Každý dům má jinou spotřebu energie na vytápění, která je dána hlavně jeho konstrukcí. Záleží jak na izolačních schopnostech obvodového pláště, tak na tvaru a velikosti budovy. Dobře je to vidět na panelovém domě, kde většina bytů ztrácí teplo jen jednou venkovní stěnou, zatímco ostatními stěnami sousedí s jinými byty či chodbou. Naproti tomu u rodinného domku dochází ke ztrátám tepla všemi stěnami, podlahou i střešou. Jiným příkladem může být velmi dobře izolovaný nízkoenergetický dům, kde obvodovým pláštěm uniká v porovnání se stejně velkým starším rodinným domem i méně než polovina energie (Obr. 9.4).



Obr. 9.4: Přibližná struktura spotřeby v různých domech [7]

Spotřebu energie na provoz domácích spotřebičů ovlivňuje hlavně jejich technická vyspělost a úspornost daná konstrukcí.

Rozdělení spotřeb energie podle účelů je důležité hlavně proto, že každou část spotřeby můžeme krýt jinou energií, s jinou cenou i jiným vlivem na životní prostředí. Pro chod domácnosti potřebujeme hlavně elektřinu, i když třeba pro vaření můžeme použít plyn nebo dřevo. Vodu můžeme ohřívat buď elektřinou (s oblibou se využívá tzv. noční proud, který je cenově výhodnější), nebo stejným palivem, jakým se topí. V praxi může jít o tzv. kombinovaný kotel na zemní plyn (nebo propan), který funguje celoročně jako karma a během zimy navíc ještě topí. Chceme-li topit uhlím či dřevem, můžeme použít tzv. kombinovaný bojler, který je během topné sezóny ohříván vodou z ústředního topení a v létě elektřinou (ev. solárním systémem).

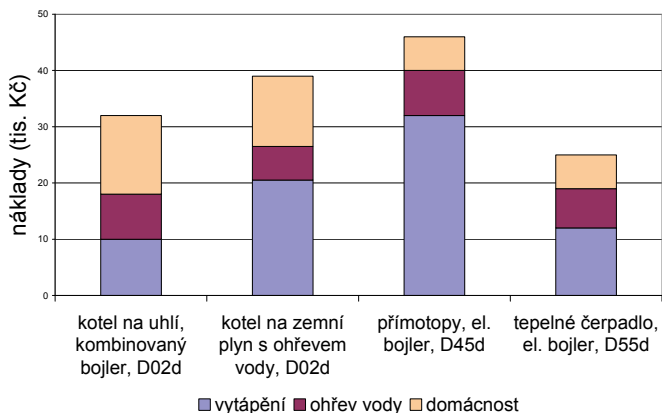
Cena energie

Stanovit skutečnou cenu energie, která by zahrnovala i vliv na životní prostředí, na zdraví obyvatel, snížení zásob paliv pro budoucí generace nebo náklady na likvidaci vyhořelého jaderného paliva, je velice složité. Zabývají se tím odborníci po celém světě a jejich výsledky nejsou vždy srovnatelné. Je však zřejmé, že při započítání těchto faktorů by byla cena energie několiknásobně vyšší. V současnosti si můžeme vybrat z mnoha paliv v různé kvalitě a ceně. Existují samozřejmě některá omezení. V některých místech není zaveden zemní plyn, jinde není k dispozici dostatečně silná elektrická přípojka.

Současné ceny průběžně aktualizované lze nalézt v [8]. Při srovnání roku 2011 např. s rokem 2004 nám vyjde, že ceny uhlí, elektřiny a plynu stouply 2x, dřeva 3x, nezměnila se cena propanu a lehkých topných olejů.

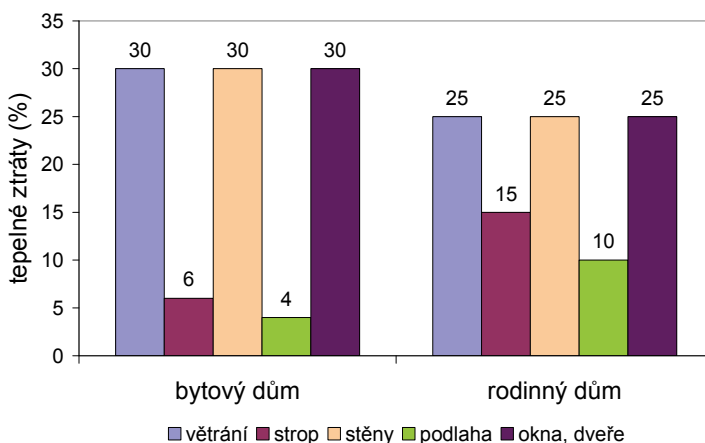
Jak ušetřit na vytápění

Před rozhodnutím, kde začít šetřit, je tedy nutné uvědomit si nejen toky energií, ale i peněz. Na Obr. 9.5 je uveden příklad rodinného domku s různými kombinacemi energií pro vytápění, ohřev vody a produktové řady elektrické energie.



Obr. 9.5: Srovnání nákladů na energie v rodinném domě [7]

Každou ze ztrát, které jsou znázorněny v grafech na Obr. 9.6, lze různými způsoby snížit. Je zřejmé, že obvodovým pláštěm uniká tepla nejvíc. Současně je ale jasné, že sebelepší izolace stěn nám nesníží účet za teplo na polovinu. Zateplení je tedy vhodné provádět komplexně a přitom brát v úvahu nejen vliv zateplení různých konstrukcí, ale i jeho cenu.



Obr. 9.6: Podíl různých konstrukcí na tepelné ztrátě domu [7]

Lákavé je hledat úspory ve snížení tepelných ztrát větráním. Utěsnění oken je levné, avšak je spojeno s velkými riziky. Při snížení infiltrace pod určitou hodnotu může vzrůst vnitřní vlhkost natolik, že může vést k poškození budovy. Omezování větrání může mít také vliv na zdraví obyvatel domu či bytu. Po každém snížení tepelné ztráty je třeba upravit vytápěcí systém, výkony otopných těles, ale především regulaci. Jinou možností je použít levnější palivo, např. dřevo. Náklady na výměnu kotle a úpravu otopné soustavy jsou řádově nižší než náklady na zateplení a výměnu oken. Obě možnosti můžeme kombinovat tak, aby úspora energie i nákladů odpovídala našim představám.

9.2.2. Zateplování

Dodatečná izolace domu bývá spojená s novou fasádou, střechou, vestavbou podkroví nebo jinou rekonstrukcí domu. Při úvahách, zda se zateplení vyplatí nebo ne, je třeba zvážit také náklady na tyto stavební úpravy.

Kromě mnoha jiných důvodů nás k zateplování nutí i současné předpisy. Dříve platná vyhláška č.291/2001 Sb. stanovovala maximální měrnou spotřebu, kterou nesměly překročit stavby a rekonstrukce financované z veřejných prostředků. Tyto požadavky se vztahovaly i na soukromé domy, pokud na ně byla poskytnuta nějaká dotace. Dále se požadavky vyhlášky vztahovaly i na zcela soukromé stavby a rekonstrukce větších objektů se spotřebou více než 700 GJ ročně, což se týká především panelových domů. Na rodinné domky a jiné soukromé stavby se spotřebou nižší než 700 GJ ročně se vyhláška nevztahovala.

Od roku 2007 platí vyhláška č.148/2007 Sb., která stanovuje:

- požadavky na energetickou náročnost budov, porovnávací ukazatele a výpočtovou metodu stanovení energetické náročnosti budov,
- obsah průkazu energetické náročnosti budov a způsob jeho zpracování včetně využití již zpracovaných energetických auditů,
- rozsah přezkušování osob z podrobností vypracování energetického průkazu budov.

Rekonstrukce staršího domu, která bude respektovat požadavky normy, by sama o sobě měla přinést úsporu okolo 40 %. Je však dobré si uvědomit, že spotřeba domu stanovená podle vyhlášky slouží hlavně pro porovnání konkrétního domu s určitým standardem, a to ještě jen pokud jde o obvodový plášť. Skutečná spotřeba se od takto stanovené může velmi výrazně lišit, už proto, že dům bude stát v teplejší klimatické oblasti, bude mít účinné vytápění nebo bude využívat teplo z odpadního vzduchu.

Vlhkost v domě

Vhodně prováděné větrání je nejjednodušší a účinný způsob, jak se zbavit vlhkosti, která nutně vzniká pobytem lidí uvnitř. Vlhkost, podobně jako teplo, uniká vždy z místa, kde je jí více, tam, kde je jí méně - v zimě tedy zevnitř ven. Studený zimní vzduch totiž obsahuje méně vlhkosti než teplý vzduch v bytě. To, jak bude vlhkost prostupovat stěnami, závisí na tom, jaké materiály byly použity při stavbě. Některé materiály jako sklo, kovy, většina plastů a jiné vlhkost nepropouští vůbec (mají velmi vysoký difúzní odpor). Porézní materiály jako cihly, dřevo, beton aj.

vlhkost propouštějí snáze. Tyto materiály mohou také určitý objem vlhkosti bez problémů absorbovat a později ji opět uvolnit do interiéru. To vyrovnává klima v místnosti a přispívá k lepší pohodě obyvatel. Proniká-li však vodní pára do konstrukce ve větším množství, může uvnitř dojít k její kondenzaci. Nadměrná vlhkost v konstrukci domu je vždy potenciálním zdrojem problémů. Při promrznutí trhá zdivo, urychluje korozi ocelových prvků, podporuje hnilobu dřevěných konstrukcí a plísňe na vnitřních omítkách. Obecně snižuje trvanlivost domu.

U starších cihlových domů se vlhkost ve stěnách během zimy hromadí a během léta se opět vypařuje do vnitřního i vnějšího prostoru. Čím je zeď silnější, tím více vlhkosti je schopna bez problémů pojmout. Zateplení může být pro toto „dýchání“ překážkou. Proto je nutné, aby projekt zateplení vždy zhodnotil i riziko kondenzace, možnost vypařování vody z konstrukce a navrhl takové řešení, kdy vlhkost nebude nebezpečná. Nejjednodušší zásadou je navrhovat skladbu konstrukce tak, aby difúzní odpor materiálů směrem zevnitř ven klesal. To znamená, že vlhkost se do konstrukce bude z interiéru špatně dostávat, ale pokud nějaké množství pronikne, snadno pak už unikne do exteriéru.

Snížení ztrát stěnami

Existují dva základní typy zateplení:

- kontaktní,
- zateplení s odvětranou mezerou.

Každý z těchto způsobů může být proveden jako vnitřní a vnější zateplení. Vždy je nutno ošetřit konstrukci tak, aby nevznikaly tepelné mosty: stěny musí být zatepleny nejen tam, kde je vytápěný prostor, ale ještě pod úroveň podlah a nad úroveň stropů, stejně tak musí být zatepleny parapety, ostění a nadpraží.

Vnější zateplení

Pro většinu budov je vhodnější použít venkovní zateplení. Zejména u panelových domů je to i účinná cesta k prodloužení jejich životnosti. Zateplení chrání v zimě před mrazem a v létě před slunečním žářem, takže klesne namáhání dilatací. Ocelové spojovací prvky jsou více chráněny před povětrností a tedy i korozí. Zateplením se řeší i tepelné mosty ve spárách mezi panely a při správném návrhu i u okenních otvorů.

Výhody:

- zdivo je „v teple“ a není tolik namáháno výkyvy teplot a povětrností,
- zvýší se akumulační schopnost domu,
- snáze se eliminují tepelné mosty v konstrukci (okenní překlady, věnce, stropy aj.),
- riziko kondenzace vlhkosti v konstrukci je minimální,
- budova získá novou fasádu, což vede k úsporám nákladů na údržbu,
- při instalaci se příliš neruší pobyt osob uvnitř.

Nevýhody:

- potřeba lešení a prostoru okolo domu,
- izolaci je potřeba provádět naráz v celé ploše stěny,
- rozšíří se vnější obrys domu (může dojít k přesahu na cizí pozemek),
- vyšší náklady.

Vnitřní zateplení

V některých případech (např. je-li fasáda domu historicky cenná) lze uvažovat o vnitřním zateplení. Pro vnější zateplení se běžně používá izolace v tloušťce 15 až 20 cm. Je zřejmé, že vnitřní zateplení bude vždy kompromisem mezi požadavkem na úsporu tepla a velikostí obytného prostoru. Protože však nemůžeme izolovat také vodorovné konstrukce, vznikají velké tepelné mosty. Původní obvodová stěna je po zateplení oddělena od teplého vnitřního prostředí vrstvou izolace, a proto je po zateplení mnohem chladnější. V místech, kde se napojuje na příčky, stropy a podlahy, ochlazuje tyto přilehlé konstrukce tak intenzivně, že se v místech styku může objevit plíseň. Mezi původní stěnou a izolací také vzniká chladná zóna, kde se s velkou pravděpodobností objeví zkondenzovaná voda uvnitř konstrukce. Důsledkem může být narušení nejen obvodových stěn, ale také nosných prvků, stropů a podlah.

Výhody:

- možnost izolovat jen jednu místnost,
- snadný přístup, bez lešení,
- možno instalovat bez ohledu na počasí,
- snáze se provádí svépomocí.

Nevýhody:

- riziko kondenzace vlhkosti ve stěnách domu,
- riziko promrzání vnějšího zdiva,
- riziko růstu plísní, zejména v oblasti tepelných mostů,
- snížení akumulační schopnosti zdiva,
- zmenšení plochy místností.

Kontaktní zateplení

Jde o nejvíce rozšířený a dobře vyzkoušený způsob zateplení, kdy je izolant přilepen k podkladu a ukotven hmoždinkami (jak kvůli gravitaci, tak kvůli větru, který by ho mohl odtrhnout). Na izolant se pak nanáší štrková omítka se ztužující sítí. Jako izolant se používá nejčastěji polystyren, někdy tuhé desky z minerálních vláken (zejména ve vyšších patrech budov, kvůli požární bezpečnosti). V zahraničí se používají i korkové desky, jako přírodní materiál.

Největší výhodou je poměrně nízká cena a bohatý výběr dodavatelských firem. Další výhodou je to, že se v izolaci nevyskytují tepelné mosty. Na izolaci je možné přilepit i drobnější tvarové prvky (pilastry, římsy aj.) z polystyrenu, polyuretanu nebo sádry. Díky tomu může mít dům i po renovaci stejný výraz jako před ní.

Nevýhodou je to, že systém vyžaduje pevný a únosný podklad. Na starou opadávající omítku jej budeme moci použít jen stěží. Kontaktní zateplení nikdy nepoužíváme na vlhké zdivo! Některé technologické operace se dají provádět jen za příznivého počasí, což může stavbu prodloužit.

9.2.3. Velikost tepelných ztrát

Stavební materiály mají různou schopnost propouštět teplo. Tepelně izolační materiál (polystyren) o tloušťce 1 cm propustí stejné množství tepla jako dřevo o tloušťce 4 cm, děrovaná cihla o tloušťce 9 atd. (Tab. 9.1).

Druh materiálu	Tepelná vodivost λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Porovnání tloušťky materiálu (cm)
izolační materially	0,02 – 0,05	1
dřevo	0,12 – 0,16	4
děrovaná cihla	0,33 – 0,36	9
plná cihla	0,78 – 0,82	20
železobeton	1,35 – 1,45	36

Tab. 9.1: Tepelná vodivost stavebních materiálů [6]

Tepelně izolační vlastnosti nejpoužívanějších materiálu jsou v Tab. 9.2. Obecně platí, že čím je materiál lehčí, tím lépe izoluje. Za dobré izolanty se považují materiály, jejichž součinitel tepelné vodivosti $\lambda < 0,20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Druh materiálu	Tepelná vodivost λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Vhodnost použití
pěnový polyuretan	0,018 – 0,035	mezi okno a zeď
pěnový polystyrén	0,026 – 0,051	venkovní stěny
pěnový polyetylén	0,038 – 0,042	Izolace trubek
skelná a čedičová vlna	0,035 – 0,076	pro vyšší teploty
perlit	0,058 – 0,062	do malty a betonu
keramzit	0,090 – 0,110	do malty a betonu

Tab. 9.2: Tepelná vodivost tepelně izolačních materiálů [6]

9.2.4. Ekonomika zateplení

Kvalitně provedené zateplení by mělo mít životnost 40 i více let. U stěn je potřeba po několika letech obnovit nátěr, stejně jako u domu nezatepleného. Zateplení střechy, stropů a podlah vydrží obvykle až do doby, kdy budova získá nového vlastníka s jinými představami o jejím vzhledu a využití.

Při rozhodování o správné tloušťce izolace si musíme uvědomit, že náklady obvykle nerostou úměrně s tloušťkou izolantu. Například u kontaktního zateplení musíme platit projekt, lešení, lepicí a omítkové hmoty a povrchové úpravy bez ohledu na to, zda použijeme 5 nebo 25 cm izolantu. S tloušťkou zateplení rostou pouze náklady na izolant a kotvicí prvky, mírně se může zvýšit cena prací. V konkrétních případech mohou nezanedbatelně narůst třeba náklady na oplechování parapetů a podobně.

Cena izolantu tvoří v celkové ceně zateplení malou část, na druhé straně z hlediska úspor je izolant jediným funkčním prvkem skladby. Už proto se nevyplatí na množství izolace šetřit. Vzhledem k vývoji cen energií se v dnešní době běžně používají vrstvy izolantu o tloušťce 15, 20 i více cm.

cena zateplení (Kč·m ⁻²)	5 cm polystyrenu	10 cm polystyrenu	20 cm polystyrenu
příprava (vyspravení) podkladu	60	60	60
lešení	350	350	350
izolant, hmoždinky a lišty	180	280	510
lepicí a omítkové hmoty	80	80	80
montáž	330	330	350
celkem	1000	1100	1350
součinitel prostupu tepla (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	0,85	0,43	0,21
izolační efekt	100 %	200 %	400 %

Tab. 9.3: Srovnání nákladů při zateplování dvojnásobnou tloušťkou izolantu [7]

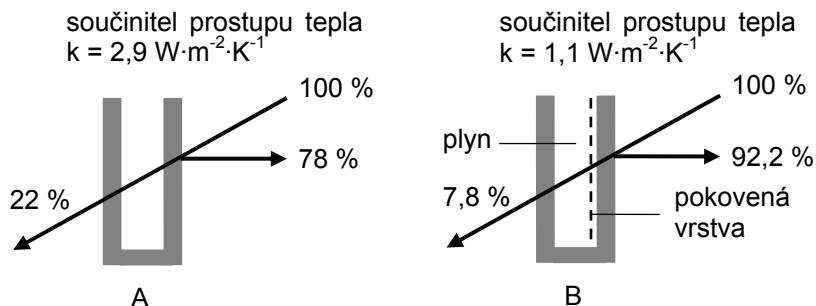
9.2.5. Snížení ztrát okny a prosklením

Okna jsou velkým zdrojem tepelných ztrát. Teplo uniká jednak prostupem a sáláním sklem a rámem, jednak spolu se vzduchem infiltrací ve spárách mezi křídlem a rámem. Infiltrace přispívají k nezbytnému větrání. Vývoj v konstrukci oken zaznamenal velký pokrok, takže nová moderní okna jsou dvakrát lepší, než ta, na která jsme u starších budov zvyklí.

Výměna oken

Výměna starých oken za nová je vždy natolik nákladná, že se čistě z hlediska energetických úspor téměř nikdy nevyplatí. Rozhodneme-li se však už okna vyměnit (třeba kvůli špatnému stavu původních), neměli bychom šetřit na zasklení. Okna jsou nabízena s různými typy dvojskel, přičemž rozdíl mezi nejlevnějším a nejdražším typem je 10 až 20 % ceny okna. Naproti tomu rozdíl v izolační schopnosti je až dvojnásobný.

Kvalitní izolační dvojsklo se vyznačuje tím, že mezera mezi skly je plněna argonem nebo jiným plynem, který izoluje lépe než obyčejný vzduch. Tzv. vakuovaná dvojskla, kde byl vzduch mezi skly zředěný (šlo tedy o velmi husté „vakuum“) jsou již překonána. Dalším atributem je mikroskopická vrstva kovu (ev. oxidů kovů) na vnější straně vnitřního skla. Tato vrstva propouští denní světlo dovnitř, ale teplo ven nikoli. Můžeme si ji představit jako síto, jehož oky snadno projde krátkovlnné záření - světlo, ale kterým neprojde dlouhovlnné záření – teplo (Obr. 9.7).



Obr. 9.7 Rozdíl mezi obyčejným (A) a kvalitním (B) dvojsklem [7]

Ještě lepších izolačních parametrů dosahuje zasklení se třemi skly (trojsklo). Před několika lety byla montáž oken s trojskly jedním z oblíbených úsporných opatření. Postupem času se však od trojitého zasklení začalo upouštět, a to jednak k vysoké ceně, jednak k velké hmotnosti oken, která kladla vyšší nároky na upevnění okenního kování. Mimoto se na trhu začala objevovat okna s dvojsklem využívající odrazivé vrstvy a náplň inertních plynů, která se svými parametry blížila oknům s trojsklem a byla výrazně levnější. V dnešní době, kdy se hledají řešení pro dosažení mnohem nižších hodnot součinitele prostupu tepla, nastává opět renesance oken s vícenásobným zasklením. Kromě toho se objevují další řešení, jako například náhrada prostředního skla průhlednou fólií s pokovením. Hmotnost je stejná jako u dvojskla a odpadají problémy s rozdílnou dilatací tří tabulí skla.

9.2.6. Větrání

Větrání významným zdrojem tepelných ztrát. Nelze ho však jen tak snadno omezit. Nedostatek čerstvého vzduchu vede k únavě a nepohodě lidí v budově, v extrémním případě i ke zdravotním problémům. Větrání nepředstavuje jen přísun kyslíku, ale i odstranění odérů a škodlivin (kouře, prachu, formaldehydů, případně radonu atd.), které se v místnosti uvolňují. I samotnému domu větrání prospívá, protože snižuje vlhkost vznikající pobytem a činností osob. Dostatečné větrání je také prevencí vzniku plísní. Omezením zbytečného větrání lze ušetřit cca 10 až 15 % energie na vytápění.

Intenzita výměny vzduchu

Normy doporučují, aby v místnosti, kde pobývají lidé, byla intenzita výměny vzduchu 0,3 až 0,6 h^{-1} nejčastěji se uvažuje hodnota 0,5 h^{-1} . To znamená, že za hodinu se vymění polovina objemu vzduchu v místnosti. Je zřejmé, že vycházet

z objemu místnosti není ideální. Zdá se tedy lepší vycházet z množství vzduchu na osobu, které je 15 až 25 m³·h⁻¹. Pokud v místnosti lidé nejsou, doporučuje se větrat alespoň s intenzitou 0,1 h⁻¹ s ohledem na odvod vlhkosti a škodlivin. Je-li v domě radon, je třeba větrat velmi intenzivně. V tom případě je vhodné použít strojní větrání, pokud možno s rekuperací tepla. Omezení větrání by mohlo mít v tomto případě tragické následky.

Přirozené větrání

Drtivá většina domů je větrána okny. To je ostatně jedna z jejich zásadních funkcí. Větrání by mělo být nárazové, tj. okna otevřenými dokořán, alespoň jednou za dvě hodiny, aby vzduch mohl proudit rychle. V zimě postačí okna otevřít na 3 až 5 minut, na jaře a na podzim na 10 až 15 minut. Krátké větrání je důležité proto, aby se zbytečně neochlazovaly stěny a podlaha. Větrání trvale pootevřeným oknem je velmi nevhodné. Mnoho tepla tak utíká bez užitku přímo ven a odlehlejší části místností jsou přitom větrány málo.

Infiltrace

Část přirozeného větrání funguje i bez ohledu na uživatele. Netěsnostmi mezi rámem a křídlem okna proniká dovnitř studený vzduch. Teplý vzduch uniká za bezvětrí spárami v horní části oken, za větru odchází okny na závětrné straně. Množství větracího vzduchu závisí na těsnosti oken, rozdílu teplot uvnitř a venku a na rychlosti větru. Důsledkem je to, že větrání infiltrací nikdy není takové, jaké potřebujeme. Není-li místnost obývána, je infiltrace většinou zbytečně vysoká, což zvyšuje spotřebu tepla. Jsou-li v místnosti lidé, je infiltrace obvykle nedostatečná, takže je stejně nutno občas vyvětrat otevřeným oknem.

Řešením je okna utěsnit, případně použít nová těsněná okna. Moderní okna jsou až desetkrát těsnější než obyčejná starší dřevěná okna. Dodatečné těsnění starších oken zvýší jejich těsnost několikanásobně. Následkem však je ale zvýšení vlhkosti v místnosti při nedostatečném větrání. Pak se mohou vyskytnout plísně v koutech a místech tepelných mostů. Ve starších domech s vlhkými zdmi by zatěsnění oken problém s vlhkostí výrazně zhoršilo; správné je nejprve odstranit příčiny vlhnutí. Úspory utěsněním oken závisí na tom, jak netěsná byla okna původní, obvykle je to až 10 %.

Nucené větrání

Větrání pomocí ventilátorů se dnes běžně uplatňuje zatím jen u kuchyňských digestoří a v koupelnách, kde je třeba odvést větší množství vlhkosti. Předpokládá se jen nárazový provoz, který nemá trvalý vliv na prostředí v domě.

Systematické větrání prostor však již není výsadou průmyslových a kancelářských budov. Větráme-li dům pomocí ventilátorů, větráme jen tehdy a jen tolik, kolik potřebujeme, což má velký vliv na spotřebu energie. Ještě větší úspory však lze dosáhnout rekuperací tepla z odpadního vzduchu. Jestliže už dům vybavíme vzduchotechnikou, tato možnost se sama nabízí. Další výhodou může být možnost chladiť dům během léta. To sice nepřinese úsporu energie, ale může významně zvýšit komfort. Instalaci vzduchotechnického zařízení pro rekuperaci tepla k dosažení úspor je ovšem třeba pečlivě zvážit, protože efektivita tohoto opatření závisí

na ceně tepla, které používáme k vytápění, na účinnosti zařízení a na množství a ceně hnací energie spotřebovávané rekuperačním zařízením.

Centrální systémy větrání

Větrací vzduch je přiváděn do místností vzduchotechnickým potrubím vedeným v podhledech stropu, případně v podlaze či stěnách. Odtah vzduchu může být umístěn buď v každé místnosti, nebo centrálně, např. v chodbě. Dveře z místností pak nesmějí být těsné. Srdcem systému je obvykle kompaktní jednotka s odtahovým i přívodním ventilátorem, filtry, rekuperačním výměníkem tepla a ohříváčem vzduchu (případně i chladičem). Ohříváč může být elektrický nebo teplovodní, který se napojí na kotel či jiný zdroj tepla (případně přes akumulární nádrž). Centrální systém větrání se totiž dá dobře spojit s vytápěním domu. Náklady ušetřené za vytápěcí systém pak vyrovnají náklady na instalaci větrání. Vzhledem k rozsahu stavebních prací je vhodný pro novostavby nebo při zásadní rekonstrukci. Pokud chceme mít v domě krb nebo jiné topidlo s komínem, je třeba navrhnout větrání jako mírně přetlakové, protože u podtlakového systému by byl nasáván vzduch komínem. To znamená přivádět o něco více vzduchu, než se odsává. Pokud je vzduch pouze přiváděn a odpadní vzduch uniká okny, není samozřejmě možno využít rekuperaci tepla. Obecně je lepší používat podtlakové systémy, aby se snížil tok vlhkosti z interiéru do konstrukcí. Obvykle je obtížné zajistit různou intenzitu větrání v jednotlivých místnostech. Řeší se to tak, že část vzduchu v domě cirkuluje, takže dům je z hlediska větrání jedna velká místnost, kam se přivádí čerstvý vzduch podle počtu osob. Větrací systém musí umožňovat měnit objem větracího vzduchu podle potřeby, nejčastěji plynulou nebo stupňovitou změnou otáček ventilátorů. Centrální větrání umožní velmi efektivně využít solární zisky z osluněných místností, které rozvede po celém domě, takže nedochází k přehřívání osluněných místností.

Díky strojnímu větrání a rekuperaci tepla lze uspořit až 80 % energie pro větrání, tj. cca čtvrtinu celkové spotřeby domu. Velkým přínosem je vyšší komfort bydlení a dostatek čerstvého vzduchu.

9.2.7. Zdroje tepla

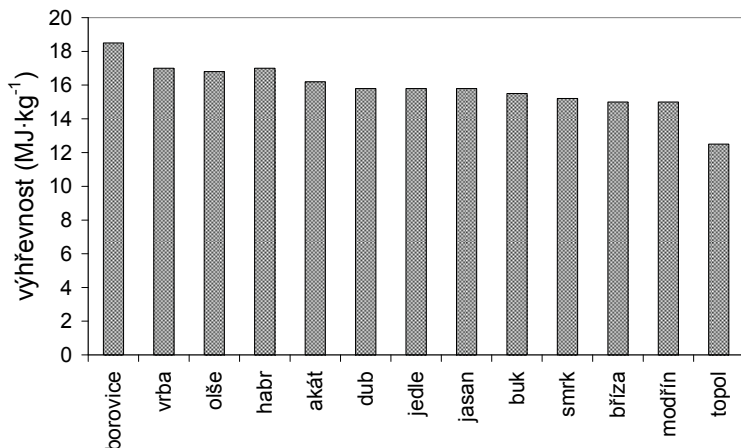
Dřevo, biomasa

Dřevo u nás stále ještě patří k nejlevnějším palivům. Pro větší zdroje (např. blokové kotelny bytových domů) se využívá i štěpka, sláma nebo jiná spalitelná biomasa, její cena je však individuální.

Platí, že dřevo by se mělo spalovat ve speciálních kotlích. Topení dřevem v kotlích na uhlí je málo účinné. Protože dřevo hoří dlouhým plamenem (na rozdíl od uhlí, které má plamen krátký), velká část energie vyletí nevyužita komínem.

Rovněž je třeba topit výhradně suchým dřevem, to znamená aspoň dva roky skladovaným v zakryté hranici. Syrové dřevo výrazně snižuje životnost kotle a je ho pochopitelně potřeba mnohem větší množství. Navíc má oproti proschlému poloviční výhřevnost, protože velká část tepla je spotřebována na vypaření vody. Potřeba skladovacího prostoru je (spolu s prací na jeho přípravu) jednou z velkých nevýhod dřeva. Jestliže nezateplený rodinný domek spotřebuje za rok 15-25 pro-

storových metrů dřeva (prm), pak potřeba prostoru okolo domu je opravdu velká. Různé druhy dřeva mají přibližně stejnou výhřevnost (Obr. 9.8). Tvrdé dřevo má větší měrnou hmotnost než měkké, ve stejně velkém polenu je tedy více energie.

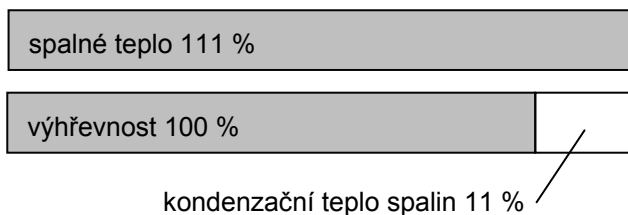


Obr. 9.8: Výhřevnost dřeva při 20% vlhkosti [7]

Zemní plyn

Jde o palivo velmi komfortní a poměrně ekologické (emise oxidů síry a prachu jsou prakticky nulové), které lze využívat s vysokou účinností. Kotle se dají velmi dobře regulovat.

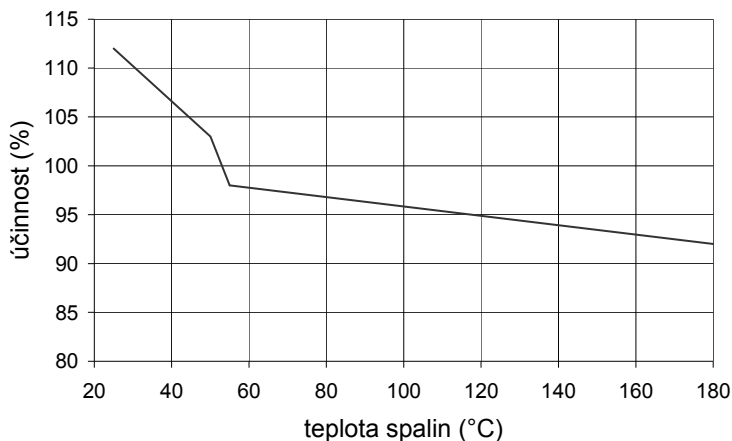
V poslední době se zemní plyn účtuje v kWh, nikoli v m³ jako dřívě. Plynoměry však stále měří v m³, takže dodavatel plynu přepočítává objem na kWh podle průměru spalného tepla za zúčtovací období. Spalné teplo je vyšší než výhřevnost (1,11 x) – viz. Obr. 9.9. Obě veličiny udávají, kolik energie je v plynu obsaženo.



Obr. 9.9: Maximální účinnost kotle v závislosti na ochlazení spalin [7]

Spálíme-li plyn, vznikne CO₂, vodní pára a malé množství jiných zplodin (oxidy dusíku aj.). Pokud však spaliny ochladíme, pára zkondenzuje a získáme teplo, které bylo potřeba na přeměnu vody na páru. Toto teplo právě tvoří rozdíl mezi výhřevností (která ho neuvažuje) a spalným teplem (které ho uvažuje). Kondenzace spalin je většinou nežádoucí, protože působí nízkoteplotní korozi ocelových kotlů.

Definice účinnosti kotlů je založena právě na výhřevnosti. Ta je definována jako poměr mezi energií v palivu (tj. výhřevností) a energií, kterou z kotle získáme (rozdíl jsou ztráty). Důsledkem je to, že moderní kondenzační kotle, které nejsou nízkoteplotní korozí ohroženy, mohou mít účinnost přes 100 %. Dalším důsledkem je to, že údaj o dodávce energie na faktuře za plyn musíme napřed přepočítat na výhřevnost, chceme-li jej použít pro technické výpočty.



Obr. 9.10: Maximální účinnost kotle v závislosti na ochlazení spalin [7]

Solární systémy

Používají se jako doplňkový zdroj, zejména na začátku a na konci topné sezóny. To vyplývá z toho, že v zimě, kdy je spotřeba tepla největší, je slunečního svitu málo. Teplovodní kolektory mohou (kromě přípravy teplé vody, což je obvykle primární) odvádět teplo do podlahového topení nebo nízkoteplotních radiátorů. Akumulační nádrž je nezbytná, protože v době slunečního svitu využívá dům především pasivní zisky okny a prosklením.

9.2.8. Návratnost investic při zateplování

Od investice čekáme, že nám zhodnotí vložené peníze s určitým ziskem a s určitým rizikem. Na zateplení se můžeme také dívat jako na útratu. Zateplením by měla stoupnout užitná i tržní hodnota domu. Rozhodnutí zde tedy závisí jen na osobních preferencích. V případě, že dům už opravdu potřebuje novou fasádu, stojíme před tzv. vynucenou investicí. Stejně jako zvažujeme, jestli udělat fasádu „obyčejnou“ s nižšími náklady, nebo zda by nebylo lepší udělat fasádu zateplenou a rok co rok platit za teplo méně než předtím. Zateplení je pak relativně levnější, protože nějaké náklady bychom museli vynaložit v každém případě.

Při zateplování budovy můžeme využít jak opatření s rychlou návratností, tak opatření nenávratná. Pro základní ekonomické vyhodnocení návratnosti potřebujeme znát tři parametry:

- 1) Náklady na úsporná opatření - jednotkové ceny (např. cena za m² zateplení). Pro většinu staveb jsou přibližně stejné.

- 2) Výši možných úspor energie - čím je původní stavba horší, čím více v ní dnes protopíme, tím snáze dosáhneme úspor (zateplení na tenké cihelné zdi přinese vyšší úsporu než na zdi z izolačních tvárnic).
- 3) Cenu tepla - závisí nejen na ceně paliva, ale i na účinnosti kotle či jiného zařízení. Někdy je do ceny paliva nutno zahrnout i další náklady - např. na likvidaci popela, na vybudování plynové přípojky a podobně. Zejména u elektrického topení je nutné platit stále platby bez ohledu na spotřebované množství. Čím méně elektřiny protopíme, tím je kilowatthodina dražší. Výstupem jednoduchého ekonomického hodnocení je prostá návratnost investice. Je-li delší než životnost opatření, vložené prostředky se nám nikdy nevrátí.

V Česku je návratnost investic do zateplení živě diskutovaný pojem. Existují propočty, které prokazují, že investice do zateplení se vrátí během 7-10 let. Samozřejmě v závislosti na aktuálních cenách energií. Spotřeba domu se posuzuje podle spotřeby kWh na m² obytné plochy za rok. Starší nezateplené domy mají spotřebu 200 kWh·m⁻² za rok. Trendy v budoucí výstavbě jednoznačně míří k nízkoeenergetickým zatepleným stavbám, které mají spotřebu pouhých 50 kWh·m⁻² za rok.

Obecně lze říci, že komplexním zateplením včetně výměny oken lze ušetřit u domů postavených do roku 1979 mezi 50 až 70 % tepla na vytápění a u domů postavených po tomto roce je úspora obvykle mezi 30 až 50 % tepla. Rozdíl je způsoben tím, že v tomto roce začaly platit nové normy na tepelné izolace.

V této kapitole jsou použity doslovné citace, tabulky a obrázky z literatury [6, 7].

9.3. Připojování elektrotepelných spotřebičů k distribuční síti nízkého napětí

9.3.1. Podmínky pro připojování elektrotepelných spotřebičů

Podmínky pro připojení elektrotepelných spotřebičů jsou dány příslušným rozvodným závodem. Obecně platí podmínka, že připojení každého elektrického spotřebiče s příkonem 10 kW a vyšším a připojení elektrotepelných spotřebičů, pokud jejich souhrnný příkon včetně spotřebičů již připojených překročí hodnotu 5 kW, by měl schválit příslušný rozvodný závod s ohledem na výkonovou propustnost elektrické distribuční sítě v místě napojení.

Další podmínky pro připojení elektrotepelných spotřebičů jsou svázány s příslušnými tarifními sazbami.

9.3.2. Jištění elektrotepelných spotřebičů

Stálé platby jsou odvozeny podle hodnoty zaplombovaného hlavního jističe. Tím je limitován maximální celkový proud odběrného místa.

Další jištění obvodů odběrného místa musí zajistit ochranu jednotlivých vedení a ochranu připojených spotřebičů. Většina elektrotepelných spotřebičů má vlastní jištění proti nadproudu.

Protože elektrické obvody pro elektrotepelné spotřebiče jsou samostatné z důvodu blokování a ovládání, je jejich systém jištění závislý na příkonu elektrotepelných spotřebičů a také na příslušných vodičích (ty jsou ovšem rovněž dimenzovány podle příkonu elektrotepelných spotřebičů).

Obecně se musí provádět jištění proti nadproudům a proti zkratovým proudům.

9.3.3. Měření spotřeby elektrické energie

Měřicí zařízení musí být osazeno na elektroměrových deskách nebo v elektroměrových rozváděčích. Umístění měřicího zařízení závisí na charakteru daného objektu. Měření by mělo, pokud to podmínky dovolují, být kdykoliv přístupné pracovníkům rozvodného závodu.

Na elektroměrových rozváděčích mohou být namontovány jen elektroměry, sazbový spínač (sazbové hodiny nebo přijímač HDO), jistič před elektroměrem, jistící zařízení obvodu sazbového spínače, ovládací relé nebo stykače, nulová svorkovnice, popř. další příslušenství, které slouží výhradně pro účely měření.

Rozváděče musí být v provedení, které vyhovuje prostředí, v němž jsou umístěny. Rozváděče s dveřmi, po jejichž otevření nejsou přístupné živé části, musí mít po uzavření dveří krytí alespoň IP 30, po otevření dveří krytí alespoň IP 20.

Vnitřní uspořádání elektroměrových rozváděčů musí být uspořádáno tak, aby živé části neměřeného rozvodu byly odděleny od prostoru pro elektroměry a sazbové spínače.

Před elektroměr se musí osadit jistič se stejným počtem pólů, jako má elektroměr fází. Jistič se dimenzuje tak, aby neomezoval příkon instalovaných spotřebičů odběrného místa. Výjimku tvoří případy, kdy si omezení vyžaduje provoz elektrické distribuční sítě nebo je-li proudová hodnota jističe součástí sjednaného tarifu.

Elektroměrové desky, popř. rozváděče, musí být provedeny pro montáž měřidel a pomocných přístrojů s třídou ochrany I. V případě, že je rozváděč osazen zařízením v provedení II. třídy izolace, se ochranný vodič nezapojí a zasune se za desku.

Elektroměry pro přímé měření se osazují pouze do hodnoty 80 A. Pro měření nad 80 A je nutné použít měřicí transformátory proudu s převodem XX/5 A, které musí být třídy přesnosti 0,5 a o jmenovité zátěži 15 VA.

Pomocná relé pro ovládání stykačů přípravy teplé užitkové vody a vytápění musí být v oceloplechovém rozváděči nainstalována do prostoru hlavních jističů.

9.3.4. Blokování elektrotepelných spotřebičů

Blokování elektrotepelných spotřebičů zabraňuje jejich provozu ve vymezených časových pásmech. Tato technická podmínka dovoluje definovat příslušné tarify pro odběr elektrické energie. Blokovací relé nebo stykače jsou ovládány spínacími hodinami nebo přijímači HDO.

Při akumulacím vytápění je základní podmínkou jeho provozu blokování proti odběru ve vysokém tarifu. Blokování musí být provedeno automaticky spolu se změnou sazby na elektroměru.

U přímotopného vytápění je rovněž podmínkou blokování provozu vytápění v době vysokého tarifu, to je v době energetických špiček. Blokování musí být automatické stejně jako v případě akumulacím vytápění.

Průtokové přímotopné ohřívače užitkové vody nemusí být blokovány, ale musí být vyloučena jejich soudobost s provozem elektrického vytápění.

Akumulační ohřívače teplé užitkové vody s kapacitou nad 25 litrů vody musí být blokovány proti odběru ve vysokém tarifu. Toto blokování je technicky provedeno stejně jako u akumulacím vytápění.

Spínací hodiny

Jeden z prostředků ovládání elektrotepelných spotřebičů jsou spínací hodiny. Tento přístroj zároveň přepíná sazbu elektroměru, ovládá a blokuje elektrotepelné spotřebiče. Spínací hodiny jsou tvořeny hodinovým strojkem (dříve mechanickým, nyní elektronickým) s 24hodinovým režimem. U spínacích hodin, které ovládají elektroměry s vyhodnocováním maxima, je systém týdenní.

Na spínacích hodinách jsou nastaveny doby vysokého a nízkého tarifu. Kromě napájecích kontaktů mají spínací hodiny pracovní kontakty spínacího relé. Spínací relé se překlopí v nastavených časech, a tím provede změnu sazby na elektroměru a sepnutí nebo blokování elektrotepelných spotřebičů.

Nevýhodou spínacích hodin je to, že jejich provoz není časově synchronizován. Záleží tedy na přesnosti hodinového stroje, zda jsou pásma vysokého a nízkého tarifu spínána přesně. Spínací hodiny musí být kontrolovány a seřizovány pracovníky rozvodných závodů, protože tyto přístroje jsou plombovány.

Další nevýhodou spínacích hodin je to, že nastavení pásem vysokého a nízkého tarifu se nedá měnit na dálku. Případnou změnu mohou provést pracovníci rozvodného závodu pouze přímo na odběrném místě. Provozem spínacích hodin nelze okamžitě reagovat na aktuální stav v napájecí síti.

Spínací hodiny se používají v oblastech, které nejsou pokryty signálem HDO, nebo tam, kde je příjem signálu HDO nespolehlivý.

Přijímače HDO

Přijímače HDO postupně nahrazují spínací hodiny. Jsou zapojeny stejně jako spínací hodiny na elektroměrovém rozváděči.

Systém HDO (hromadné dálkové ovládání) je systém ovládání přijímačů z jednoho bodu (vysílač HDO) bez zpětného hlášení o provedení povelu. Vysílač HDO je umístěn v napájecí rozvodně a jeho provoz je obvykle řízen z příslušného dispečinku. Spojovací cestu mezi vysílačem a přijímači tvoří distribuční elektrická síť. Vysílaný telegram je kódován na ovládací frekvenci a tento signál je superponován na běžnou provozní frekvenci 50 Hz.

Popis systému HDO, druhů telegramů a technického řešení systému je rozsáhlé téma. Proto se v této kapitole zmíníme pouze o problematice, která se bez-

prostředně týká řízení provozu elektrotepelných spotřebičů.

Přijímač HDO podle svého nastavení reaguje na příslušný vyslaný telegram HDO a provádí, stejně jako spínací hodiny, přepnutí sazby na elektroměru a ovládání (blokování) elektrotepelných spotřebičů.

Výhodou tohoto systému je, že přepínání tarifů může být provedeno podle okamžitého stavu sítě. Rozvodný podnik ovšem musí dodržet podmínky, které jsou pro danou sazbu závazné. Odpadá zde problém s časovou synchronizací a také denní i týdenní provoz nevyžaduje jiný druh přijímače.

Problém systému HDO je ten, že rušení vyššími harmonickými proudy a rezonančními jevy nedovolilo rozšířit tento systém zejména do průmyslových oblastí, kde jsou tato rušení markantní. Snižováním ovládací frekvence se tento systém stává odolnější proti rušení [9].

9.4. Literatura

- [1] Drkal, F.: K vývoji klimatizace - TZB-Info [on-line]. 13.6.2005 [cit. 2011-10-25]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2557-k-vyvoji-klimatizace-ii>
- [2] TSC - Jak fungují klimatizace [cit. 2011-10-23]. Dostupné z: <http://www.tsc-lg.cz/o-klimatizacich/jak-to-funguje>
- [3] Rubín, A., Rubínová, O.: Klimatizace a větrání, Šlapanice, ERA 2004
- [4] Székelyová, M., Ferstl, K.: Větrání a klimatizace, Jaga, Bratislava 2006
- [5] Dufka, J.: Větrání a klimatizace domů a bytů, Praha, Grada 2005
- [6] Dufka, J.: Hospodárné vytápění domů a bytů, Praha, Grada 2007
- [7] Srdečný, K., Macholda, F.: Úspory energie v domě, Grada, Praha 2004, ISBN 80-247-0523-0
- [8] Porovnání nákladů na vytápění podle druhu paliva [cit. 2011-10-23]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/269-porovnani-nakladu-na-vytapani-podle-druhu-paliva>
- [9] Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení, Montanex Ostrava 2008, ISBN 978-80-7225-291-6

10. Numerické metody v elektrotepelné technice

10.1. Diferenciální operace s vektory

V této kapitole je uveden přehled základních diferenciálních operací s vektory, se kterými se můžete setkat při modelování elektrotepelných procesů. [1]-[10]

Funkci $u = f(x, y, z)$ definovanou v určité oblasti, nazýváme skalárním polem. Skalární pole přiřazuje každému bodu daného pole určitou číselnou hodnotu (skalár). Plochy $u = \text{konst.}$ jsou hladiny skalárního pole. Příkladem skalárního pole je potenciální elektrostatické pole. Jeho hladiny se nazývají ekvipotenciální plochy.

Parciální diferenciální rovnice se používají v případech, kdy nás zajímá vliv několika proměnných na danou veličinu, přičemž jednotlivé nezávislé proměnné působí zpravidla nezávisle na sobě. Parciální diferenciální rovnice je tedy diferenciální rovnice více proměnných a pro dílčí derivace 1. řádu podle jednotlivých proměnných se používá následující označení

$$u_x = \frac{\partial u}{\partial x}, u_y = \frac{\partial u}{\partial y}, u_z = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (10.1)$$

pro dílčí derivace 2. řádu mají tvar

$$u_{xx} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, u_{yy} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, u_{zz} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (10.2)$$

Integrálem nebo řešením parciální diferenciální rovnice nazýváme funkci, která rovnici vyhovuje identicky v nějaké oboru.

Gradient skalárního pole $u = f(x, y, z)$ je vektor, jehož složkami jsou parciální derivace skalárního pole podle jednotlivých souřadnic

$$\text{grad } u = \frac{\partial u}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial u}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial u}{\partial z} \mathbf{k} = \nabla u = \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k} \right) u, \quad (10.3)$$

kde $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ jsou jednotkové vektory, ∇ je Hamiltonův operátor nabla (nabla operátor) definován vztahem

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}. \quad (10.4)$$

Gradient skalárního pole je v každém bodě kolmý k jeho hladině. Gradientem elektrostatického pole (v každém bodě) je definován vektor, který charakterizuje intenzitu daného pole. Všechny tyto vektory tvoří vektorové pole. Křivky, které se

v každém svém bodě dotýkají tohoto pole, se nazývají siločáry. Siločáry potenciálního pole jsou tedy vždy kolmé k ekvipotenciálám. Gradient má tedy v každém bodě skalárního pole směr největšího růstu tohoto pole. Největšího úbytku pole dosáhneme pohybem ve směru opačném ke gradientu, nulové změny ve směrech kolmých ke gradientu.

Rovnice vyjadřující Fourierův zákon vedení tepla obsahuje gradient teploty. Můžeme říct, že gradient teploty určuje maximální nárůst teploty ve směru normály k izotermě.

Divergence vektorového pole \mathbf{a} je skalár a platí

$$\operatorname{div} \mathbf{a} = \nabla \cdot \mathbf{a} = \mathbf{i} \cdot \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial x} + \mathbf{j} \cdot \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial y} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial z} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}. \quad (10.5)$$

Z uvedené rovnice vidíme, že divergenci vektorového pole lze psát i jako součet skalárních součinů.

Při proudění kapaliny, divergence vektoru rychlosti vyjadřuje objemové množství kapaliny, které vyteče z jednotkového objemu za jednotku času, jinými slovy vydatnost zřídla jednotkového objemu. Vektorové pole \mathbf{a} nazýváme zřídlovým, jestliže alespoň v jednom bodě platí $\operatorname{div} \mathbf{a} \neq 0$. Vektorové pole se nazývá nezřídlové, pokud $\operatorname{div} \mathbf{a} = 0$, např. nestlačitelná kapalina bez zřídla. Tok tohoto pole uzavřenou plochou je roven nule (stejně množství vystupuje z plochy a vstupuje do ní).

Rotace vektoru \mathbf{a} je vektor

$$\operatorname{rot} \mathbf{a} = \nabla \times \mathbf{a} = \left(\frac{\partial a_z}{\partial y} - \frac{\partial a_y}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial a_x}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial x} \right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial a_y}{\partial x} - \frac{\partial a_x}{\partial y} \right) \mathbf{k}. \quad (10.6)$$

Rotaci vektoru \mathbf{a} můžeme napsat jako vektorový součin operátoru nabla a daného vektoru.

Rotace vektoru rychlosti kapaliny vyjadřuje směr osy, kolem které se kapalina otáčí jako celek v okolí uvažovaného bodu. Délka tohoto vektoru určuje dvojnásobnou rotační rychlost (v obloukové míře). Pro nevírové pole platí $\operatorname{rot} \mathbf{a} = 0$. Každé nevírové pole lze vyjádřit v jednoduše souvislé oblasti jako gradient nějakého skalárního pole. Rotaci lze také psát jako součet vektorových součinů

$$\operatorname{rot} \mathbf{a} = \nabla \times \mathbf{a} = \left(\mathbf{i} \times \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial x} \right) + \left(\mathbf{j} \times \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial y} \right) + \left(\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{a}}{\partial z} \right). \quad (10.7)$$

Skalárním násobením operátoru nabla sebou samým dostaneme Laplaceův operátor

$$\Delta = \nabla \cdot \nabla = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (10.8)$$

Je to lineární diferenciální operátor 2. řádu a je sestaven z parciálních derivací podle souřadnic. Laplaceův operátor můžeme aplikovat na skalární i vektorové pole. Laplaceův operátor nemá tak názorný význam jako divergence a rotace, ale uplatňuje se v elektřině a magnetismu, v nauce o vlnění apod.

Všechny uvedené diferenciální operátory (gradient, divergence, rotace, Laplaceův operátor, operátor nabla) jsou homogenní a aditivní (pro součet argumentů obdržíme součet hodnot pro jednotlivé argumenty). Dále jsou uvedeny některé důležité vztahy pro počítání s diferenciálními operátory

$$\begin{aligned}\operatorname{div}(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) &= \mathbf{b} \operatorname{rot} \mathbf{a} - \mathbf{a} \operatorname{rot} \mathbf{b}, \\ \operatorname{div}(\operatorname{grad} u) &= \nabla \cdot (\nabla u) = \Delta u, \\ \operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{a}) &= \operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{a}) - \Delta \mathbf{a}, \\ \operatorname{rot}(\operatorname{grad} u) &= \mathbf{0}, \\ \operatorname{div}(\operatorname{rot} \mathbf{a}) &= 0.\end{aligned}\tag{10.9}$$

Poslední dvě rovnice vyjadřují důležitý poznatek, že potenciální pole ($\operatorname{grad} u$) je vždy nevírové (jeho rotace je identicky rovna nule) a pole $\operatorname{rot} \mathbf{a}$ je nutně nežířdlové (jeho divergence je identicky nulová).

V elektrotepelné technice se často řeší úlohy pro válcové útvary, proto budou uvedeny základní diferenciální operace v cylindrických souřadnicích r, φ, z . Výsledkem divergence vektoru a Laplaceova operátoru skalární funkce je skalár

$$\begin{aligned}\operatorname{div} \mathbf{a} &= \frac{1}{r} \frac{\partial(r a_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial a_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial a_z}{\partial z}, \\ \Delta u &= \nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2},\end{aligned}\tag{10.10}$$

souřadnice vektoru $\operatorname{grad} u$ ve směrech r, φ, z jsou

$$\frac{\partial u}{\partial r}, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi}, \quad \frac{\partial u}{\partial z},\tag{10.11}$$

souřadnice vektoru $\operatorname{rot} \mathbf{a}$ ve směrech r, φ, z

$$\frac{1}{r} \frac{\partial a_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial a_\varphi}{\partial z}, \quad \frac{\partial a_r}{\partial z} - \frac{\partial a_z}{\partial r}, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial(r a_r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial a_r}{\partial \varphi}.\tag{10.12}$$

Pozn.: Skalárním součinem dvou vektorů $\mathbf{a}(a_x, a_y, a_z)$, $\mathbf{b}(b_x, b_y, b_z)$ (označení $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ nebo \mathbf{ab}) nazýváme číslo (skalár)

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z.\tag{10.13}$$

Jsou-li \mathbf{a} , \mathbf{b} nenulové vektory a jejich úhel je φ , pak pro jejich skalární součin platí

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \cos \varphi. \quad (10.14)$$

Nenulové vektory \mathbf{a} , \mathbf{b} jsou k sobě kolmé právě tehdy, pokud platí

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = 0. \quad (10.15)$$

Vektorový součin (označení $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$) dvou vektorů $\mathbf{a} (a_x, a_y, a_z)$, $\mathbf{b} (b_x, b_y, b_z)$ je vektor a pomocí základních vektorů \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} lze psát vektorový součin ve tvaru

$$\mathbf{w} = \mathbf{a} \times \mathbf{b} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}. \quad (10.16)$$

Vektorový součin dvou lineárně závislých vektorů je nulový vektor. Vektorový součin dvou lineárně nezávislých vektorů \mathbf{a} , \mathbf{b} , které svírají úhel φ , má tyto vlastnosti:

- je kolmý k oběma daným vektorům \mathbf{a} , \mathbf{b} , tj. $\mathbf{w} \cdot \mathbf{a} = 0$, $\mathbf{w} \cdot \mathbf{b} = 0$,
- jeho délka je číselně rovna obsahu rovnoběžníka určeného vektory \mathbf{a} , \mathbf{b}

$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \sin \varphi. \quad (10.17)$$

10.2. Křivkový integrál

Křivkový integrál je integrál skalárního nebo vektorového pole podél určité křivky. Mějme prostorovou orientovanou po částech hladkou křivku c , která je uzavřená. Křivkový integrál podél této uzavřené křivky se nazývá cirkulace vektorového pole \mathbf{a} po uzavřené křivce c a má zápis

$$\oint_c \mathbf{a} \cdot d\mathbf{s}, \quad (10.18)$$

kde $d\mathbf{s} = \mathbf{t} ds$, s je parametr délky a \mathbf{t} je jednotkový tečný vektor v uvažovaném bodě křivky. Integrál po uzavřené křivce je v potenciálním poli roven nule

$$\oint_c \mathbf{a} \cdot d\mathbf{s} = \oint_c \text{grad } u \cdot d\mathbf{s} = 0. \quad (10.19)$$

Stokesova věta vyjadřuje vztah mezi křivkovým integrálem vektorového pole přes uzavřenou křivku c a plošným integrálem, kde plocha A , je plocha ohraničená křivkou c . Platí

$$\oint_c \mathbf{a} \cdot d\mathbf{s} = \iint_A \text{rot } \mathbf{a} \cdot d\mathbf{A}, \quad (10.20)$$

kde $d\mathbf{A} = n dA$, \mathbf{n} je vektor vnější normály. Fyzikální interpretace Stokesovy věty: Tok vektoru \mathbf{a} plochou A je roven cirkulaci vektoru \mathbf{a} po křivce c .

Gaussova-Ostrogradského věta dává do souvislosti plošný a objemový integrál

$$\iiint_V \operatorname{div} \mathbf{a} \cdot dV = \iint_A \mathbf{a} \cdot d\mathbf{A}. \quad (10.21)$$

Integrál na pravé straně je plošný integrál po uzavřené ploše, jejímž vnitřkem je objem V . Fyzikální význam: Tok vektoru \mathbf{a} uzavřenou plochou je roven objemovému integrálu z divergence vektoru \mathbf{a} .

10.3. Besselovy funkce

Pro modelování jevů některých fyzikálních polí, např. při analýze teplotních a elektromagnetických polí ve válcovém prostředí, se používají cylindrické funkce. Pomocí těchto funkcí se vyšetřuje rozložení teploty ve válcové vsázce, elektrické pole ve válci při dielektrickém ohřevu, analyzují se povrchové jevy v elektricky vodivém válci působením elektromagnetického pole apod. Existuje několik typů cylindrických funkcí, jedním z nich jsou Besselovy funkce, které se rozlišují podle druhu a řádu.

Mějme diferenciální rovnici

$$x^2 y'' + xy' + (x^2 - n^2)y = 0, \quad (10.22)$$

potom řešením této rovnice je Besselova funkce, kde číslo n je označováno jako řád funkce. Funkce $y = J_n(x)$ je Besselova funkce 1. druhu řádu n a je definovaná vztahem

$$J_n(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^n \sum \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k}, \quad (10.23)$$

kde $k = 0, 1, 2, \dots$ Pro n celé číslo platí

$$J_{-n}(x) = (-1)^n J_n(x). \quad (10.24)$$

Ve vztahu (1.20) je Γ Eulerova funkce 2. řádu nebo-li funkce gama, pro kterou platí vztah

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (10.25)$$

a platí $\Gamma(n+1) = n!$, tj. pro $n = 0$ je $\Gamma(0+1) = 0! = 1$, pro $n = 1$ je $\Gamma(1+1) = 1! = 1$ atd.

V aplikacích elektrických ohřevů se využívají Besselovy funkce s reálným a komplexním argumentem. Nejprve jsou uvedeny Besselovy funkce nultého a prvního řádu pro reálný argument:

- Besselova funkce 1. druhu, 0. řádu ($n = 0$) s reálným argumentem

$$J_0(x) = 1 - \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{(2 \cdot 4)^2} - \frac{x^6}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2} + \frac{x^8}{(2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8)^2} - \dots, \quad (10.26)$$

- Besselova funkce 1. druhu, 1. řádu s reálným argumentem

$$J_1(x) = \frac{x}{2} - \frac{x^3}{2^2 \cdot 4} + \frac{x^5}{(2 \cdot 4)^2 \cdot 6} - \frac{x^7}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2 \cdot 8} + \dots \quad (10.27)$$

Zároveň platí, že derivace funkce $J_0(x)$ je záporná hodnota funkce $J_1(x)$

$$\frac{d[J_0(x)]}{dx} = -J_1(x). \quad (10.28)$$

Besselovy funkce s komplexním argumentem ($x\sqrt{-j}$) se vyjadřují pomocí dvou funkcí ber x a bei x , kde funkce ber x zahrnuje součet všech reálných členů a funkce bei x záporný součet imaginárních členů. Potom můžeme psát:

- Besselova funkce 1. druhu, 0. řádu s komplexním argumentem ($x\sqrt{-j}$)

$$J_0(x\sqrt{-j}) = 1 - \frac{(x\sqrt{-j})^2}{2^2} + \frac{(x\sqrt{-j})^4}{(2 \cdot 4)^2} - \frac{(x\sqrt{-j})^6}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2} + \dots$$

$$J_0(x\sqrt{-j}) = 1 + j \frac{x^2}{2^2} - \frac{x^4}{(2 \cdot 4)^2} - j \frac{x^6}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2} + \dots \quad (10.29)$$

$$J_0(x\sqrt{-j}) = \text{ber } x - j\text{bei } x,$$

- Besselova funkce 1. druhu, 1. řádu s komplexním argumentem ($x\sqrt{-j}$)

$$J_1(x\sqrt{-j}) = \frac{d[J_0(x\sqrt{-j})]}{d(x\sqrt{-j})} = -\sqrt{j}(\text{ber}' x - j\text{bei}' x). \quad (10.30)$$

Besselovy funkce 2. druhu (Neumannovy) jsou rozlišeny označením $N_n(x)$ a jsou funkcí Besselovy funkce 1. druhu. V následujících vztazích je γ Eulerova konstanta, $\gamma = 0,57721566$:

- Besselova funkce 2. druhu, 0. řádu s reálným argumentem

$$N_0(x) = \frac{2}{\pi} \left(\gamma + \ln \frac{x}{2} \right) J_0(x) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \left(\frac{x}{2} \right)^m \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k}, \quad (10.31)$$

- Besselova funkce 2. druhu, 1. řádu s reálným argumentem

$$N_1(x) = -\frac{d[N_0(x)]}{dx}, \quad (10.32)$$

- Besselova funkce 2. druhu, 0. řádu s komplexním argumentem

$$N_0(x\sqrt{-j}) = \text{ner } x - j \text{nei } x, \quad (10.33)$$

- Besselova funkce 2. druhu, 1. řádu s komplexním argumentem

$$N_1(x\sqrt{-j}) = \frac{d[N_0(x\sqrt{-j})]}{d(x\sqrt{-j})} = -\sqrt{j}(\text{ner}' x - j \text{nei}' x). \quad (10.34)$$

Besselovy funkce 2. druhu s komplexním argumentem jsou vyjádřeny analogicky jako u 1. druhu a byly také zavedeny funkce zahrnující součet všech reálných členů a záporný součet imaginárních členů, označené $\text{ner } x$ a $\text{nei } y$. Zápisy $\text{ber}' x$, $\text{bei}' y$, $\text{ner}' x$ a $\text{nei}' x$ vyjadřují derivace těchto funkcí.

10.4. Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice jsou základní rovnice pro elektromagnetické pole, které vysvětlují všechny kategorie elektromagnetických jevů. Jsou teoretickým základem pro vysvětlení funkce elektromagnetických zařízení. Můžeme z nich odvodit rovnice, které popisují elektrické, magnetické a elektromagnetické pole. Význam těchto rovnic je i v tom, že zůstávají beze změny ve všech pozorovacích soustavách.

Maxwellovy rovnice určují vlnový charakter elektromagnetického pole. Podstatou vlnových jevů je konečná rychlost šíření těchto jevů. Pokud by byla rychlost nekonečně velká, jev by byl okamžitě v celém prostoru, šíření by nebylo postupné a neexistovalo by ani vlnění.

K popisu elektromagnetického pole se využívají základní veličiny definované v těchto polích, elektrická a magnetická intenzita a indukce (E , H , D , B). Vektory intenzity elektrického a magnetického pole E , H jsou na sebe vzájemně kolmé.

Maxwellovy rovnice se vyjadřují buď v integrálním, nebo v diferenciálním tvaru. Skutečnost přímo popisuje integrální tvar, protože se vztahuje na konečné délky, plochy a objemy, a platí obecně

$$\begin{aligned}
 \oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} &= J + \frac{d\Psi}{dt}, \\
 \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= -\frac{\partial\Phi}{\partial t}, \\
 \oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} &= Q, \\
 \oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{10.35}$$

V prvních dvou rovnicích představuje křivkový integrál cirkulaci vektoru (\mathbf{H} nebo \mathbf{E}) podél uzavřené orientované křivky c . Ve zbývajících dvou rovnicích plošný integrál označuje výtok vektoru z uzavřené plochy A . První rovnice vyjadřuje souvislost mezi cirkulací \mathbf{H} a časovou změnou elektrického indukčního toku Ψ a celkovým proudem J procházejícím plochou ohraničenou křivkou c . Ve druhé rovnici je vyjádřena souvislost mezi cirkulací \mathbf{E} a časovou změnou indukčního magnetického toku Φ procházejícím danou plochou. Gaussův zákon pro elektrické pole je třetí rovnice a vyjadřuje souvislost mezi elektrickou indukcí \mathbf{D} a celkovým elektrickým nábojem Q uvnitř této plochy. Poslední rovnice je Gaussův zákon pro magnetické pole a říká, že celkový magnetický tok jakoukoliv uzavřenou plochou je nulový.

První Maxwellova rovnice elektromagnetického pole v integrálním tvaru vyjadřuje obecně platný vztah mezi magnetomotorickou silou v uzavřené křivce a mezi vodivým proudem a časovou změnou elektrického indukčního toku. Proud a tok prostupují vnitřkem dané uzavřené křivky. Z uvedené rovnice můžeme říct, že i bez vodivého proudu může vzniknout magnetomotorická síla, mění-li se elektrický indukční tok vnitřkem křivky. Podobně můžeme říct, že časově proměnný magnetický tok indukuje v uzavřené křivce, jejímž vnitřkem prostupuje, elektromotorickou sílu (2. Maxwellova rovnice).

Diferenciální tvar Maxwellových rovnic převádí integrální veličiny na veličiny měrné (hustoty) a tím soustřeďuje platnost matematických vztahů do elementu, tj. do určitého bodu. Tyto Maxwellovy rovnice jsou základní parciální diferenciální rovnice elektromagnetického pole, které popisují jeho makroskopické zákonitosti. Jsou definovány následujícími vztahy

$$\begin{aligned}
 \text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\
 \text{rot } \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\
 \text{div } \mathbf{D} &= \rho_0, \\
 \text{div } \mathbf{B} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{10.36}$$

Takto upravené rovnice platí jen v takových bodech, v nichž veličiny jsou spojitě a spojitě diferencovatelné funkce polohy. První dvě rovnice obsahují plošné hustoty, druhé dvě prostorové hustoty. Z uvedených rovnic je zřejmé, z jakých příčin vznikají víry pole (rotace) nebo zřídla silových čar (divergence). První z rovnic vyjadřuje skutečnost, že vírové magnetické pole je vyvoláno nejen vodivostními proudy (\mathbf{J}), ale i posuvnými proudy ($\partial\mathbf{D}/\partial t$). Druhá rovnice je vlastně zákonem elektromagnetické indukce, tj. časová změna magnetického pole je vždy spojená s existencí vírového elektrického pole. Třetí rovnice potvrzuje existenci volného elektrického náboje s hustotou ρ_0 (ρ_0 je objemová hustota náboje) a platí obecně. Čtvrtá rovnice tvrdí, že volný magnetický náboj neexistuje a že magnetické siločáry jsou vždy uzavřené. Pokud se v elektromagnetickém poli nenachází volný elektrický náboj, potom platí

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 0. \quad (10.37)$$

Doplníme-li čtyři hlavní Maxwellovy rovnice čtyřmi vedlejšími rovnicemi, které vyjadřují vliv prostředí na jevy probíhající v elektromagnetickém poli

$$\mathbf{J} = \gamma\mathbf{E}, \quad \mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \quad \mathbf{F} = Q(\mathbf{E} + \mathbf{c} \times \mathbf{B}), \quad (10.38)$$

dostaneme úplný systém Maxwellových rovnic, kterými je jednoznačně určeno elektromagnetické pole v dané oblasti pro všechny časy $t > 0$. Ve vztazích vystupují vlastnosti prostředí, γ konduktivita (S m^{-1}), ε permitivita (F m^{-1}) a μ permeabilita (H m^{-1}). Poslední rovnice je označovaná jako Lorentzova síla a určuje sílu působící na bodový náboj Q (nabitou částici) v elektromagnetickém poli a je rovna vektorovému součtu síly elektrostatické a elektrodynamické.

Důležitou součástí Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru jsou hraniční podmínky, které jsou nutnými podmínkami existence jednoznačného řešení elektromagnetického pole v dané oblasti. Hraničními podmínkami se rozumí okrajové podmínky, podmínky na rozhraní dvou prostředí a počáteční podmínky.

10.5. Energie elektromagnetického pole

Pokud bychom chtěli analyzovat přenos energie elektromagnetického pole, např. z induktoru do vsázky při indukčním ohřevu, musíme vytvořit energetickou bilanci těchto procesů.

Energie elektromagnetického pole W má dvě složky, elektrickou složku energie W_e a magnetickou složku energie W_m . Celková energie elektromagnetického pole v objemu V je potom dána příspěvkem těchto dvou složek

$$W = W_e + W_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} dV + \frac{1}{2} \int_V \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} dV \quad (10.39)$$

Energie elektromagnetického pole s časem klesá, potom úbytek energie v objemu V s časem t dává výkon

$$P = -\frac{\partial W}{\partial t} = -\varepsilon \int_V \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} dV - \mu \int_V \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dV. \quad (10.40)$$

Rovnici můžeme upravit použitím 1. a 2. Maxwellovy rovnice (1.33) a dostaneme

$$P = \int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \int_V (\mathbf{H} \operatorname{rot} \mathbf{E} - \mathbf{E} \operatorname{rot} \mathbf{H}) dV. \quad (10.41)$$

Výraz ve druhém integrálu na pravé straně této rovnice můžeme upravit na základě vektorového počtu (1.9) a dostaneme

$$P = \int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \int_V \operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV. \quad (10.42)$$

Daná rovnice je všeobecná rovnice energetické bilance a vyjadřuje úbytek energie pole za jednotku času a příčiny tohoto úbytku. První vztah na pravé straně rovnice vyjadřuje teplo, které se v objemu vyvinulo za jednotku času, tj. ztrátový výkon (výraz $\gamma \mathbf{E}^2$ představuje elementární formu Jouleova zákona). Druhý vztah vyjadřuje zářivý výkon elektromagnetického pole.

Pokud je elektromagnetické pole generované vnějším zdrojem s výkonem P_z , potom platí

$$P_z = \frac{\partial W}{\partial t} + \int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \int_V \operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV. \quad (10.43)$$

Na základě uvedeného vztahu můžeme říct, že výkon vnějšího zdroje se spotřebuje na zvětšení energie elektromagnetického pole za jednotku času, na pokrytí Jouleových ztrát v daném objemu pole a na vyzáření energie z jednotkového objemu pole.

Pokud bude prostředí nevodivé, $\gamma = 0$ (např. dielektrikum kondenzátoru), bude složka Jouleových ztrát nulová. Pro nevodivé prostředí s vnějším zdrojem potom platí

$$P_z = \frac{\partial W}{\partial t} + \int_V \operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV. \quad (10.44)$$

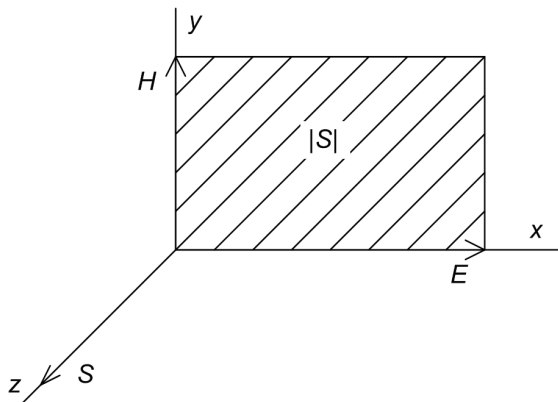
10.6. Poyntingův zářivý vektor

Poyntingův zářivý vektor (někdy se uvádí zkráceně Poyntingův vektor) je velmi výhodnou pomůckou pro výpočty elektromagnetického pole, např. u indukčních ohřevů, přídavných ztrát ve vinutí elektrických strojů atd.

Poyntingův zářivý vektor \mathbf{S} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) je vektorový součin vektorů intenzity elektrického a magnetického pole

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}. \quad (10.45)$$

Vektory intenzity elektrického pole \mathbf{E} a magnetického pole \mathbf{H} jsou kolmé k sobě i ke směru šíření elektromagnetické vlny. Vektory \mathbf{E} , \mathbf{H} a \mathbf{S} tvoří pravotočivou soustavu a Poyntingův vektor je kolmý na rovinu, v níž leží \mathbf{E} , \mathbf{H} (Obr. 10.1). Tok energie s hustotou $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ přes uzavřenou plochu A do a nebo z objemu V ohraničeného touto plochou se rovná rychlosti nárůstu nebo úbytku energie pole. Poyntingův vektor představuje tok zářivé energie jednotkou plochy za jednotku času. Jeho velikost je podle (10.14) rovna ploše obdélníka se stranami E a H .



Obr. 10.1 Směr Poyntingova vektoru v elektromagnetickém poli a jeho velikost

Použijeme-li v rovnici energetické bilance (10.39) Poyntingův vektor a rovnici upravíme na základě Gaussovy-Ostrogradského věty (10.18), která převádí objemový integrál na plošný, dostaneme

$$P = \int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \int_V \operatorname{div} \mathbf{S} dV = \int_V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \oint_A \mathbf{S} \cdot d\mathbf{A}. \quad (10.46)$$

Na základě této rovnice můžeme říct, že divergence Poyntingova vektoru, tj. objemová hustota energetického toku, je rovna množství energie, které za jednotku času vystoupí z jednotkového objemu elektromagnetického pole

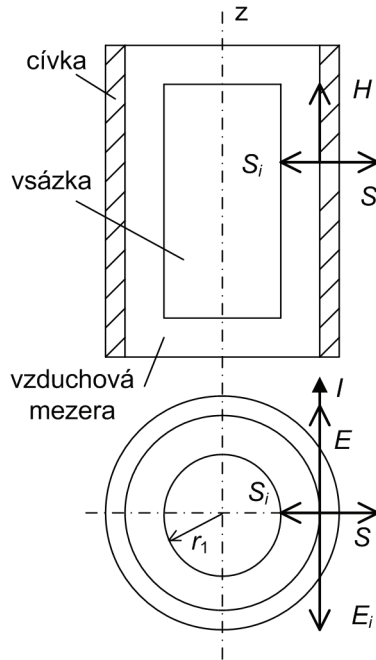
$$\operatorname{div} \mathbf{S} + q_J + \frac{\partial w}{\partial t} = 0. \quad (10.47)$$

Množství tepla, ve které se přemění elektromagnetická energie za jednotku času v jednotkovém objemu q_J , určuje Jouleovo teplo. Časová derivace objemové hustoty energie značí vzrůst energie jednotkového objemu elektromagnetického pole za jednotku času. Uvedená matematická formulace vlastně vyjadřuje zákon zachování energie.

Celkový výkon vycházející z objemu V je dán rovnicí

$$\int_V \operatorname{div} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV = \int_V \operatorname{div} \mathbf{S} dV = \oint_A \mathbf{S} \cdot d\mathbf{A}. \quad (10.48)$$

Je-li v některém místě zdroj elektromagnetické energie (např. zářící těleso), je v tomto místě divergence Poyntingova vektoru kladná a tok tohoto vektoru libovolnou uzavřenou plochou A (obklopující zdroj) je rovněž kladný.



Obr. 10.2 Poyntingův vektor v sousém systému válcové cívky a vsázky

Význam Poyntingova vektoru si ukážeme na sousém systému válcové cívky a vodivé vsázky při indukčním ohřevu. Pokud daný systém připojíme na střídavý zdroj, začne závity cívky protékat proud I , směr intenzity elektrického pole E je shodný se směrem proudu. V důsledku procházejícího proudu se indukuje v dutině cívky magnetické pole intenzity H a to generuje v závitech indukované vířivé proudy. Indukované vířivé proudy mají opačný směr jako indukující proud cívky a uzavírají se po obvodu vsázky v rovinách kolmých na společnou osu cívky a vsázky. Indukovaného napětí na jednotku výšky cívky E_i má tedy opačnou orientaci než intenzita E . Použitím Flemingova pravidla levé ruky určíme dva fázory S a S_i , které určují dva rozdílné toky energie elektromagnetického pole. Hustota toku energie S je dána vztahem (10.42), její směr je ven z cívky a má fyzikální význam elektrických ztrát. Druhá hustota toku energie S_i je vektorový součin intenzity elektrického pole E_i v důsledku generovaných vířivých proudů a intenzity magnetického pole

$$S_i = S_i \times H. \quad (10.49)$$

Hustota toku energie S_i směřuje k ose cívky a představuje energii vyzářenou z jednotkového objemu za jednotku času do dutiny cívky a dopadající na povrch vsázky. Povrchem vodivé vsázky se přijatá energie pohlcuje, spotřebuje na generování vířivých proudů, energie se utlumuje a vyvíjí se ve vsázce teplo podle Jouleova zákona.

Indukované vířivé proudy se v sousém systému cívky a vsázky uzavírají po obvodu vsázky v rovinách kolmých na společnou osu cívky a vsázky. Hustota proudu se zmenšuje směrem k této ose.

Pro harmonicky měnící se pole se vyjadřuje Poyntingův vektor jako komplexní číslo a je určen vektorovým součinem fázorů \mathbf{E} a \mathbf{H}^* , přičemž \mathbf{H}^* je komplexně sdružený fázor. Dostaneme tak reálnou a imaginární část Poyntingova vektoru

$$\bar{\mathbf{S}} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* = \text{Re}(\mathbf{S}) + j \text{Im}(\mathbf{S}). \quad (10.50)$$

kde $\text{Re}(\mathbf{S})$ představuje činnou složku hustoty toku energie pole za jednotku času, tj. činný výkon na jednotku plochy, $\text{Im}(\mathbf{S})$ jalovou složku této hustoty, tj. jalový (magnetizační) výkon na jednotku plochy. Reálná složka má fyzikální význam jako v časově stálém poli, imaginární složka vyjadřuje tu část energie pole, která se periodicky mění z elektrické na magnetickou a naopak.

10.7. Vlnové rovnice elektromagnetického pole

Přenos energie elektromagnetického pole a její konverze na Jouleovo teplo je spojeno s problematikou elektromagnetického vlnění. Při průchodu proudu rovinným zářičem vzniká v jeho okolí rovinné elektromagnetické vlnění, válcová cívka vyzařuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění. Podle konfigurace pole ve vsázce může být elektromagnetické vlnění podélné nebo příčné, podle prostředí, kterým se vlna šíří, vodivé nebo nevodivé.

Vlnové rovnice harmonického elektromagnetického pole se získají transformací Maxwellových rovnic na rovnice, které budou vyjádřeny pouze jednou proměnnou složky intenzity elektromagnetického pole, tj. buď elektrickou \mathbf{E} , nebo magnetickou \mathbf{H} . Soustava rovnic šíření elektromagnetické vlny platí pro vodivé i nevodivé elektrické prostředí a pro libovolný časový průběh proměnných elektromagnetického pole, mají tvar

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{H} - \gamma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \mathbf{E} - \gamma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (10.51)$$

Vlnové rovnice pro časově harmonický průběh obou složek pak vyjadřují šíření magnetické a elektrické složky stejné harmonické vlny v elektricky libovolném prostředí a mají tvar

$$\begin{aligned} \nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + (\omega^2 \varepsilon \mu - j\omega\gamma\mu) \bar{\mathbf{H}} &= \nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + \mathbf{k}^2 \bar{\mathbf{H}} = 0, \\ \nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + (\omega^2 \varepsilon \mu - j\omega\gamma\mu) \bar{\mathbf{E}} &= \nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + \mathbf{k}^2 \bar{\mathbf{E}} = 0. \end{aligned} \quad (10.52)$$

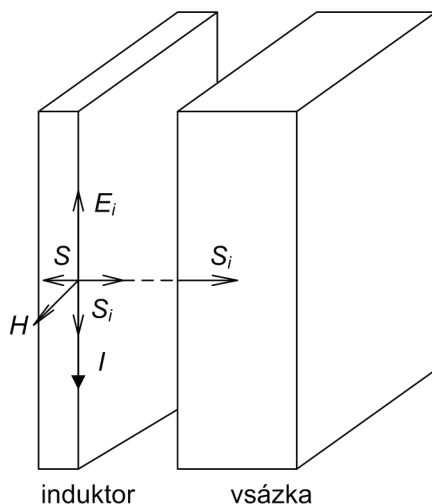
V uvedených rovnicích jsou $\bar{\mathbf{E}}$ a $\bar{\mathbf{H}}$ rotující fázory v komplexní rovině, pro které platí

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{E}} &= \mathbf{E}_m e^{j\omega t}, & \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= j\omega \bar{\mathbf{E}}, & \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= -\omega^2 \bar{\mathbf{E}}, \\ \bar{\mathbf{H}} &= \mathbf{H}_m e^{j\omega t}, & \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} &= j\omega \bar{\mathbf{H}}, & \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} &= -\omega^2 \bar{\mathbf{H}}.\end{aligned}\tag{10.53}$$

Elektrické vlastnosti prostředí a úhlová rychlost vlnění jsou souhrnně uvedeny v konstantě šíření vlnění \mathbf{k} , tzv. vlnové číslo. Vlnové číslo je všeobecně komplexním číslem, tj. má reálnou a imaginární složku

$$\begin{aligned}\mathbf{k}^2 &= \omega^2 \varepsilon \mu - j\omega \gamma \mu = -j\omega \mu (\gamma + j\omega \varepsilon), \\ \mathbf{k} &= \sqrt{-j\omega \mu (\gamma + j\omega \varepsilon)} = \alpha - j\beta.\end{aligned}\tag{10.54}$$

Reálná složka vlnového čísla α se nazývá fázová konstanta a imaginární složka β je konstanta tlumení (činitel tlumení).



Obr. 10.3 Elektromagnetické vlnění mezi dvěma rovinnými deskami

10.7.1. Rovinné elektromagnetické vlnění

Pokud mají induktor i vsázka plochý tvar (např. vzájemně rovnoběžné desky Obr. 10.3), má vzniklé vlnění charakter rovinného elektromagnetického vlnění. Generování elektromagnetického pole v deskovém induktoru a přenos jeho energie do vsázky je podobný jako u induktoru ve tvaru válce (Obr. 10.2). Po připojení na střídavý zdroj napětí, protéká deskovým induktorem proud I , vyvolaný elektrickou složkou pole E . Tento proud generuje magnetickou složku pole s intenzitou H , která indukuje elektrické pole s intenzitou E_i , která má opačný směr než intenzita E . Deska generuje vlnu a na základě znalostí o Poyntingově vektoru vyplývá, že se vyzařuje tok energie pole ve dvou směrech. Do vnitřku deskového induktoru s hustotou S a má charakter elektrických ztrát a mimo desku (směrem ke vsázce) s hustotou S_i .

touto S_j . Tato hustota toku energie vystupuje z desky v kolmém směru a je vyzařovaná přes nevodivé prostředí na povrch vodivé vsázky.

Důležitými kritérii pro posouzení elektromagnetického vlnění je, zda se jedná o jednostranné nebo oboustranné vlnění a jaká je tloušťka dané vsázky vzhledem k relativní hloubce pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky a .

Jako příklad je uvedeno rovinné jednostranné vlnění. Magnetická a elektrická vlna jsou dány superpozicí dvou vln, vlny přímé (E_p, H_p) a zpětné (E_z, H_z). Pro rovinné jednostranné vlnění ve směru osy x dostaneme všeobecné řešení vlnových rovnic (10.49) pro magnetickou a elektrickou vlnu ve tvaru

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{E}} &= \mathbf{Z}(Ae^{-jkx} - Be^{jkx}) = \bar{\mathbf{E}}_p + \bar{\mathbf{E}}_z, \\ \bar{\mathbf{H}} &= Ae^{-jkx} + Be^{jkx} = \bar{\mathbf{H}}_p + \bar{\mathbf{H}}_z,\end{aligned}\tag{10.55}$$

kde komplexní integrační konstanty \mathbf{A} , \mathbf{B} se určují z podmínek jednoznačnosti úlohy a \mathbf{Z} je charakteristická impedance vsázky

$$\mathbf{Z} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\gamma + j\omega\varepsilon}}.\tag{10.56}$$

Pokud je prostředí elektricky nevodivé ($\gamma = 0$), je charakteristická impedance dána reálným číslem pro elektricky vodivé prostředí (pokud platí $\gamma > \omega\varepsilon$) číslem komplexním

$$\mathbf{Z} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{j\omega\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\varepsilon_0\varepsilon_r}}, \quad \mathbf{Z} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\gamma}}.\tag{10.57}$$

U jednostranného vlnění vodivé vsázky s dostatečně velkou tloušťkou d ($d \rightarrow \infty$) se přímé složky $\bar{\mathbf{E}}_p$ a $\bar{\mathbf{H}}_p$ utlumí dříve, než dopadnou na zadní stěnu deskové vsázky. Proto se nevytvoří zpětné složky a jsou tedy nulové. Řešení se zjednoduší a pro obě složky vlny a pro fázor hustoty indukovaného proudu platí

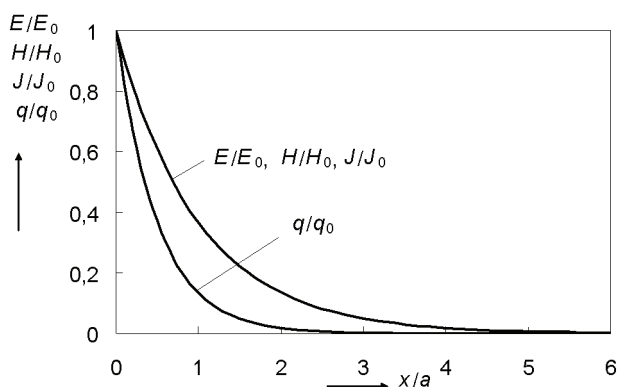
$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{E}} &= \bar{\mathbf{E}}_p = \frac{1+j}{a\gamma} \bar{\mathbf{H}}_0 e^{-x/a} e^{-jx/a}, \quad \bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{H}}_p = \bar{\mathbf{H}}_0 e^{-x/a} e^{-jx/a}, \\ \bar{\mathbf{J}} &= \gamma \bar{\mathbf{E}} = \frac{1+j}{a} \bar{\mathbf{H}}_0 e^{-x/a} e^{-jx/a},\end{aligned}\tag{10.58}$$

kde \mathbf{H}_0 je hodnota na povrchu vsázky, x je vzdálenost od povrchu vsázky. Pro poměrné vyjádření těchto veličin platí

$$\frac{\bar{E}}{\bar{E}_0} = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = \frac{\bar{J}}{\bar{J}_0} = e^{-x/a} e^{-jx/a}, \quad (10.59)$$

kde první exponenciální funkce vyjadřuje poměrné zmenšení amplitud jednotlivých fázorů se vzdáleností x (pro $x = a$ je pokles na 36,8 % hodnoty na povrchu vsázky). Druhá exponenciální funkce vyjadřuje prostorové natočení jednotlivých fázorů ve vzdálenosti x oproti fázorům na povrchu vsázky. Pro vzdálenost $x = \lambda = 2\pi a$ je vzájemné natočení jednotlivých fázorů o 360° , tj. jsou právě ve fázi. Průběhy jednotlivých poměrných veličin jsou uvedeny na Obr. 10.4 a jsou doplněny o závislost vyjadřující poměrné množství indukovaného tepla ve vsázce jednotkového objemu za jednotku času.

Tloušťka vsázky bývá vyjádřena vzhledem k hloubce vniku a . Pro $x = 2\pi a$ dosahují složky elektromagnetického vlny (i proudová hustota) necelých 0,2 % hodnot na povrchu vsázky. Vsázka tloušťky $d \geq 2\pi a$ má dostatečně velkou tloušťku (nemusíme uvažovat zpětnou složku vlny), v opačném případě (pro $d < 2\pi a$) je vsázka tenká a šířící vlna má i zpětné složky a vztahy (10.55) a (10.56) pro ni neplatí.



Obr. 10.4 Průběhy amplitud E , H , J ve vsázce velké tloušťky

10.7.2. Válcové elektromagnetické vlnění

V aplikacích indukčního ohřevu je nejčastěji válcová vsázka. Přenos energie v soustavě induktor-vsázka se uskutečňuje prostřednictvím válcového elektromagnetického vlnění.

Přenos energie elektromagnetického pole v sousém systému válce a vsázky a proces generování tepla ve vsázce je vysvětlený v předcházející kapitole (Obr. 10.2). Indukované vířivé proudy se v tomto sousém systému uzavírají po obvodu vsázky v rovinách kolmých na společnou osu cívky a vsázky. Hustota proudu se zmenšuje směrem k této ose. V důsledku utlumování vlnění ve vodivé vsázce směrem k ose dochází ke zmenšování magnetické složky intenzity pole z maximální

hodnoty na povrchu vsázky na minimální hodnotu v ose vsázky. V tomto uspořádání je axiální (podélné) magnetické pole a radiální elektrické pole.

Pro válcové elektromagnetické vlnění se vyjadřují rovnice v cylindrických souřadnicích a pro jednorozměrnou úlohu se použije transformace

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \quad (10.60)$$

a vlnové rovnice válcové elektromagnetické vlny pro všeobecné prostředí mají tvar

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{H}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial r} + \mathbf{k}^2 \bar{\mathbf{H}} = 0, \quad \frac{\partial^2 \bar{\mathbf{E}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial r} + \mathbf{k}^2 \bar{\mathbf{E}} = 0. \quad (10.61)$$

Konstanta šíření vlny \mathbf{k} je podle (1.51) závislá na materiálových vlastnostech a je dána složkami α a β . Transformace rovinné vlny na válcovou nemá vliv na materiálové vlastnosti prostředí, ve kterém se šíří. Transformace Laplaceova operátoru na cylindrické souřadnice lze použít pouze pro takovou vektorovou veličinu, která má směr souřadnice z (Obr. 10.2) v transformované soustavě. Tomu vyhovuje fázor magnetické vlny $\bar{\mathbf{H}}$, a proto rovnice obsahující fázor elektrické vlny $\bar{\mathbf{E}}$ je použitelná pro jinou konfiguraci, kde tento fázor bude mít směr z .

Bez ohledu na konfiguraci elektromagnetického pole jsou rovnice (10.58) Besselovy diferenciální rovnice (kap. 10.3) a jejich všeobecným řešením se dostane lineární kombinace cylindrických funkcí komplexního argumentu $(x\sqrt{-j})$.

Všeobecné řešení elektromagnetického pole, šířícího se ve vodivém prostředí s podélnou magnetickou složkou (Obr. 10.2), je

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{H}} &= \mathbf{A} J_0(x\sqrt{-j}) + \mathbf{B} N_0(x\sqrt{-j}), \\ \bar{\mathbf{E}} &= \sqrt{-j} \frac{\sqrt{2}}{a\gamma} \left[\mathbf{A} J_1(x\sqrt{-j}) + \mathbf{B} N_1(x\sqrt{-j}) \right] \end{aligned} \quad (10.62)$$

Elektrická i magnetická vlna mají přímé a zpětné složky. Přímé složky obsahují Besselovy funkce 1. druhu a zpětné složky Besselovu funkci 2. druhu, v obou případech nultého, resp. prvního řádu.

10.8. Základy matematicko-fyzikálního modelování termického plazmatu

Modely proudění termického plazmatu (např. interakce elektrického oblouku s proudem chladicího média) jsou založeny především na řešení rovnic mechaniky kontinua, tj. rovnice kontinua, rovnice momentové a rovnice energie.

Základní zákony dále uvedené jsou značně obecné a předpokládá se pouze, že tekutina je homogenní (kontinuum, pro které mají fyzikální smysl lokální vlast-

nosti, tj. hustota ρ , tlak p , teplota ϑ a rychlost \mathbf{c}) a bez extrémních gradientů stavových veličin.

Rovnice kontinuity - zákon zachování hmotnosti ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$) je dána vztahem

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{c}) = 0, \quad (10.63)$$

kde první složka na levé straně rovnice vyjadřuje časovou změnu hmotnosti v jednotce objemu a druhá složka je divergence hmotnostního toku. Z rovnice plyne, že časová změna hmotnosti v jednotce objemu je rovna divergenci hmotnostního toku (součtu všech hmotnostních toků dovnitř i ven z jednotkového objemu).

Rovnice momentová - zákon zachování hybnosti ($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$) je dána

$$\rho \frac{\partial \mathbf{c}}{\partial t} + \rho (\mathbf{c} \cdot \nabla) \mathbf{c} = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}, \quad (10.64)$$

kde první složka na levé straně rovnice je setrvačná síla, druhá složka je konvekční síla. Na pravé straně rovnice je nejprve tlaková (kompresní) síla (gradient tlaku), druhá složka je třecí (viskozí) síla ($\bar{\boldsymbol{\tau}}$ je tenzor vazkých napětí) a třetí složka je elektrodynamická síla (vektorový součin proudové hustoty \mathbf{J} a magnetické indukce \mathbf{B}). V rovnici zachování hybnosti představují gradient tlaku a elektrodynamická síla hnací síly a proti působí setrvačná síla, konvekční síla a třecí síla. Momentová rovnice je vektorová rovnice, která se rozepisuje do tří skalárních rovnic pro každou složku zvlášť - v kartézských (ortogonálních) souřadnicích x -ová, y -ová a z -ová složka nebo v cylindrických souřadnicích radiální, azimutální a z -ová složka.

Rovnice energie (rovnice zachování energie) ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$) vychází z 1. zákona termodynamiky a vyjadřuje skutečnost, že vzrůst vnitřní energie h jde na vrub přívodu tepla z okolí, přírůstku tepla vlivem komprese a vnitřního tření a energie dodané působením vnějších sil. Pro rovnici energie platí následující vztah

$$\rho \frac{\partial (h + \frac{c^2}{2})}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho \mathbf{c} (h + \frac{c^2}{2}) - \nabla \cdot \mathbf{J} + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}} \cdot \mathbf{c}) + \mathbf{J} \mathbf{E}, \quad (10.65)$$

kde na levé straně rovnice je časová změna entalpie a na pravé straně rovnice jsou jednotlivé položky zleva konvekční člen (tok entalpie), ztráty vedením tepla, ztráty třením (viskozí) a Jouleovy ztráty (\mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole). Jouleovy ztráty představují elektrický výkon dodávaný do plazmatu oblouku vlivem ohmických ztrát průchodem elektrického proudu. Ostatní členy představují odvod energie z oblouku, respektive ztráty. Vektor \mathbf{J} zahrnuje ztráty vlivem vedení tepla \mathbf{J}_q a vlivem záření \mathbf{J}_r , tj. $\mathbf{J} = \mathbf{J}_q + \mathbf{J}_r$. Konvekční člen zahrnuje energii unášenou prouděním plazmatu (tok entalpie). Ve členech s entalpií je zahrnuta i kinetická energie proudícího plazmatu na jednotku hmotnosti ($c^2/2$), která při běžných rychlostech proudění tvoří zanedbatelnou část toku energie.

K těmto rovnicím se připojují základní vztahy z termodynamiky (uvedené v předcházející kapitole) a zobecněný Ohmův zákon

$$\mathbf{J} = \gamma [\mathbf{E} + (\mathbf{c} \times \mathbf{B}) - \beta_H (\mathbf{J} \times \mathbf{B})], \quad (10.66)$$

kde γ je konduktivita a β_H je Hallova konstanta. Výrazy v hranaté závorce jsou postupně zleva intenzity elektrického pole od přiloženého napětí, od indukovaného napětí vlivem pohybu v magnetickém poli a intenzita elektrického pole od Hallova napětí.

Při využití uvedeného systému vztahů pro popis jevů v proudícím plazmatu například pro analýzu chlazeného oblouku, který hoří ve válcovém kanále plazmatronu, se provádí následující zjednodušení. Zanedbává se člen elektrodynamických sil v momentové rovnici (10.61), ztráty od třecích sil a kinetická energie plazmatu v rovnici energie (10.62) a vzhledem k velké intenzitě elektrického pole vlivem přiloženého napětí na oblouku i zbylé dva členy na pravé straně Ohmova zákona (10.63). Předpokládá se obvykle válcová symetrie. Pro vazké (viskozní) napětí τ i vedení tepla J_q (tepelný tok) jsou určující radiální složky gradientů (osové rychlosti a teploty), tj.

$$\tau = \eta \frac{\partial c_z}{\partial r}, \quad J_q = \Phi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (10.67)$$

Radiační člen rovnice energie se rovná vyzářené energii z jednotky objemu (součinitel radiace ε_E)

$$\nabla \cdot \mathbf{J}_r = \varepsilon_E. \quad (10.68)$$

S uvedenými zjednodušeními lze přepsat rovnici zachování hmotnosti ve válcových souřadnicích do tvaru

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho c_z) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho c_r) = 0, \quad (10.69)$$

rovnici zachování hybnosti pro z-ovou složku do tvaru

$$\rho \frac{\partial c_z}{\partial t} + \rho c_z \frac{\partial c_z}{\partial z} + \rho c_r \frac{\partial c_z}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\eta r \frac{\partial c_z}{\partial r} \right). \quad (10.70)$$

Ve většině řešených úloh se jedná o rotačně symetrické případy, kdy azimutální složka momentové rychlosti je nulová a radiální složka nehraje podstatnou roli. Rovnici zachování energie lze vyjádřit

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho c_z \frac{\partial h}{\partial z} + \rho c_r \frac{\partial h}{\partial r} = \gamma E^2 - 4\pi \varepsilon_E + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (10.71)$$

Ohmův zákon s uvažováním výše uvedených zanedbání lze vyjádřit vztahem

$$i = E \int_0^r \gamma 2\pi r dr, \quad (10.72)$$

kde i je proud procházející obloukem a E je intenzita elektrického pole v oblouku.

Z uvedeného systému rovnic rovněž plyne, že k jeho řešení je nutné znát u analyzovaných plynných soustav látkové vlastnosti.

Analýza jevů v kanále se provádí na základě znalosti naměřených integrálních veličin (např. napětí a proud oblouku, radiální ztráty, průtok chladicího média) a znalosti termodynamických a transportních vlastností použitého média.

Zjednodušený model axiálně chlazeného elektrického oblouku je vlastně oblouk hořící ve válcovém kanále, jehož stěny jsou chlazený vodou. Elektrický oblouk má rovněž válcově symetrický tvar.

Pro potřeby zjednodušeného modelu je celý objem anodového kanálu plazmatronu rozdělen na dvě hlavní oblasti: na zónu oblouku a zónu studeného plynu. Rozdělení vyplývá z odlišnosti výpočtů uvnitř oblouku a mimo něj. Procesy probíhající uvnitř oblouku jsou komplexnější než v zóně studeného plynu, zóna elektrického oblouku je elektricky vodivá, zatímco studenou zónu tvoří neutrální plyn. Dělicí hranice (hranice oblouku) mezi těmito oblastmi je povrch elektrického oblouku a je určena teplotou, při které pracovní plyn začíná být elektricky vodivý.

Důležitou součástí modelování jevů je určení rozložení teploty v axiálním a radiálním směru elektrického oblouku.

10.9. Literatura

- [1] Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M.: Feynmanove prednášky z fyziky 3. Alfa, Bratislava, 1988.
- [2] Halliday D., Resnick R., Walker J.: Fyzika. Část 3 Elektřina a magnetismus. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. VUT v Brně, VUTIU, 2000.
- [3] Haňka L.: Teorie elektromagnetického pole. SNTL, Praha, 1975.
- [4] Horák Z., Krupka F.: Fyzika. Příručka pro vysoké školy technického směru. Svazek 2. SNTL, Praha, 1976.
- [5] Horák K., Krupka F., Šindelář V.: Technická fyzika. SNTL, Praha, 1961.
- [6] Kmoníček V., Slepíčka F., Veis Š.: Fyzikální vlastnosti plynných látek. Academia, Praha, 1973.
- [7] Krempaský J.: Fyzika. SNTL, Praha, 1982.
- [8] Novák P.: Elektrické teplo. Základy teorie elektrických ohrevů a aplikácie. Equilibria, 2010.
- [9] Rada J.: Elektrotepeľná technika. SNTL, Praha, 1985.
- [10] Rektorys K.: Přehled užití matematiky 1. Prométheus, Praha, 1995.

Prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc., doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D.,
Ing. Vladimír Král, Ph.D.

Elektrotepečná technika

Vydalo České vysoké učení technické v Praze,

Zikova 1905/4, 166 36 Praha 6

Grafický návrh obálky: Michaela Kubátová Petrová

Vytiskl EUROPRINT, a.s., Pod Kotlářkou 3, 150 00 Praha 5

Počet stran 266

Vydání první. Praha 2011

ISBN 978-80-01-04938-9