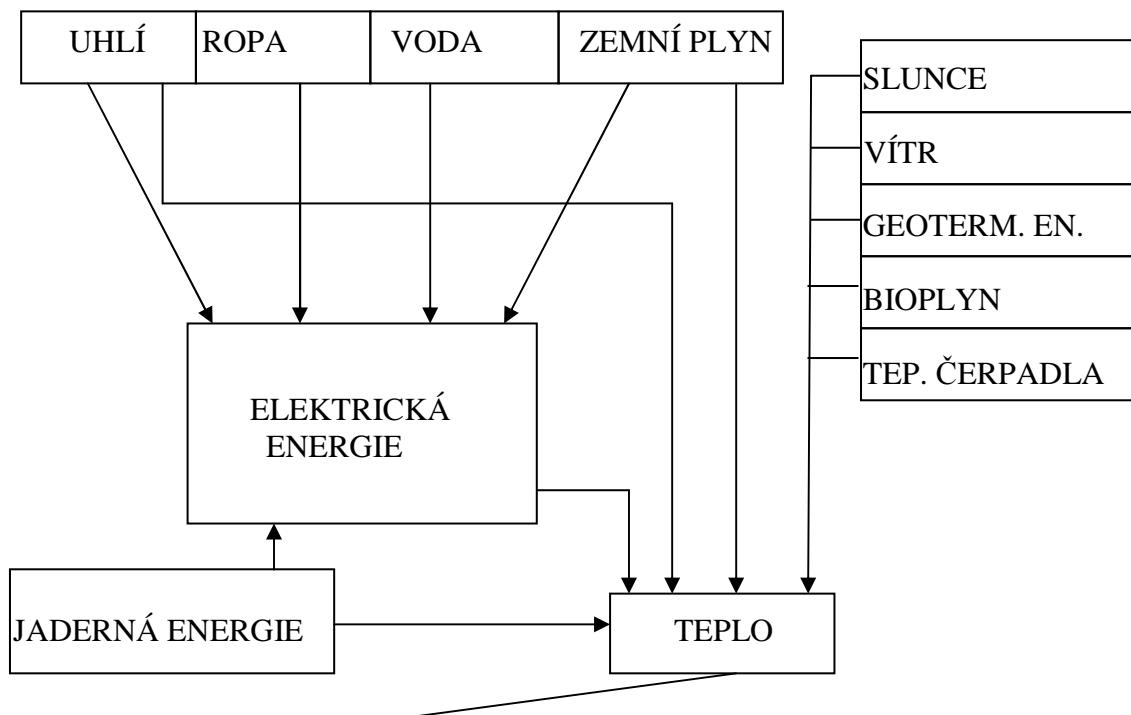


## **Otázky:**

- 1) Fyzikální základy přeměn elektrické energie v užitečné teplo**
- 2) Sdílení tepla v elektrotepelných zařízeních**
- 3) Základní tepelné veličiny a jejich jednotky**
- 4) Konstrukční materiály pro elektrotepelné zařízení**
- 5) Průběhy H a E v rovinném elektromagnetickém vlnění**
- 6) Minimální úbytek napětí a elektrické ztráty na pásovém vedení**
- 7) Rovná elektricky vodivá stěna malé a velké tloušťky – fyzikálně, význam pro praxi**
- 8) Definice hloubky vniku naindukovaných proudů „a“**
- 9) Poyntingův zářivý vektor ve válcovém elektromagnetickém vlnění**
- 10) H a E ve válcovém elektromagnetickém vlnění – průběhy**
- 11) Objasnění „elektromagnetické průzařnosti“**
- 12) Naindukované teplo v plné elektricky vodivé vsázce**
- 13) Průběhy proudové hustoty naindukovaných proudů v plné válcové vsázce – praktické aplikace**
- 14) Analogie válcový vodič – válcová vsázka – fyzikálně, aplikace**
- 15) Vliv relativní permeability na ohřevy elektromagnetickou indukcí**
- 16) Zdroje pro napájení indukčních zařízení**
- 17) Omezování vlivu rozptylových elektromagnetických polí na konstrukci indukčních zařízení**
- 18) Náhradní obvod indukčního zařízení**
- 19) Účinnost indukčních zařízení**
- 20) Hodnocení průmyslových ohřevů kritériem 3E**
- 21) Princip dielektrického a mikrovlnného ohřevu**
- 22) Princip a výhody elektrického sálavého vytápění**
- 23) Efektivní způsoby ohřevů a vaření potravin**
- 24) Principy elektrického odporového ohřevu**
- 25) Úlohy z laboratorních cvičení**
  - 1) Měření teplotního pole infrazářičů**
  - 2) Termočlánky**
  - 3) Měření průběhů vypařování vody z tkaniny pomocí mikrovlnné trouby**
  - 4) Symetrační zařízení**
  - 5) Určování radiační účinnosti sálavých panelů**
  - 6) Určování rozložení teplotního pole v elektricky vodivé desce při jejím indukčním ohřevu**
  - 7) Měření vlivu indukčnosti**
  - 8) Měření vlivu indukčnosti**

## 1) Fyzikální základy přeměn elektrické energie v užitečné teplo

V elektrotepelných zařízeních se mění energie elektrická na energii tepelnou.



- TECHNOLOGICKÉ TEPLO – tavení, přetavování, ohřevy, svařování, speciální účely
- TOPENÍ KLIMATIZACE – přímé, akumulační, hybridní, netradiční
- TUV – přímé, akumulační, netradiční (sluneční kolektory)
  
- zvyšováním teploty kmitají atomy kolem rovnovážných poloh - tuhé skupenství se mění na kapalné – atomy se uvolní z rovnovážné polohy

**Vznik tepla** – nejčastěji je elektrická energie přeměňována přímo v teplo.  
 Toto teplo je buď **zádané** – topná tělesa, odporové a indukční pece, atp..  
 nebo **nechťene** – tepelné ztráty – žárovky, motory, transformátory.

Teplo je druh energie, má tedy stejnou jednotku jako mechanická práce a elektrická energie, tj. joule.

Platí převodní vztah

$$1\text{J} = 1\text{W.s}$$

Měřítkem tepelného stavu tělesa je teplota. Udává potenciál tepelné energie. Teplota je základní veličinou v termice. Jednotkou teploty je kelvin (K). Je to 273,16tý díl teploty trojnáho bodu vody v termodynamické Kelvinově stupnici. Kromě toho se ještě používá vedlejší jednotka, Celsiův stupeň ( $^{\circ}\text{C}$ ).  $1^{\circ}\text{C}$  je stejně velký, jako 1K. Základním bodem Kelvinovy stupnice je absolutní nula, základním bodem Celsiové stupnice je 273,15 K. Převod mezi kelviny a Celsiovými stupni se počítá podle vztahu  $Q = J + 273,15$  (K;  $^{\circ}\text{C}$ ) kde Q je teplota v kelvinech, J je teplota v Celsiových stupních.

## Výkon:

- práce vykonaná za jednotku času J/s, W/h... - všechny níže uvedené vztahy jsou cca
- 1 kcal = 1,163Wh = 4,186 kJ**
- 1 MJ = 0,277 kWh**
- 1 kWh = 3,6 MJ**
- 1 kW=860 kcal/h**
- 1 KJ = 0,239 kcal**
- 1 J= 1Ws**

**Klasický ohřev: přestup tepla z teplejšího prostředí do ohřívaného objektu - prouděním, sáláním, vedením**

$\vartheta_{OK} >> \vartheta_2$  - přestup tepla z teplejšího prostředí do ohřívaného objektu

$\lambda$  - (W,m<sup>-1</sup>,k<sup>-1</sup>) vedení tepla – tepelná vodivost

$\alpha$  -(W, m<sup>-2</sup>, k<sup>-1</sup>) – součinitel přestupu tepla

$\epsilon$  - stupeň černosti 0< $\epsilon$ <1

$\tau_C$  – Stephan-Boltzmannova konst.  $5,76 \cdot 10^{-8}$  Wm<sup>-2</sup> k<sup>-4</sup>

**do 350°C** – přestup tepla prouděním

**nad 350°C** – přestup tepla sáláním

## INDUKČNÍ OHŘEV – ohřev el vodivých materiálů

Ohřev elektromagnetickou indukcí – proměnným elektromagnetickým polem se naindukují vříivé proudy do vsázky a ta se ohřívá, velice důležitá je hloubka vniku naindukovaných proudů **a**

$\gamma$  - (S/m) - elektrická vodivost – závisí na materiálu a teplotě

$\mu$  - (-) permeabilita prostředí – závisí na teplotě ( $\mu = \mu_0 \mu_r$ )

**H** – (A/m) intenzita magnetického pole  $H=B/\mu$

**E** – (V/m) intenzita elektrického pole

**f** – (Hz) – frekvence – čím větší – tím rychlejší ohřev (50-10 000Hz)

## ODPOROVÝ OHŘEV

Odporový ohřev využívá přeměny elektrické energie na elektrické teplo při průchodu proudu odporovou součástkou.

- **nepřímý** - teplo se akumuluje a následně předává do okolí – akumulační jímky **TUV**
- **přímý** – teplo se ihned předává do okolí obloukové pece, průtokové ohřívače

**I**- (A) – proud procházející ohřívaným vodičem

**U**-(V) – napětí ohřívaného vodiče

**J**- (A/m<sup>2</sup>) – proudová hustota

$\gamma$  - (S/m) - elektrická vodivost – závisí na materiálu a teplotě

## DIELEKTRICKÝ OHŘEV

Nekovy jsou vloženy do elektrického vysokofrekvenčního pole. Rychlým pře polarizováním částic ohřívané látky vznikají tzv. dielektrické ztráty, které se mění v teplo. Velikost ztrát závisí na intenzitě elektrického pole (spádu napětí), na kmitočtu, na permitivitě ohřívané látky a na ztrátovém úhlu dielektrika. Používaný kmitočet je 1 MHz až 100 MHz, spád napětí je 500 V až 1500 V na 1 cm tloušťky dielektrika.

$\epsilon_r$  - (-) – permitivita prostředí ( $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ )

$\epsilon_r \operatorname{tg} \phi$  – ztrátové číslo a úhel napětí ohřívaného vodiče

**E** – (V/m) intenzita elektrického pole – rozhodující

**H** – (A/m) intenzita magnetického pole  $H=B/\mu$  - pomocná

**f** – (Hz) – frekvence – čím větší – tím rychlejší ohřev (1MHz-100MHz)

## **INFRAČERVENÝ OHŘEV**

Zdrojem infračerveného záření jsou infrazářiče. Vyzařují paprsky s vlnovou délkou 750 nm až 10 000 nm. Infračervené záření proniká do hloubky a rychle prohřívá látku. Příklad infrazářiče je podžhavená žárovka.

## **OBLOUKOVÝ OHŘEV**

Oblouk napájíme střídavým nebo stejnosměrným proudem. Proud při tom prochází plyny, které jsou za normálních podmínek elektricky nevodivé. Teprve po ionizaci prostředí (např. vlivem vysoké teploty) se stanou elektricky vodivými. Teplota dosahuje hodnoty až několika tisíc kelvinů. Plyny při takové teplotě jsou velmi vodivé - nazýváme je plazma. Podle způsobu hoření oblouku v peci rozlišujeme

- pece s přímým topením: oblouk v nich hoří mezi elektrodou a taveninou
- pece s nepřímým topením: teplo se v nich přenáší do vsázky nepřímo - sáláním

## 2) Sdílení tepla v elektrotepelnych zařízeních

Sdílení tepla je fyzikální děj, při kterém dochází k přenosu tepelné energie mezi termodynamickými systémy, způsobený rozdílem teplot. Může probíhat několika odlišnými fyzikálními způsoby:

### Přenos tepla prouděním (konvekce)

Přenos tepla prouděním je založen na transportu tepla pomocí proudící kapaliny.

#### Newtonův zákon

$$q = \alpha(T_s - T_a)$$

kde

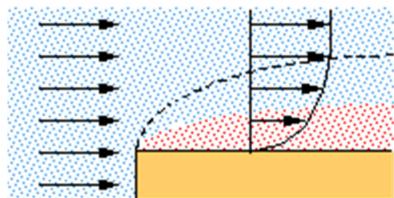
- $\alpha$  je součinitel přestupu tepla
- $T_s$  je teplota povrchu pevné látky
- $T_a$  je teplota proudící kapaliny (plynu)

Hodnotu součinitele přestupu tepla  $\alpha$  lze získat pomocí empirických vztahů, odvozených z výsledků experimentálních měření. Závislosti se uvádějí ve formě vzorců obsahujících podobnostní kritéria.

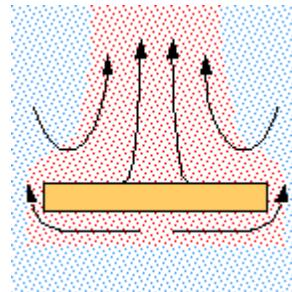
- přirozená konvekce
- nucená konvekce

#### Rovná plocha

nucená konvekce



přirozená konvekce



### Přenos tepla vedením (kondukcí)

K přenosu tepla vedením dochází při přímém kontaktu teplosměnných ploch pomocí předávání kinetické energie vzájemným narážením molekul tvořících tyto plochy. Uvnitř pevné látky je teplo vedenо vibracemi přenášejícími se strukturou látky.

#### Fourierův zákon

$$\bar{q} = -\lambda \Delta T$$

V kartézských souřadnicích:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

## Neustálené vedení tepla

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

## Přenos tepla zářením (sálání)

Přenos tepla zářením spočívá v přenosu tepla mezi povrchy pomocí emise a absorpce elektromagnetického záření, a proto jako jediný oproti konvekci a kondukcí probíhá i ve vakuu.

## Veličiny popisující sálání

- **zářivá energie**  $Q_e$  (J) celkové množství energie vyzářené do poloprostoru na všech vlnových délkách
- **zářivý tok**  $\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$  (W) výkon přenášený zářivou energií, tedy množství energie vyzářené povrchem tělesa do poloprostoru za jednotku času
- **spektrální (monochromatická) hustota zářivého toku**  $\Phi_{e\lambda} = \frac{\Phi_e}{d\lambda}$  (W.m<sup>-1</sup>) výkon přenášený zářivou energií při určité vlnové délce
- **intenzita vyzařování**  $M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$  (W.m<sup>-2</sup>) zářivý tok, vysílaný jednotkou povrchu
- **spektrální (monochromatická) intenzita vyzařování**  $M_{e\lambda} = \frac{dM_e}{d\lambda}$  (W.m<sup>-3</sup>) výkon vyzářený z jednotkového povrchu tělesa do poloprostoru za jednotku času při určité vlnové délce
- **intenzita záření I** (W.m<sup>-2</sup>.sr<sup>-1</sup>) tok energie za jednotku času na jednotku plochy jednotkovým prostorovým úhlem, kolmo k této ploše

## Zákony popisující sálání

Energii vyzařovanou z jednotkové plochy tělesa za jednotku času do poloprostoru v celém vlnovém rozsahu vyjadřuje Stefanův-Boltzmannův zákon.

- Planckův vyzařovací zákon
- Kirchhoffův zákon vyzařování
- Lambertův zákon
- Wienův zákon
- Zákony geometrické optiky

## Průchod záření participujícím prostředím

Při průchodu tepelného záření prostředím, může dojít ke změně jeho intenzity v důsledku interakce s jeho částicemi. Interakce probíhá formou absorpce (pohlcování) a rozptylu. Velikost vlivu obou jevů je dána vlastnostmi daného prostředí a vlnovou délkou záření a je možno jej vyhodnotit pomocí konstant součinitele absorpce  $\kappa_s$  a součinitele rozptylu  $\sigma_s$ .

Součet obou konstant, zvaný součinitel útlumu  $\gamma_s$ , podává informaci o celkové ztrátě intenzity vlivem absorpce a rozptylu. Rozdíl mezi absorpcí a rozptylem je dán tím, že při absorpci se tepelné záření mění na vnitřní energii prostředí, naproti tomu při rozptylem se pouze změní směr paprsku a ten dále může zesílit jiný paprsek jdoucí v jiném směru.

$$\gamma_s = \kappa_s + \sigma_s$$

Po průchodu paprsku tepelného záření vrstvou o velmi malé (infinitezimální) tloušťce  $dx$  se změní intenzita o infinitezimální hodnotu  $dI$ .

$$dI = -\kappa_s \cdot I \cdot dx$$

Po průchodu vrstvou tloušťky  $l$  se změní intenzita na

$$I = I_0 e^{-\int_0^l \kappa_s dl}$$

kde  $I_0$  je intenzita vstupujícího záření.

### **Stefanův-Boltzmannův zákon**

Intenzitu vyzařování získáme integrací vztahu pro spektrální intenzitu vyzařování (definovanou Planckovým zákonem).

$$M_{e0} = \int_0^\infty M_{e0\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

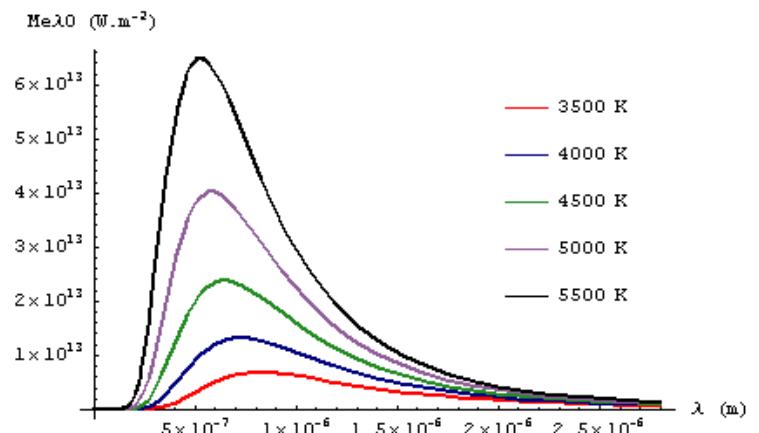
Energie vyzařovaná povrchem je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty.

### **Planckův vyzařovací zákon**

Roku 1900 Max Planck odvodil vztah pro intenzitu vyzařování dokonale černého tělesa. Planckův vyzařovací zákon vyjadřuje spektrální intenzitu vyzařování dokonale černého tělesa  $M_{e\lambda 0}$  jako funkci vlnové délky  $\lambda$  a absolutní teploty  $T$ .

$$M_{e\lambda 0} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{\pi}{\left(e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1\right)}$$

Spektrum černého tělesa pro různé teploty v rozsahu 3500 až 5500 K.



## **Lambertův zákon**

intenzita vyzařování izotropního rovinného plošného zdroje v každém jeho bodě klesá s kosinem odklonu od kolmice k ploše zdroje.

$$I = I_0 \cos\theta$$

Zdroje záření vyhovující tomuto zákonu se nazývají kosinové nebo Lambertovské zářiče.

## **Wienův zákon**

Popisuje vztah mezi nejintenzívnejší vyzařovanou vlnovou délkou  $\lambda_{\max}$ , která je emitována absolutně černým tělesem a teplotou:

$$\lambda_{\max} \cdot T = \text{konst} = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ (m.K)}$$

## **Zákony geometrické optiky**

Tepelné záření ve formě elektromagnetických vln respektuje velmi jednoduché zákony geometrické optiky.

Dopadá-li na těleso zářivý tok  $\Phi_e$ , potom se jeho část  $\Phi_a$  pohltí, část  $\Phi_r$  odrazí a část  $\Phi_{tr}$  tělesem pronikne. Podle zákona o zachování energie musí platit:

$$\Phi_e = \Phi_a + \Phi_r + \Phi_{tr}.$$

Dělíme-li všechny členy  $\Phi_e$ , dostaneme:

$$1 = \frac{\Phi_a}{\Phi_e} + \frac{\Phi_r}{\Phi_e} + \frac{\Phi_{tr}}{\Phi_e}$$

kde

$$\frac{\Phi_a}{\Phi_e} = \alpha_r \quad \dots \text{ je součinitel pohltivosti (absorptance)}$$

$$\frac{\Phi_r}{\Phi_e} = \rho_r \quad \dots \text{ je součinitel odrazivosti (reflektance)}$$

$$\frac{\Phi_{tr}}{\Phi_e} = \tau_r \quad \dots \text{ je součinitel propustnosti (transmitance).}$$

### 3) Základní tepelné veličiny a jejich jednotky

**I** – (A) – proud procházející ohřívaným vodičem

**U** – (V) – napětí ohřívaného vodiče

**R** – () – elektrický odpor

**L** – (H) – indukčnost

**M** – (H) – vzájemná indukčnost

**E** – (V/m) – intenzita elektrického pole

**H** – (A/m) – intenzita magnetického pole  $H=B/\mu$

**S** – (VA/m<sup>2</sup>) – Poyntingův (zářivý) vektor

**B** – (T) – indukce magnetického pole

**J** - (A/m<sup>2</sup>) – proudová hustota

**f** – (Hz) – frekvence

**γ** - (S/m) - elektrická vodivost

**μ**-(-) – permeabilita prostředí

**ε**- (-) – permitivita prostředí ( $\boldsymbol{\epsilon}=\epsilon_0\epsilon_r$ )

**λ** - (W,m<sup>-1</sup>,k<sup>-1</sup>) – tepelná vodivost

**α** - (W, m<sup>-2</sup>, k<sup>-1</sup>) – součinitel přestupu tepla

**ε** - stupeň černosti  $0 < \epsilon < 1$

**τc** – Stephan-Boltzmannova konst.  $5,76 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

#### **4) Konstrukční materiály pro elektrotepelné zařízení**

- při konstrukci elektrotepelných zařízení → vliv působení vysokých teplot
- konstrukční materiály musí odolávat teplotám až do 1000 °C
- při vysokých teplotách musí mít elektroizolační vlastnosti
- za vyšších teplot spolu můžou reagovat chemicky materiály, které se k sobě za běžných teplot chovají inertně

#### **Kovové konstrukční materiály**

Pro kovové části pecí, podlahové desky, kelímky pecí

Požadavky:

- odolnost v žáru
- mechanická pevnost a tuhost – součásti se nesmí deformovat
- obrobitevnost – možnost vyrábět součásti odléváním, svařováním, broušením
- nízká cena, snadná dosažitelnost

**Žáruvzdornost** – tvoří ji vrstva oxidu určitého kovu vytvořená na povrchu součásti → chrání součást proti oxidaci. Přísady do oceli – Cr, Ni, Al, Si vytvoří trvalou souvislou ochrannou vrstvu oxidu.

Al + Si → ocel křehká, obtížně se mechanicky opracovává

Ni → zvyšuje obrobitevnost oceli, mechanické vlastnosti při stoupajících teplotách

Cr → za vysokých teplot ocel ztrácí pružnost, dochází k trvalé deformaci

Tepelná vodivost žáruvzdorných ocelí < než u uhlíkatých ocelí.

Oceli s málo Cr se tepelná vodivost v závislosti na teplotě zmenšuje.

Oceli s vysokým obsahem Cr se tepelná vodivost v závislosti na teplotě zvyšuje.

Rezistivita oceli s vysokým obsahem Cr je větší než u uhlíkatých ocelí

Oceli Cr – Ni jsou nejpoužívanější ve stavbě el. pecí. Mají velkou žáruvzdornost, mechanickou pevnost, dobře se obrábějí. Pro teploty do 800 °C → Cr 18%, Ni 8% a pro teploty 1000 – 1100 °C s vysokým obsahem Ni 17-26%. Jsou drahé → nahrazovány speciálními litinami Cr – Ni (10%, 20%) lze použít do 750-850 °C a litiny s vysokým obsahem Cr (25-30%) až do 1000 °C.

**Alitování** konstrukčních ocelí pro zlepšení jejich odolnosti proti oxidaci ponořením součásti do roztaveného hliníku při teplotě 650 °C na několik hodin. Vytvořením  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na povrchu → součásti pracují do 800 °C.

**Těžkotavitelné materiály** – wolfram, molybden, tantal, niob

Kovy s teplotou tavení vyšší než 2200 °C. vyrábí se z nich topné články, stínítka, podložky. Pevnost závisí na technologii výroby. Na vzduchu jsou proti oxidaci málo odolné → ve vakuu stálé.

#### **Vliv prostředí**

C: ocel nauhličuje a křehne, snižuje se odolnost proti oxidaci → proti opalu. Odlehličující účinek má  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Lepší použít oceli chromové než Cr – Ni oceli.

N<sub>2</sub>: váže v ocelích Cr a Al → tvoří nitridy. Nikl zmenšuje difúzi N<sub>2</sub> do oceli → lepší použít Cr – Ni oceli než Cr oceli

S: sloučuje se s Ni na NiS → ocel se časem rozpadne. Vyhovují Cr oceli.

Vakuum: vlastnosti žáruvzdorných ocelí zhoršuje. Čím vyšší teplota tím větší vliv vakua. Dobré vlastnosti Cr – Ni oceli.

## **Nekovové materiály**

materiály hutné = velká mechanická pevnost proti namáhání při pracovních teplotách  
materiály pórkovité = dobré tepelně izolační vlastnosti, malá hustota, malá mech. odolnost  
materiály vláknité = výborné tepelné vlastnosti, nejmenší hodnoty součinitele tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a hustoty.

## **Žáruvzdorné keramiky**

Staviva pro vnitřní vrstvy vyzdívek pecí, musí splňovat tyto požadavky:

- dostačná žáruvzdornost – teplota, při níž hrot jehlanu zmékne a ohne se. (Segerův jehlan). Žáruvzdorné nastává deformace při 1580-1770 °C, nad nimi je už materiál vysoce žáruvzdorný.
- mechanická pevnost při pracovních teplotách
- odolnost proti rychlým změnám teplot, proti tepelným rázům
- odolnost proti chemickým vlivům při normálních i pracovních teplotách
- dostačně malá tepelná vodivost, malá tepelná kapacita
- zanedbatelná elektrická vodivost při nízkých i vysokých teplotách
- nízká cena a snadná dostupnost

Základními složkami jsou  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ .

Dinasy – křemičité materiály, 95 %  $\text{SiO}_2$ .

Suracit – křemičitý písek různého zrnění 95 %  $\text{SiO}_2$ .

Šamoty – směs  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Mulit – obsahuje 70%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a 28%  $\text{SiO}_2$  – vyšší žáruvzdornost než běžný šamot

Elektrokorund – korund tavený v el. obloukových pecích - vyšší žáruvzdornost než běžný šamot

Magnezitová staviva – 80 %  $\text{MgO}$

Chromitová, uhlíková, hlinito-grafitová staviva

Oxidy vzácných kovů –  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{BcO}$  – vysoká žáruvzdornost

## **Vláknité materiály**

Keramická vlákna → roztavená látka se protlačuje jemnými tryskami elektricky prohřívanou hlavou do proudu horkého vzduchu. Vaty, rohože, plstě odolné teplotám 1200-1400 °C. Při použití vláknitých materiálů se zkracují roztápcí časy pece, zmenšují se jejich vnitřní rozměry, snižuje se jejich hmotnost. Mají výborné tepelně izolační vlastnosti. Vlastnosti výrobků z vláknitých materiálů jsou ovlivněny charakterem vláken (délka, tloušťka) a technologií zpracování vláken.

## **Pórkovité materiály**

Malá tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita. Dostačná žáruvzdornost, mechanická pevnost a nízká cena. Pórkovitost lze uměle zvýšit přidáním vhodných přísad do základních materiálů při jejich vypalování.

Přísady :  
- látky spalitelné (piliny, dřevěné uhlí)  
- chemicky kypřící, pěnotvorné (kalafunové mýdlo)  
- tepelně izolující látky

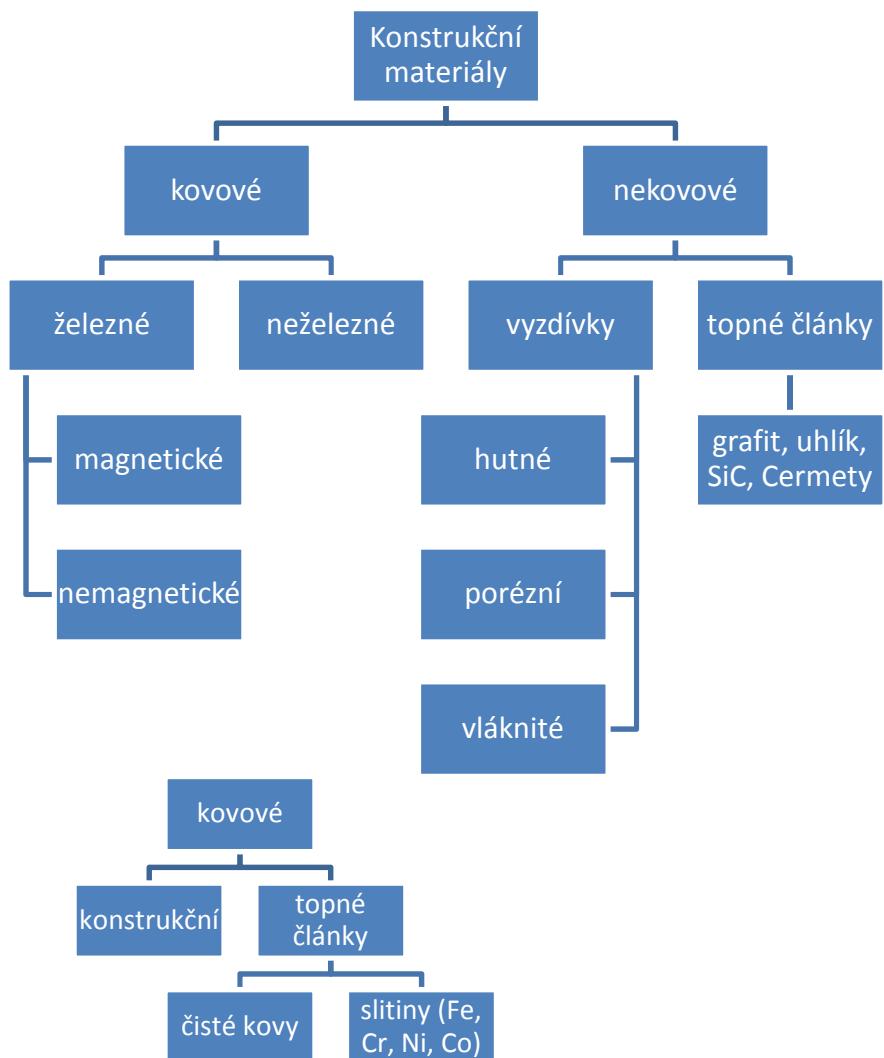
Lehčené šamoty – umělé

Diatomit – výrobek z křemeliny – zrna  $\text{SiO}_2$  velikosti 5 mm organického původu

Azbest – lepenky, desky až do 600 °C, karcinogení – tepelně izolační materiál

Pěnové materiály – tepelně izolační materiál

Slídy – do 900 °C



viz. skripta Elektrotepelná technika I. a II. str. 86 – 92.

## 5) Průběhy H a E v rovinném elektromagnetickém vlnění

### Obecné vyjádření rovinného elmg. vlnění

Zdrojem rovinného elmg. vlnění může být pouze rovná vodivá stěna, kterou prochází jedním směrem střídavý, harmonicky proměnný proud.

Vyjdeme z dříve odvozených obecných fázorových rovnic

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = 0, \quad \nabla^2 \bar{H} + k^2 \bar{H} = 0$$

Vyjádříme Laplaceův operátor

$$\left[ \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} \right] + k^2 \bar{E} = 0$$

Rovinné elmg. vlnění je charakterizováno tím, že derivace E a H jsou podle y a z rovny nule. V Laplaceově operátoru odpadnou druhé derivace podle y a z.

$$\left[ \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} \right] + k^2 \bar{E} = 0, \quad \left[ \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} \right] + k^2 \bar{E} = 0$$

$$\bar{H} = \bar{A} e^{\lambda x} \quad \lambda^2 \bar{A} e^{\lambda x} + k^2 \bar{A} e^{\lambda x} = 0 \quad \lambda_{1,2} = \pm jk$$

Řešením rovnice je:  $\bar{H} = \bar{A}_1 e^{j k x} + \bar{A}_2 e^{-j k x} = \bar{H}_P + \bar{H}_R$

Výraz udává obecné řešení harmonického rovinného elmg. vlnění pro prostředí nevodivé i vodivé. A1, A2, jsou integrační konstanty, které se v konkrétním případě určí z mezních podmínek. První člen na pravé straně je elmg. vlnění postupující, vycházející ze zářiče. Druhý člen značí elmg. vlnění odražené zpět od předpokládané rovné vodivé stěny, umístěné kolmo ke směru šíření.

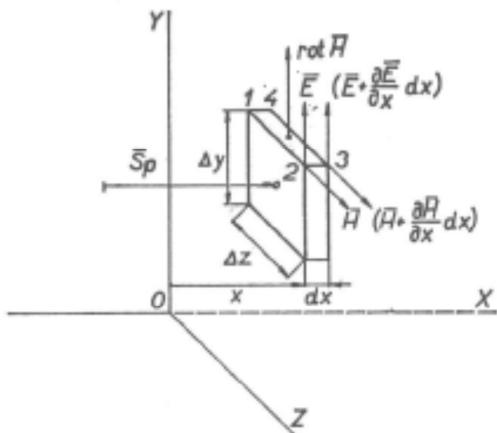
K fázoru H je třeba ještě přiřadit fázor elektrického pole E. Vzájemný vztah udává 1. Maxwellova rovnice

$$\text{rot} \bar{H} = \gamma \bar{E} + j \omega \epsilon \bar{E} = (\gamma + j \omega \epsilon) \bar{E}$$

Uvažujeme v prostoru kolmo ke směru šíření elmg. vlnění element o rozlozech ( $\Delta y \Delta z$ ), o tloušťce dx ve směru šíření. Ve vzdálenosti x je hodnota fázoru H, ve vzdálenosti ( $x+dx$ ) je fázor  $[\bar{H} + (\partial \bar{H} / \partial x) dx]$ . Máme-li určit rot H, zapíšeme do čitatele výrazu  $\left[ \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial x^2} \right] + k^2 \bar{E} = 0$

práci, kterou vykoná jednotka mg množství, pohybuje-li se po obvodu elementární plošky 1-2-3-4-1. Na úsecích 2-3 a 4-1 se práce nekoná, protože směr dráhy je kolmý ke směru síly H. Do jmenovatele zapíšeme obsah elementární plošky ( $\Delta z dx$ ). Dělíme-li čitatele jmenovatelem, dostaneme hledanou velikost rot H.

$$\text{rot} \bar{H} = \frac{\bar{H} \Delta z - (\bar{H} + \frac{\partial \bar{H}}{\partial x} dx) \Delta z}{\Delta z dx} = - \frac{\partial \bar{H}}{\partial x}$$



Obr. 31.2. Prostorový element pro vyjádření  $\text{rot } \mathbf{H}$ .

### Charakteristická impedance prostředí

$$\frac{\overline{E}_p}{\overline{H}_p} = \frac{\overline{A}_1 e^{-jkx}}{\overline{A}_1 e^{-jkx}} \sqrt{\left( \frac{j\omega\mu}{\gamma + j\omega\epsilon} \right)} = \sqrt{\left( \frac{j\omega\mu * j\omega\mu}{(\gamma + j\omega\epsilon)j\omega\mu} \right)} = \frac{\omega\mu}{\sqrt{[-j\omega\mu(\gamma + j\omega\epsilon)]}} = \frac{\omega\mu}{k} = \overline{Z}$$

Obecný výraz  $Z$  platí pro rovinné vlnění nevodivé i vodivé s konstantami  $\mu, \epsilon, \gamma$ .

**Rovinné elmg. vlnění v nevodivém prostředí**  
je charakterizováno tím, že měrná vodivost  $\gamma = 0$ .

$$k^2 = \omega^2 \epsilon \mu - j\omega \mu \gamma = \omega^2 \epsilon \mu = \left( \frac{\omega}{v} \right)^2, k = \frac{\omega}{v}.$$

$$\frac{d^2 \overline{H}}{dx^2} + k^2 \overline{H} = 0$$

$$\frac{d^2 \overline{E}}{dx^2} + k^2 \overline{E} = 0$$

Pro dosazení za  $k = \frac{\omega}{v}$ . bude:

$$\frac{d^2 \overline{H}}{dx^2} + \left( \frac{\omega}{v} \right)^2 \overline{H} = \frac{d^2 \overline{H}}{dx^2} + \alpha^2 \overline{H} = 0$$

$\text{rot } \overline{H}$  dostaneme derivováním výrazu:  $\overline{H} = \overline{A}_2 e^{-j\alpha x} + \overline{A}_2 e^{j\alpha x} = \overline{H}_p + \overline{H}_r$

$$\overline{E} = \frac{1}{j\alpha\epsilon} \text{rot} \overline{H} = +j \frac{1}{\alpha\epsilon} \frac{\alpha \overline{H}}{\alpha x} = j \frac{1}{\alpha\epsilon} \left[ -j\alpha \overline{A}_1 * e^{-j\alpha x} + j\alpha \overline{A}_2 * e^{j\alpha x} \right] = \frac{\alpha}{\alpha\epsilon} \left[ \overline{A}_1 e^{-j\alpha x} - \overline{A}_2 e^{j\alpha x} \right].$$

$$\frac{\alpha}{\alpha\epsilon} = \frac{\omega}{v\alpha\epsilon} = \frac{1}{v\epsilon} = \frac{\sqrt{(\epsilon\mu)}}{\epsilon} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \frac{\mu_r}{\epsilon_r}} = 120\pi \sqrt{\left( \frac{\mu_r}{\epsilon_r} \right)} = Z$$

$$\overline{E} = Z \left[ \overline{A}_1 e^{-j\alpha x} - \overline{A}_2 e^{j\alpha x} \right] = 120\pi \sqrt{(\mu_r / \epsilon_r)} \left[ \overline{A}_1 e^{-j\alpha x} - \overline{A}_2 e^{j\alpha x} \right] = \overline{E}_p + \overline{E}_r.$$

Rovnice rovinného harmonického elmg. vlnění v nevodivém prostředí pro fázory  $\overline{H}$  a  $\overline{E}$  jsou:

$$\overline{H} = \overline{A}_2 e^{-j\alpha x} + \overline{A}_2 e^{j\alpha x} = \overline{H}_p + \overline{H}_r$$

$$\overline{E} = Z \left[ \overline{A}_1 e^{-j\alpha x} - \overline{A}_2 e^{j\alpha x} \right] = 120\pi \sqrt{(\mu_r / \epsilon_r)} \left[ \overline{A}_1 e^{-j\alpha x} - \overline{A}_2 e^{j\alpha x} \right] = \overline{E}_p + \overline{E}_r.$$

### Určení integračních konstant $\overline{A}_1$ a $\overline{A}_2$

Pro fázory  $\overline{H}$  a  $\overline{E}$  značí první člen na pravé straně vždy rovinné elmg. vlnění vyzářené (postupující), druhý člen vlnění odražené od vodivé stěny s rozhraním kolmým ke směru šíření.

V rozhraní, pro  $x = 0$ :

$$\overline{H} = \overline{H}_2 = \overline{A}_1 + \overline{A}_2 , \quad \overline{E} = \overline{E}_2 = 120\pi \sqrt{(\mu_r / \epsilon_r)} \left[ \overline{A}_1 - \overline{A}_2 \right]$$

$$\frac{\overline{E}_2}{\overline{H}_2} = \frac{p}{\gamma} \frac{\cosh pd}{\sinh pd} = \frac{1+j}{a\gamma} \cdot \frac{\cosh pd}{\sinh pd}$$

$$\overline{A}_1 = \frac{1}{2} \overline{H}_2 (1 + k'),$$

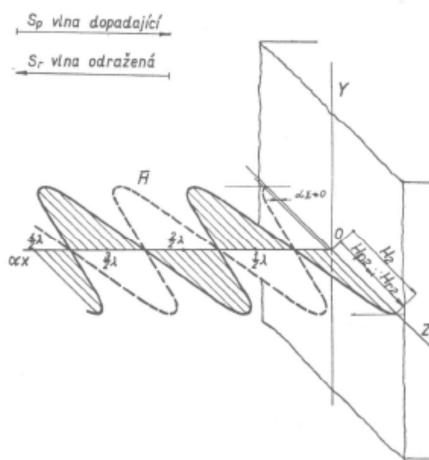
$$\overline{A}_2 = \frac{1}{2} \overline{H}_2 (1 - k').$$

$k'$  je komplexní číslo, hodnota  $k' << 1$ , proto můžeme při určení konstant  $\overline{A}_1$  a  $\overline{A}_2$  v nevodivém prostředí toto  $k'$  zanedbat.

Právě v rozhraní  $x = 0$ , bude:

$$\overline{H} = \frac{1}{2} \overline{H}_2 + \frac{1}{2} \overline{H}_2 = \overline{H}_{p2} + \overline{H}_{r2} = \overline{H}_2 , \quad \overline{H}_{p2} = \overline{H}_{r2} = \frac{1}{2} \overline{H}_2$$

V rozhraní jsou obě složky magnetické vlny (přicházející a odražená) stejně veliké a též fáze, takže se sčítají



Obr. 32.4. Stojaté elmg. vlnění (vlna magnetická  $H$ ) před odrážejícím rozhraním.

## Vlna elektrická

$$\bar{E} = \bar{E}_2 = Z \left[ \frac{1}{2} \bar{H}_2 - \frac{1}{2} \bar{H}_2 \right] = \bar{E}_{p2} + \bar{E}_{r2} = 0, \bar{E}_{p2} = -\bar{E}_{r2}.$$

V rozhraní jsou obě složky vlny elektrické stejně veliké, avšak opačné fáze, takže se odečítají,  $\bar{E}_2 = 0$ .

## Stojaté elmg. vlnění

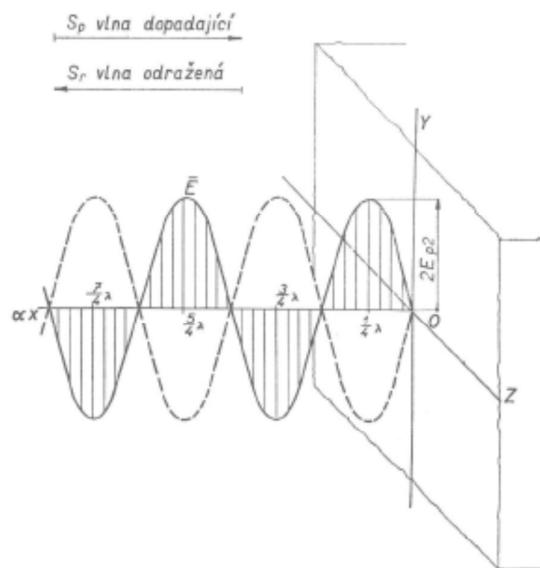
Složením vlny postupující a odražené vznikne v prostoru mezi rovinou vyzařující a odrážející stojaté elmg. vlnění.

## Vlna magnetická

$$\bar{H} = \frac{1}{2} \bar{H}_2 (e^{-j\alpha x} + e^{j\alpha x}) = \frac{1}{2} \bar{H}_2 (\cos \alpha x - j \sin \alpha x + \cos \alpha x + j \sin \alpha x) = \bar{H}_2 \cos \alpha x = \bar{H}_2 \cos \alpha x e^{j\omega t}.$$

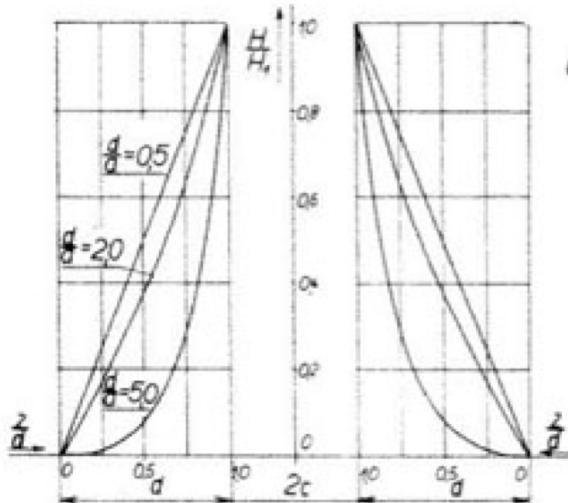
Dostali jsme rovnici stojatého elmg. vlnění fázoru  $\bar{H}$  v nevodivém prostředí, v prostoru mezi rovinou vyzařující a odrážející. Stojaté elmg. vlnění je charakterizováno tím, že má pevné body, ve kterých je maximální hodnota  $H$  (kmity) a pevné body s nulovou hodnotou (uzly). Skutečné rovinné elektromagnetické vlnění má současně obě složky  $H$  a  $E$ , které leží v rovinách k sobě kolmých. V našich 32.4 a 32.5 jsou v zájmu větší názornosti obě složky kresleny odděleně. V mísťech, kde jedna složka má kmity, má druhá složka uzly a naopak.

Uvažujeme pro účely indukčního zahřívání kmitočty v rozmezí  $f = 10^2$  až  $10^6$  Hz. Tomu odpovídají ve vzduchu vlnové délky  $\lambda = 3000$  km až 300 m. Kdybychom chtěli realizovat alespoň jednu vlnu stojatého vlnění při uvedených kmitočtech, bylo by třeba, aby vzdálenost mezi vyzařující a odrážející rovinou byla rovna vlnové délce. Vzhledem k velkým rozměrům to je neproveditelné. Můžeme však vytvořit názorný model stojatého vlnění, použijeme-li kmitočtů značně vyšších. Pro  $f = 10^9$  Hz je vlnová délka  $\lambda = 30$  cm. Při takovém kmitočtu můžeme realizovat i v malém prostoru několik vln elmg. stojatého vlnění mezi rovinným zářičem (vhodnou anténou) a odrážející vodivou stěnou.

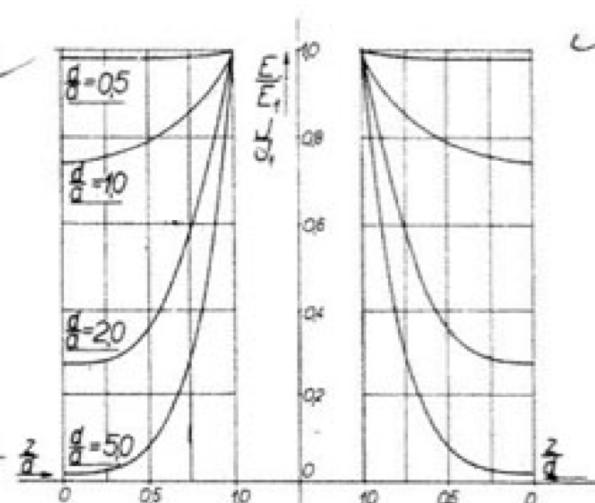


Obr. 32.5. Stojaté elmg. vlnění (vlna elektrická  $E$ ) před odrážejícím rozhraním.

## 6) Minimální úbytek napětí a elektrické ztráty na pásovém vedení

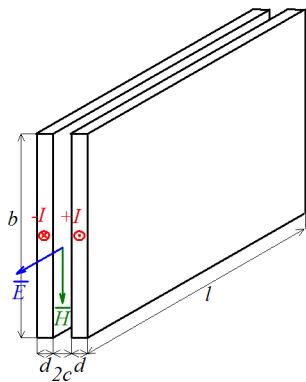


Obr. 39,2. Rozložení magnetického pole ve stěnách pásového vedení.



Obr. 39,3. Rozložení elektrického pole a hustoty proudu ve stěnách pásového vedení.

Vypočtěte ztráty a úbytek v měděném pásovém vedení o délce  $l = 13m$ . Výška pásů  $b = 20\text{ cm}$ , tloušťka  $d = 0,5\text{ cm}$ , vzdálenost pásů  $2c = 2\text{ cm}$ . Prochází proud  $I_{ef} = 1575\text{ A}$ , kmitočet  $f = 600\text{ Hz}$ . Vodivost  $\gamma = 5,5 \cdot 10^7\text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ .



Hloubka vniku:

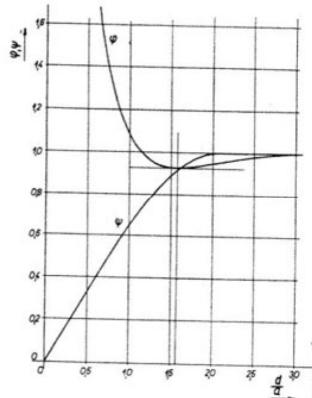
$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot 3,14 \cdot 600 \cdot 5,5 \cdot 10^7 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 1}} = 2,76 \cdot 10^{-3}\text{ m}$$

Argument:

$$\frac{d}{a} = \frac{0,5}{0,276} = 1,81\text{ cm}$$

Z diagramu odečteme:  $\varphi = 0,926$ ,  $\psi = 0,97$

$$R = \rho \cdot \frac{2 \cdot l}{a \cdot b} \cdot \varphi = \frac{1}{5,5 \cdot 10^7} \cdot \frac{2 \cdot 13}{2,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2} \cdot 0,926 = 7,93 \cdot 10^{-4}\Omega$$



Ztráty ve vedení:

$$P = R \cdot I_{ef}^2 = 7,9 \cdot 10^{-4} \cdot 1575^2 = 1960W$$

Reaktance vedení:

$$\omega L = \omega L' + \omega L'' = \rho \cdot \frac{2 \cdot l}{a \cdot b} \cdot \psi \left( \frac{2 \cdot d}{a} \right) + \omega \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{2c \cdot l}{b}$$

$$\omega L = \frac{1}{5,5 \cdot 10^7} \cdot \frac{2 \cdot 13}{2,76 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2} \cdot 0,97 + 2\pi \cdot 600 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot \frac{0,02 \cdot 13}{0,2} = 7,03 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Výsledná impedance:

$$Z = R + j\omega L = (0,79 + j7,03) \cdot 10^{-3}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + j\omega^2 L^2} = \sqrt{0,79^2 + 7,03^2} \cdot 10^{-3} = 7,07 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Úbytek na vedení:

$$U_{ef} = Z \cdot I_{ef}' = 7,07 \cdot 10^{-3} \cdot 1575 = 11,1V$$

## 7) Rovná elektricky vodivá stěna malé a velké tloušťky – fyzikálně, význam pro praxi

Stěnu malé tloušťky rozumíme takovou stěnu, ve které se rovinné mag. vlnění dopadajícího kolmo na přední rozhraní a částečně vstupující do stěny neutlumí dříve, než dojde k zadnímu rozhraní, takže se od zadního rozhraní odráží zpět.

Dopadající vlnění rozlišujeme na:

- Prostředí vlevo před předním rozhraním – izolant (vzduch)
- Prostředí vpravo za předním rozhraním – vodivá stěna
- Prostředí vpravo za zadním rozhraním – izolant (vzduch)

16.

$\bar{H}$  a  $\bar{E}$  ve stěně malej tloušťky

-  $d''$  - tloušťka stěny, ve které je  $H, E$  městací vlny umístěny

- obecní rovnice pro vodivé prostředí:

$$H = A \cdot e^{-px} + B \cdot e^{px} = H_P + H_R$$

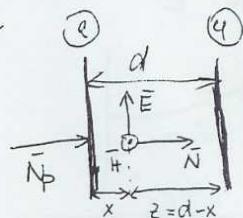
$$E = \frac{P}{\gamma} (A \cdot e^{-px} + B \cdot e^{px}) = E_P + E_R$$

$$A = \frac{H_2}{1 - e^{-2pd}} = \frac{H_2 \cdot e^{pd}}{2 \sinh pd}$$

$$B = - \frac{H \cdot e^{-2pd}}{1 - e^{-2pd}} = - \frac{H_2 \cdot e^{-pd}}{2 \sinh pd}$$

$$H = \frac{H_2}{2 \sinh pd} \cdot (e^{pd} \cdot e^{-px} - e^{-pd} \cdot e^{px}) = \frac{H_2}{2 \sinh pd} (e^{p(d-x)} - e^{-p(d-x)})$$

$$\boxed{\bar{H} = H_2 \cdot \frac{e^{pz} - e^{-pz}}{2 \sinh pd} = H_2 \cdot \frac{\sinh pz}{\sinh pd}}$$



$d$  = tloušťka stěny

$x$  = vzdálenost od místka dopadu počtu vektoru

$$e^{pz} - e^{-pz} = 2 \sinh pz$$

$$E = \frac{P}{\gamma} \cdot \frac{H_2}{1 - e^{-2pd}} (e^{-px} - e^{-2pd} \cdot e^{px})$$

$$\boxed{\bar{E} = \frac{P}{\gamma} \cdot H_2 \cdot \frac{\cosh pz}{\sinh pd}}$$

- absolutní hodnoty  $|\bar{H}|$  a  $|\bar{E}|$ :

$$|\bar{H}| = H_2 \cdot \sqrt{\frac{\cosh(\frac{2z}{a}) - \cos(\frac{2z}{a})}{\cosh(\frac{2d}{a}) - \cos(\frac{2d}{a})}} \rightarrow \text{znamená-li } z=d \rightarrow \text{může být i nulový}$$

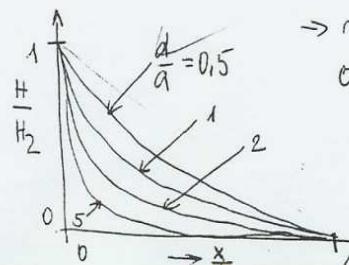
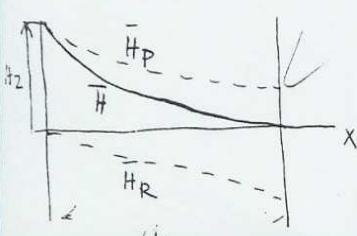
$$|\bar{E}| = \frac{\sqrt{2}}{a \cdot \gamma} \cdot H_2 \cdot \sqrt{\frac{\cosh(\frac{2z}{a}) + \cos(\frac{2z}{a})}{\cosh(\frac{2d}{a}) + \cos(\frac{2d}{a})}}$$

$$\text{pro } \gamma = \text{konst} \Rightarrow \frac{E}{E_2} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

### PRŮBĚHY

$$\frac{H}{H_2} = \frac{\text{absolutní hodnota } H \text{ v místě mísle}}{\text{hodnota } H_2 \text{ v prostoru mísle}}$$

$$\frac{x}{d} = \frac{\text{vzdálenost } x \text{ od prostředku rozhnau}}{\text{tloušťka stěny } d}$$



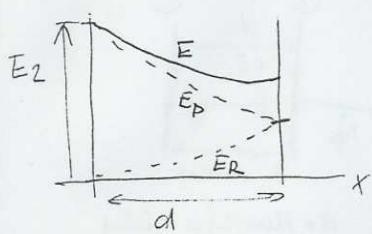
✓ v zadání rozhnau  $H_P$  ji slíží všechny jiné  
ke ale posunula o  $\pi \rightarrow$  odtí se odečítají

← do mísly vstupují  $H_2$ , která je vlnou  
→ na rozhnau (4) se postupně vlna  $H_P$   
ochází s opačnou fazí a slevnou  
amplitudou  $\rightarrow H = H_P + H_R$

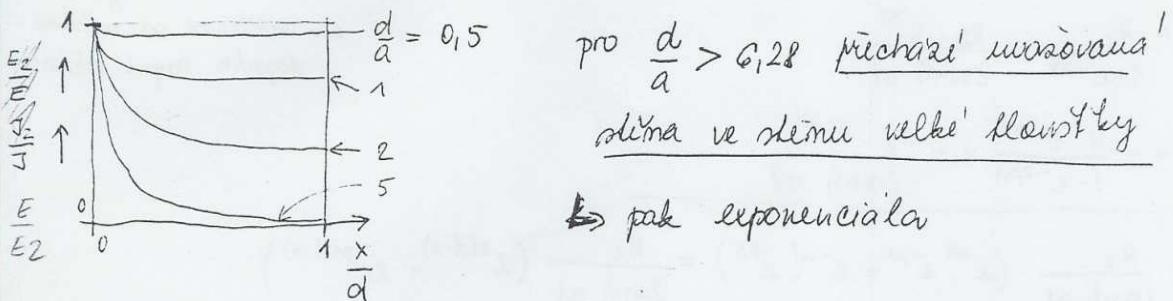
$$\frac{x}{d} = 0 \rightarrow v \text{ mísle } (2) \rightarrow vstup N_P$$

$$\frac{x}{d} = 1 \rightarrow v \text{ mísle } (4) \rightarrow konec vstupy$$

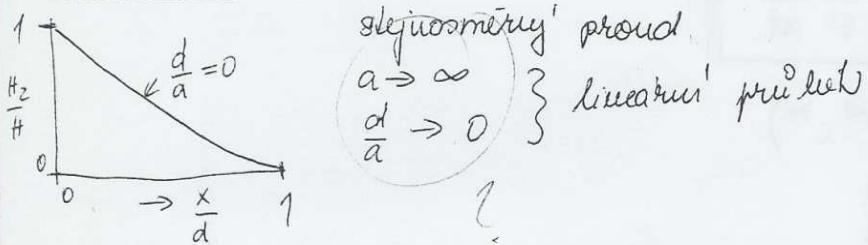
Příkhek E:



oči sloučí jistu v zadním rozhoru 'slyme velké', jistu ve fazi  $\rightarrow$  se čítají se



Příkhek H



## 8) Definice hloubky vniku naindukovaných proudů „a“

Při řešení rovnic elektromagnetického rovinného vlnění ve vodivém prostředí se ukázalo výhodným zavedení pojmu hloubka vniku  $a$ .

### I. definice a

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}} \quad [\text{cm}]$$

$\omega = 2\pi f$  je zde závislost kmitočtu

$\gamma \quad \text{S/m}$  konduktivita neboli vodivost

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad [\text{H/m}]$$

permeabilita

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

### II. definice a v rovinné stěně velké tloušťky

$$\bar{H} = H_2 \cdot e^{-\frac{x}{a}} \cdot e^{-j\frac{x}{a}} \cdot e^{j\omega t}$$

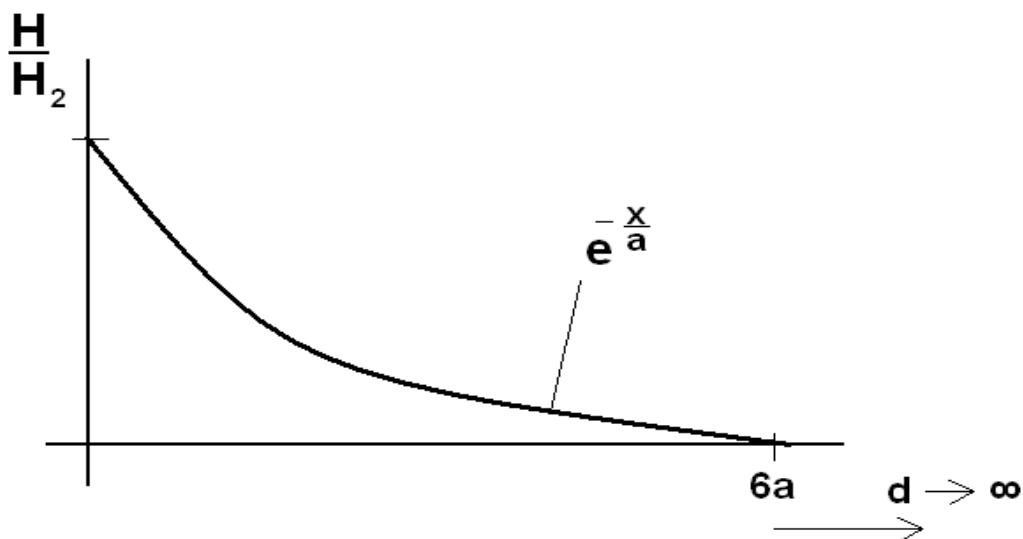
$$\bar{E} = E_2 \cdot e^{-\frac{x}{a}} \cdot e^{-j\frac{x}{a}} \cdot e^{j\omega t}$$

$$\begin{cases} H_2 \cdot e^{-\frac{x}{a}} \\ E_2 \cdot e^{-\frac{x}{a}} \end{cases}$$

Amplitudy  $H, E$

$e^{-j\frac{x}{a}}$  fázové natočení

$e^{j\omega t}$  harmonický průběh



a)  $x = a$

$$\bar{H} = H_2 \cdot e^{-1} \cdot e^{-j} \cdot e^{j\omega t}$$

$\bar{H}_a = H_2 \cdot e^{-1} = H_2 \cdot 0,368 \Rightarrow$  v hloubce vniku  $a$  od povrchu má  $\bar{H}$  amplitudu rovnou 36,8% z  $\bar{H}_2$  na povrchu

Stěna od šířky kde  $d > 6a \cong 2 \cdot \pi \cdot a$  je považována za stěnu nekonečné šířky  $d \rightarrow \infty$

b)  $\frac{x = 2 \cdot \pi \cdot a}{H_2} = H_2 \cdot e^{-2\pi} \cdot e^{-j2\pi} \cdot e^{j\omega t}$   
 $\overline{H_{2\pi a}} = H_2 \cdot 0,00187 \Rightarrow 0,187\% \text{ z } \overline{H_2} \text{ na povrchu}$

$e^{-j\frac{x}{a}}$  fázové natočení pro  $x = 2 \cdot \pi \cdot a \rightarrow e^{-j\frac{2\pi a}{a}} \rightarrow e^{-j2\pi} \Rightarrow$  otočení o  $360^\circ$  dojde k úplnému utlumení

### III. definice a

$$P_{21d \rightarrow \infty} = \frac{1}{2a\gamma} \cdot H_2^2$$

$$P_{21} = \frac{1}{a\gamma} \cdot \left( \frac{H_2}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad \left( \frac{H_2}{\sqrt{2}} \right)^2 = H_{2ef}^2 \cong I_{ef}^2$$

$$\rho = \frac{1}{\gamma} \quad \rho \cdot \frac{1}{S} \approx \frac{1}{a\gamma} \Rightarrow S = a \cdot 1$$

$$P_{21} = R_{21} \cdot I_{ef}^2$$

pohlcování elmg. energie do stěny  $d \rightarrow \infty$

a)  $\frac{x = a}{H_2} = \frac{1}{\gamma} \cdot \left( \frac{H_2}{a} \right)^2 \cdot \int_0^a e^{-\frac{2x}{a}} dx = \frac{1}{2\gamma a} \cdot H_2^2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2a}{a}} \right) = 0,8646 \cdot P_{21\infty}$

v hloubce "a" vznikne 86,5% tepla z  $P_{21}$

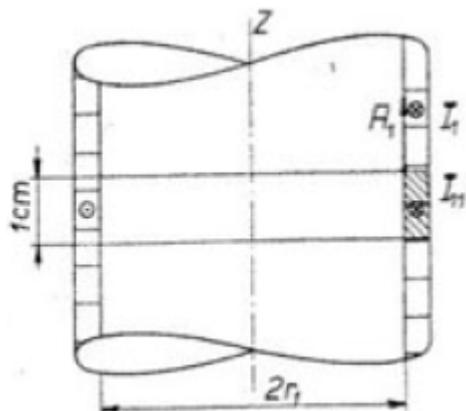
b)  $\frac{x = 2a}{H_2} = 0,9816 P_{21\infty} \rightarrow 98,16\% \text{ z } P_{21}$

c)  $\frac{x = 3a}{H_2} = 0,9975 \cdot P_{21\infty} \rightarrow 99,75\% \text{ z } P_{21}$

## 9) Poyntingův zářivý vektor ve válcovém elektromagnetickém vlnění

Válcové elektromagnetické vlnění - prázdný induktor

Zdrojem válcového elmg. vlnění je válcová plocha, protékána střídavým proudem tak, že proudová vlákna leží v rovinách kolmých k ose válce.



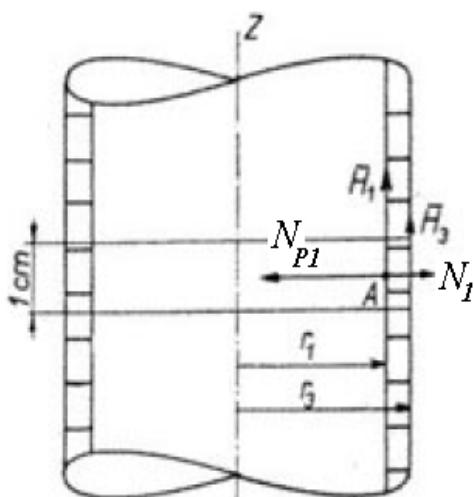
N - počet závitů

I - proud v závitech cívky

J - proudová hustota  $J_{11} = N_{11} \cdot I_1 [A/m^2]$

H - intenzita magnetického pole [A/m]

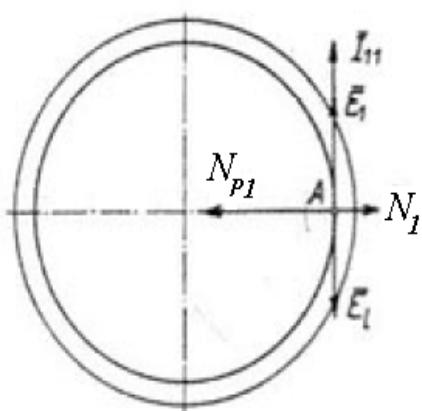
$N_{P1}$  - elektromagnetické vlnění, které vyzařuje vnitřní povrch cívky do vlastní dutiny  $[W/cm^2]$



Teče-li proud  $I_1$  vyznačeným směrem, má  $E_1$  na poloměru  $r$  stejný směr. Vektor  $H_1$  směřuje vzhůru. Vektor  $E_1$  a  $H_1$  určují zářivý vektor  $N_1$ , kolmý k jejich rovině. Jeho smysl je takový, že vstupuje kolmo do stěny cívky a značí velikost ztrát v cívce. Proud  $I$  vybudí v dutině cívky magnetický tok, který indukuje v závitech elmot. sílu  $E_i$  opačného smyslu, než je intenzita  $E_1$ . Magnetická intenzita  $H_1$  a indukovaná elmot. síla  $E_i$  vytvoří zářivý vektor  $N_{P1}$ , který je opět kolmý k povrchu cívky a směřuje k její ose. Cívka tedy vyzařuje do své dutiny elmg. tok o hustotě  $N_{P1}$   $[W/cm^2]$ .

Předpokládáme-li, že cívka má nekonečnou délku, potom se mag. tok, buzený v dutině cívky, vrací nekonečným prostorem vně cívky, má nekonečný průřez a tedy nulovou intenzitu. Proto se  $H_3$  na vnějším poloměru  $r$  rovná nule.

$$J_{11} = \oint_a H \cdot ds = H_1 \cdot 1 - H_3 \cdot 1 = H_1 \quad [A/cm]$$



## 10) H a E ve válcovém elektromagnetickém vlnění – průběhy

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0$$

ve válcových souřadnicích:  $\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H}{\partial r}$  jelikož H závisí

$$\text{pouze na } r \text{ a je konstantní pro } \varphi \text{ a } z \Rightarrow \nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H}{\partial r}$$

$$\text{po dosazení } \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} + k^2 H = 0 \quad / : k^2$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial (kr)^2} + \frac{1}{kr} \cdot \frac{\partial H}{\partial (kr)} + H = 0 \quad \rightarrow \text{Besselova diferenciální rovnice nultého řádu}$$

Výraz pro složku magnetickou válcového elmg. vlnění v dutině cívky

$$H = C_1 \cdot J_0(kr) + C_2 \cdot N_0(kr) \rightarrow \text{Cylindrické funkce} \quad C_1, C_2 \text{ integrační konstanty}$$

Ještě potřebujeme výraz pro intenzitu elektrického pole. Vzájemný vztah mezi E a H dostaneme rot H.

rot H dostaneme jestliže práci kterou vykoná mag. intenzita H po určité dráze dělíme  $1 * dr$

$$\text{rot } \bar{H} = \frac{H \cdot 1 - \left( H + \frac{\partial H}{\partial r} dr \right) \cdot 1}{dr \cdot 1} = - \frac{\partial \bar{H}}{\partial r} \quad \text{to dosadíme do rot } \bar{H} = \gamma E + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$\text{po matematických úpravách } E = - \frac{1}{\gamma + j\omega\epsilon} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} \quad \text{dosazením do této rovnice za } H$$

$$H = C_1 \cdot J_0(kr) + C_2 \cdot N_0(kr)$$

vyjde výraz  $E = \frac{k}{\gamma + j\omega\epsilon} \cdot [C_1 \cdot J_1(kr) + C_2 \cdot N_1(kr)]$  pro složku elektrickou válcového

elmg. vlnění v dutině cívky, konstanty C určíme z mezních podmínek, rozdílných pro jednotlivé případy

$$\text{C}_2 \text{ pro } r = 0 \rightarrow E_0 = 0 \text{ po dosazení za } E = 0 = [C_1 \cdot J_1(0) + C_2 \cdot N_1(0)]$$

$$J_1(0) = 0$$

$$N_1(0) = -\infty \neq 0 \Rightarrow \boxed{C_2 = 0}$$

Nenastává odraz, elmg. vlnění v prázdné dutině cívky má pouze složky H a E vyzařované cívou.

**C<sub>1</sub>.** Druhou konstantu určíme z podmínky, že intenzita H v místě r je určena výrazem

$$H_1 = N_{11} \cdot I_1 = C_1 \cdot J_0(kr) \Rightarrow C_1 = \frac{H_1}{J_0(kr)}$$

$$\boxed{\bar{H} = \bar{H}_1 \cdot \frac{J_0(kr)}{J_0(kr_1)}}$$

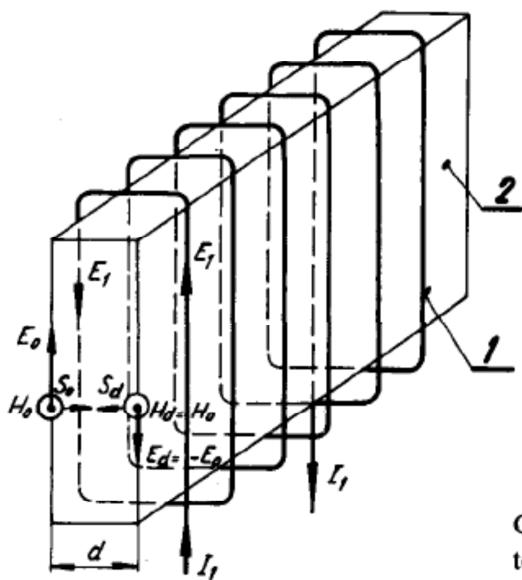
**Rovnice pro prostředí vodivé i nevodivé**

$$\boxed{E = \frac{k}{\gamma + j\omega\epsilon} \cdot \bar{H}_1 \cdot \frac{J_1(kr)}{J_0(kr_1)}}$$

## 11) Objasnění „elektromagnetické průzařnosti“

b) Intenzita elektrického pole a Poyntingův vektor na levém a pravém povrchu stěny při  $\mathbf{H}_0 = \mathbf{H}_d$

Tento případ je důležitý zejména pro výpočty indukčních ohřevů plochých desek (obr. 99).



Obr. 99. Indukční ohřev relativně tenké stěny

Poyntingův vektor

$$\mathbf{S}_0 = \mathbf{E}_0 \times \mathbf{H}_0 \quad (210)$$

$$\mathbf{S}_d = \mathbf{E}_d \times \mathbf{H}_0 = -\mathbf{E}_0 \times \mathbf{H}_0 = -\mathbf{S}_0 \quad (211)$$

$\mathbf{S}_0$  a  $\mathbf{S}_d$  jsou stejné, ale opačných smyslů ( $\mathbf{S}_0$  má směr  $+x$ ,  $\mathbf{S}_d$  má směr  $-x$ ). Reálná část  $\mathbf{S}_0$  bude tedy

$$P_0 = \frac{H_0^2}{a\gamma} M(\alpha) \quad (212)$$

a vyjadřuje amplitudu činného výkonu jdoucího od jednotky povrchu stěny zleva, jestliže  $H_0$  je amplituda. Efektivní výkon pro harmonický průběh bude

$$P_{0\text{ef}} = \frac{H_0^2}{2a\gamma} M(\alpha) \quad (213)$$

Zprava jde do stěny stejný efektivní činný výkon

$$P_{\text{def}} = \frac{H_0^2}{2a\gamma} N(\alpha) \quad (214)$$

(Znaménko minus již neuvažujeme, oba výkony se ve stěně sčítají a ohřívají ji.)  
Imaginární část  $\mathbf{S}_0$  bude

$$Q_0 = \frac{H_0^2}{a\gamma} N(\alpha)$$

a vyjadřuje amplitudu jalového (magnetizačního) výkonu jdoucího do jednotky povrchu zleva. Efektivní hodnota tohoto jalového výkonu bude

$$Q_{0\text{ef}} = \frac{H_0^2}{2ay} N(\alpha) \quad (215)$$

Tento magnetizační jalový výkon přísluší k magnetickému toku, který je skutečně ve stěně. Je to tzv. tok zbytkový, protože zbyl z celkového vstupního toku, jehož část byla indukovanými vířivými proudy vytlačena. Úhel fázového posunu bude určen

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{Q_{0\text{ef}}}{P_{0\text{ef}}} = \frac{N(\alpha)}{M(\alpha)} = \frac{\sinh \alpha + \sin \alpha}{\sinh \alpha - \sin \alpha} \\ \cos \varphi &= \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}; \quad \left( \alpha = \frac{d}{a} = \frac{\text{tloušťka stěny}}{\text{hloubka vniku}} \right) \end{aligned} \quad (216)$$

Indukční ohřev stěny, k němuž se předešlé teoretické závěry vztahují, je schematicky na obr. 99. Obr. 99 koresponduje s obr. 98. Budící (primární) vinutí (také induktor) 1 je navinuto kolem ohřívané desky 2 tloušťky  $d$ . Vinutím prochází střídavý proud  $I_1$  a budí magnetické pole intenzity  $H_0$ . Indukované vířivé proudy v desce mají opačný směr než  $I_1$ . Také  $E_0$  a  $E_d$  má opačný směr než  $E_1$ . Protože funkce  $M(\alpha)$  a  $N(\alpha)$  [rovnice (208) a (209)] mají pro výpočty indukčních ohřevů plochých útvarů velký význam, vyneseme je graficky (obr. 100) podle tabulky vypočítané na počítači.

Pro stěnu nekonečně tlustou platí podle rovnice (165) a (166)

$$P_{0\text{ef}\infty} = \frac{1}{2ay} H_0^2 \quad Q_{0\text{ef}\infty} = \frac{1}{2ay} H_0^2$$

$$\frac{P_{0\text{ef}}}{P_{0\text{ef}\infty}} = M(\alpha) \quad \frac{Q_{0\text{ef}}}{Q_{0\text{ef}\infty}} = N(\alpha)$$

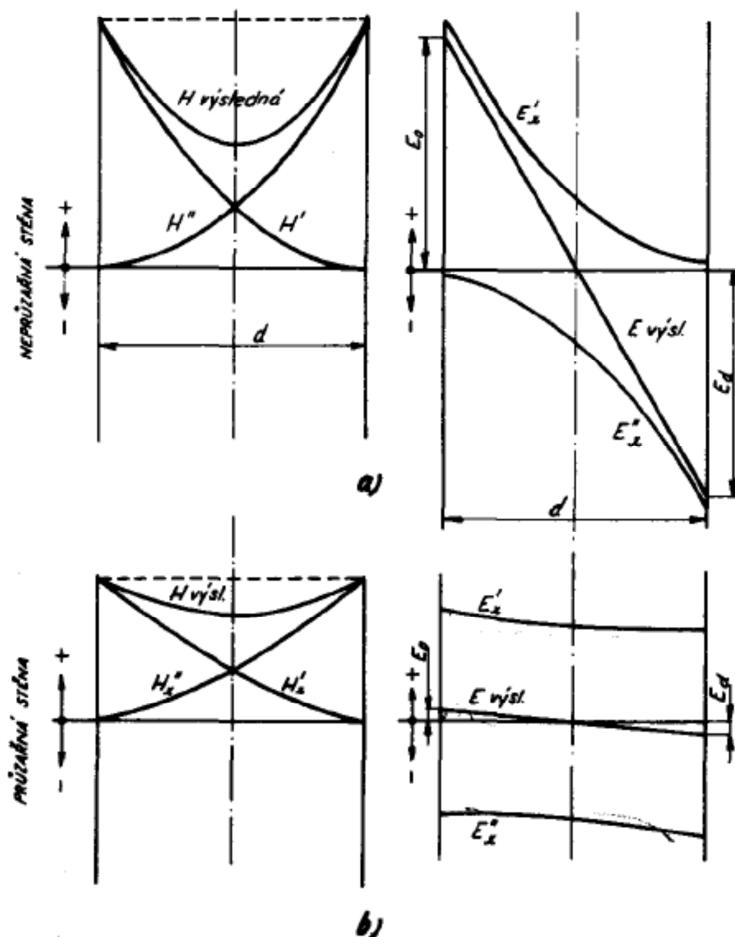
$$P_{\text{ef}} = P_{\text{ef}\infty} M(\alpha) \quad (217)$$

$$Q_{\text{ef}} = Q_{\text{ef}\infty} N(\alpha) \quad (218)$$

Funkce  $M(\alpha)$  a  $N(\alpha)$  tedy určují, jaký podíl výkonu činného a jalového absorbuje stěna konečné tloušťky z výkonu, který by absorbovala stěna nekonečně tlustá.

Z obr. 100 vyplývá, že pro  $\alpha = d/a = 2$  neboli  $d = 2a$  absorbuje stěna asi 80 % výkonu, který by absorbovala stěna teoreticky nekonečně tlustá, prakticky stěna, pro niž platí  $\alpha \geq 3$  neboli  $d \geq 3a$ . Pro  $d < a$  ( $d/a = \alpha < 1$ ) je stěna průzařná, neabsorbuje téměř výkon (teplo). Elektromagnetické vlnění (složka  $\mathbf{E}_x'$  a  $\mathbf{E}_x''$  podle rovnic (196) a (198)) se vzájemně ruší, protože se nestáčilo v tenké stěně utlumit. Průzařnost je pro indukční teplo nevýhodná. Proto volíme pro ohřev vyšší frekvenci. Tím klesne hloubka vniku  $a$ , stoupne  $\alpha$  a klesne průzařnost. Naproti tomu je průzařnost např. u transformátorových plechů nutná, aby se plechy indukčně neohřívaly.

Fyzikálně je zjednodušeně objasněna průzařnost na obr. 101a, b. Na obr. 101b je dobře vidět, jak se  $E'_x$  a  $E''_x$  ruší, jestliže se průchodem stěnou neutlumí. Výsledná  $E$  je potom velmi malá, a tím je malý i Poyntingův vektor.



Obr. 101. Fyzikální vysvětlení průzařnosti

Pro fyzikální názor je užitečné – obecně jak jsme již provedli dříve – vynést graficky průběh absolutních hodnot amplitud  $H_x$  podle rovnice (201) a  $E_x$  podle rovnice (202). Víme, že absolutní hodnota amplitud v jednotlivých hloubkách stěny (pásu) se vypočítá tak, že sečteme čtverce reálné a imaginární části rovnic (201), (202) a odmocníme. Přitom můžeme v konkrétním případě vynášet v určitém měřítku graficky přímo konkrétní hodnoty. Často je však výhodné – jak jsme již poznali – vynášet hodnoty poměrné, tj.  $H_x/H_0$  nebo  $E_x/E_0$  atp. Takové grafy jsou obecnější.

Zejména průběh amplitud  $E_x$  je velmi důležitý, neboť udává i rozdělení hustoty proudu ( $J = \gamma E_x$ ) a rozdělení tepelného výkonu v objemové jednotce. Platí totiž, že

$$\sigma = \frac{E_x^2 \gamma}{2}$$

Stačí tedy umocnit křivku  $E_x$  a dostaneme průběh  $\sigma$  jako funkci hloubky  $x$  ( $\gamma$  přitom uvažujeme konstantní).

## 12) Naindukované teplo v plné elektricky vodivé vsázce

4.35. Množství vyvinutého tepla ve válcové vsázce

4.351. Přímé odvození množství tepla

Při průchodu indukovaných proudů vzniká ve vsázce teplo. Měrný příkon  $\sigma$  je množství tepla, které vznikne v jednotce objemu za jednu vteřinu:

$$\sigma = \frac{1}{2\gamma} J^2 = \frac{1}{2} \rho J^2 \quad [\text{W/cm}^3, \text{S.cm}^{-1}, \text{A/cm}^2]. \quad (43,65)$$

$J$  značí hustotu proudu v místě o poloměru  $r$ . V části válcové vsázky o poloměru  $r_2$ , o osové délce 1 cm, vznikne množství tepla  $P_{21}$  (obr. 43,8).

$$dP_{21} = 2\pi r dr \sigma = \pi \rho J^2 r dr,$$

$$P_{21} = \pi \rho \int_0^{r_2} J^2 r dr \quad [\text{W/cm}, \Omega \cdot \text{cm}, \text{A/cm}^2, \text{cm}]. \quad (43,66)$$

Pro hustotu proudu  $J$  jsme odvodili výraz (43,25):

$$J^2 = \frac{2}{a^2} H_2^2 \frac{\operatorname{ber}'^2 x + \operatorname{bei}'^2 x}{\operatorname{ber}^2 x_2 + \operatorname{bei}^2 x_2} \quad [\text{A/cm}^2].$$

Zavedeme do (43,66) argument  $x$  místo  $r$ :

$$x = \frac{r}{a} \sqrt{2}, \quad r dr = \frac{a^2}{2} x dx. \quad (43,67)$$

Dosadíme do (43,66):

$$P_{21} = \frac{\pi \rho H_2^2}{\operatorname{ber}^2 x_2 + \operatorname{bei}^2 x_2} \left[ \int_0^{x_2} x \operatorname{ber}'^2 x dx + \int_0^{x_2} x \operatorname{bei}'^2 x dx \right] \quad [\text{W/cm}]. \quad (43,68)$$

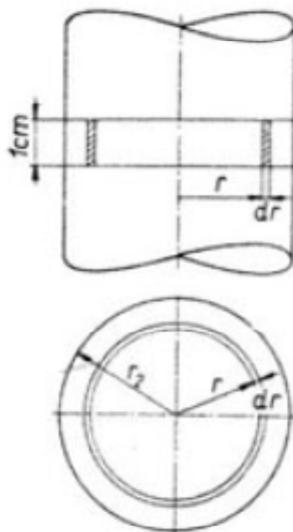
Oba integrály v závorce vyřešíme integrací řad, kterými jsou definovány funkce  $\operatorname{ber}' x$  a  $\operatorname{bei}' x$  (příloha, (73,14a) a (73,15a)):

$$\operatorname{ber}' x = \left( -\frac{x^3}{2^2 \cdot 4} + \frac{x^7}{(2 \cdot 4 \cdot 6)^2 \cdot 8} - \frac{x^{11}}{(2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 10)^2 \cdot 12} + \dots \right), \quad (43,69)$$

$$\operatorname{bei}' x = \left( -\frac{x}{2} + \frac{x^5}{(2 \cdot 4)^2 \cdot 6} - \frac{x^9}{(2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8)^2 \cdot 10} + \dots \right). \quad (43,70)$$

Řady  $\operatorname{ber}' x$  a  $\operatorname{bei}' x$  konvergují tím rychleji, čím menší je hodnota argumentu  $x$ . Např. pro  $x = 5,0$  má řada  $\operatorname{ber}' x$  tyto členy:

$$\operatorname{ber}' (5,0) = -7.81 + 4.24 - 0.275 + 0.0045 \dots$$



Obr. 43,8. Diagram pro přímé odvození naindukovaného tepla.

#### 4.352. Nepřímé odvození množství tepla ve vsázce

Použijeme způsobu, který je běžně používán u transformátoru, kdy hodnotu odporu ze sekundární strany převádíme na primární. Vzhledem k prostorovému rozložení proudu ve vsázce si však nejsme a priori jisti, že odvozený výsledek bude správný.

V předchozí části 4.34 jsme odvodili výraz (43,58) pro činný odpor  $R_{21}$  části vsázky o osové délce 1 cm, transformovaný do cívky. Prochází-li tímto odporem cívkový proud  $I_1$ , vznikne množství tepla  $P'_{21}$ :

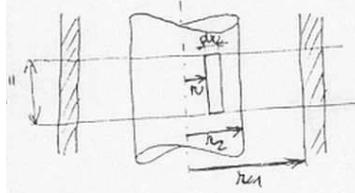
$$P'_{21} = \frac{1}{2} R_{21} I_1^2 = \frac{2\pi x_2}{\gamma} N_{11}^2 P(x_2) \frac{1}{2} I_1^2 = \pi \rho x_2 P(x_2) (N_{11} I_1)^2 = \pi \rho x_2 H_2^2 P(x_2) \quad [W/cm]. \quad (43,73)$$

Funkce  $P(x_2)$  je podle (43,55)

$$P(x_2) = \frac{\operatorname{ber} x_2 \cdot \operatorname{ber}' x_2 + \operatorname{bei} x_2 \cdot \operatorname{bei}' x_2}{\operatorname{ber}^2 x_2 + \operatorname{bei}^2 x_2}. \quad (43,74)$$

### 13) Průběhy proudové hustoty naindukování proudů v plné válcové vsázce – praktické aplikace

$H_1, E_1 \rightarrow$  v plné el. vodivé vsázce, průběhy  $\rightarrow \gamma \neq 0$   
 $\epsilon = 0$



$$k^2 = -j\omega\mu + \omega^2\mu\epsilon$$

$$k^2 = -j\omega\mu$$

$$k = \sqrt{-j} \cdot \sqrt{\omega\mu\epsilon} = \frac{1-j}{a}$$

$$\text{měřejí užlem = fazová konstanta} = \beta = \alpha = \frac{1}{a} = \sqrt{\frac{\omega\mu\epsilon}{2}}$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0$$

$$\frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dH}{dr} + k^2 H = 0$$

$$\frac{d^2 H}{(kr)^2} + \frac{1}{(kr)} \cdot \frac{dH}{(kr)} + H = 0 \leftarrow \text{Besselova dif. rovnice můžeho řádu}$$

$$H = C_1 \cdot J_0(kr) + C_2 \cdot N_0(kr) \quad \leftarrow \text{cylindrické funkce (složka Besselova + Neuman.)}$$

$$J_0, J_1(kr) \quad N_0, N_1(kr)$$

$$\text{I. Maxwell rovnice: } \text{rot } \vec{H} = \mu E + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\text{rot } H = \mu E = - \frac{\partial H}{\partial r} = -k \cdot C_1 \cdot J_1(kr) + k \cdot C_2 \cdot N_1(kr)$$

$$E = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{k}{\mu} [C_1 \cdot J_1(kr) + C_2 \cdot N_1(kr)]$$

$$(kr) = x \cdot \sqrt{-j} \rightarrow x = \frac{r_1}{a} \sqrt{2} \quad \begin{cases} x_2 = \frac{r_2}{a} \sqrt{2} & \rightarrow \text{pro vařku} \\ x_1 = \frac{r_1}{a} \sqrt{2} & \rightarrow \text{pro induktor} \end{cases}$$

= měří vztahu mezi poloměrem a hmotou  
vniku naindukováných proudů

Konstanty

1) uvnitř válce; pro  $r = 0$  je intenzita  $E = 0$

$$E = C_1 \cdot J_1(0) + C_2 \cdot N_1(0) = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} J_1(0) = 0 \\ N_1(0) \neq 0 \end{array} \right\} \Rightarrow C_2 = 0$$

2) pro  $r_1 = r_2$  ( $H_2$  na  $r_2 = H_1$ )

$$H = H_2 = C_1 \cdot J_0(kr_2)$$

$$\left[ C_1 = \frac{H_2}{J_0(kr_2)} \right]$$

$$H = H_2 \cdot \frac{J_0(kr_2)}{J_0(kr_1)} = H_2 \cdot \frac{J_0(x \cdot \sqrt{-j})}{J_0(x_2 \cdot \sqrt{-j})}$$

$$E = \frac{1}{\mu} \cdot J = \frac{k}{\mu} \cdot H_2 \cdot \frac{J_1(kr_2)}{J_0(kr_1)} =$$

$$E = \sqrt{j} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\mu} \cdot H_2 \cdot \frac{J_1(x \cdot \sqrt{-j})}{J_0(x_2 \cdot \sqrt{-j})}$$

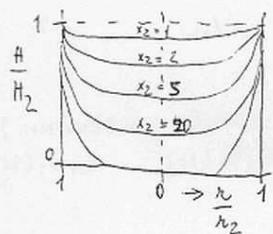
průklohy:

$$\frac{H}{H_2} \cdot \frac{E}{E_2} = \frac{J}{J_2} \quad ; \quad \left| \frac{J}{J_2} \right|^2 = \left( \frac{J}{J_2} \right)^2 \quad T = \frac{1}{2\pi} \cdot J^2$$

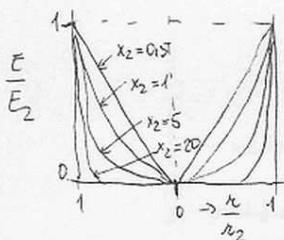
- můžeme vyjádřit  $|H|, |E| \rightarrow$  jejich absolutní hodnoty

$$|H| = H_2 \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^2 + d^2}}$$

$$|E| = \frac{r_2}{ap} \cdot H_2 \cdot \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^{21} + d^{12}}}$$



s rozložením  $x_2$  se vše možnouží  
magnetický povrchový jin  $\Rightarrow$  skin effect (rostek)



$\rightarrow$  s rozložením  $x_2$  se objevuje zvýraznění  
proudový povrchový jin  $\Rightarrow$  skin effect

#### 14) Analogie válcový vodič – válcová vsázka – fyzikálně, aplikace

##### Impedance válcové vsázky

- impedance vsazky převádíme na stranu induktoru

$\Phi_m$  - mag. tok v měřítku mezi cívkou a vsazkou

$\Phi_v$  - mag. tok mezi vsazkou

$$\Phi = \Phi_m + \Phi_v$$

- činná závera ledlo toku  $\frac{d\Phi}{dt}$  nejhledá v měřovací části cívky (o délce  $1m$ )

wrátěná indukované napětí

- impedance: podíl původního napětí na měřenou cívku a proudu v cívce



$$w_1 = \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\text{na } "1": U_{11} = N_{11} \cdot \bar{U}_1$$

$$Z_{21} = \frac{N_{11} \cdot \bar{U}_1}{I_1} \Rightarrow \operatorname{Re}(Z_{21}) + j \cdot \operatorname{Im}(Z_{21})$$

$$\Phi_m = \pi \cdot (\mu_1^2 - \mu_2^2) \mu H = S \cdot B$$

$$d\Phi_v = 2\pi r \cdot dr \cdot \mu H = 2\pi \mu H \frac{\alpha^2}{2} x \, dx$$

$$\Phi_v = 2\pi \mu \frac{\alpha^2}{2} \int_0^{x_2} H x \, dx = \pi \mu \alpha^2 \cdot \frac{H_1}{J_0(x_2 \sqrt{f})} \int_0^{x_2} J_0(x \sqrt{f}) \cdot x \, dx$$

$$x = \frac{r}{\alpha} \sqrt{f} \rightarrow r = x \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{f}}$$

$$dr = dx \cdot \frac{\alpha}{\sqrt{f}}$$

$$r \cdot dr = \frac{\alpha^2}{2} \cdot x \, dx$$

$$N_{11} U_1 = N_{11} \left( \frac{d\Phi_m}{dt} + \frac{d\Phi_v}{dt} \right)$$

$$\frac{d\Phi_m}{dt} = j\omega \pi (\mu_1^2 - \mu_2^2) \mu H_1 = j\omega \pi (\mu_1^2 - \mu_2^2) \cdot \mu \cdot \underbrace{N_{11}^2 I_1}_{H_1 N_{11}^2 I_1}$$

$$\frac{d\Phi_v}{dt} = j\omega \pi \mu \alpha^2 \frac{H_1}{J_0(x_2 \sqrt{f})} \int_0^{x_2} J_0(x \sqrt{f}) \cdot x \, dx = j\omega \pi \mu \alpha^2 \cdot \underbrace{H_1}_{J_0(x_2 \sqrt{f})} \sqrt{f} \cdot x_2 \cdot \frac{J_1(x_2 \sqrt{f})}{J_0(x_2 \sqrt{f})}$$

$$\frac{J_1(x_2 \sqrt{f})}{J_0(x_2 \sqrt{f})} = -T_f \cdot [P(x_2) + jQ(x_2)]$$

$$Z_{21} = \frac{N_{11} U_1}{I_1} = \underbrace{\frac{2\pi X_2}{f} N_{11}^2 P(x_2)}_{\operatorname{Re}(Z_{21})} + j \underbrace{\left[ \omega \mu \pi (\mu_1^2 - \mu_2^2) N_{11}^2 + \frac{2\pi X_2}{f} N_{11}^2 Q(x_2) \right]}_{\operatorname{Im}(Z_{21})}$$

$$P(x_2)$$

$$\operatorname{Re}(Z_{21}) = R_{21} \leftarrow \text{činný odpor vsazky na } \bar{I}_1$$

$$\operatorname{Im}(Z_{21}) = \text{reaktance vsazky } wL_v \text{ a reaktance mezi cívkou a vsazkou } wL_m$$

pro velké  $x_2 \rightarrow$  jednodušší:

$$x_2 > 4 \quad P(x_2) \approx \frac{1}{T^2} - \frac{1}{2x_2} \quad \left| \begin{array}{l} x_2 > 15 \quad P(x_2) \approx \frac{1}{T^2} \approx 0,404 \approx Q(x_2) \\ Q(x_2) \approx \frac{1}{T^2} \approx 0,404 \end{array} \right. \quad \text{druhý člen } P(x_2) \text{ zanedbáme}$$

$$R_{21} = \frac{2\pi x_2}{\gamma} N_u^2 P(x_2)$$

→ pokud dosadíme za  $P(x_2)$  limitu hodnotu

$$R_{21\infty} = \rho \cdot \frac{2\pi x_2 \cdot \Gamma_2}{a} \cdot \frac{1}{\Gamma_2} \cdot N_u^2$$

$$R_{21\infty} = \rho \cdot \frac{2\pi x_2}{a \cdot 1} \cdot N_u^2$$

$$R_{21\text{ekvivalentu}} = \rho \cdot \frac{2\pi x_2}{a} \quad [\Omega/m]$$

## **15) Vliv relativní permeability na ohřevy elektromagnetickou indukcí**

Při návrhu indukční kelímkové pece je nutné se také zabývat problematikou tavení tříděného šrotu. Zde je problém v tom, že vsázka není válcová, ale kusová, kdy mají kusy různý tvar a velikost. Je proto velmi pravděpodobné, že by některé kusy šrotu byly elektromagneticky průzařné, proto je třeba šrot třídit také podle velikosti kusů a pro tavení použít zdroje s vhodnou frekvencí.

V průběhu tavení železných kovů pomocí elektromagnetické indukce mění vsázka svoje parametry. Na začátku tavení až do teploty magnetické přeměny (pro ocel ~ 760 °C) je vsázka magnetická, pevného skupenství. Od teploty magnetické přeměny až do teploty tavící (pro ocel ~ 1500 °C) je vsázka nemagnetická, pevného skupenství. Nad teplotu tavící je vsázka tekutá a nemagnetická. To znamená, že při návrhu indukčního ohřevu magnetických materiálů je nutné se zabývat také problematikou konečné teploty ohřevu, z čehož vyplývá různá magnetická permeabilita.

Volbou frekvence proudu, jenž napájí induktor, se ovlivňuje rozdělení tepla vyvíjeného ve vsázce. Toto je dáno tím, že je hloubka vniku a naindukovaných proudů mimo jiné závislá na frekvenci napájecího napětí a ve vrstvě na povrchu vsázky o tloušťce „**a**“ vzniká přibližně 86 % z celkového množství naindukovaného tepla do vsázky.

Doposud se mlčky předpokládalo, že proud induktoru se během ohřevu nemění. To by však bylo možné jen v případě, že by byl napájen z ideálního proudového zdroje. Pokud tomu tak není, může indukční ohřev feromagnetické vsázky probíhat následujícím způsobem:

- Na počátku, kdy je vsázka studená, je její poměrná permeabilita vysoká (řádově tisíce). Vysoká je proto i indukčnost a celková impedance obvodu a té odpovídá proud protékající cívkou.
- S rostoucí teplotou vsázky její poměrná permeabilita klesá (nejprve pozvolna a po dosažení určité teploty, která se u běžných ocelí pohybuje kolem 500 °C, dosti rychle) až k hodnotě 1 v okolí Curieho bodu (mezi 800–900 °C). S ní odpovídajícím způsobem klesá indukčnost a indukční reaktance obvodu. Přestože činný odpor induktoru naopak s teplotou vzrůstá, celková impedance obvodu klesá, což se může projevit nárůstem amplitudy napájecího proudu a rychlejším ohřevem. Jedná se tedy o kladnou zpětnou vazbu, kterou je třeba při podrobnějších výpočtech rovněž respektovat.

## 16) Zdroje pro napájení indukčních zařízení

### Vliv napájecího obvodu

Doposud se mlčky předpokládalo, že proud induktoru se během ohřevu nemění. To by však bylo možné jen v případě, že by byl napájen z ideálního proudového zdroje. Pokud tomu tak není, může indukční ohřev feromagnetické vsázky probíhat následujícím způsobem:

- Na počátku, kdy je vsázka studená, je její poměrná permeabilita vysoká (řádově tisíce). Vysoká je proto i indukčnost a celková impedance obvodu a té odpovídá proud protékající cívku.

- S rostoucí teplotou vsázky její poměrná permeabilita klesá (nejprve pozvolna a po dosažení určité teploty, která se u běžných ocelí pohybuje kolem  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dosti rychle) až k hodnotě 1 v okolí Curieho bodu (mezi  $800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). S ní odpovídajícím způsobem klesá indukčnost a indukční reaktance obvodu. Přestože činný odpor induktoru naopak s teplotou vzrůstá, celková impedance obvodu klesá, což se může projevit nárůstem amplitudy napájecího proudu a rychlejším ohřevem. Jedná se tedy o kladnou zpětnou vazbu, kterou je třeba při podrobnějších výpočtech rovněž respektovat.

U indukčních kelímkových pecí napájených přímo ze sítě o frekvenci 50 Hz je maximální měrný výkon omezen přibližně na 300 kW na tunu taveniny. Při vyšších hodnotách výkonu by bylo víření materiálu příliš intenzivní a výška kopulovité horní hladiny příliš velká.

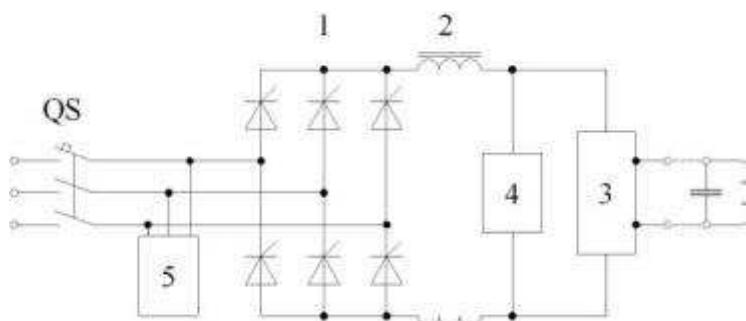
U kelímkových pecí napájených vyšší frekvencí (do 1 000 Hz) je intenzita proudění taveniny a výška kopulovité horní hladiny menší. Měrný výkon se může volit až 1 000 kW na tunu taveniny. Vyšší měrný výkon zkracuje dobu tavby, což může být ekonomicky výhodnější.

Indukční ohřev je progresivní a energeticky úsporná technologie. Při indukčním ohřevu nevznikají kromě tepla žádné ekologicky závadné zplodiny.

Indukční jednoúčelová zařízení lze snadno zapojit do procesu automatické výroby. Kromě toho se vyrábějí i malé víceúčelové přístroje, jež jsou vhodné pro kusovou výrobu.

### Tranzistorové měniče kmitočtu pro indukční ohřev s výstupním kmitočtem 6 - 50 kHz

Měniče kmitočtu typové řady TRMK jsou určeny k napájení indukčních ohřívacích, kalicích, tavicích a dalších technologických zařízení se zátěží tvořenou paralelním obvodem.



#### Princip

Měniče TRMK sestávají ze vstupního silového vypínače (QS), řízeného usměrňovače (1), vyhlazovací tlumivky (2), střídače-invertoru proudu (3) a přepěťových ochran (4), (5). Napájení se uskutečňuje ze sítě nn nebo vn (50 Hz) přes přizpůsobovací transformátor (není součástí měniče).

Rízení chodu měniče a ochranu elektronických dílů při poruchových stavech zajišťuje řídicí systém složený z regulátoru, převodníků a volně programovatelného automatu.

Pro chlazení elektronických a dalších prvků silových obvodů je použit uzavřený vodní chladicí systém.

### **Přednosti TRMK**

- vysoká energetická účinnost v celém rozsahu výkonů – nad 90 %
- rozsah nastavení výkonu od 10 % do 100 % jmenovité hodnoty
- rozsah výstupního kmitočtu ( $f_{\min} - f_{\max}$ ) u jednotlivých typů 40 % - 100 % jmenovité hodnoty
- uzavřený chladicí okruh s vodou o malé elektrické vodivosti omezuje negativní elektrochemické účinky na součásti chladicí soustavy a zajišťuje dobrý izolační stav silových obvodů
- vysoký stupeň krytí umožňuje umístění měniče v prašném prostředí
- spolehlivost startů a chodu měniče v širokém rozsahu zatěžovací impedance
- dokonalé galvanické oddělení řídicích a silových obvodů
- jednoduchý a přehledný řídicí systém s malým počtem výměnných jednotek zvyšuje spolehlivost, usnadňuje lokalizaci poruchy a rychlé obnovení provozu
- vysoká odolnost řídicích obvodů vůči vnějšímu elektromagnetickému rušení

## **17) Omezování vlivu rozptylových elektromagnetických polí na konstrukci indukčních zařízení**

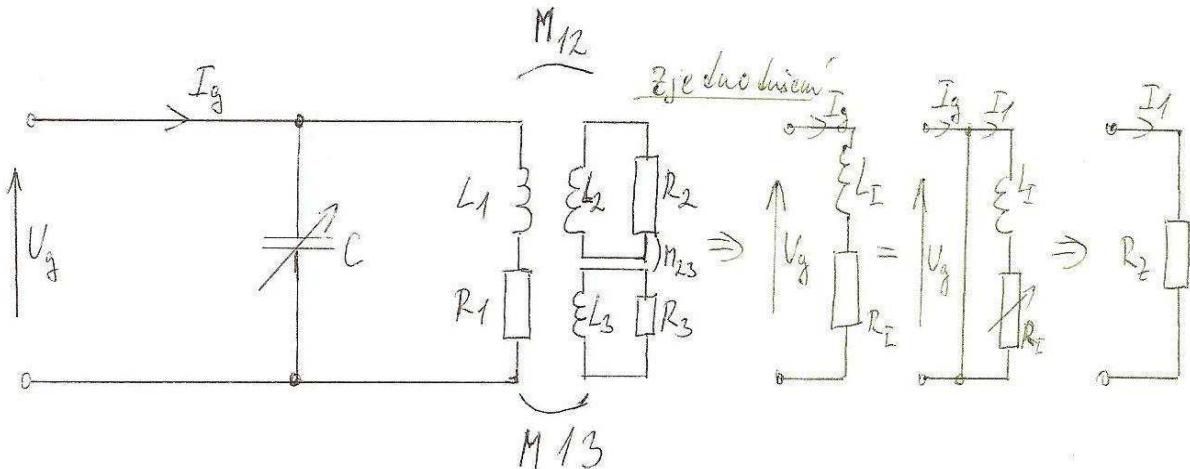
Indukční ohřev je možný jen u elektricky vodivých materiálů. Energie střídavého elektromagnetického pole se vyzařuje z cívky (induktoru) na vodivou vsázku, kde se indukují vřířivé proudy. Tyto proudy vsázku zahřívají. Teplo vzniká přímo ve vsázce, z čehož je zřejmé, že má nejvyšší teplotu v celé soustavě indukčního ohřevu (vše ostatní může být studené). Toto je velká výhoda indukčního ohřevu. Další výhodou je, že vsázka je galvanicky oddělená od všech částí soustavy.

Tavení v indukční kelímkové peci - pec tohoto typu je v principu vzduchový transformátor. Primární vinutí tvoří válcová cívka z měděné trubky obdélníkového průřezu a sekundární vinutí je vsázka, která je spojena nakrátko. Vodič induktoru je trubkového průřezu proto, že jeho dutinou prochází chladící médium (voda). Voda musí odvést elektrické ztráty v cívce (asi 20 až 25 % příkonu) a dále teplo, které projde do cívky ze vsázky stěnou kelímků.

Hlavní výhodou indukčních kelímkových pecí je, že v nich vlivem působení elektrodynamických sil dochází k intenzivnímu vření roztavené vsázky v kelímku, které nastává vždy při průchodu proudu cívkom. Výsledkem je dokonalá homogenita slitiny roztaveného kovu.

Při průchodu střídavého proudu cívkom se vzniklé magnetické pole uzavírá vně cívky (přes ocelové konstrukce pece). Tím by se konstrukce zahřívaly, zvýšily by se ztráty a snížila by se účinnost pece. Proto je cílem snížit magnetický tok vně pece na minimální hodnotu. Tohoto lze dosáhnout stíněním pece a to buď válcovým pláštěm souosým s cívkom z dobře vodivého materiálu, nebo se vně cívky umístí svazky transformátorových plechů.

## 18) Náhradní obvod indukčního zařízení



Obr. č. 1 : Náhradní schéma indukčního zařízení a jeho zjednodušení

1 - vinutí

2 - vsázka

$$R_z = \frac{L_I}{R_I C_I}$$

3 - stínění pod pláštěm

$$I_1 = Q \cdot I_g \quad (Q \text{ je u tavících pecí 12; u ohřívacích pecí 6})$$

$$C_{\text{prázd.}} = \frac{L_1}{R_1^2 + \omega^2 + L_1^2}; \quad C = \frac{L_I}{R_I^2 + \omega^2 + L_I^2}; \quad C \Rightarrow I_m (I_g) = 0$$

$\Delta U_{\min}$  - aby na induktoru bylo napětí stejné jako na zdroji

$R_{\min}, X_{\min} \Rightarrow Z_{\min}$

$$\Delta U = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot I_1$$

$R_{\min}$  - při materiálu s maximální vodivostí  $\gamma_{\max}$

$$\text{tloušťka pásu } d = \frac{\pi}{2} \cdot a, \quad l_{\min} \quad R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$X_{\min} = X_{\min} \text{ vlastního vedení} + X_{\min} \text{ mezery mezi pásy}$

$$\frac{I_1}{J} \Rightarrow [\text{mm}^2] \Rightarrow A = \frac{\pi}{2} a \cdot b \Rightarrow b \Rightarrow b_{\max}$$

b vysoké → na paralelní pásy

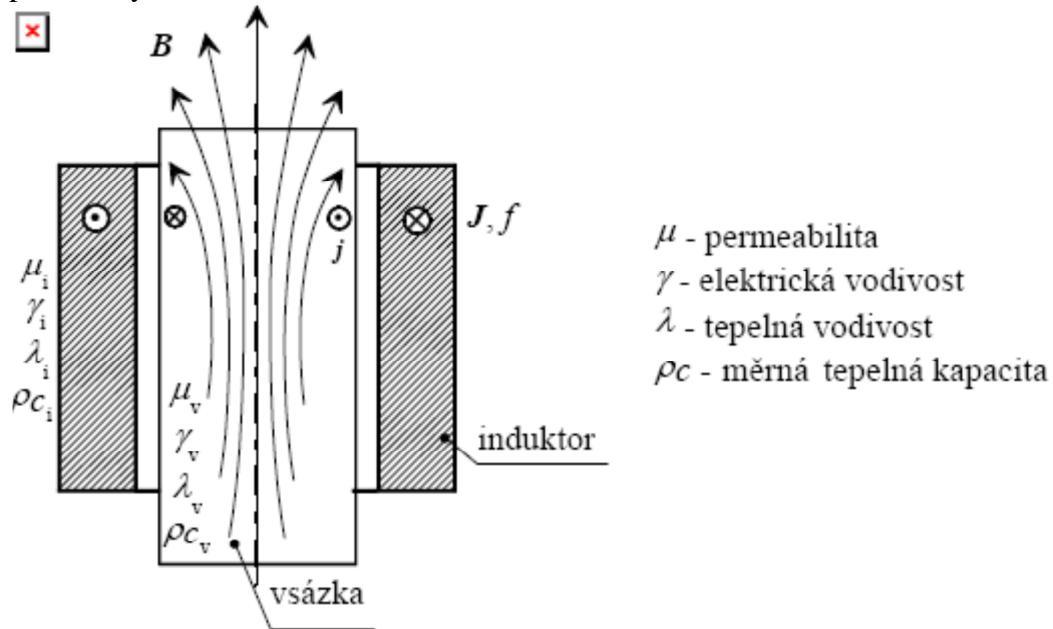
$R_c$  .... minimální na takovou blízkost, aby nedošlo k přeskoku napětí

$R_{c\min} \rightarrow$  dovolené  $E \sim U \quad l_{\min}$

$$X_{\text{mezery}} = 7,5 X_{\text{pás. vedení}}$$

## 19) Účinnost indukčních zařízení

Princip indukčního ohřevu je jednoduchý a je schematicky znázorněn na obr.1. Vsázka, která musí být dostatečně elektricky vodivá, se vloží do induktoru (zpravidla masivnější cívka) protékaného střídavým proudem o hustotě  $J$  a kmitočtu  $f$ . Ten vyvolá magnetické pole  $B$  procházející vsázkou, v níž se následně indukují vřířivé proudy o hustotě  $j$ . Ty se uvnitř vsázky uzavírají a generují zde ztráty, jež se projevují zvýšením její teploty (průchodem budicího proudu se ovšem ohřívá i induktor). Hloubku prohřátí vsázky lze dobře reguloval kmitočtem; s rostoucím kmitočtem budicího proudu se ztráty a tedy teplo generují v tenčích a tenčích povrchových vrstvách.



Vzhledem k tomu, že indukční ohřev je proces zpravidla energeticky velmi náročný, je nezbytné celý systém (induktor, vsázka a další prvky) optimalizovat tak, aby při zadaných požadavcích na průběh procesu byla jeho účinnost co nejvyšší. Navíc je často zapotřebí dodržet určitý časový režim ohřevu, případně jiné parametry (rozložení teplot apod.). V určitých (zejména jednodušších) případech je možno provést korektní návrh systému splňujícího uvedené požadavky na základě předchozích zkušeností. Většinou se však tento návrh neobejde bez vyřešení přiměřeně přesného matematického modelu a provedení optimalizace.

### Induktor

Důležitou součástí zařízení pro indukční ohřev je induktor. Obvykle je zhotoven z dutého měděného vodiče, protékaného chladicí vodou. Geometrické uspořádání induktoru musí zaručovat co nejtěsnější elektromagnetickou indukční vazbu s ohřívaným předmětem. Induktor může být válcový, plochý nebo lineární. Pro vhodné uspořádání elektromagnetického pole může být doplněn nástavci z transformátorových plechů nebo feritu.

## Účinnost indukčního ohřevu

Tato účinnost závisí zejména na vhodném tvaru induktoru. Induktor musí být co nejvíce přizpůsoben tvaru ohřívaného předmětu. Účinnost ohřevu válcových těles lze dosti dobře odhadnou podle přibližného vztahu:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{d^2} \left( 1 + 6,25 \frac{\delta^2}{d^2} \right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}} \quad (1)$$

- kde:
- D průměr induktoru
  - d průměr válcového předmětu
  - $\delta$  hloubka vniku
  - $\rho_1$  měrný odpor materiálu induktoru
  - $\rho_2$  měrný odpor materiálu ohřívaného
  - $\mu$  poměrná permeabilita

je důležité, aby člen  $1 + 6,25 \frac{\delta^2}{d^2}$  byl co nejmenší, v podstatě lze dosáhnout hodnoty 1,1 z toho vyplývá požadavek na velikost poměru  $\delta/d$ :

$$\frac{\delta}{d} \leq \frac{1}{\sqrt{62,5}} \approx \frac{1}{8} \quad (2)$$

Je třeba volit frekvenci tak, aby hloubka vniku  $\delta$  nebyla větší než jedna osmina průměru d. V souladu s rovnicí (1) bude tedy minimální frekvence:

$$f_{min} = 16 * 10^6 \frac{\rho}{\mu d^2} \quad (\text{Hz; } \Omega * \text{mm}^2 * \text{m}^{-1}; \text{mm}) \quad (3)$$

V tab. 3 jsou uvedeny orientační hodnoty účinnosti indukčního ohřevu válcového tělesa v závislosti na hodnotě poměru d/δ.

Tab. 3. Účinnost indukčního ohřevu válcového tělesa v závislosti na hodnotě poměru d/δ

d/δ	8	6	4	2	1	0,6	0,4
účinnost (%)	95	85	65	30	10	4	1

## **20) Hodnocení průmyslových ohřevů kritériem 3E**

Při hodnocení průmyslových ohřevů, projektování otopného systému budov je třeba vytvořit předpoklady pro jejich pozdější žádoucí provoz. A to nejen z hlediska vytvoření tepelné pohody, ale také z pohledu energetického, ekonomického a ekologického.

### **Topení**

Poměrně velká část lidstvem využívané energie se v konečném důsledku mění a využívá jako tepelná energie. Předpokládá se, že tato část činí zhruba osmdesát procent z veškeré energie a zhruba šedesát procent energie elektrické. Z pohledu ekologie, energetiky a ekonomiky není tato statistika ani zdaleka uspokojivá. Bylo by všeobecně výhodnější, kdyby došlo ke snížení spotřeby tepla.

Největším problémem je vytápění velkoplošných objektů s vysoko umístěnými stropy. Této charakteristiky nejvíce odpovídají výrobní haly, velké tělocvičny a sportovní stadiony. Chceme-li snížit náklady na vytápění, můžeme k tomuto úkolu přistupovat ze dvou základních hledisek:

- snížením tepelných ztrát objektu
- využitím finančně nenákladného zdroje energie.

Nejvhodnější se jeví skloubení obou těchto přístupů, to jest vytvoření komplexního otopného systému, který bude pracovat s co možná nejlevnější energií a bude ji co nejlépe využívat. Takový systém bude přijatelný podle všech hlavních kritérií (3E).

V našich současných poměrech, kdy pouze ve vzácných případech máme dostatek potřebných zdrojů, musíme uvedeným kritériím přidělovat preference. Ve většině případů je pak rozhodujícím faktorem hospodárnost projektu, a to zejména jeho finanční návratnost.

Tepelné ztráty jsou způsobeny dvěma zásadními příčinami. Vlivem vytápění dochází uvnitř objektu ke zvyšování teploty, a tím i k nárůstu teplotního rozdílu mezi teplotami uvnitř a vně objektu. Vlivem nenulové tepelné vodivosti pláště přechází energie z teplejšího prostředí do chladnějšího.

Máme-li snížit tepelnou ztrátu objektu, můžeme toho docílit aplikováním dvojího přístupu:

- zmenšením rozdílu mezi teplotami uvnitř a vně objektu
- nebo zlepšením tepelně izolačních vlastností pláště budovy.

### **Ohřev**

Abychom splnili kritéria 3E musíme navrhovat takové pece, které tyto kritéria nijak nezhoršují, spíše zlepšují.

- Odporové pece – 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, max. teplota
  - rovnomořnost a přesnost dodržení teploty
  - přirozená či řízená atmosféra v peci
  - přetržitý a nepřetržitý provoz
  - prostor, který je k dispozici
  - cena pece

- Indukční pece – Při ohřevu pro tvářecí účely, kdy je požadován rovnoměrný ohřev výchozího polotovaru, je třeba si uvědomit tyto skutečnosti:
  - použijeme-li frekvenci příliš nízkou, nastane průzařnost materiálu a tím špatný ohřev s malou energetickou účinností
  - použijeme-li frekvenci vysokou, nastane vývin tepla jen na povrchu, vnitřní částí polotovaru se budou ohřívat jen vedením tepla, ohřev se prodlouží a vzrostou tepelné ztráty
  - ohřev má dobrou účinnost při ploché vsázce
  - příkon pece se volí dle požadovaného množství vytaveného kovu za jednu hodinu (tabulky)
  - musí se brát zřetel na zrnitost vsázky (čím menší zrno, tím větší frekvence – ohled na průzařnost)

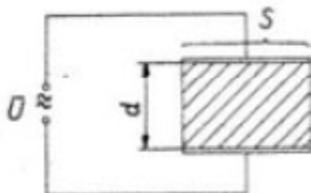
## 21) Princip dielektrického a mikrovlnného ohřevu

### 6. Vznik tepla v elektrickém poli (Dielektrické teplo)

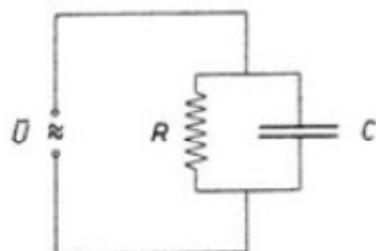
K prohřívání elektricky nevodivých materiálů používáme ohřevu v elektrickém poli (dielektrický ohřev), jak je schematicky znázorněno na obr. 60,1.

Nevodivý materiál se vloží do elektrického pole kondenzátoru, napájeného proudy o vysokém kmitočtu. Používají se kmitočty přibližně v rozsahu  $10^6$  až  $10^9$  Hz.

Vznik tepla při dielektrickém ohřevu je obdobný jako vznik tepla vlivem



Obr. 60,1. Schematické uspořádání kondenzátoru pro dielektrické prohřívání. Válcová nevodivá vsázka je mezi deskami kondenzátoru.



Obr. 60,2. Elektrické schéma kondenzátoru se ztrátami v dielektriku.

hysterezních ztrát v železe při magnetování střídavým proudem. Molekuly materiálu vloženého do elektrického pole kondenzátoru se chovají jako elektrické dipoly. Snaží se sledovat změny elektrické polarity, snaží se natáčet, při čemž musí překonávat vzájemné tření. To je přičinou vzniku tepla v materiálu.

Kapacita  $C$  deskového kondenzátoru s dielektrikem beze ztrát je dána výrazem

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d} [\text{cm}, \text{cm}^2, \text{cm}^{-1}] = \frac{10}{9} \cdot 10^{-12} \frac{1}{4\pi} \frac{\varepsilon S}{d} [\text{F}, \text{cm}^2, \text{cm}^{-1}] = \\ = 8,85 \cdot 10^{-14} \frac{\varepsilon S}{d} [\text{F}, \text{cm}^2, \text{cm}^{-1}]. \quad (60,1)$$

Označili jsme:

$S$ . . . plochu desky [ $\text{cm}^2$ ],

$d$ . . . vzdálenost desek [cm],

$\varepsilon$ . . . poměrnou dielektrickou konstantu materiálu.

## Mikrovlnný ohřev

Při ohřevu dochází k přeměně energie střídavého elektrického pole o velmi vysoké frekvenci na tepelnou energii. Děje se tak působením pole na polární molekuly materiálu. Dipóly molekul se nepřetržitě natáčejí dle okamžitého směru elektromagnetického pole a takto mění svoji orientaci. Přitom se využívá dvou procesů: mezimolekulárního tření, k němuž dochází při překonávání mezimolekulárních přitažlivých sil, a hystereze, která vzniká mezi působícím polem a indukovanou elektrickou odevzou vlivem setrvačnosti, jež závisí na elektrickém náboji, hmotě a tvaru molekul. Díky těmto jevům je ohřev produktu velmi rychlý a probíhá v celém objemu, ve kterém působí elektromagnetické pole na polární materiál.

Princip dielektrického ohřevu byl objeven v souvislosti s vývojem radiolokátorů již těsně po druhé světové válce, ale komerční uplatnění našel až po více než dvaceti letech.

Mikrovlnami nelze běžně ohřívat plyny, ale velmi rozšířené je mikrovlnné sušení – tedy využití mikrovlnné energie k odpařování, které má své specifické výhody. Mikrovlnnou energii lze využít také pro generování ionizované látky - plazmatu a méně často i k tavení.

Mikrovlny spadají do frekvenčního pásmo asi 300 MHz – 300 GHz, které odpovídá vlnovým délkám v rozmezí 1 m–1 mm. Zařízení pro průmyslové aplikace se konstruují podobně jako komerční mikrovlnné trouby pro domácnosti, většinou na celosvětově nejvíce využívané frekvenci okolo 2450 MHz (vlnová délka  $\lambda=12,24$  cm). Často používané je taktéž pásmo kolem 915 MHz ( $\lambda =32,75$  cm), jehož výhodou je přibližně dvaapůlkrát větší hloubka vniku do ohřívaného materiálu, než jaké se dosahuje u frekvence 2450 MHz. Pro aplikace vyžadující přesné zacílení vyzařované energie a pouze povrchové působení se využívá pásem 5,8 GHz ( $\lambda =5,17$  cm) a 24,125 GHz ( $\lambda =1,36$  cm). Mikrovlnná energie zpravidla vniká do hloubky v řádu jednotek až desítek centimetrů. Nejvhodnější je jí používat k ohřevu materiálů, jejichž ztrátový činitel je menší než 0,05, a k procesům, při nichž se požaduje vysoká hustota výkonu. Je to dáno tím, že při jejich použití nedochází ke vzniku elektrického oblouku a spálení materiálu.

## **22) Princip a výhody elektrického sálavého vytápění**

### **Teplotní pole elektrických sálavých panelů**

**Zdeněk Chudáček - EE 5**

lektor: prof. Ing. Jiří Kožený, CSc. - KEE

Vytápění elektrickými sálavými panely je progresivní a stále více oblíbený způsob, jak vytápět bytové i nebytové prostory. Tento způsob vytápění neohřívá vzduch, nýbrž podlahu, stěny a ostatní předměty, na něž tepelné záření dopadá. Vzduch se ohřívá sekundárně od sáláním zahřátých povrchů. Vzduch díky tomu neproudí, a proto nevíví prach ani mikroorganismy. Největší výhodou tohoto způsobu vytápění je jeho vysoká úspornost a přizpůsobivost. Velikosti panelů lze přizpůsobit přesně na míru, která je zapotřebí. Provoz panelů je zcela tichý a bezodpadový. Má dlouhou životnost a vyžaduje pouze minimální údržbu. V mé práci se zabývám teplotním polem elektrických sálavých panelů. Jedná se o prostorové rozložení teplot v okolí sálavého panelu v závislosti na výkonu a vzdálenosti od sálavého panelu. Velikost a rozložení teplot jsou rovněž závislé na vzdálenosti od otopných ploch, tj. poloze místa ve sledovaném objektu a na rozměrech objektu. Teplota vzduchu ohřátého od podlahy, předmětů a okolních stěn roste v závislosti na výšce od podlahy podstatně pomaleji, než je tomu u klasických otopných systémů. K největším rozdílům dochází v oblasti pohybu člověka, tzn. do 2 metrů nad podlahou. Velké rozdíly teplot v této oblasti působí velice nepříznivě na dosažení tepelné pohody. Nohy a hlava člověka jsou pak v rozdílných mikroklimatických podmínkách. Tento nepříznivě působící jev je u sálavého vytápění zavřenými sálavými panely výrazně potlačen. Změnami parametrů jako je výkon sálavého panelu, výška instalace a účinnost panelu lze docílit optimální rozložení teplot v pracovní oblasti a tím dosažení tepelné pohody člověka v daném prostoru.

Doporučené použití těchto panelů je u vytápění průmyslových hal, tělocvičen, sálů, dílen a podobných prostor.

## **23) Efektivní způsoby ohřevů a vaření potravin**

**Probrané v otázce 25/8**

## 24) Principy elektrického odporového ohřevu

V elektrotepelných zařízeních odporových se mění energie elektrická v tepelnou podle Joulova zákona: prochází-li elektrický proud vodičem, vzniká ve vodiči teplo. Teplo se předává do okolí za současného růstu teploty samotného vodiče. Množství tepla je úměrné druhé mocnině proudu a elektrickému odporu vodiče. Podle vzniku a působení tepla se odporová zařízení rozdělují do dvou základních skupin, a to na zařízení s přímým a nepřímým odporovým ohřevem.

### C.1. PŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV

V zařízeních pro přímý odporový ohřev vzniká teplo přímým průchodem proudu buď elektricky vodivou pevnou vsázkou nebo elektricky vodivou kapalinou – elektrolvtem obklopujícím vsázkou.

$$Q = Q_u + Q_z \quad (61)$$

kde  $Q$  je teplo vzniklé průchodem proudu,

$Q_u$  užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky,

$Q_z$  tepelné ztráty.

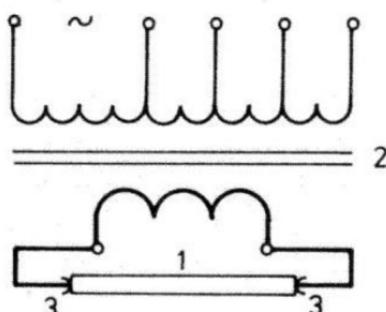
Podle vzniku tepla lze zařízení pro přímý odporový ohřev rozdělit na dva základní typy:

Prvním typem jsou *zařízení pro ohřev pevné vsázky* kovové, uhlikové nebo grafitové. Kovová vsázka je ve tvaru tyčí, drátů, pásů apod.

Druhým typem jsou *zařízení pro ohřev tekuté vsázky*. Tekutou vsázkou může být voda (ohřev vody v elektrodotových kotlích) nebo roztavené sklo (elektrický přihřev a tavení skla) nebo v tekuté vsázce může současně probíhat elektrolýza (výroba hliníku termickou elektrolýzou). Dále se v tekuté vsázce může ohřívat pevná kovová vsázka (solné lázně pro tepelné zpracování drobné vsázky nebo tzv. katodový ohřev kovové vsázky ve vodním roztoku soli). V praxi mají význam zejména tyto aplikace.

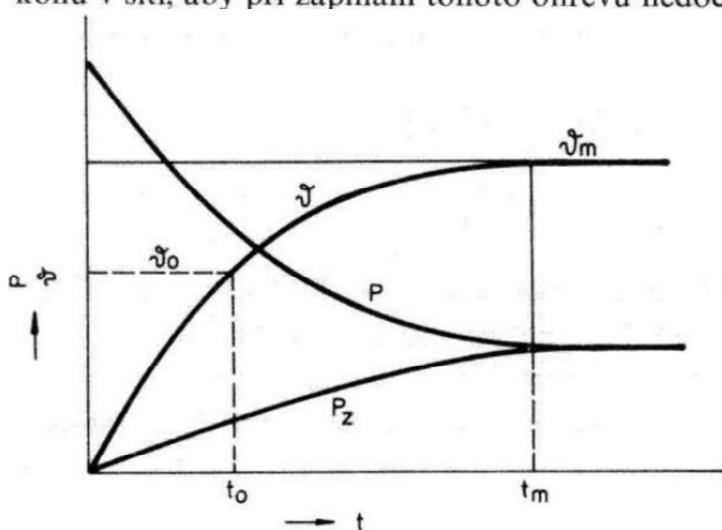
### C.1.1. Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů pásů apod.

Princip ohřevu je schematicky znázorněn na obr. 30. Délka ohřívané tyče má být mnohonásobně větší (minimálně 10krát) než její průměr, aby byl ohřev dostačně 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. 30. Přímý odporový ohřev tyčí

Lze odvodit, že optimální poměry pro ohřev jsou tehdy, jestliže se činný odpor tyče rovná impedanci celého přívodního vedení, tj. impedanci, která odpovídá spojení kontaktů 3 dokrátko fiktivní náhradní tyče se stejnými rozměry, jako má tyč ohřívaná bez činného odporu. Blížila by se jí studená měděná tyč. Tuto podmíinku lze v praxi dodržet jen přibližně, neboť odpor např. oceli při ohřevu ze 20 °C na 1 200 °C stoupne asi sedmkrát. Aby impedanční přizpůsobení bylo přijatelné, zvyšuje se během ohřevu, zejména u velkých výkonů, napětí na tyči souhlasně s růstem jejího odporu přepínáním odboček na vstupním vinutí transformátoru 2. Účiník při tomto přímém odporovém ohřevu je překvapivě malý, neboť při velkých proudech se značně uplatňuje reaktance vedení ke kontaktům 3. Určité potíže vznikají s přivedením proudu do tyče kontakty 3. Konec tyče musí být pokud možno čisté, kontakty bývají měděné, chlazené vodou a jsou k ohřívané tyče přitlačovány pneumaticky nebo hydraulicky. Nevýhodou je, že ohřívaný materiál je po dobu ohřevu vázán na kontakty, což ztěžuje mechanizaci. Další nevýhoda je v tom, že se při každé ohřívané tyče musí ohřev zapínat a vypínat, což u velkých výkonů není bez problémů. Tím rostou nároky na spínací zařízení i na velikost zkratového výkonu v síti, aby při zapínání tohoto ohřevu nedocházelo ke kolísání napětí v síti.



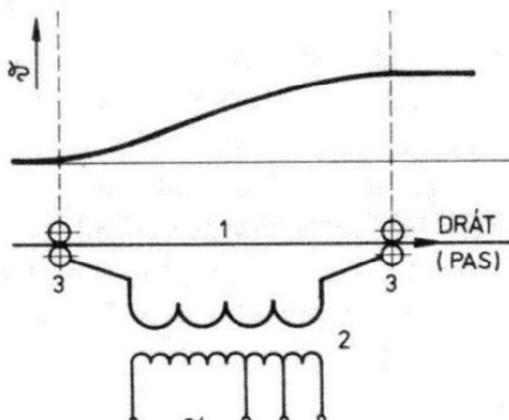
Obr. 31. Průběhy příkonu, ztrát a teploty při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče

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

$$a = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu_r}} \quad (62)$$

Zařízení pro průběžný ohřev drátu nebo pásu je znázorněno schematicky na obr. 34. Drát nebo pás 1 je do proudového obvodu výstupní strany transformátoru 2 připojen kladkami 3 (nebo grafitovými bloky).

Konečné teploty ohřevu lze docílit změnou napětí mezi kladkami, změnou jejich vzájemné vzdálenosti, změnou protahovací rychlosti drátu. K výhodám přímého ohřevu patří nízká spotřeba elektrické energie, ohřev je velmi rychlý, a proto je malá oxidace i odlehčení. Popsaný ohřev se používá např. pro měkké žíhání měděných drátů a pásů před izolací pláštěm (protahovací rychlosť je asi  $1\ 000\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ); pro ohřev ocelových tyčí pro kování, pro ohýbání, kalení drátů do předpjatého betonu apod.



Obr. 34. Schéma zařízení pro průběžný ohřev drátu (pásu)  
1 ohřívaný drát, pás, 2 regulační transformátor, 3 kladky a přívody

## C.2. NEPŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV

V zařízeních s nepřímým odporovým ohřevem vzniká teplo v topných článcích umístěných přímo v pecním prostoru. Do vsázky se pak teplo přenáší převážně sáláním topných článků a vyzdívek, prouděním atmosféry v pecním prostoru, popř. i vedením. Elektrická odporová zařízení s nepřímým ohřevem, tzv. *odporové pece*, je možné dělit podle několika hledisek (např. podle ČSN 34 5191):

## C.6. MATERIÁLY PRO TOPNÉ ČLÁNKY ODPOROVÝCH PECÍ A ZAŘÍZENÍ

Topné články jsou v odporových pecích zdrojem tepla. Ohřívají se přímým průchodem proudu a teplo se z jejich povrchu přenáší do prostoru pece při nízkých teplotách převážně prouděním, při vysokých teplotách pak sáláním. Konstruují se a umisťují v pecích tak, aby splňovaly podmínky pro co nejlepší přenos tepla do pracovního prostoru pece (neměly by být cloněny a jednotlivé články by neměly sálat na sebe). Na materiály pro topné články jsou kladený vysoké nároky, měly by mít tyto vlastnosti:

- odolnost proti žáru při pracovní teplotě článku,
- velkou mechanickou pevnost zatepla,

- odolnost proti chemickým vlivům atmosféry v pecích a keramiky, s níž se v peci 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:

- a) materiály kovové,
- b) materiály nekovové.

Mezi kovové materiály patří slitiny Ni, Cr, Fe, Al nemagnetické a magnetické, čisté kovy, ocel a speciální slitiny [1], [2], [3], [5], [6], [10], [11], [12].

Pracovní teploty kovových topných článků dosahují nejvýše  $1375^{\circ}\text{C}$ , proto se hledaly materiály, které při stejných základních vlastnostech jako u kovových mohou pracovat v normální atmosféře při teplotách vyšších. Těmto požadavkům vyhovuje několik materiálů nekovových [2], [3], [10], [11].

## 25) Úlohy z laboratorních cvičení

### 1) Měření teplotního pole infrazářičů

#### **Úkoly měření:**

Naměřte oteplovací křivku plošného termočlánku při jeho ozařování různým typem infrazářiče a různé vzdálenosti.

Naměřte zářivá pole pro různé typy a různé vzdálenosti od měřící roviny.

Naměřené hodnoty uveďte do grafů.

#### **Teoretický úvod:**

Infračervené záření je neviditelné elektromagnetické vlnění o vlnové délce od 760 nm do 10000 nm. Zdrojem je každé těleso v průzračném prostředí s teplotou vyšší než 0 K. Povrchem energii vyzařuje a zároveň přijímá, v závislosti na podmínkách se ochlazuje při převažujícím vyzařování, nebo zahřívá při přijímání energie. Využívá se hlavně při ohřevu látek, při dopadu záření se látka zahřívá a zároveň vyzařuje energii do okolí. Po ustálení bude energie přijatá zářením rovna teplu uvolněného z tělesa do okolí.

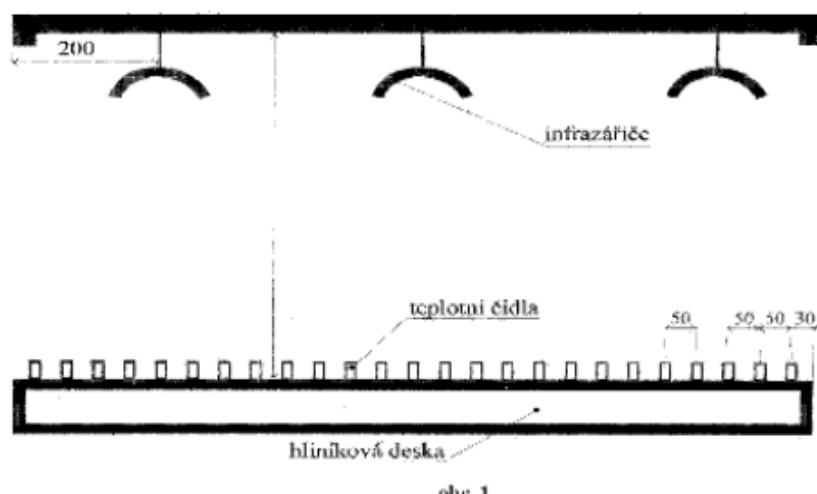
#### **Postup měření:**

##### **1. měření (obr. 1)**

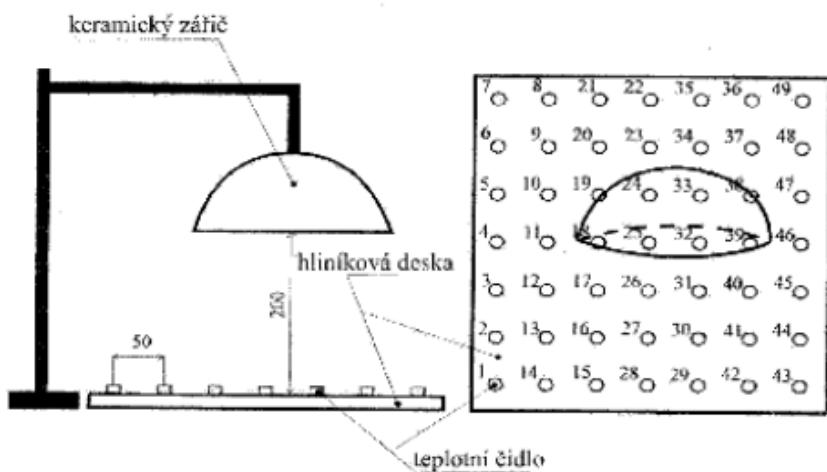
Použili jsme infrazářiče zavěšené nad 25 termočlánky Fe-Ko umístěných na hliníkové desce. Po zapojení infrazářiče jsme po minutových intervalech měřili IR-Thermometrem teplotu infrazářičů až do jejich ustálení. Poté jsme za pomocí měřicího přístroje z vyvedených svorek odečetli hodnoty teplot jednotlivých termočlánků. Měření jsme provedli pro dvě vzdálenosti za ustálené teploty.

##### **2. měření (obr. 2)**

Použili jsme hříbkový infrazářič zavěšený nad 49 termočlánky Fe-Ko na hliníkové desce. Po ustálení teploty infrazářiče jsme měřícím přístrojem odečetli hodnoty teplot na jednotlivých termočláncích za pomocí vyvedených svorek.



obr. 1



nahr. 2

### Naměřené a vypočtené hodnoty:

Měření náběhové charakteristiky

čas t [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	13	17
Teplota Infrazářiče 1 [°C]	24	158	264	343	405	448	470	497	511	523	527	529	531
Teplota Infrazářiče 2 [°C]	24	60	160	260	340	375	400	415	425	430	438	450	460

Naměřené teploty – 1. Infrazářič

Vzdálenost 15

cm

Termočlánek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Teplota [°C]	35	37	46	50	62	60	25	50	52	51	48	60	61	60	62	53	55	47	50	55	53	56	52	47	40

Vzdálenost 25

cm

Termočlánek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Teplota [°C]	30	30	34	35	40	37	27	40	40	45	42	40	39	43	40	43	39	38	38	35	36	35	35	33	

Naměřené teploty – 2. Infrazářič

Vzdálenost 15 cm

Pozice termočlánků								Teplota [°C]							
7	8	21	22	35	36	49		24	24	30	26	30	24	25	
6	9	20	23	34	37	48		28	22	40	26	33	24	26	
5	10	19	24	33	38	47		33	28	39	29	37	25	28	
4	11	18	25	32	39	46		35	20	50	37	41	20	29	
3	12	17	26	31	40	45		35	35	40	42	40	30	28	
2	13	16	27	30	41	44		35	30	36	45	37	35	29	
1	14	15	28	29	42	43		30	33	35	46	29	34	31	

Vzdálenost 25 cm

Pozice termočlánků								Teplota [°C]							
7	8	21	22	35	36	49		27	25	30	26	24	25	20	
6	9	20	23	34	37	48		29	23	32	25	25	23	24	
5	10	19	24	33	38	47		30	27	32	27	28	26	25	
4	11	18	25	32	39	46		32	20	33	30	30	29	26	
3	12	17	26	31	40	45		32	30	28	31	30	28	27	
2	13	16	27	30	41	44		32	28	28	25	30	28	26	
1	14	15	28	29	42	43		30	28	30	30	31	25	26	

Vypočtené hodnoty – vlnové délky

Infrazáříč 1

Teplota [°C]	24	158	264	343	405	448	470	497	511	523	527	529	531
Vlnové délka	975	672	539	470	427	401	389	376	369	363	362	361	360
λ [nm]	1,0	0,8	4,6	3,0	3,1	8,3	9,4	2,7	5,5	9,8	1,6	2,6	3,6

Infrazáříč 2

Teplota [°C]	24	60	160	260	340	375	400	415	425	430	438	450	460
Vlnové délka	975	869	668	543	472	447	430	421	415	412	407	400	395
λ [nm]	1,0	7,5	9,8	5,1	6,0	0,8	4,8	1,0	0,7	1,2	4,8	7,2	2,5

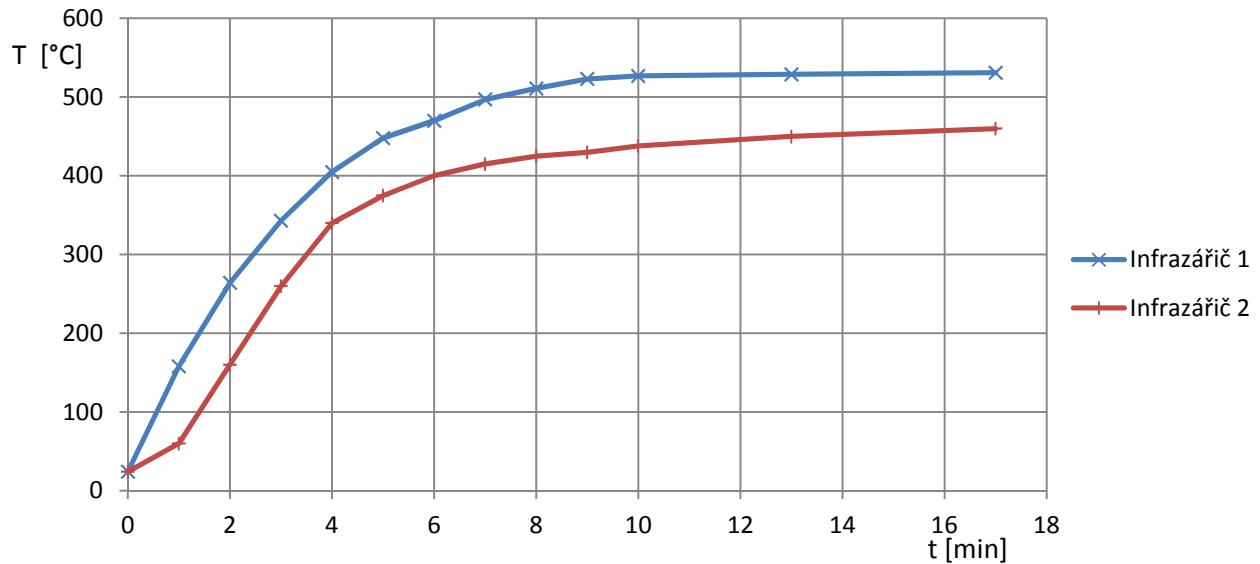
### Příklad výpočtu:

Wienův zákon:  $\lambda * \Theta = 2,898 * 10^{-3} [m * K]$

$$\lambda = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{\Theta} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{158 + 273,15} = 6720,8 [nm]$$

### Grafy:

Náběhová charakteristika infrazářičů



Graf č.1

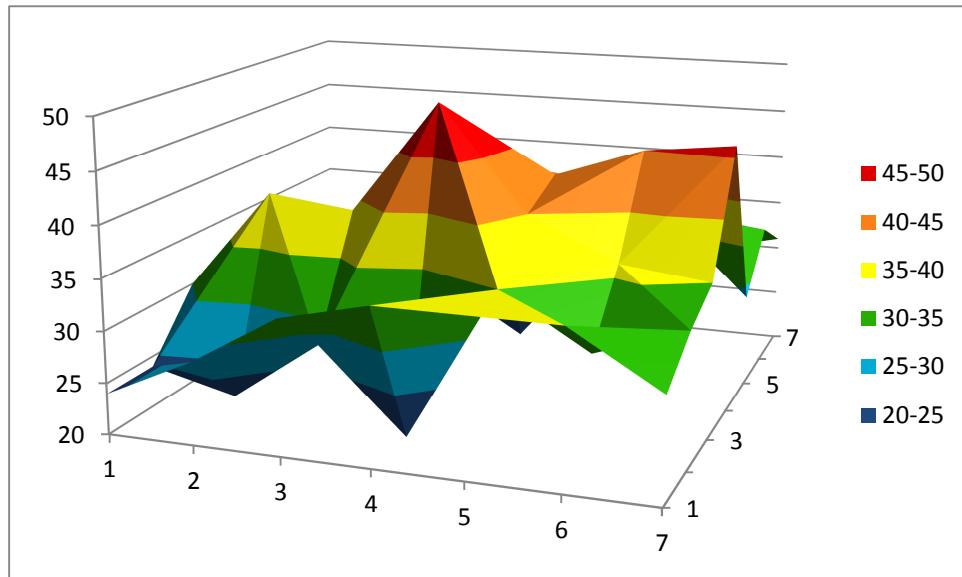
Rozložení teplot 1. infrazářiče



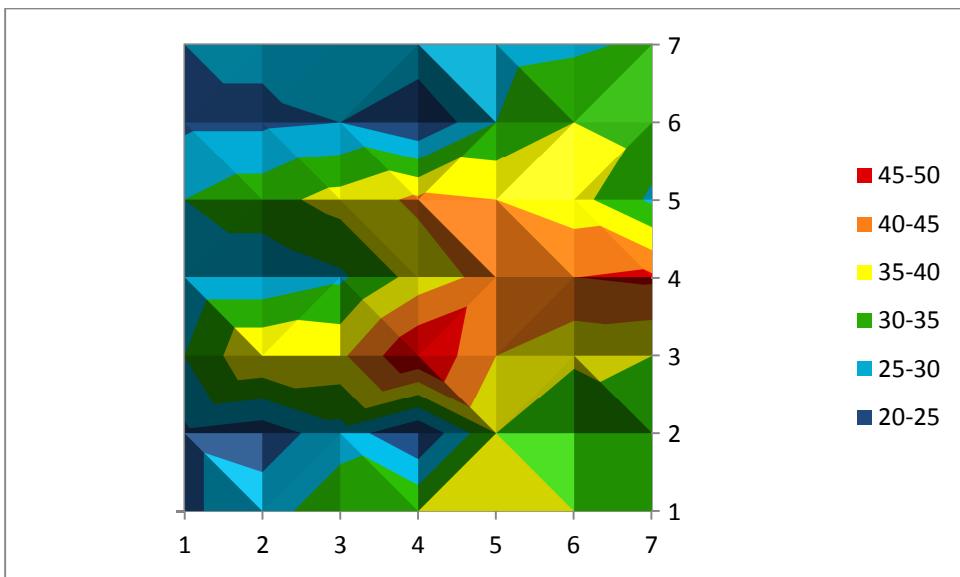
Graf č.2

Rozložení teplot 2. infrazářiče

Vzdálenost 15 cm

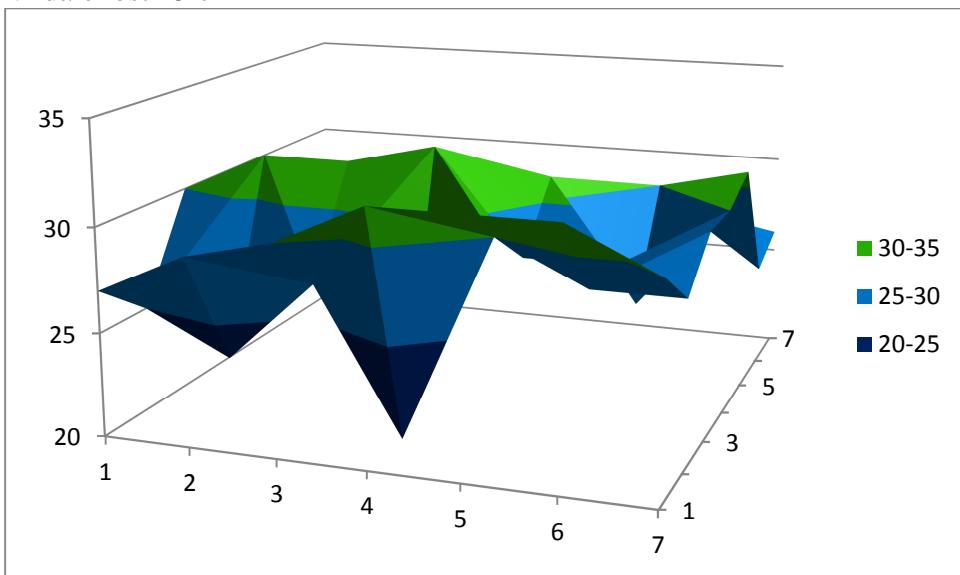


Graf č.3

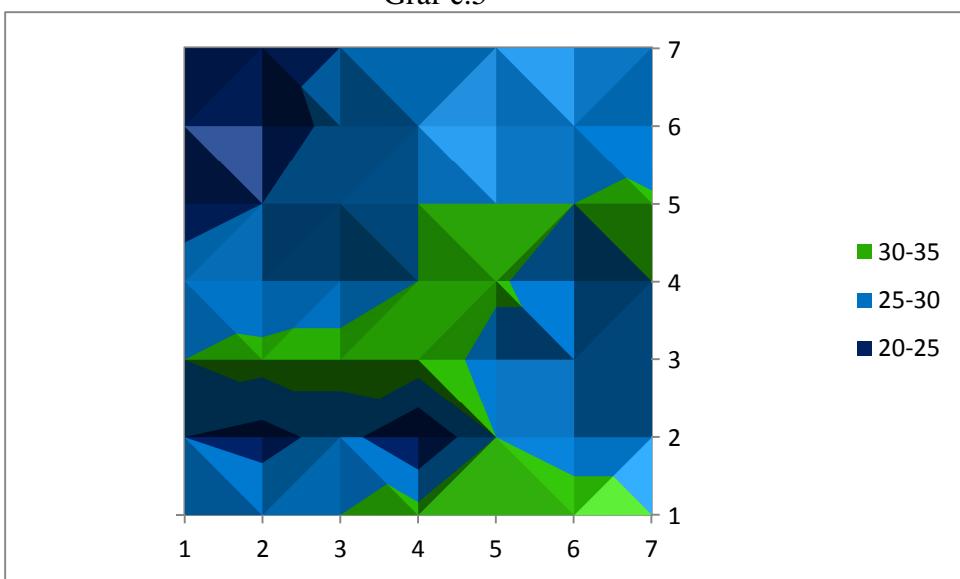


Graf č.4

Vzdálenost 25 cm



Graf č.5



Graf č.6

## Závěr:

Podle teorie by měla být vlnová délka infračerveného záření v rozsahu 760nm až 10000nm. Z námi naměřených a vypočtených hodnot se pohybuje v rozmezí 3600nm až 9800nm. Teoretické předpoklady jsou tedy splněny. Nejvyšší vlnová délka byla spočtena při nejnižší teplotě, při nejvyšší teplotě byla vlnová délka nejmenší.

V grafu č. 1 je vyobrazena narůstající teplota obou infrazářičů v závislosti na čase. První infrazářič měl logaritmický nárůst teploty. K ustálení teploty došlo po deseti minutách. Druhý infrazářič měl nejdříve pomalejší nárůst teploty, ale dále by se dalo říct, že byl také logaritmický. Ustálení teploty nastalo až po sedmnácti minutách.

V grafu č. 2 jsou znázorněny teploty jednotlivých termočlánků z měření 1. infrazářiče pro výšky 15 a 25 cm. Z grafu je vidět, že při vzdálenosti 15 cm infrazářičů od termočlánků, je více znát umístění infrazářičů, zatímco při vzdálenosti 25cm teplota méně kolísá. Při vzdálenosti 15 cm dosahovala teplota nejvyšší hodnoty 62°C, při vzdálenosti 25 cm dosahovala teplota hodnoty 45°C. Teploty naměřené na termočláncích pod krajními infrazářiči se odlišují, pravděpodobně byly ovlivněny okolní teplotou. Dále je vidět, že termočlánek č. 7 je nejspíše poškozený, protože teplota, kterou nám Celsiusmetr při obou měřeních ukázal, byla naprosto odlišná od teplot v jeho okolí.

Grafy č. 3 a č. 4 vyobrazují rozložení teploty na termočláncích při měření 2. infrazářiče ve výšce 15 cm. Nejvyšší teploty byly naměřeny pod infrazářičem, rozdíly teplot mezi kraji a středem jsou velmi znatelné.

Při porovnání s grafy č. 5 a č. 6, kde jsou rozdíly mezi teplotami termočlánků na středu a na krajích méně výrazné, se opět potvrzuje to, že se teplota s větší vzdáleností více rozptylí.

Zároveň se ukazuje, že některé termočlánky jsou s největší pravděpodobností vadné, jelikož i přes nárůst teploty v okolí, na těchto termočláncích došlo k minimálnímu nárůstu anebo k žádnému.

## 2) Termočlánky

### Termočlánky

#### Úkol měření :

Proveďte cejchování dvou druhů termočlánků (Ch-A, Fe-Ko) podle normálu (normálem je termočlánek NiCr-Ni). Cejchování proveďte alespoň pro čtyři teploty.

#### Teoretický úvod :

##### I. Termoelektrický jev :

Podstata termoelektrického jevu je přímá přeměna tepelné energie v elektrickou a naopak. Vysvětlení vzniku termoelektrického napětí můžeme provést na základě teorie o rozdělení vodičů na monopolární typu n a p a na vodiče ambipolární. Monopolární vodič typu n obsahuje většinou nosiče záporných elektrických nábojů (elektrony), zatímco vodič typu p nosíce zdánlivě kladných nábojů (díry). Oba typy vodičů se navzájem liší způsobem přemisťování elektrických nábojů ve vodiči, je-li na něm teplotní rozdíl. Monopolární vodič typu n (měď) se chová tak, že při jeho zahřátí se volné elektrony přemisťují k chladnějšímu konci vodiče. Tím vzniká na chladnějším konci přebytek záporných nábojů (záporná polarita) a na teplejším konci kladná polarita. Vodič typu p (konstantan) se při stejném smyslu teplotního spádu, jako u typu n, chová opačně (chladnější konec má kladnou polaritu).

Tento pohyb častic ve vodičích se děje jen uvnitř vodiče samotného, protože potenciální hráz, vytvořená ionty krystalické mřížky, zabránuje vystoupení elektronů z vodiče. Spojí-li se však dokonale vodivě dva různé kovy, mohou elektrony z kovu s nižší potenciální hrází přestupovat do kovu s vyšší potenciální hrází a vytvářet tak elektrický proud spojenými vodiči. Tímto způsobem se vysvětluje vznik termo-elektrického článku.

Velikost termoelektrického napětí je závislá na druhu použitých kovů a rozdílu teplot spojů. Tuto závislost lze vyjádřit vztahem:

$$U = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot (\vartheta_T - \vartheta_S) \quad [\text{mV}]$$

kde

$\alpha_A, \alpha_B$  součinitelé určující velikost termoelektrického napětí příslušné použitým materiálům [ $\text{mV}/^\circ\text{C}$ ]

$\vartheta_S$  ..... teplota studeného spoje [ $^\circ\text{C}$ ]

$\vartheta_T$  ..... teplota teplého spoje [ $^\circ\text{C}$ ]

Vytvoří-li se termoelektrický článek z vodičů stejného typu, součinitelé  $\alpha$  se odečítají, použije-li se vodič typu n a p, pak se součinitelé  $\alpha$  sčítají a termoelektrické napětí dosáhne maximální velikosti.

Úměrnosti termoelektrického napětí k rozdílu teplot obou spojů termoelektrického článku se využívá nejčastěji k měření teplot. Zpravidla je známá teplota studeného (srovnávacího) spoje a pomocí napětí a cejchovní křivky pro použití materiály lze určit teplotu teplého (měrného) spoje.

##### II. Cejchování termočlánků :

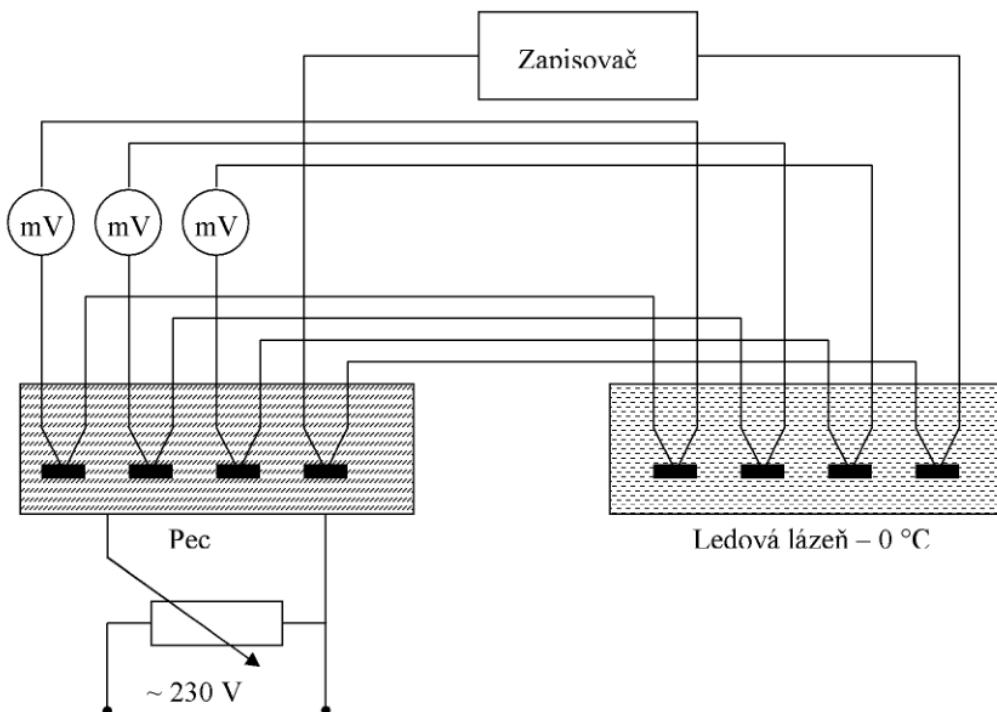
Účelem cejchování termočlánků je stanovit závislost jejich termoelektrického napětí na příslušném rozdílu teplot mezi srovnávacím a měrným koncem. Tato závislost se pak vyjadřuje tabulkou nebo cejchovní křivkou.

Porovnáváním s normálem se termočlánky obvykle cejchují v elektrické peci. Při tom je nutné sledovat, aby hloubka ponoření normálu a cejchovního článku v peci byla stejná a tím bylo zaručeno jejich umístění v místě stejné teploty. Teplota v místě peci musí být zvyšována pomalu, protože mnohdy by se při rychlém růstu teploty nemohla vyrovnat časová zpoždění při měření teploty ověřovaného termočlánku a normálu.

Teplota srovnávacího konce bývá  $0^\circ\text{C}$ . Tuto metodu lze použít asi do teploty  $1200^\circ\text{C}$ . Při porovnávání naměřených hodnot termoelektrického napětí ověřovaného článku s hodnotami uvedenými v normě se zjistí vždy určité odchyly.

Výsledkem cejchování termočlánků je korekční křivka.

*Schéma zapojení :*



*Postup měření :*

Tři druhy termočlánků (Fe-Ko, Ch-A, normál NiCr-Ni) jsou ponořeny jedním koncem v lázni vody s ledem o teplotě 0°C a druhým koncem v pícce, která se vytápí.

Pro docílení pomalého růstu teploty, je pec napájena z regulačního transformátoru sníženým napětím. Zvyšování teploty sledujte na záznamovém zapisovači.

V okamžiku, kdy se začne teplota zvyšovat, napájení vypněte. Jelikož má systém teplotní setrvačnost, bude se nějakou chvíli ještě teplota zvyšovat. V okamžiku, kdy se ustálí teplota (sledujte zapisovač), odečtěte hodnoty napětí na měřených termočláncích.

Poté opět zapněte vytápění pícky a pokračujeme stejným postupem, dokud nenaměříte alespoň čtyři sady hodnot.

Sestrojte naměřené charakteristiky a porovnejte je s dovolenou odchylkou závislosti (stanovenou výrobcem).

*Naměřené a převedené hodnoty:*

T	E	J	K
U[mV]	U[mV]	U[mV]	U[mV]
<b>0,8</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0,6</b>
<b>1,8</b>	<b>2,8</b>	<b>2,2</b>	<b>1,8</b>
<b>2,6</b>	<b>4,3</b>	<b>3,5</b>	<b>2,8</b>
<b>3,4</b>	<b>5,6</b>	<b>4,4</b>	<b>3,6</b>
<b>4,2</b>	<b>6,8</b>	<b>5,4</b>	<b>4,3</b>

T	E	J	K
T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
<b>20</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	<b>15</b>
<b>44</b>	<b>46</b>	<b>43</b>	<b>45</b>
<b>63</b>	<b>70</b>	<b>67</b>	<b>69</b>
<b>81</b>	<b>89</b>	<b>84</b>	<b>88</b>
<b>98</b>	<b>107</b>	<b>102</b>	<b>105</b>

**Závěr:**

Termočlánek typu T je normálový termočlánek. V grafu je vynesen modrou barvou, světle modrou jsou pak vyneseny meze  $\pm 2\%$  od normálu. Do těchto mezí se ostatní měřené termočlánky dostali jen na začátku měření. Nejlepší výsledky má termočlánek typu J, je jen mírně nad mezí  $\pm 2\%$ . Ostatní 2 termočlánky už jsou dál, ale žádný z nich se nevychýlil nijak hodně. Takže jsme ověřili, že jsou termočlánky funkční, a daly by se podle grafu ocejchovat.

### **3) Měření průběhů vypařování vody z tkaniny pomocí mikrovlnné trouby**

#### **Úkol měření:**

Cílem měření je zaznamenat vypařování vody z různých druhů tkanin.

#### **Teoretický úvod:**

Tepelná úprava pokrmu je v mikrovlnné troubě prováděna za pomoci elektromagnetického záření obvykle s frekvencí 2,45 GHz tj. vlnovou délku 12,24 centimetrů. Toto mikrovlnné záření je v pokrmu schopno rozkmitat částice, zejména molekuly vody, stejně jako při „klasických“ způsobech šíření tepla. Přitom mikrovlny pronikají dovnitř pokrmu, a tím dochází k relativně velmi rychlému zahřátí celku.

Mikrovlnné záření je generováno pomocí magnetronu a vyzařováno do ohřívacího prostoru. Ten má kovový povrch, kterým záření nemůže proniknout. Dvířka jsou pokryta kovovou mřížkou, jejíž otvory jsou mnohem menší než vlnová délka mikrovlnného záření, představuje proto skoro stejnou překážku pro vlny jako plný kov. Ohřívací prostor mívá rozdíly odpovídající celým násobkům poloviny vlnové délky použitého záření, takže dochází ke vzniku stojatého vlnění. K nejúčinnějšímu ohřevu proto dochází v kmitnách vlnění. Aby byl ohřev pokrmů rovnoměrnější, umísťují se zpravidla na otočný podnos; otáčení zajišťuje, že kmity postupně procházejí různými místy pokrmu.

Vypařování je skupenská přeměna, při které se kapalina mění na plyn pouze z povrchu (ne z celého objemu jako při varu). Kapalina při vypařování odebírá teplo z okolí. Podle kinetické teorie se z kapaliny vypařují ty molekuly, jejichž energie je dostatečná k překonání kohezních sil, a jejichž pohyb směruje k volnému povrchu kapaliny, takže projdou povrchovou vrstvou a opustí kapalinu. Kapalinu tedy opouštějí molekuly s největší energií. Pokud je těchto molekul větší množství, vede to ke snížení střední energie zbývajících molekul kapaliny. To se při adiabatickém vypařování projeví snížením teploty kapaliny. Při rovnováze mezi párou a kapalinou se pára nazývá nasycená.

Množství tepla, které je při dané teplotě potřebné k přeměně jednoho kilogramu kapalné látky v plynnou fázi, se nazývá skupenské teplo výparné (vypařovací).

#### **Postup měření:**

Nejdříve si vyberte 5 různých druhů tkanin namočených do vody.

Poté postupně jednu po druhé zvažte a vložte na minutu do mikrovlnné trouby a znova zvažte.

Toto opakujte alespoň 4x pro každou tkaninu.

**Naměřené hodnoty:**

KG 317 Červená

t [min]	0	1	2	3
váha [g]	3,107	2,651	2,24	1,97

BD 148 Bílá

t [min]	0	1	2	3
váha [g]	6,15	5,101	3,787	2,805

KG 317 Modrá

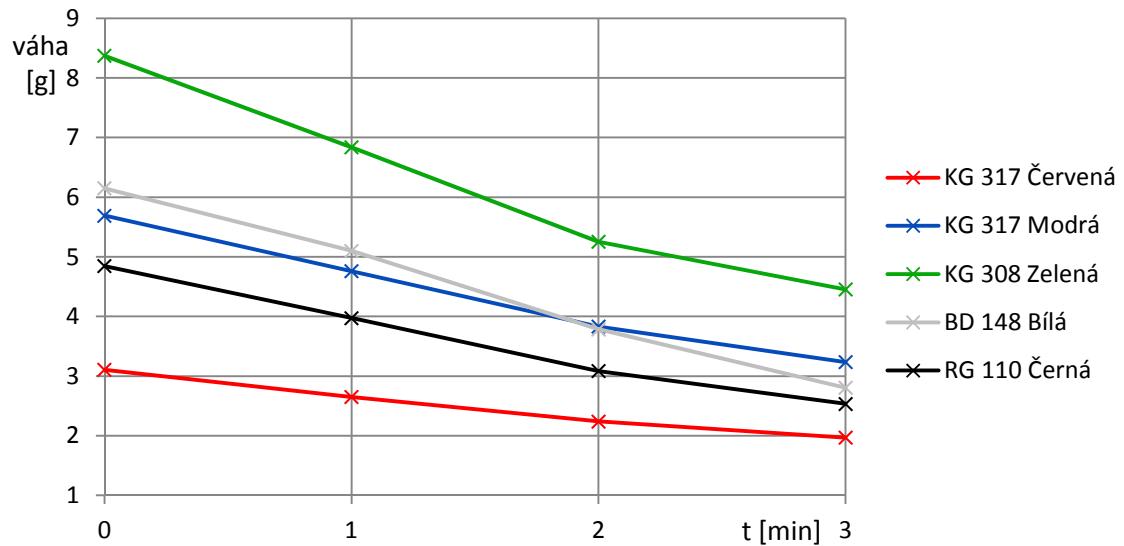
t [min]	0	1	2	3
váha [g]	5,691	4,761	3,831	3,235

KG 308 Zelená

t [min]	0	1	2	3
váha [g]	8,373	6,838	5,255	4,455

RG 110 Černá

t [min]	0	1	2	3
váha [g]	4,846	3,973	3,085	2,536

**Graf:**

Obr. 1 Graf znázorňující pokles váhy během vysoušení

**Závěr:**

Zjistili jsme, že každý druh tkaniny se vysouší s jinou účinností. Z grafu je vidět, že nejrychleji klesá váha u KG 308 Zelená, takže můžeme říct, že zde mělo vysoušení nejvyšší účinnost. Druhá nejlépe vysoušející se tkanina byla BD 148 Bílá. Na dalším místě jsou společně KG 317 Modrá a RG 110 černá. Nejhůře se vysoušela tkanina KG 317 červená.

## 4) Symetrikační zařízení

### Zadání

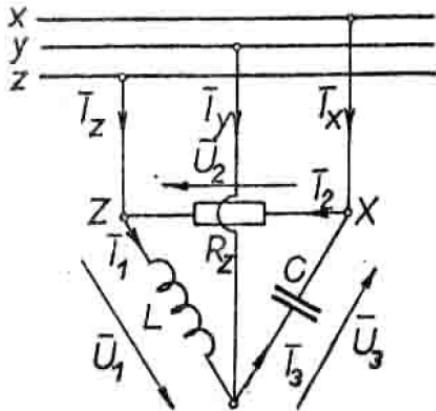
Navrhněte symetrikační zařízení pro připojení jednofázové odporové zátěže k trojfázové symetrické síti pro zadanou hodnotu odporu. Návrh proveděte pro zapojení do hvězdy a trojúhelníka

### Teoretický rozbor

V praxi se na síť připojují zátěže různých typů. Jedním spotřebičem, připojujícím na síť, je indukční pec. Předpokládáme, že pec je vyladěna a zatěžuje síť jako ohmický odpor. Jelikož se jedná o jednofázovou zátěž se značným příkonem, je nutno připojit k peci další zařízení, které zajistí symetrické zatížení trojfázové sítě. Jedná se o symetrikační indukčnost a kapacitu, které se spolu s pecí zapojuje. Při rovnoměrném zatížení sítě se požaduje, aby proudy v jednotlivých fázích byly stejné a současně souběžné s příslušným fázovými napětími. Při obou zapojení je třeba použít správný sled fází, protože velikost proudů, případně napětí, je závislé na zapojení

### Schéma zapojení

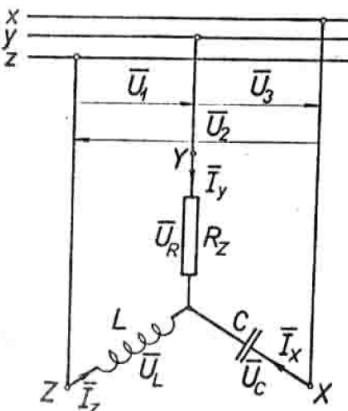
#### Trojúhelník



$$L_s = \frac{\sqrt{3} * R_z}{2 * \pi * f}$$

$$C_s = \frac{1}{2 * \pi * f * \sqrt{3} * R_z}$$

#### Hvězda



$$L_s' = \frac{R_z}{\sqrt{3} * 2 * \pi * f}$$

$$C_s' = \frac{\sqrt{3}}{2 * \pi * f * R_z}$$

### Naměřené a vypočtené hodnoty

$$R_z = 300 \Omega$$

$$L_s = \frac{R_z \sqrt{3}}{2\pi f} = \frac{300 \sqrt{3}}{2\pi 50} = 1,654 H$$

$$0,551 H$$

$$C_s = \frac{1}{2\pi f \sqrt{3} * R_z} = \frac{1}{2\pi 50 \sqrt{3} * 300} = 6,126 \mu F$$

$$18,378 \mu F$$

$$L_s = \frac{R_z}{2\pi f \sqrt{3}} = \frac{300}{2\pi 50 \sqrt{3}} =$$

$$C_s = \frac{\sqrt{3}}{2\pi f * R_z} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi 50 * 300} =$$

Symetrický stav		
I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
0,08	0,09	0,07
U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]
46,3	46,3	46,4

Symetrický stav		
I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
0,2	0,245	0,227
U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]
46,3	46,2	46,3

Nesymetrický stav		
I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
0,224	0,057	0,224
U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]
46,4	46,2	46,3

Nesymetrický stav		
I1 [A]	I2 [A]	I3 [A]
0,558	0,182	0,569
U1 [V]	U2 [V]	U3 [V]
46,3	46,2	46,2

## Závěr

Odlišnosti proudů v symetrickém stavu jsou dány nepřesně nastavenými parametry L a C, protože přesné hodnoty nebyly k dispozici. V jednotlivých zapojení je vidět výrazný rozdíl mezi symetrií a nesymetrií

## **5) Určování radiační účinnosti sálavých panelů**

### **Úvod**

Elektrické sálavé panely, zavěšené pod stropem či na stěnách vytápěného prostoru, jsou zdrojem tepelného záření. Záření se šíří prostorem aniž by docházelo k ohřevu vzduchu. Po jeho dopadu na povrch pevných těles (podlaha, stěna, nábytek nebo další vnitřní zařízení), podle míry pohltivosti, odrazivosti a prostupnosti povrchu se mění v teplo. Vzduch je pro toto záření „průzařný“, ohřívá se pouze sekundárně od povrchů ohřátých těles.

### **Theoretický rozbor**

Infračervené záření je elektromagnetické vlnění, které je neviditelné a přenáší tepelnou energii. Rozsah vlnových délek je přibližně od = 780 - 14 000 nm. V průzračném prostředí se toto záření šíří přímočaře vsemi směry a na rozhraní dvou prostředí s různou hustotou dochází k jeho lomu. Mezi další vlastnosti elektromagnetického vlnění z této oblasti patří odraz od lesklých ploch a možnost jeho koncentrace. Zdrojem infrazáření se stává každé teplejší těleso než 0 K. Svým povrchem vyzařuje energii do okolí, ale současně přijímá energii vyzařovanou jinými tělesy. Zářivá energie, pohlcena neprůzračným tělesem se přemění v energii tepelnou. Toho se využívá především při ohřevu látek. Při dopadu na povrch určitého tělesa, jeho teplota bude poměrně rychle stoupat a s ní současně i vlastní vyzařování tělesa do chladnějšího okolí. Po určitém čase se ustálí stav, kdy teplota ozařovaného tělesa bude konstantní a nezávislá na čase.

Pro využití infrazáření bylo zkonstruováno několik typů infrazářičů, které lze rozdělit do skupin:

**a)** Svítivé zářiče vyzařují energii v oblasti vlnových délek od 700 - 2000 nm, to znamená, že část vyzařované energie spadá do oblasti viditelného záření. Zdrojem záření je wolframové vlákno s pracovní teplotou 2100 - 2400 K. Skleněná baňka tohoto zářiče má tvar parabolického reflektoru, který je na vnitřní straně opatřen odraznou kovovou vrstvou (hliník, stříbro). Účinnost je 65 %. Do skupiny svítivých zářičů patří také infrazářiče křemenné. V křemenné trubce je osově umístěna topná spirála z odporového materiálu, která má pracovní teplotu až 1500 K. Zdrojem infrazáření je jednak vlastní spirála, ale i ohřátá trubka z křemenného skla.

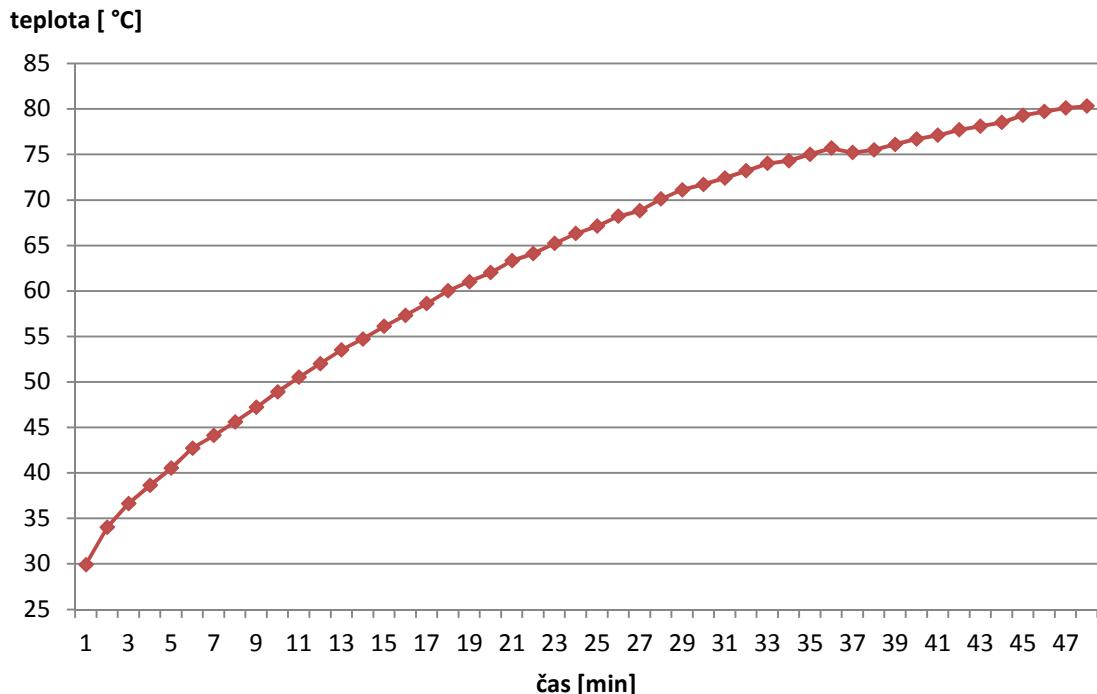
**b)** Temné infrazářiče vyzařují energii převážně v rozsahu vlnových délek 1600 - 4000 nm. To znamená, že v porovnání se zářiči svítivými budou nižší i jejich pracovní teploty, které jsou v rozmezí 450 – 1000 K. Zdrojem zářivé energie bývá nejčastěji keramická hmota, ohřívána topnou spirálou zalisované uvnitř. Tyto typy keramických zářičů se používají s různým tvarem (korýtkové, hříbkové). Tyto zdroje podstatně odolnější proti mechanickému poškození.

**c)** Sálavé panely - odporový topný prvek v topidle se vlivem průchodu (odporem)

elektrického proudu zahřívá a zároveň nahřívá i přední plochu. Velikost tepelného toku přenosu tepla sáláním je dána materiálovými vlastnostmi topného povrchu, vzájemnou vazbou mezi spektrem přenášeného radiačního toku a spektrální pohltivostí absorbujícího povrchu. Přes tento povrch se tvoří vlnová délka infračervené energie tzv. Infračervené záření. Tato energie se po dopadu na pevná tělesa mění v teplo – ohřívá všechny předměty vystavené této energii. V případě vytápění jsou rozhodující materiály ve vytápěném prostoru, které mají schopnost akumulovat teplo(stěny, podlahy, stropy apod.). Například stavební konstrukce si dokáže teplo nahromadit a sekundárně jej vracet do vytápěného prostoru a určovat svou teplotou tepelnou pohodu ve vytápěném prostoru. Právě ve schopnosti stavebních materiálů akumulovat „infrateplo“, spočívá princip nízkoteplotního infračerveného vytápění sálavými panely. Pokud mají navrhovaná tělesa sloužit pro zahřívání a sušení materiálů, vyznačujícími se výraznými selektivními vlastnostmi, je možné podstatně zlepšit radiační vlastnosti topných těles výběrem optimálního povrchu a tím zefektivnit přenos tepla zářením mezi topným tělesem a daným materiélem. Optimální projekční

uspořádání a vhodná konstrukce topných ploch zvyšující sálavou složku tepla, má při vytápění největší vliv na úsporu energie. Infračervené záření se využívá pro nejrůznější účely. Pro malou pronikavost se při průmyslovém využití používá především k sušení laku, papíru, tkanin, smaltu a keramiky - materiálů s malou tloušťkou. Sálavé panely pak k vytápění místností, hal.

Teplota panelu v závislosti na čase



## Závěr

300W sálavý panel se ohříval pomalu (z měření: 48 minut), měřit panel s větším příkonem doba do ustáleného stavu by byla menší. Z grafu je vidět pěkný náběh na provozní teplotu, pokles od hladké křivky je dán nestálostí prostředí - otevření dveří, průchod lidí

## 6) Určování rozložení teplotního pole v elektricky vodivé desce při jejím indukčním ohřevu

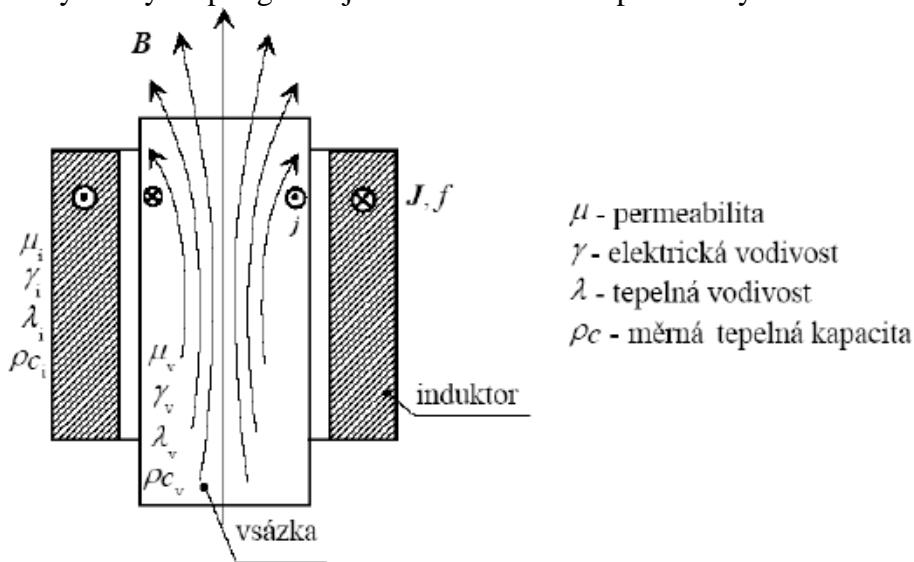
### Úvod

Používání indukčního ohřevu umožňuje velice precizní a k ohřívané vsázce velice šetrný způsob jejího ohřevu ve srovnání s přímým i nepřímým odporovým ohřevem, či ohřevem plamenem. Za největší výhodu indukčního ohřevu lze označit vznikající teplo přímo ve vsázce v důsledku působení Jouleových ztrát, které vyvolaly naindukované výřivé proudy, vyvolané proměnným elektromagnetickým polem cívky. Známe-li rozložení naindukovaných proudů, lze určit rozložení ztrát úměrné vzniklému teplu. Teplo vyvolané ztrátami bude úměrné jejich velikosti a času, po který budou ve vsázce působit. Největší vývin tepla bude v místech s největšími ztrátami, z nichž se bude tepelným vedením šířit do celé vsázky.

### Teorie

Indukční ohřev je možné použít jen u materiálů elektricky vodivých. V předmětu z vodivého materiálu vloženém do střídavého elektromagnetického pole, se indukují výřivé proudy zahřívající předmět. Zjednodušeně to lze přirovnat k transformátoru, kde výstupní vinutí představuje vsázku (spojení nakrátko). Energie se přenáší elektromagnetickým polem a následně vzniká teplo přímo ve vsázce. Ta je nejteplejším objektem celé soustavy – vše ostatní může být studené. Vznik tepla přímo ve vsázce, ta není mechanicky vázaná, patří k největším výhodám tohoto ohřevu.

Princip indukčního ohřevu je schematicky znázorněn na obrázku níže. Vsázka, která musí být dostatečně elektricky vodivá, se vloží do induktoru protékaného střídavým elektrickým proudem o hustotě  $J$  a kmitočtu  $f$ . Ten vyvolá magnetické pole  $B$  procházející vsázkou, v níž se následně indukují výřivé proudy o hustotě  $j$ . Ty se na povrchu uzavírají a generují ztráty projevující se zvýšením teploty a následně budícím proudem vsázky se ohřívá i induktor. Hloubku prohřátí lze dobře regulovat kmitočtem: S rostoucím kmitočtem budícího proudu se ztráty a tedy i teplo generují v tenčích a tenčích povrchových vrstvách.



Schematické znázornění indukčního ohřevu

Indukční ohřev je proces energeticky velmi náročný a je nezbytné celý proces optimalizovat tak, aby byla jeho účinnost při zadaných požadavcích na průběh procesu nejvyšší. Při indukčním ohřevu je ohřívaný předmět v pozici zkratované cívky a tok v ní vede k zahřátí materiálu. Teoreticky se dají zahřát střídavým elektromagnetickým polem všechny elektricky vodivé látky, v praxi se indukčně ohřívají kovy

## Princip indukčního vařiče

Plotýnka (varná deska) vařiče obsahuje cívku napájenou velkým střídavým elektrickým proudem. Cívka je navinuta z vysokofrekvenčního lana a je velmi dobrý elektrický vodič a zároveň je tím omezen povrchový jev celého lana. V cívce vzniká magnetické pole vytvářející teplo dvěma způsoby: Působením magnetického pole na elektricky vodivé dno nádoby se v nádobě indukují vřívivé proudy, které se díky elektrickému odporu nádoby mění na teplo. Malá část tepla vzniká také působení hysterezních ztrát ve feromagnetickém materiálu nádoby při jeho magnetizaci. Od ohřáté vrstvy na spodní straně nádoby se postupně ohřeje celé dno i celá varná nádoba a následně i ohřívaný obsah nádoby.

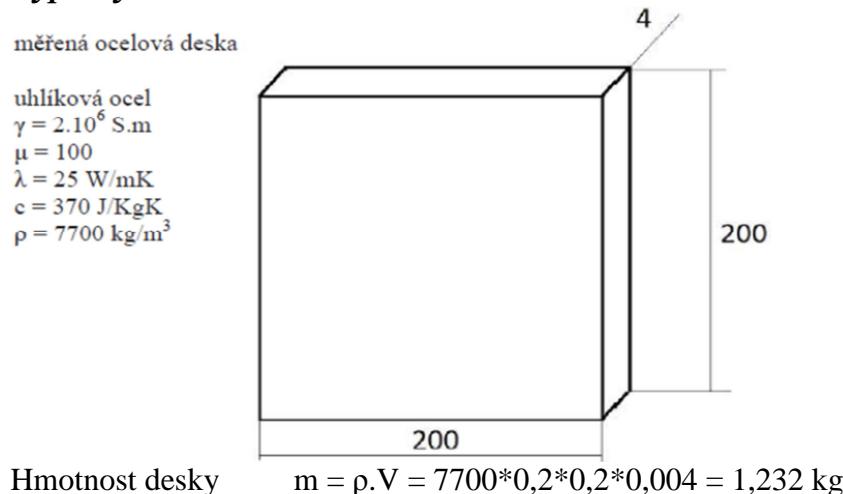
## **Cíl měření**

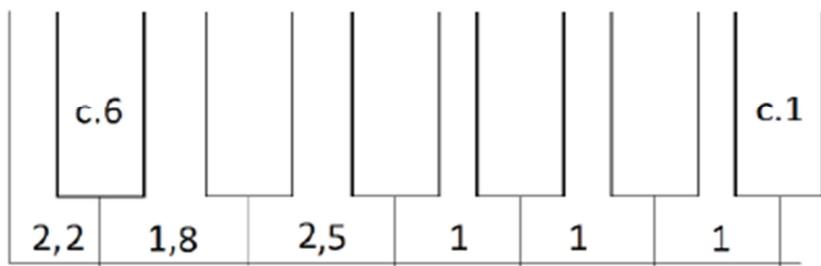
- Stanovit příkon vařiče při zadaných vstupních výkonech
- Přibližně určit energii potřebnou na ohřev desky z počáteční na požadovanou teplotu
- Zaznamenat teplotu v bodech pomocí souřadnicového zapisovače Omega RD8800
- V zadané vzdálenosti od vařiče změřit velikost indukce rozptylového elektromagnetického pole pomocí sondy ELT 400
- Pomocí osciloskopu stanovit frekvenci proudu

## **Postup měření**

Pomocí indukčního vařiče připojeného přes elektroměr ohřát ocelovou desku dle tří zvolených stupňů ohřevu. Na desku je připevněno šest termočlánků připojených k zapisovači. Po celou dobu ohřevu se bude monitorovat průběh ohřevu ocelové desky do teploty 150°C. Indukční vařič se bude postupně spínat dle stupňů výkonů. Dobu každé sekvence ohřevu bude stopována a následně využita pro stanovení příkonu, se kterým indukční vařič pracoval. V zadané vzdálenosti od vařiče změřit velikost indukce rozptylového elektromagnetického pole sondou ELT 400. Při měření přiložit sondu od osciloskopu k induktoru vařiče a z osciloskopu odečíst frekvenci proudu přes induktor.

## **Výpočty**





**Obr. 1 Umístění termočlánků na ocelové desce v [cm]**

Potřebné teplo pro ohřátí desky: z 22°C na 150°C

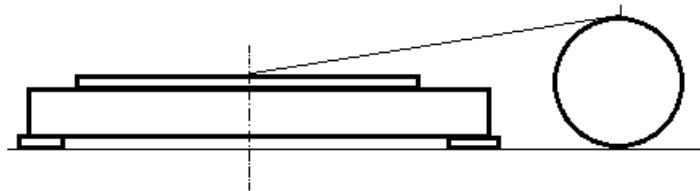
$$Q_1 = m \cdot c(\Delta\theta) = 1,232 \cdot 370 \cdot [275,15 + (150-22)] = 183,772 \text{ kJ}$$

z 50°C na 150°C

$$Q_2 = 1,232 \cdot 370 \cdot [275,15 + (150-50)] = 125,524 \text{ kJ}$$

Naměřené hodnoty při daném výkonu indukčního vařiče

příkon (W)	1200	1400	1800
frekvence (kHz)	29,5	26	25
magnetická indukce ( $\mu\text{T}$ )	4,7	5,5	6,3



Obr 2 Umístění ELT400 při měření rozptylového magnetického pole

### ***Určení příkonu spotřebiče***

výkon 1200W

stav elektroměru počátek: 216,795 kWh  
konec: 216,815 kWh

spotřebovaná elektrická energie  $216,815 - 216,795 = 0,02 \text{ kWh}$

příkon vařiče  $P_P = \text{údaj elektroměru} \div \text{čas ohřevu} = 0,02 / 0,025 = 0,8 \text{ kW}$

výkon 1400W

stav elektroměru počátek: 216,825 kWh  
konec: 216,846 kWh

spotřebovaná elektrická energie  $216,846 - 216,825 = 0,021 \text{ kWh}$

příkon vařiče  $P_P = 0,021 / 0,017 = 1,23 \text{ kW}$

výkon 1800W

stav elektroměru počátek: 216,855 kWh  
konec: 216,877 kWh

spotřebovaná elektrická energie  $216,877 - 216,855 = 0,022 \text{ kWh}$

příkon vařiče  $P_P = 0,022 / 0,021 = 1,32 \text{ kW}$

## **Použité přístroje**

22647 – ELT 400

22898 – souřadnicový zapisovač

osciloskop, elektroměr Křížík, indukční vařič

## **Závěr**

Z grafu rozložení teploty je vidět průběh ohřívání ocelové desky a následné chlazení na zhruba  $50^{\circ}\text{C}$ . Vrcholová teplota byla stanovena na  $150^{\circ}\text{C}$ , abychom nezapálili dřeva, co držela teplotní čidla na desce. První ohřev byl nastaven výkonem 1200W na vařiči, druhý 1400W a třetí 1800W. Z grafu jsou vidět jednotlivé strmosti ohřevu desky, přičemž nejstrmější je ta na největší zvolený výkon.

## 7) Měření vlivu indukčnosti

1) Vybrali jsme 2 cívky ( $dc > dv$ ) a určili jsme  $N, l, \varphi$

L1 cívka (induktor)

L2 cívka (vsázka)

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$$

pro dutinu cívky  $\mu_r = 1$

$dc$  náhradní průměr cívky C1

$l_1$  délka cívky C1

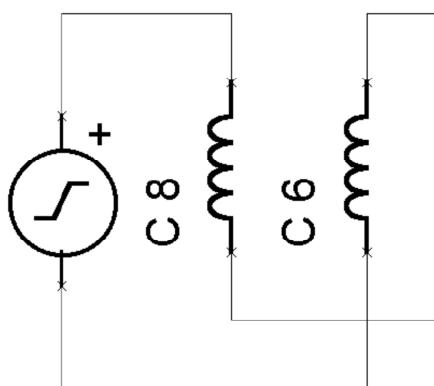
$N_1$  počet závitů cívky C1

$dv$  náhradní průměr vsázky C2

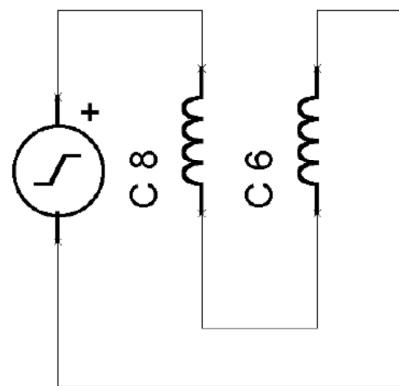
$l_2$  délka vsázky C2

$N_2$  počet závitů cívky C2

Zapojení měřených cívek:



Obvod pro měření  $L_a$



Obvod pro měření  $L_b$

2) Změřili jsme indukčnosti samotných (dc a dv) L1 a L2

3) Určili jsme L1 a L2 výpočtem podle

$$L_1 = \mu_0 \mu_r \pi \left( \frac{d_c}{2} \right)^2 \frac{N_1^2}{l_1} \alpha_1 = 4\pi 10^{-7} 1 \pi \left( \frac{0,0074}{2} \right)^2 \frac{57^2}{0,0155} 0,9016 = 9,78 \cdot 10^{-4} [H]$$

$$L_2 = \mu_0 \mu_r \pi \left( \frac{d_v}{2} \right)^2 \frac{N_2^2}{l_2} \alpha_2 = 4\pi 10^{-7} 1 \pi \left( \frac{0,004}{2} \right)^2 \frac{57^2}{0,0155} 0,8181 = 2,82 \cdot 10^{-4} [H]$$

$$\alpha_1 = f \left( \frac{d_c}{l_1} \right) = (\text{z tabulek součinitel nagaoka}) 0,9016 [-]$$

$$\alpha_2 = f \left( \frac{d_v}{l_2} \right) = (\text{z tabulek součinitel nagaoka}) 0,8181 [-]$$

4) Změřili jsme M12 cívek zasunutých v sobě

$$L_a = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L_b = L_1 + L_2 - 2M$$

Po úpravě dostaneme:  $M = \frac{L_a - L_b}{4} = \frac{171,1 - 67,8}{4} \cdot 10^{-6} = 25,8 \cdot 10^{-6} [H]$

5) Určení M12 výpočtem

$$M_{12} = \mu_0 \pi \left( \frac{d_v}{2} \right)^2 \frac{N_1}{l_2} F_{12} = 4\pi 10^{-7} \pi \left( \frac{0,004}{2} \right)^2 \frac{57}{0,0155} 0,837 = 4,9 \cdot 10^{-8} [H]$$

z tabulek se určí koeficient  $\rightarrow F_{12} = f\left(\frac{d_c}{l_1}, \frac{d_v}{l_2}, \frac{l_1}{l_2}\right) = 0,837 [-]$

6) Měření cívek se stíněním n svazky trafoplechů

- a) Změna La v závislosti na n svazcích vkládaných po dvojcích proti sobě na vnitřní stěnu ocelového válce, d=0,017m, n max=16
- b) Změna Lb v závislosti na n svazcích vkládaných po dvojcích proti sobě na vnitřní stěnu ocelového válce, d=0,017m, n max=16
- c) Měření La' – cívky ve válci se stabilními 16 svazky, d=0,02m, (L2 uvnitř L1)
- d) Měření Lb' – cívky ve válci se stabilními 16 svazky, d=0,02m, (L2 uvnitř L1)
- e) Výpočet M12' – obě cívky ve válci s 16 svazky, d=0,02m

Změřili jsme La' a Lb' a vypočítali jsme velikot M12'.

$$M' = \frac{L_a' - L_b'}{4} = \frac{183,4 - 71,4}{4} \cdot 10^{-6} = 28 \cdot 10^{-6} [H]$$

### Závěr:

Přidávání svazků transformátorových plechů zvyšuje indukčnost cívek i jejich vzájemnou indukčnost. Ocelový válec s transformátorovými plechy zvýší magnetický tok procházející cívkami a tím celkovou účinnost soustavy, zároveň plní funkci stínění. Rozdílné hodnoty změřených a vypočtených hodnot, stejně tak nelinearity grafu jsou způsobeny vlastní indukčností měřicích šnůr a celkovou mechanickou nestabilitou měřené soustavy cívek a stínícího válce.

## 8) Vařiče

### Úkol měření:

Změřte tepelnou účinnost elektrického vařiče, rychlovárné konvice a mikrovlnné trouby. Zpracujte výsledky a do grafů zakreslete závislosti teploty vody na době ohřevu.

### Teoretický úvod:

Při měření účinnosti se ohřívá v nádobě dané množství vody z teploty  $20^{\circ}\text{C}$  na teplotu  $96^{\circ}\text{C}$ . Pomocí wattmetru je měřen přivedený příkon vařiče, který se spolu s teplotou ohřívané vody odečítá v minutových intervalech. V tomto případě bude v účinnosti zahrnuta i energie spotřebovaná i na ohřátí vlastního vařiče a její hodnota se určí jako poměr množství energie přivedené ohřívané vodě k celkové energii spotřebované vařičem podle vztahu:

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_{el}} = \frac{m \cdot c (\vartheta_k - \vartheta_0)}{P \cdot t}$$

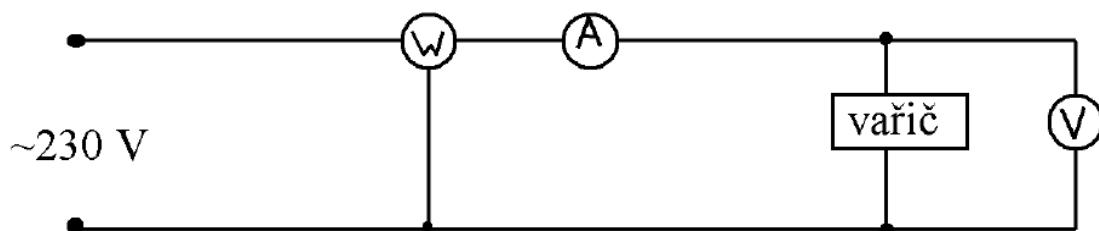
Ze vztahu:

- M - hmotnost ohřívané vody [kg]  
C - specifické teplo vody [J/kg  $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\vartheta_k, \vartheta_0$  - konečná a počáteční teplota vody [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
P - průměrná hodnota příkonu vařiče [W]  
T - doba ohřevu [s]

### Postup měření:

1. Na elektroměru zjistit počáteční stav, poté do rychlovárné konvice se vlije 0,75l vody a zapne se rychlovárná konvice.
2. Pomocí teploměru se zapisují změřené hodnoty od 0 minut po 1 minutě popřípadě po 30 sekundách až do bodu varu.
3. V bodě varu okamžitě spotřebič vytáhnout ze zásuvky a opsat stav elektroměru.
4. Tento postup je stejný pro odpovídající indukční vařič jen voda se vlije samozřejmě do hrnce.
5. U mikrovlnné trouby se do plastové nádoby vlije 0,6l vody.
6. Změřit teplotu vody před ohřátím.
7. Voda se ohřívá po dobu 2 minut a následně se opět změří teplota vody.
8. Zaznamená se počáteční i koncový stav elektroměru.

### Schéma zapojení:



## Naměřené a vypočtené hodnoty:

### 1. Rychlovarná konvice:

T [°C]	19	38	51	69	86	95
t [min]	0	0,5	1	1,5	2	2,5

počáteční stav elektroměru [kWh]	207,004
koncový stav elektroměru [kWh]	207,079
spotřebovaná energie [kWh]	0,075

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_{el}} = \frac{m \cdot c(\vartheta_k - \vartheta_0)}{P \cdot t} = \frac{0,75 \cdot 4180 \cdot (95 - 19)}{1800 \cdot 150} = 0,882$$

$$P = \frac{75}{150} \cdot 3600 = 1800W$$

### 2. Odporový ohřívač:

T [°C]	19	20	23	31	42	51	58	67	74	81	88	94
t [min]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

počáteční stav elektroměru [kWh]	206,69
koncový stav elektroměru [kWh]	206,866
spotřebovaná energie [kWh]	0,176

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_{el}} = \frac{m \cdot c(\vartheta_k - \vartheta_0)}{P \cdot t} = \frac{0,75 \cdot 4180 \cdot (94 - 19)}{960 \cdot 660} = 0,371$$

$$P = \frac{176}{660} \cdot 3600 = 960W$$

### 3. Indukční ohřívač:

T [°C]	19	26	38	52	64	76	89	96
t [min]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5

počáteční stav elektroměru [kWh]	206,867
koncový stav elektroměru [kWh]	206,956
spotřebovaná energie [kWh]	0,089

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_{el}} = \frac{m \cdot c(\vartheta_k - \vartheta_0)}{P \cdot t} = \frac{0,75 \cdot 4180 \cdot (96 - 19)}{1525,7 \cdot 210} = 0,753$$

$$P = \frac{89}{210} \cdot 3600 = 1525,7W$$

#### 4. Mikrovlnná trouba:

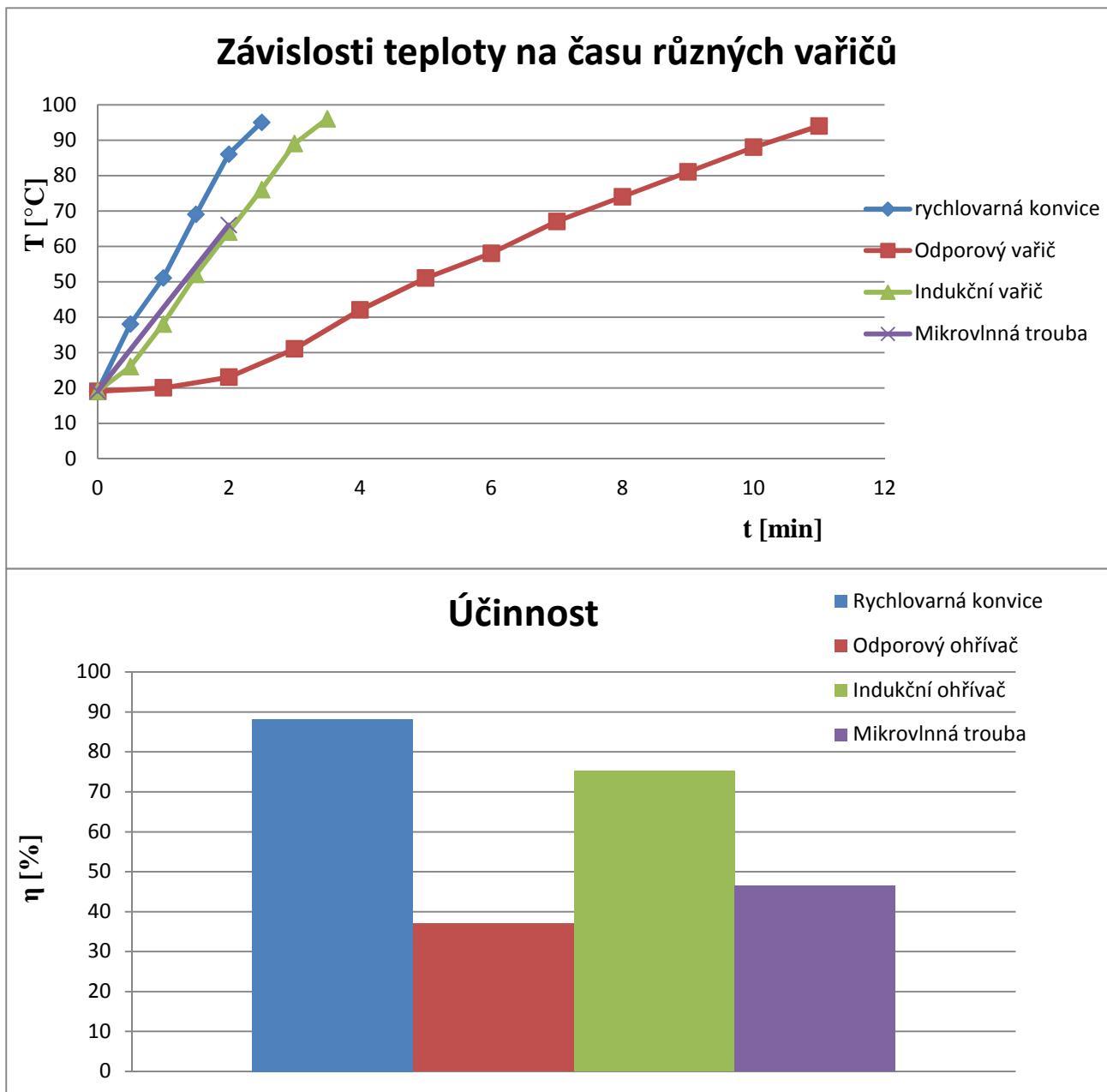
T [°C]	19	66
t [min]	0	2

počáteční stav elektroměru [kWh]	206,957
koncový stav elektroměru [kWh]	207,004
spotřebovaná energie [kWh]	0,047

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_{el}} = \frac{m \cdot c(\vartheta_k - \vartheta_0)}{P \cdot t} = \frac{0,4 \cdot 4180 \cdot (66 - 19)}{1410 \cdot 120} = 0,464$$

$$P = \frac{47}{120} \cdot 3600 = 1410W$$

Grafy:



**Závěr:**

Dle měření má největší účinnost v ohřevu 0,75l vody rychlovarná konvice, která má zárověn nějvětší příkon tj. 1800W. Naše pomyslné druhé místo obsadil indukční ohřev s účinností 75,3% a příkonem 1525,7W. Jako třetí nám vyšla mikrovlnná trouba s účinností 46,3% a příkonem 1410W. Nejhůře ohřívaná voda je pomocí odporového ohříváče, kde účinnost je 37,1% a příkon 960W.