

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Františka L o b a

obor strojírenská technologie

Protože jste splnil..... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství a kultury o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Návrh technologického zpracování ohřevu a rekonstrukce měničny pro napájení ohřívacích strojů pro tepelné tváření vybraných výkovků.

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se se stávajícími technologiemi výroby v AZNP Mladá Boleslav.
2. Uvažujte napájení ohřívacích strojů z rotačních měničů 4000 Hz a předpokládejte regulaci tepelného výkonu napětím a dobou ohřevu. Srovnajte navržené napájení ohřívacích strojů s napájením ze statických měničů.
3. Navhněte způsob kontroly teploty při ohřívání a využití výsledků měření k regulaci příkonu ohříváče.
4. Proveďte ekonomický rozbor navrženého řešení pro výrobu 200 000 automobilů za rok.

Liberec, 31.8.1977
31.8.1977
13. listopadu 1977
31.8.1977

V 69/1977 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÁ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 5
PSČ 461 17

Rozsah grafických laboratorních prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

1. Čabelka : Mechanická technologie,; SAV Bratislava, 1967
2. Sandler : Polovodičové měniče kmitočtů
3. Jenčík - Vocetka : Měření tepelných veličin v automatizaci; SNTL Praha, 1967
4. Bašta-Chládek-Mayer : Teorie elektrických strojů
5. Podnikové podklady AZNP Mladá Boleslav

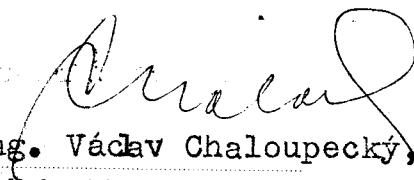
Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Václav Chaloupecký, CSc

Konsultanti: Ing. František Groh
Ing. Jiří Vacek - KEL

Datum zahájení diplomové práce: 11. X. 1976

Datum odevzdání diplomové práce: 27. V. 1977




Doc. Ing. Václav Chaloupecký, CSc
Vedoucí katedry


Doc. RNDr. Bohuslav Stříž,
Děkan

v Liberci

dne 11. října

1976

VŠST LIBEREC

Fakulta strojní

Obor 23-07-8

Strojírenská technologie

zaměření strojírenská metalurgie

Katedra technologie a nauky o materiálu

Návrh technologického zpracování ohřevu a rekonstrukce
měnírny pro napájení ohřívacích strojů pro tepelné tvá-
ření vybraných výkovků

L o b František

DP - ST - 1299/77

Vedoucí práce: Doc. Ing. Václav Chaloupecký, CSc (KTM VŠST)

Konzultant: Ing. František Groh (KTM VŠST)
Ing. Jiří Vacek (KEL VŠST)

Rozsah práce a příloh

Počet stran:	49
Počet příloh a tabulek:	4
Počet obrázků:	17
Počet výkresů:	2

DT: 621.73.043

27. května 1977

Nístopřísežné prohlášení

**Nístopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.**

V Liberci dne 27. 5. 1977

Jan Janík

Obsah

Úvod	5
1. Popis stávající výroby v AZNP Mladá Boleslav	6
1.1. Popis zařízení kovárny v AZNP Ml. Boleslav	6
1.2. Příklad stávajícího technologického postupu zhotovení výkovku	9
1.3. Vlastní téma diplomové práce	10
2. Indukční ohřev v kovárně	12
2.1. Fyzikální podstata indukčního ohřevu	12
2.2. Volba kmitočtu, rychlost a doba ohřevu	17
2.3. Možnosti regulace doby ohřevu	22
2.4. Regulační obvod a popis jeho činnosti	31
2.5. Popis statických měničů a porovnání s navrženou konceptí	35
3. Návrh způsobu kontroly teploty při ohřívání a využití výsledků měření k regulaci příkonu ohříváče	38
3.1. Rozdělení pyrometrů a posouzení možnosti použití	38
3.2. Problém závislosti vlnové délky a intenzity světla na teplotě	39
3.3. Porovnání fotočlanků a posouzení jejich použití jako přijímače světelného záření	41
3.4. Vlastní návrh	43
3.5. Ověření v praxi	43
4. Ekonomický rozbor	45
Závěr	47

Úvod

Základním úkolem hospodářské a sociální politiky KSČ pro období 6. pětiletky je zajistit uspokojování rostoucích hmotných a duševních potřeb obyvatelstva a další upevňování jeho životních a sociálních jistot na základě vysoké efektivity společenské výroby a kvality veškeré prováděné práce. Ze strany strojírenství to znamená zvýšit výrobu do roku 1980 zhruba o 48 - 51 %, přičemž je nutno současně zlepšovat celkovou kvalitu, provozní spolehlivost a inovaci výrobků. Jednou z cest, jak těchto úkolů dosáhnout, je růst produktivity práce, úspora materiálu a energií, rychlejší zavádění výsledků vědy a techniky do praxe a plánovitá integrace v rámci RVHP.

Tato práce řeší právě problém úspory elektrické energie, zvyšování produktivity práce a kvality výrobků v zápusťkové kovárně národního podniku AZKP v Mladé Boleslavi.

1. Popis stávající výroby v AZNP Mladá Boleslav

Národní podnik AZNP Mladá Boleslav je v současné době největším výrobcem osobních automobilů v Československu. Celková roční produkce je 168 000 vozidel. V letošním roce přechází tato automobilka na výrobu nových typů vozů ŠKODA. Jsou to Š 105, Š 120L, Š 120LS.

Výroba v podniku je rozdělena do tří oblastí:

- a) příprava polotovarů v oblasti metalurgické;
- b) oblast mechanicko-montážní - zde se provádí opracování jednotlivých součástí a dále montáž těchto součástí do celků (motor, hnací agregát, přední náprava);
- c) oblast karosářsko-montážní - v této oblasti dochází k výrobě karosérií a ke konečné montáži celého automobilu.

Úkolem této DP je řešit problémy týkající se ohřevu materiálu před zpracováním - kováním. Jde tedy o první oblast výroby, tj. přípravu polotovarů.

1.1. Popis zařízení kovárny AZNP Ml. Boleslav

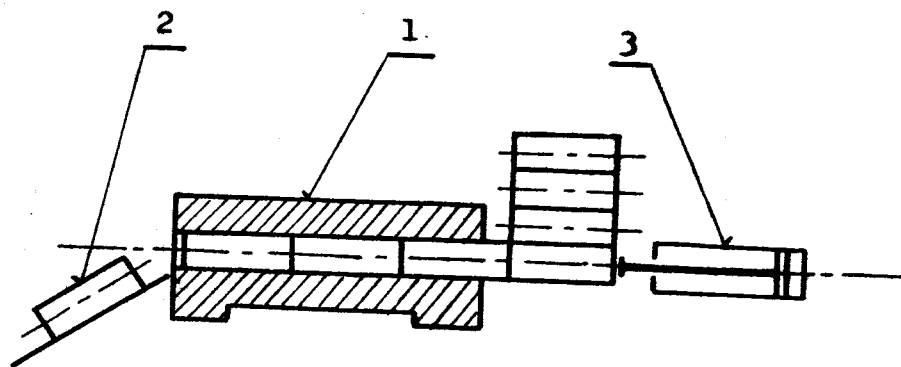
Kovárna je umístěna v hale (viz příloha), kde je výroba rozdělena do několika buněk na lisech o tonáži 2500 t, 1600 t, 1000 t a 650 t. V současné době používají v kovárně tyto typy lisů:

Ostřihovací lis LU 160	Mechanický kovací lis LKM 1000
LDK 200	LKM 1600
LU 250	LKM 2500
LKO 315	LKM 2500-C
	LZK 2500
	LZK 1600

Ke každému kovacímu lisu je přiřazen jeden ohříváč typu ISOK, obr. 2. Je to vlastně axiální středofrekvenční automatický ohříváč. Má ohřívací cívku s podélným (axiálním) magnetickým polem, v níž magnetické siločáry probíhají rovnoběžně s osou ohřívaného předmětu, obr. 1.

Nadělené kusy materiálu se založí do skloněného zásobníku. Odtud jsou v určitých intervalech pneumatickým válcem zasouvány do induktoru v podélném směru. Zasunutím nového, studeného kusu se všechny ostatní posunou o jednu délku polotovaru vpřed, takže na druhém konci induktoru vypadne ohřátý kus.

Ohříváč se skládá z ocelového rámu, na jehož horní část je připevněna ohřívací cívka (induktor), zásobník materiálu, pneumatický válec a ovládací panel. V dolní části je umístěn kondenzátorová baterie a další elektrické vybavení.



Obr. 1

Schéma středofrekvenčního automatického ohříváče pro ohřev kusů před kováním:

- 1 - cívka
- 2 - ohříváný kus
- 3 - pneumatický válec

K napájení ohříváčů je použito středofrekvenčních rotačních měničů typu PZ 13a 4/4 o výkonu 250 kVA, obr.3. Agregát se skládá z asynchronního motoru, který pohání středofrekvenční zubový alternátor. Rotor motoru i alternátoru jsou uloženy na společném hřídeli. Celý je řešen jako vertikální monoblok, tj. motor i alternátor tvoří jeden konstrukční celek.

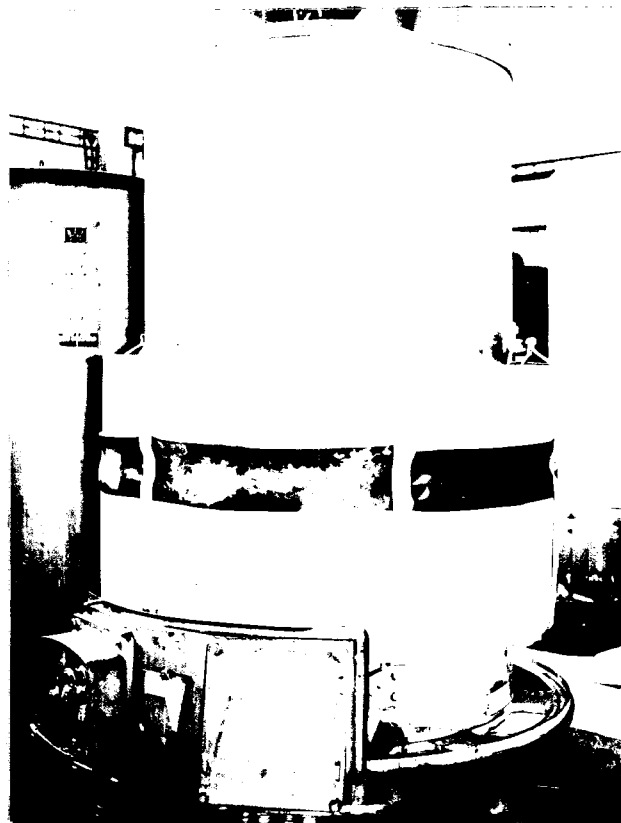
Technické údaje:

Příkon	280 kW
Napájecí napětí	6000 V
Výkon	250 kVA
Výstupní napětí	1000 V
Výstupní proud	250 A
Frekvence	4340 Hz
Celková účinnost	81,5 %



Obr. 2

Axiální středofrekvenční ohříváč typu ISOK - vpravo
/pohled na pracoviště - kovací buňku/



Obr. 3

Středofrekvenční rotační měnič typu FZ 13a 4/4 bez krytu

Středofrekvenční měniče v kovárně pracují paralelně, do společného středofrekvenčního rozvodu. Všechny 14 měničů je umístěno v oddělené části haly, tzv. měnírně. Tím jsou chráněny před prachem a otřesy v kovárně a je také usnadněna jejich obsluha a údržba.

Paralelní chod měničů poskytuje tu výhodu, že při poruše nebo údržbě jednoho stroje se nezastaví žádný ohřívací stroj v kovárně. Nikdy totiž není zapotřebí celého výkonu měírny, takže některé měniče jsou odstaveny a mohou se v případě potřeby spustit.

Velkou nevýhodou těchto měničů je, že musí běžet nepřetržitě (i mimo pracovní dobu). Je to proto, že denním vypínáním a zapínáním docházelo k častým závadám na izolaci vinutí, jež byla namáhána tepelnými změnami. Příkon měniče při chodu naprázdno je 40 kW.

Další nevýhodou měničů je doba oprav. Limity oprav jsou příliš dlouhé a došlo-li by k havárii více strojů najednou, může nastat i částečné omezení výroby. Tato nepříjemná dosavadní situace je zaviněna tím, že jediným monopolním výrobcem měničů a jejich náhradních dílů v ČSSR je n. p. BEZ Bratislava, který sám nestačí v daných lhátách opravy zabezpečit.

další nevýhody

1.2. Příklad stávajícího technologického postupu zhotovení výkovku

Zápusťková kovárna v AXMP produkuje 46 druhů výkovků. Ty slouží jak pro vlastní potřebu závozu, tak i pro externí výrobu. Pro DP bylo vybráno 6 výrobků (viz tab. 1), které vlastně tvoří zástupce všech 46 druhů.

Ze skladu materiálu je vydán polotevar - tyčový materiál. Ten je dělen strojními nážkami na kusy o předepsané hmotnosti. Dělení musí být prováděno přesně, aby byla hmotnost v předepsané toleranci a střížné plochy hladké, bez otřepů.

Takto nadělený materiál přichází do ohřívacího stroje, kde se průběžně ohřívá na kovací teplotu 1150 - 1200 °C. Nejméně dvakrát za směnu je namátkově kontrolována teplota ohřevu optickým - spektrálním pyrometrem typu PYROMET.

Předehřátý kus materiálu, který vypadne z ohříváče, je dopraven na mechanický kovací lis. Kování se skládá z jedné nebo více operací - podle složitosti výrobku. Kování musí probíhat v předehřáté zápusťce. Teplota předehřátí je 200 - 500 °C. Dále obsluha lisu vyjme výkovek kleštěmi ze zápusťky a přenese jej na ostříhovací lis. Po každém kusu je zápusťka očištěna od okují a namazána bezádným mazadlem AQUANET. Na ostříhovacím lisu je provedeno ostřížení, případně před tím děrování - opět podle tvaru výrobku. Tímto je skončeno vlastní tváření.

Dále se provádí tepelné zpracování, kontrola tvrdosti, broušení a další operace podle druhu výrobku. Na závěr se provádí konečná kontrola.

1.3. Vlastní téma diplomové práce

Jak vyplývá z konstrukce ohřívacího stroje, děje se posun materiálu v induktoru pomocí pneumatického válce, který je spouštěn časovým relé. Znamená to, že ohřáté kusy materiálu vypadávají ve stále stejných časových intervalech. V každé buňce je tedy určujícím prvkem rytmu práce ohřívací stroj a ne obsluha, jak by tomu mělo správně být. Tento problém je řešen v kapitole 2.

Dalším problémem je měření teploty. Je jasné, že teplota při ohřevu závisí na době ohřevu a na tepelném příkonu. V podmínkách kovárny však nemůžeme zaručit, že tyto dva parametry jsou konstantní. Doba ohřevu je sice určována časovým relé, ale nepřetržité otřesy, které jsou v kovárně, způsobují jeho častou poruchovost. A tepelný příkon - na ten působí hned několik vlivů, např. kolísání napětí v síti, rozměrové odchylky materiálu atd. Tudiž kontrolovat teplotu jen dvakrát za směnu je zdaleka nedostačující. To by se měla měřit nepřetržitě, u každého kusu materiálu. Tento problém je řešen v kapitole 3.

Název součásti	Název skupiny	Materiál	Rozměr /mm/	Hmot- nost kg	Chřítivě ISO	Výkon ohř. kg/h	Čas kusev
Hnací hřídel	Převodovka	16 220.0	Ø 35x303		300/4	750	0,460
Ojnice	Motor	12 060.0	Ø 40x165	1,62	300/4,4	750	0,190
Planetové kolo	Zadní náprava	14 220.0	Ø 56x 81	1,67	300/4	750	0,431
Hřídel páry	Řízení	15 240.0	Ø 22x180		200/4	500	0,230
Šep kola	Přední náprava	15 240.3	Ø 60x105		300/4	950	0,660
Kolo 3 rychlosti	Převodovka	14 140.0	Ø 45	0,60	200/4	500	0,220

Tab. 1
Přehled vybraných výtoků

2. Indukční ohřev v kovárně

Indukční ohřev je poměrně moderní způsob ohřevu, který splňuje provozně důležité požadavky, jenž jsou na ohřev materiálu v zápusťkové kovárně kladeny. Je to dokonalé prohřátí materiálu, přesné dodržení kovací teploty. Velkou předností indukčního ohřevu je jeho pohotovost, provozní spolehlivost, jednoduchá obsluha, zkrácená doba ohřevu i její stejnoměrnost, umožňující plynule rytmickou práci kovacího stroje a působí příznivě i na životnost zápusťek. Zvláštní výhodou je poměrně jednoduchá automatizace ohřívacího pochodu a snadné spojení ohříváčů s tvářecích strojů do určených tvářecích výrobních linek.

Nevýhodou indukčního ohřevu jsou vysoké pořizovací náklady proti palivovým pecím a malá přispěvovost pro výrobu členitých výkovků v malých sériích.

2.1. Fyzikální podstata indukčního ohřevu

Teplo vznikající v indukčních pecích je buď Jouleovo teplo dosažené v sekundárním vinutí transformátoru spojeném nakrátko, nebo vzniká působením vířivých proudů ve vodivé hmotě. Aby výkonnost pecí byla co největší, mají první pece tok proudu co možná velký a druhé tok co nejrychleji kmitající. Proto tyto pece druhého druhu se napájejí vyšším kmitočtem než průmyslovým (50 Hz).

Indukční ohřev můžeme rozdělit na ohřev:

- 1) nízkými kmitočty (nf) - do 500 Hz
- 2) středními kmitočty (sf) - 500-10 kHz
- 3) vysokými kmitočty (vf) - nad 10 kHz

V našem případě se jedná o ohřev středními kmitočty.

Při volbě kmitočtů pro indukční ohřev je nejdůležitější tzv. hloubka vniku vysokofrekvenčního proudu (nebo tzv. efektivní hloubka vířivých proudů). Čím vyšší je frekvence, tím tenčí je povrchová vrstva, v níž protékají indukované proudy. Při střední frekvenci (řádově 2-10 kHz), získané ro-

tačními generátory, je hloubka vniku větší, takže se teplo vyvíjí v tlustší povrchové vrstvě. To umožňuje volit větší výkony a tím skrátit ohřívací dobu, aniž se materiál namáhá příliš prudkým teplotním spádem v povrchové vrstvě.

Úbytek proudové intenzity směrem ke středu je určen podle /1/ exponenciální funkcí

$$I_x = I_0 e^{-x\delta} \quad (1)$$

kde I_0 je intenzita vířivých proudů na povrchu, I_x je intenzita ve vzdálenosti x /cm/, δ je konstanta, jenž závisí na zvolené frekvenci a na magnetických i elektrických vlastnostech ohřívaného materiálu, tj. na jeho permeabilitě μ a na jeho specifickém odporu ρ . Pro předmět s rovinnou ohřívanou plochou platí podle /1/ rovnice

$$\delta = 2\pi \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} \quad (2)$$

kde f je frekvence střídavého proudu, který protéká induktorem. Tuto rovnici můžeme použít s přibližností i pro předměty se zakřivenou ohřívanou plochou. Závislost mezi proudovou intenzitou I_x a vzdáleností x od povrchu předmětu můžeme tudíž vyjádřit ve tvaru

$$I_x = I_0 e^{-2\pi \sqrt{\frac{\mu f}{\rho}} \cdot x} \quad (3)$$

tato závislost je na obr. 4 znázorněna graficky pro dvě různé frekvence f_1 a f_2 .

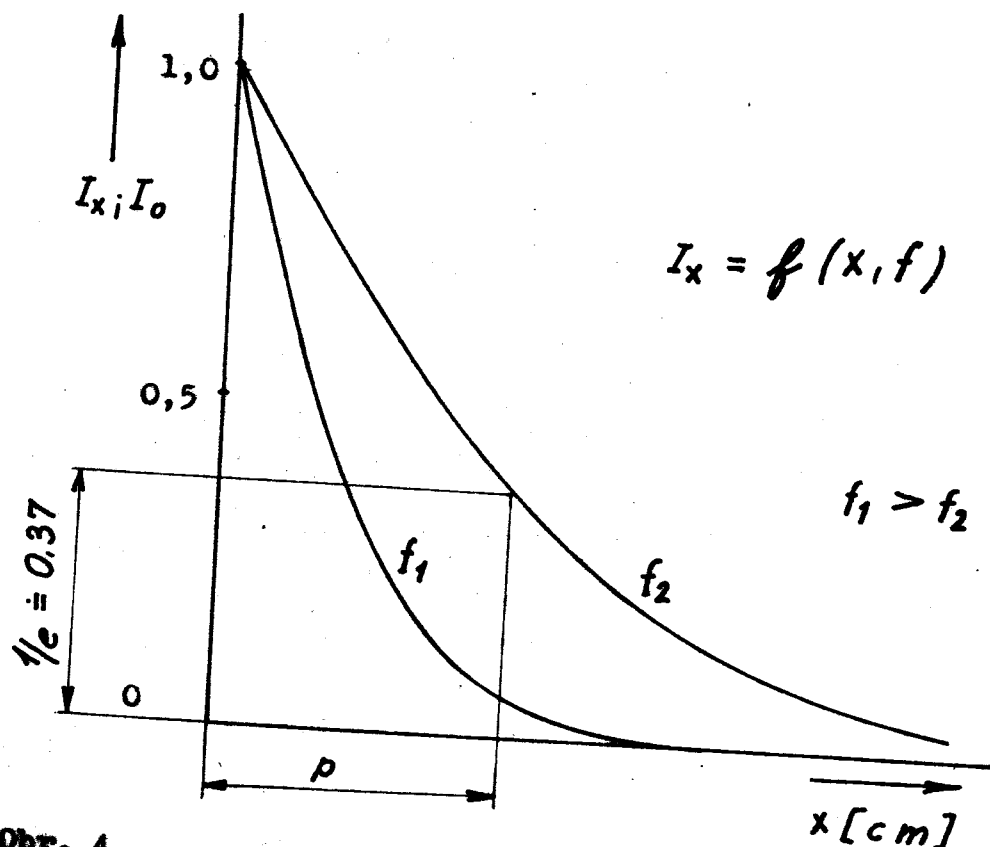
Intenzita klesá tím rychleji, čím nižší je frekvence f , takže při vzrůstající frekvenci protéká povrchovými částmi větší podíl celkového proudu.

Dosaďme-li do vzorce pro intenzitu I_x hodnotu

$$x = p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

dobudeme

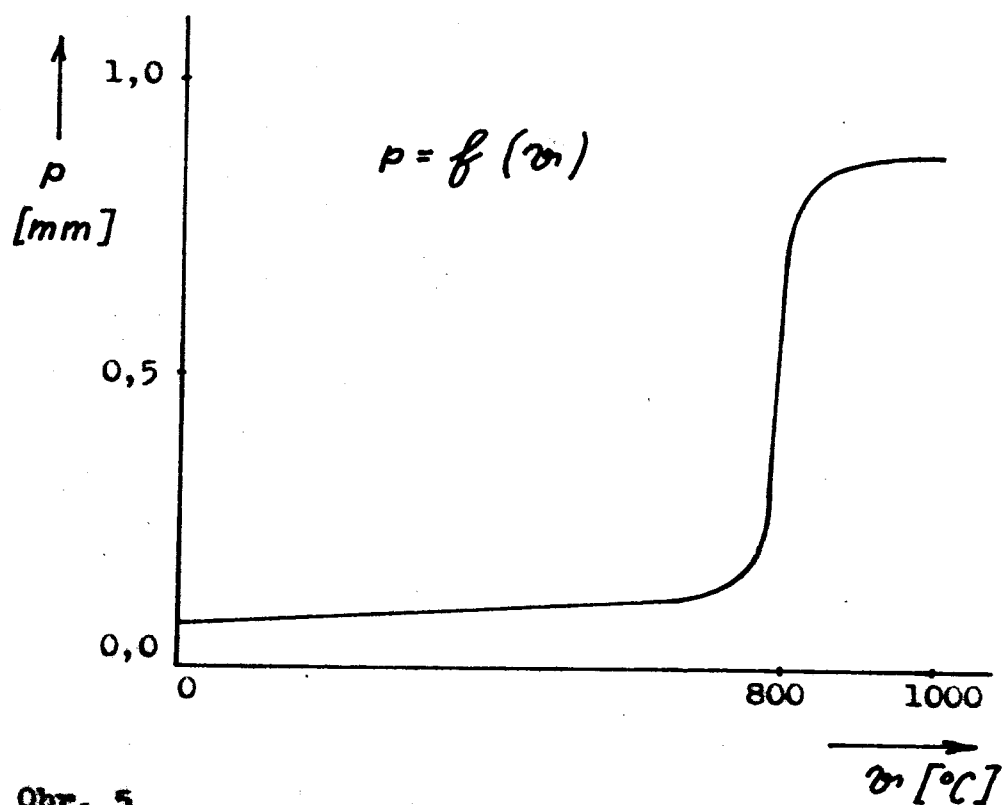
$$I_x = \frac{I_0}{e} = 0,37 I_0$$



Obr. 4

Závislost proudové intenzity na vzdálenosti od povrchu /1/

Vzdálenost p , ve které intenzita vířivých proudů klesne na hodnotu I_0/e , označujeme jako efektivní hloubku vniku vířivých proudů. Tato hodnota charakterizuje rychlost ubývání proudové intenzity směrem ke středu ohřívaného předmětu. Závisí přímo na specifickém odporu ρ ohřívaného materiálu a nepřímo na jeho permeabilitě μ a na frekvenci f . U konstrukčních ocelí bývá permeabilita μ za normální teploty 100 - 500, nad teplotou 770 °C (Curieho bod) klesne na hodnotu $\mu = 1$, čímž se náhle zvětší efektivní hloubka vniku vířivých proudů p . Tato změna je znázorněna na obr. 5. Dále na str. 16 je tabulka efektivních hloubek vniku vířivých proudů pro několik různých frekvencí a teplot.



Obr. 5

Efektivní hloubka vniku vířivých proudů p v závislosti na teplotě pro ocel (feromagnetickou) /B/

Teplota /°C/	mm ² /m	ω	Efektivní hl. vniku vířivých proudů /mm/ při f =					
			500 Hz	2 kHz	4 kHz	5 kHz	10 kHz	50 kHz
20	0,16	20	2	0,71	-	0,6	0,32	0,2
		100	1			0,3	-	0,1
		1000	0,3			0,1	-	0,03
750	-	-	3,1	1,67	-	1,05	0,74	0,31
800	1,2	1	14	-	-	7,5	-	1,4
1000	-		23	12,3	8,7	7,8	5,5	2,3
1200	-		24	12,7	-	8,1	5,7	2,4

Tab. 2
Efektivní hloubka vniku vířivých proudů pro několik různých frekvencí
a teplot /1, 6/

2.2. Volba kmitočtu, rychlost a doba ohřevu

Do značné míry ovlivňuje dobu ohřevu /1/ i spotřebu proudu velikost frekvence. Se zřetelom na dobrou účinnost ohřevu všeobecně platí, že malé rozměry ohřívajícího materiálu vyžadují vyšší frekvenci a velké průměry menší frekvenci. Přehled doporučených frekvencí je v tabulce 3.

Tab. 3

Doporučené frekvence v závislosti na průřezu ohřívající oceli /1/

Doporučená frekvence /Hz/	Průměr nebo ohřívající oceli /mm/
100 000	5 - 12
10 000	14 - 40
8 000	15 - 50
4 000	22 - 70
3 000	24 - 90
2 500	28 - 100
2 000	30 - 120
1 000	50 - 180
500	80 - 280
50	190 - 500

Volba vhodné frekvence se dále řídí vlastnostmi ohřívajícího materiálu, požadovaným průběhem ohřevu a žádaným stupněm stejnoměrnosti prohřátí celého průřezu materiálu.

Při ohřevu jsme (v rychlosti ohřevu) omezeni jen velikostí gradientu teplot, který vznikne během ohřevu a který určuje velikost vnitřních proutí mezi povrchovými a středovými partlemi ohřívajícího materiálu.

Doba ohřevu na kovací teplotu se nemůže volit libovolně, neboť má svoje meze, dané přestupem tepla z povrchu ohřívajícího materiálu do jeho vnitřku. Proto musíme volit

její minimální velikost tak, aby se dosáhlo stejnoměrného prohřátí v celém průřezu ohřívajícího předmětu.

Mezi povrchovou vrstvou ohřívající indukovanými proudy a studenějším vnitřkem vzniká teplotní spád, který způsobuje odvádění tepla dovnitř. Teplota stoupá na povrchu i uvnitř hmoty. Tento děj je složitý, protože tepelný příkon není konstantní během ohřevu, ale mění se tak, jak se mění elektrické vlastnosti oceli s teplotou, viz kapitola 2.1. Chceme-li matematicky popsat tento děj, musíme předpokládat jisté zjednodušení - že ohřev je rovnoměrný, stálým výkonem, pro velké těleso omezené rovinným povrchem. Pak stoupání teploty na povrchu je dáno podle /6/ vztahem

$$\vartheta_s = 0,27 \sqrt{\frac{t}{\rho c \lambda}} p \quad ^\circ\text{C}/ \quad (4)$$

kde ϑ_s je povrchová teplota $^\circ\text{C}/$

t čas $/\text{s}/$

ρ měrná váha $/\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}/$

c měrné teplo $/\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1}/$

λ tepelná vodivost $/\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1}/$

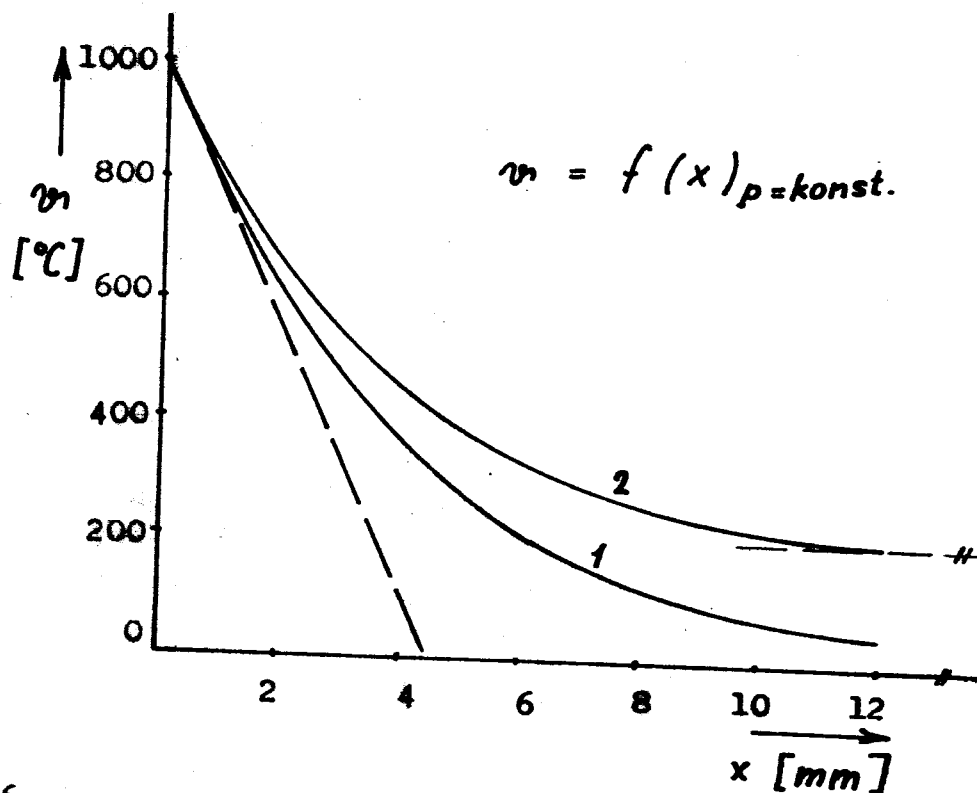
p tepelný příkon na jednotku povrchu $/\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}/$

Teplotní spád σ je úměrný procházejícímu teplu a je tím větší, čím menší je tepelná vodivost. Podle /6/ pak platí

$$\sigma = 0,24 \frac{p}{\lambda} \quad ^\circ\text{C cm}^{-1}/ \quad (5)$$

Ubývání teploty do hloubky je znázorněno na obr. 6. Rovnice (4) platí pro tečnu k teplotní křivce na povrchu. Křivka 2 znázorňuje skutečný průběh teploty u válcového tělesa o poloměru rovném právě 12 mm.

Předpokládáme-li jistý maximální rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem materiálu známých rozměrů, můžeme spočítat tepelný spád σ a dosazením do rovnic (4) a (5) vypočítáme minimální dobu ohřevu. Přehled minimálních dob ohřevu pro nízkouhlíkovou a nízkolegovanou ocel je uveden v tab. 4.



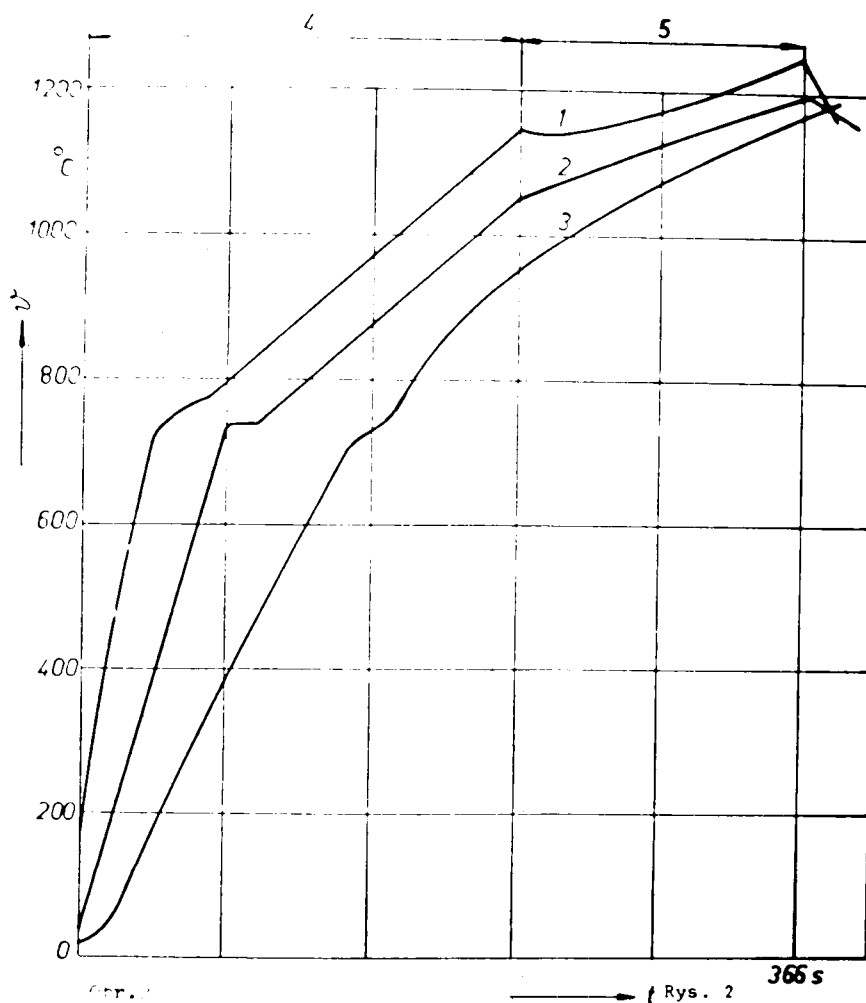
Obr. 6

Povrchový ohřev oceli; závislost teploty na hloubce od povrchu při konstantním měrném příkonu $p = 1000 \text{ W/cm}^2$ po době 2 s od okamžiku zapnutí /6, 8/

Tab. 4

Minimální doby ohřevu nízkouhlíkové a nízkolegované oceli pro různé průměry materiálu /1/

Průměr mat. /mm/	Doba ohřevu /min/	
	nízkouhlíková ocel	nízkolegovaná ocel
20	0,6	1,2
30	1,2	1,7
40	1,8	2,2
50	2,5	3,0
60	3,0	3,5
70	3,5	4,2
80	4,0	4,7
90	4,5	5,3
100	5,0	6,0



Obr. 7

Teplotní křivky pro kvadratické bloky 100 x 100 mm
při kmitočtu $f = 2 \text{ kHz}$ /10/

- 1 Povrch
- 2 Střed
- 3 Jádro
- 4 Tepelná cívka
- 5 Teplo udržující cívka

Skutečný průběh teplot v závislosti na čase převzatý z /10/ při indukčním ohřevu kmitočtem 2 kHz ocelových bloků 100 x 100 mm je na obr. 7. Z grafu je patrná prodleva a zlom křivky při teplotě 760 °C (Curieho bod) a při teplotě fázové přeměny.

Dobu ohřevu lze u některých druhů ocelí podstatněkrátit (až na 50 %) použitím tzv. rychloohřevu, při němž se zvýší hustota proudu a tím i měrný příkon $/W\ cm^{-2}/$ ve vstupní části cívky. Měrný příkon p bývá 50 W/cm^2 i více, je určen teplotním spádem, viz rovnice (5). Doba ohřevu má být v souladu s dobou potřebnou k vyrobení výkovku, tj. s taktem tvářecího stroje.

Délka indukční cívky musí proto odpovídat potřebnému počtu přířezů nebo předmětů současně v cílce ohříváných.

Je-li doba ohřevu	$T\ /s/$
takt kovacího stroje	$t\ /s/$
délka indukční cívky	$L\ /m/$
délka přířezu	$l\ /m/$

bude potřebná délka cívky

$$L = \frac{T}{t} \cdot l \quad /m/$$

(6)

V našem případě jsme především omezeni konstrukčními možnostmi, tj. výkonem instalovaného ohříváče, průměrem indukteru, materiálu a hmotností jednotlivých přířezů. Pokud nejkratší doba ohřevu, kterou můžeme v konkrétním případě dosáhnout, nepřesáhne nejkratší takt t na kovací stroj, je vše v pořádku a máme možnost regulace. Pokud je tomu naopak, je kovací stroj i dělník nevyužit a snižuje se produktivita práce na daném pracovišti.

Příklad výpočtu minimální doby ohřevu při kování.
(Údaje převzaty z pracovního postupu)

Název součásti:	Hrací hřídél
Název skupiny:	Převodovka
Druh mat. a rozměr:	Válcovaná ocel $\phi\ 35 \times 303\ 16\ 220.0$
Ohříváč:	ISOK 300/4
Výkon ohříváče:	750 kg/hod
Induktor:	$\phi\ 38$

Kovací teplota:

1150 - 1200 °C

Čas kusový t (na kovací lisu): 0,46 min = 27,8 s

Výpočet:

$$\text{Objem jednoho kusu } V = \frac{d^2}{4} \cdot l = 288 \text{ cm}^3$$

$$\text{hmota jednoho kusu } m = V \cdot \gamma = 2,24 \text{ kg}$$

$$\text{doba ohřevu } t = \frac{m}{750} = 0,003 \text{ hod} = 10,75 \text{ s}$$

Nejkratší čas ohřevu jednoho kusu, kterého lze dosáhnout na uvedeném ohřivači při jeho maximálním výkonu, je 10,75 s. Z toho plyne, že ohřivač je v tomto případě vytížen na 39 %, což je málo. V ideálním případě by to mělo být asi 70 %. Uvážíme-li, že ohřivač nemůže pracovat trvale na maximum a že je třeba jistá rezerva. Vhodnější by bylo použít ohřivač typu ISOK 200/4, který by byl využit na 58 %.

2.3. Možnosti regulace doby ohřevu

Jak plyne z předchozí kapitoly, lze dobu ohřevu regulovat změnou tepelného příkrmu na jednotku povrchu. Ten je určen jednak činným výkonem na rezonančním obvodu (obr. 8b) a účinností přenosu η , tj. tím, jaká část výkonu se přenese do ohřívaného materiálu v induktoru. Pro účinnost přenosu η podle /6/ platí:

$$\eta = \frac{r}{R_p} \quad (7)$$

kde r je přenesený odpor ze sekundárního obvodu do primárního (obr. 8b,c)

R_p celkový sériový odpor v primárním obvodu složený z vlastního odporu R_1 primárního obvodu a přeneseného odporu r .

Pro r podle /6/ platí:

$$r = R_2 \frac{\omega^2 k^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{R_2 + X_2^2} \quad (8)$$

kde R_2 je sériový odpor sekundárního rezonančního obvodu
 ω_0 úhlový rezonanční kmitočet $\omega_0 = 2\pi f_0$
 X_2 reaktance sekundárního obvodu (jestliže $\omega_2 = \omega_0$
 pak $X_2 = 0$)
 k činitel vazby, pro nějž podle /6/ platí:

$$k = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{01}}{f_0}\right)^2} \quad (9)$$

kde f_{01} je rezonanční kmitočet samotného primárního obvodu
 (tj. induktor prázdný bez materiálu).

Z předchozích vztahů plyne, že účinnost přenosu můžeme během provozu změnit pouze změnou frekvence. V našem případě je však frekvence f_0 konstantní, protože rotační měnič, které napájí ohříváče, mění síťové napětí kmitočtu 50 Hz na napětí pevné frekvence (4 kHz).

Chceme-li regulovat dobu ohřevu, zbývá nám měnit pouze činný výkon na rezonančním obvodu ohříváče. Tento výkon se spotřebuje na paralelním zatěžovacím odporu R_p (obr. 8a). Můžeme jej vyjádřit též pomocí sériového odporu R_s . Uvnitř obvodu (obr. 8a) koluje oscilační proud

$$I = \frac{U}{j\omega L} = jU\omega C \quad (10)$$

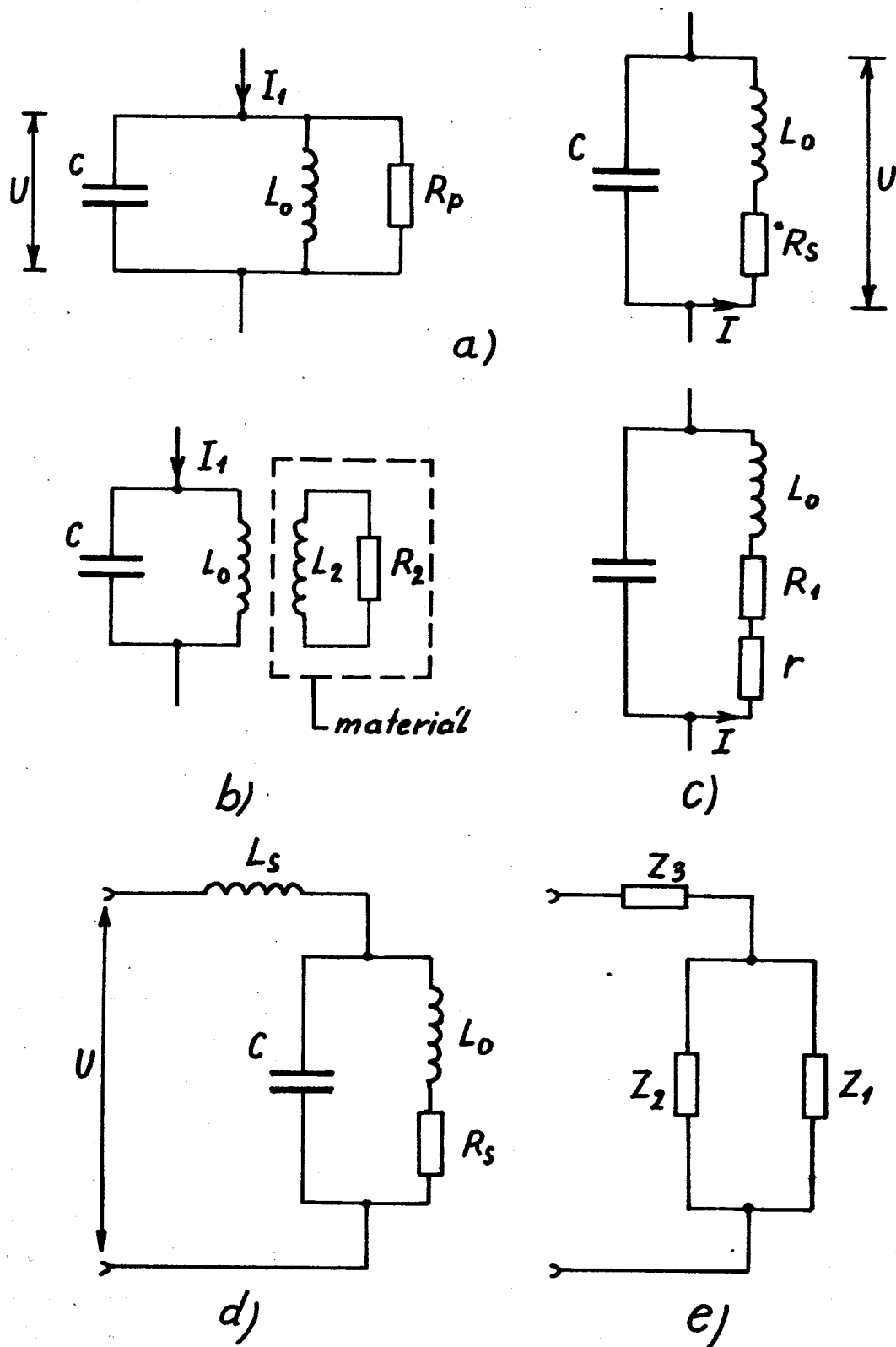
kde L je indukčnost;
 C kapacita obvodu;
 ω úhlový kmitočet.

Takže výkon spotřebovaný na odporu R_s je

$$P = U \cdot I_1 = R_s \cdot I^2 \quad (11)$$

Odpor R_s je složen ze dvou částí R_1 a r , viz (7).
 Odpor R_1 je vlastně odpor ztrátový. Výkon na něm ztracený představuje teplo, kterým se ohřívají závity induktoru a kondenzátorová baterie a které je nutno odvádět chladičí vodou. Přenesený odpor r je odpor užitečný. Výkon na něm ztracený představuje tepelný výkon, kterým se povrchově ohřívá materiál v induktoru.

Poznámka: Výkon na svorkách ohříváče udávají výrobci vše-



Obr. 8

Náhradní schémata rezonančního obvodu ohříváče

obecně 0,4 kWh/kg materiálu ohřátého na 1200 °C. Při kalorimetrickém ohřevu se spotřebuje asi 0,23 kWh/kg. Rozdíl představuje právě ztráty na R_1 a ještě další ztráty vedením a sáláním tepla.

Výkon spotřebovaný v oscilačním obvodu ohříváče je tedy podle (11) určen součinem efektivní hodnoty napětí U na oscilačním obvodu a efektivní hodnoty napájecího proudu I_1 . Chceme-li tento výkon snížit, musíme snížit buď napětí U nebo proud I . Napětí se na ohříváči nastavuje přepínáním odboček na sekundárním vinutí rozptylového transformátoru viz příloha 2. Každé přepnutí však znamená vypnutí stroje a opětné zapnutí. Při zapnutí je však nutné, aby byl ohříváč nesetřesený, tj. aby byl induktor prázdný. Z toho plyne, že regulace tímto způsobem během provozu je nemožná.

Zbývá nám tedy poslední možnost regulace, a to snižovat činnou složku oscilačního proudu I na úkor složky jalové rozkladěním paralelního oscilačního obvodu. Máme zde dvě možnosti, buď přidávat kapacitu (překompenzovat) nebo ji snižovat.

Doposud jsem uvažoval induktor s kondenzátorovou baterií pouze jako paralelní rezonanční obvod. Praktické poznatky z provozu ukazují, že se obvod nechová přesně podle tohoto teoretického předpokladu, tj. že při rozkladění se uvedených podmínek se činný výkon nesnižuje, ale naopak je-li kapacita větší než kapacita při resonanci, činný výkon poněkud vzroste.

Abychom zjistili podmínky, za kterých dochází k uvedenému jevu, uvažujeme elektrický náhradní obvod ohříváče včetně rozptylové indukčnosti transformátoru (obr. 8d). V elektrickém náhradním obvodu R_g reprezentuje převážně energii přenesenou do ohřívání materiálu induktorem viz (11). Vzhledem k tomu, že tato energie je funkcí frekvence bude také R_g na kmitočku závislý.

Pro jednoduchost se v dalším omezíme jen na malý kmitočtový rozsah kolem $\Omega = 1$ a budeme pokládat v tomto malém kmitočtovém rozsahu R_g za konstantní.

Pro celkovou impedanci obvodu Z podle obr. 8e platí:

$$Z = Z_3 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (12)$$

$$\text{kde } Z_3 = j\omega L_s; \quad Z_1 = \frac{1}{j\omega C}; \quad Z_2 = R + j\omega L_0$$

Dosadíme-li do (12), po úpravě dostaneme:

$$Z = j\omega L_s \cdot \frac{1 - j\left(\omega R_s C - \frac{\omega L_0}{R_s} + \omega^3 L^2 \frac{C}{R_s}\right)}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 R_s^2 \cdot C^2} \quad (13)$$

Dále dosazením za $C = \frac{1}{\omega_0^2 L}$ a zavedením poměrné frekvence $\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$ a převratné hodnoty činitele jakosti $Q \dots \delta = \frac{1}{Q} = \frac{R_s}{\omega_0 L_0}$ dojdeme ke vztahu:

$$Z = \omega_0 L_0 \left[\frac{\delta}{(1 - \Omega)^2 + \Omega^2 \cdot \delta^2} + j \left(\Omega \frac{L_s}{L_0} - \frac{\Omega (\delta^2 - 1 + \Omega^2)}{(1 - \Omega)^2 + \Omega^2 \delta^2} \right) \right] \quad (14)$$

Na obrázku 9 jsou graficky znázorněny závislosti poměrné reaktance $\xi = \frac{\text{Im}(Z)}{\omega_0 L_0}$ na poměrném kmitočtu Ω při

$$\delta = 0,9; \quad 0,4; \quad 0,2 \quad \text{a při } \frac{L_s}{L_0} = 1$$

vypočtené podle (14). Na obr. 10 pak pro $\frac{L_s}{L_0} = 0,2$. Dále na obr. 11 a 12 jsou závislosti poměrného činného výkonu $\frac{P}{P_0}$ na Ω pro výše uvedené hodnoty $\delta = \frac{L_s}{L_0}$.

kde pro činné výkony P a P_0 platí:

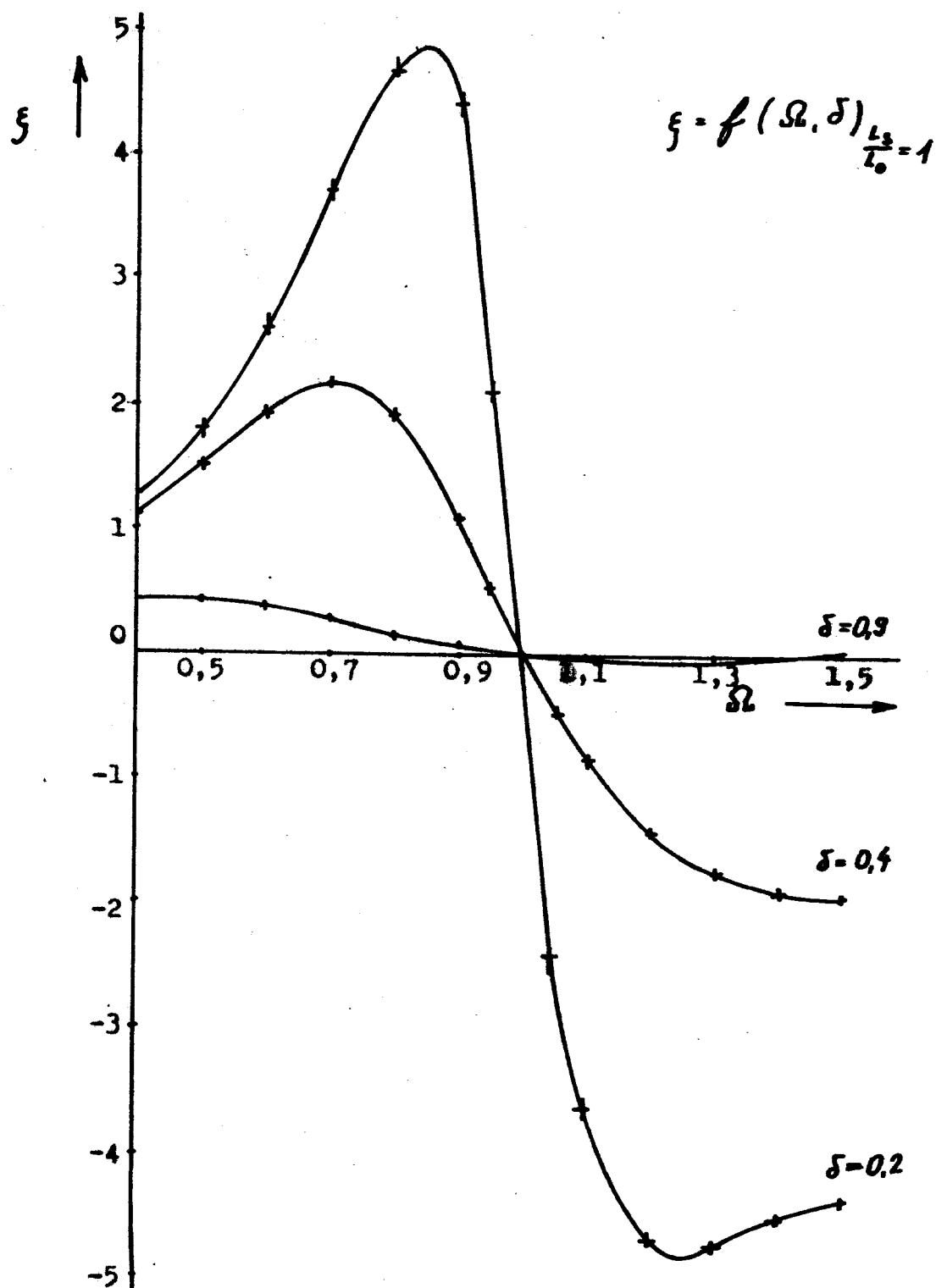
$$P = \frac{U^2}{|Z|} \cos \varphi = \frac{U^2}{|Z|} \frac{R_0/Z}{|Z|/2}$$

$$P_0 = \frac{U^2}{Z_0} \cdot 1 \quad \dots \text{(výkon při resonanci, tj. } \Omega = 1 \text{)}$$

$$\text{pak } \frac{P}{P_0} = \frac{Z_0}{|Z|} \frac{R_0/Z}{|Z|/2} \quad (15)$$

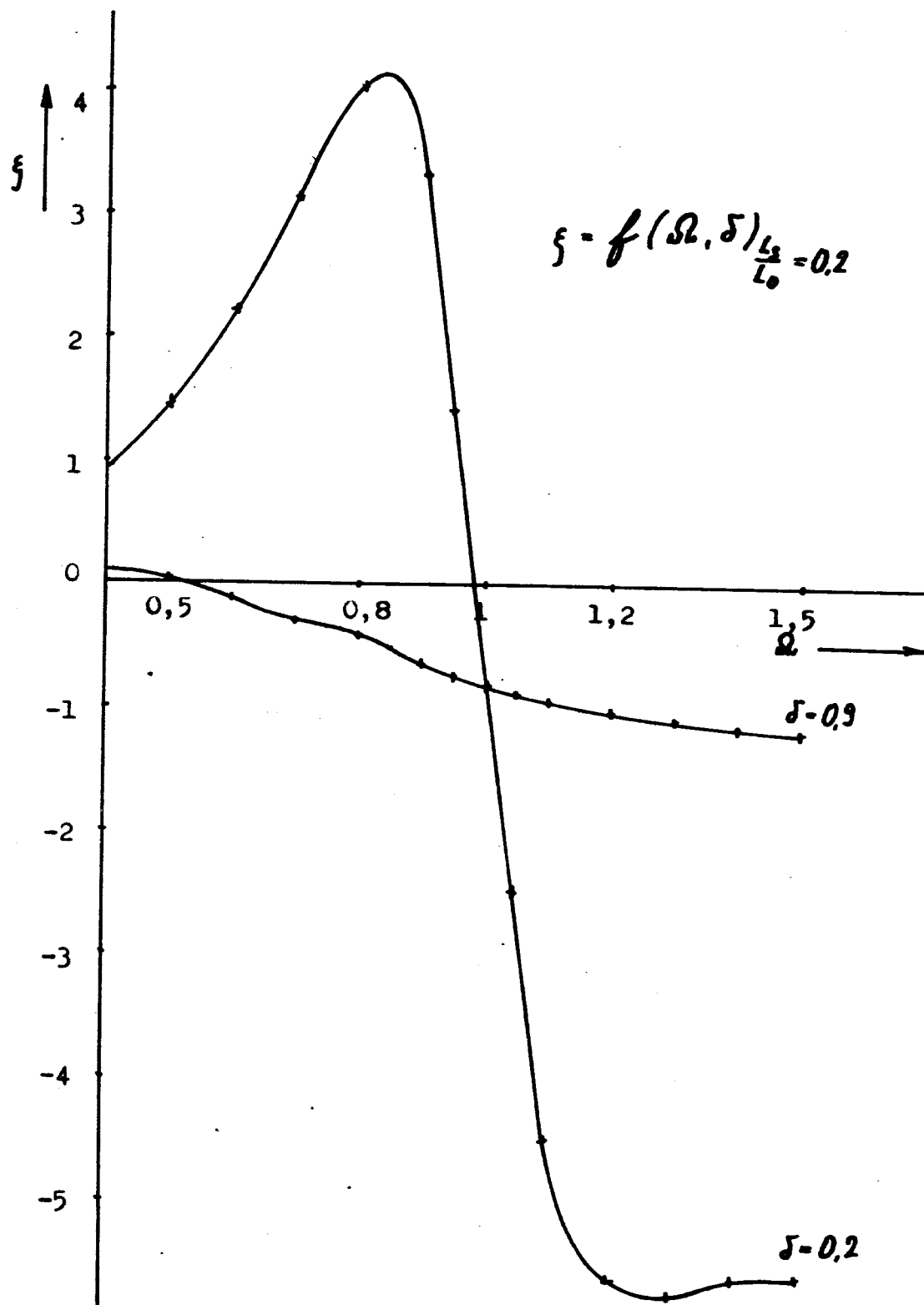
Rezborom grafů a z praktických poznatků z provozu plyne, že snižování činného výkonu musíme provádět snižováním paralelní kapacity C.

Pokud bychom chtěli určit rozsah regulace, tj. určit, jak dalece je možno snížit činný výkon (přičemž se musí vzít v úvahu, že se bude zhoršovat účinek), znamenalo by to provést podrobný rezbor podložený větším počtem měření.



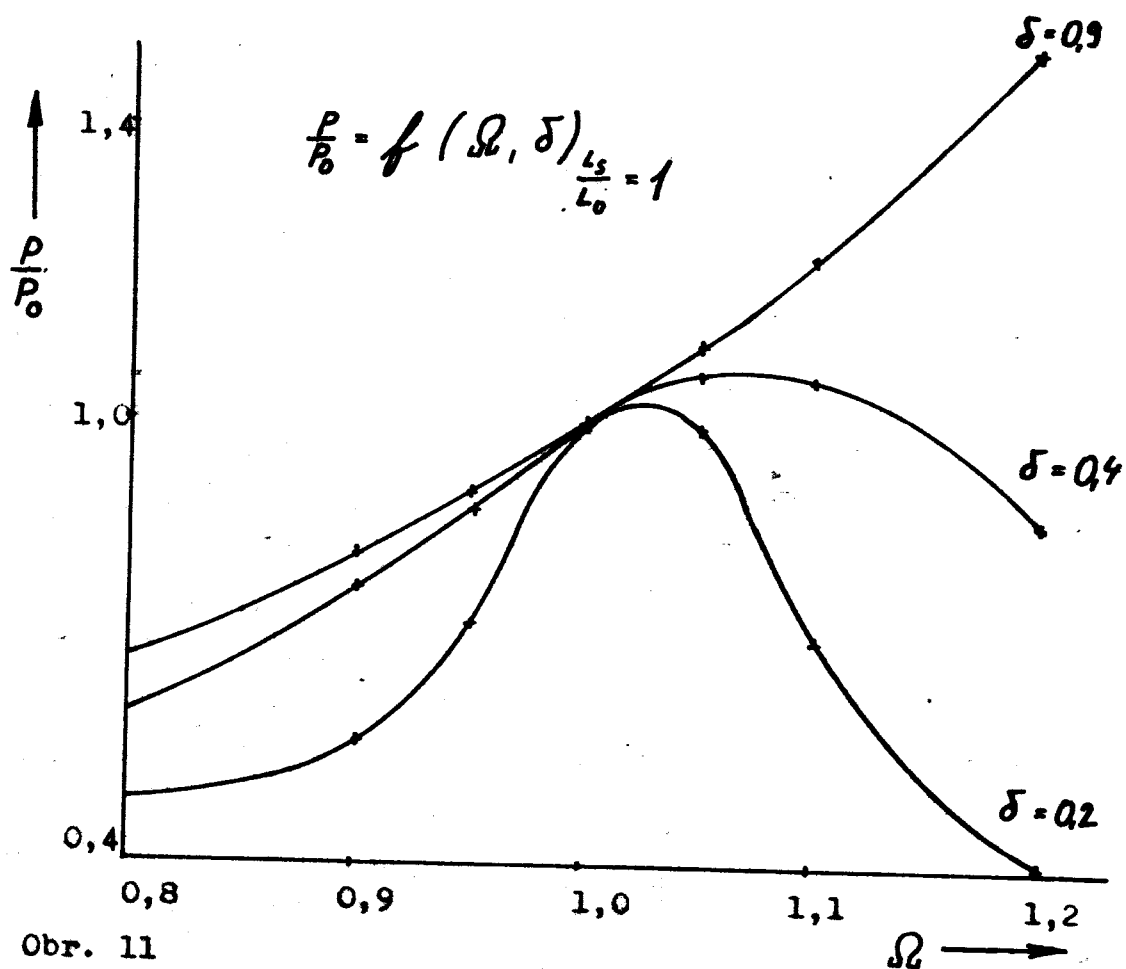
Obr. 9

Závislosti poměrné reaktance ξ na poměrném kmitočtu při činiteli útlumu $\delta = 0,9; 0,4; 0,2$ a při $\frac{L_2}{L_0} = 1$



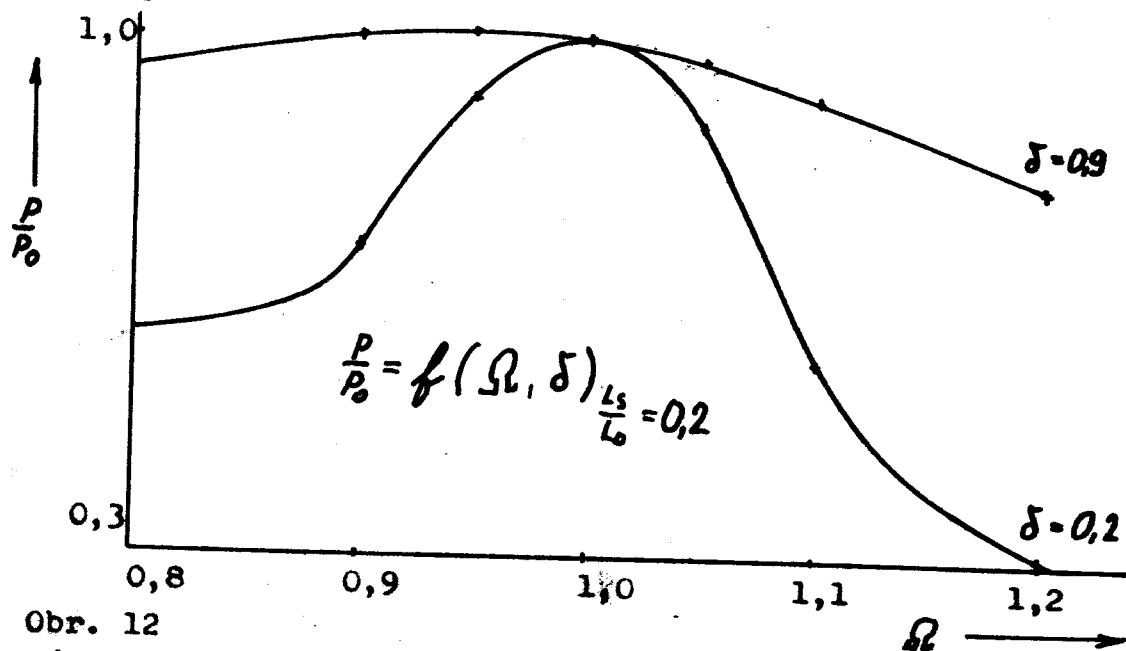
Obr. 10

Závislosti poměrné reaktance ξ na poměrném kmitočtu při činiteli útlumu $\delta = 0,9; 0,2$ a při $\frac{L_c}{L_0} = 1$



Obr. 11

Záv. poměrného činného výkonu $\frac{P}{P_0}$ na Ω pro $\delta = 0,9; 0,4; 0,2$ při $\frac{L_s}{L_0} = 1$



Obr. 12

Záv. poměrného činného výkonu $\frac{P}{P_0}$ na Ω pro $\delta = 0,9; 0,2$ při $\frac{L_s}{L_0} = 0,2$

2.4. Regulační obvod a popis jeho činnosti

Jestliže máme navrhnout regulační obvod, musíme nejprve shrnout všechny požadavky, které na něj klademe. Já jsem si zadal tyto požadavky:

- 1) Měřit teplotu ohřívajícího kusu materiálu, který je na konci induktoru a má být vysunut z ohříváče.
- 2) Spustit mechanismus, který posouvá materiál v induktoru, jestliže teplota posledního kusu dosáhne požadované (nastavené) hodnoty.
- 3) Zajistit, aby se studený, nedostatečně ohřátý nebo přehřátý kus nedostal na dopravník ke kovacímu lisu.
- 4) Snížit nebo zvýšit příkon (a tím i prodloužit nebo zkrátit dobu ohřevu) podle toho, jak se změnil rytmus práce na kovacím stroji.
- 5) Vypnout ohříváč, jestliže na kovacím lisu vznikla nějaká závada a lis byl zastaven.
- 6) Zastavit ohříváč, jestliže se polotovary v induktoru neposouvají a začnou se přehřívat.
- 7) Umožnit: a) ovládání posouvacího mechanismu, které je ruční: nutně při spouštění ohříváče;
b) vypnutí ohříváče.
- 8) Umožnit dělníkovi obsluhujícímu lis, aby mohl ze svého pracoviště kontrolovat teplotu (pokud by byl k dispozici ukazovací přístroj, jenž by byl schopen snášet podmínky na pracovišti, tj. otřesy).
- 9) Indikovat stavy: neoheřatý materiál, materiál ohřát na kovací teplotu, přehřátý materiál. Popřípadě indikovat ještě jiné stavy: snížený výkon, zvýšený výkon, ohříváč vypnut.

Podle uvedených požadavků jsem navrhl blokové schéma regulačního obvodu, které je na obr.13 ..

Popis činnosti:

ST - Snímač teploty viz kap. 3.

VO - Vyhodnocovací obvod - obsahuje obvod, který s foto-transistorem v ST převádí měřenou veličinu (teplotu) na veličinu elektrickou, tj. buď na napětí nebo proud. Tato veličina se vede přímo do ukazovacího přístroje a také do dalšího obvodu, kde se porovnává s hodnotami nastavenými. Jestliže dosáhne této hodnoty, pak z obvodu vyjde signál, který znamená, že materiál dosáhl nastavené teploty τ_2 . Tato veličina se nastaví na neoptimálnější hodnotu v rozsahu 1150 - 1200 °C. Pro výstup q z VO platí:

$$\tau \geq \tau_2 \quad \dots \quad q = 1$$

$$\tau < \tau_2 \quad \dots \quad q = 0$$

UP - Ukazovací přístroj - je to v podstatě ručičkové el. měřidlo, které je ocejchováno ve °C.

PV2 - Pneumatický ventil - je to dvojdílný ventil elektricky ovládaný, který pouští vzduch buď nad píst nebo pod píst pneumatického válce V2. Dále zde musí být blokování ventilu, jestliže přichází signál od KS1.

V2 - Pneumatický válec výhybky, který má dvě činné polohy. Buď otočí výhybku směrem na pás nebo do bedny. Válec společně s ventilem PV2 pracují podle této logiky:

$$x = 1 ; \quad y = 0 \quad \dots \quad \text{do bedny}$$

$$x = 0 ; \quad y = 1 \quad \dots \quad \text{na pás}$$

Pro x a y platí:

$$x = s \vee p ; \quad y = 0$$

PV1 - Pneumatický ventil, který ovládá jednočinný pneumatický válec V1.

V1 - Jednočinný pneumatický válec, který posouvá poletovary v induktoru (a vrací se sám do výchozí polohy).

Pro pneumatický ventil a válec platí:

$$q = 1 \quad \dots \quad \text{posun materiálu}$$

$$q = 0 \quad \dots \quad \text{válec stojí}$$

P - Indikační panel umístěný v dohledu obsluhy lisu.

Obsahuje žárovky indikující studený ($\check{Z}_1$), ohřátý ($\check{Z}_2$) a přehřátý materiál ($\check{Z}_3$) a indikaci vypnutí ohříváče ($\check{Z}_4$).

- TL1 - Tlačítko, sloužící k ručnímu ovládní pneumatického válce posunu materiálu. Mělo by být v blízkosti tlačítka, kterým se spouští ohříváč, aby obsluha mohla naplnit induktor ihned po spuštění ohříváče.
- SP - Snímač přítomnosti ohřátého kusu - pracuje na podobném principu jako ST. Indikuje přítomnost ohřátého materiálu (v prostoru lisu), který je připraven ke kování.
- ČO - Časovací obvod - je to obvod, jenž měří čas, po který leží ohřátý kus materiálu v pracovním prostoru lisu, než jej dělník vloží do zápusky. Tento čas je měřítkem toho, jak rychle stačí obsluha odebírat ohřátý materiál, tedy určuje, zda je ohřev rychlejší či pomalejší, než proces kování. Dále tento obvod pomocí R1, R2, ... zapíná stykače kondenzátoru, tj. přiladuje nebo naladuje rezonanční obvod induktoru a tím zvyšuje nebo snižuje činný výkon ohříváče.
- R1, R2 ... - Pomocná relé ovládníci stykače kondenzátoru.
- KS2 - Konecový spínač (případně jeden kontakt vačkového kombinovaného spínače), který indikuje, že lis stojí (v horní poloze).
- RO - Rozhodovací obvod - je to logický obvod, který vyšle signál $\bar{q}$, jestliže je splněna podmínka $\bar{b}$ a během trvání $\bar{b}$ přijde dvakrát signál q . Znamená to, že obvod vyšle signál k vypnutí ohříváče, jestliže lis stojí a po dobu, co stojí, ohřeje ohříváč další dva kusy materiálu.
- PR - Pomocné relé - rozpínací relé hlavního stykače ohříváčího stroje. Rozepne přidržovací obvod hlavního stykače a tím vypne ohříváč.
- KS1 - Konecový spínač - indikuje, že pneumatický válec je v zadní poloze.
- TL2 - Tlačítko pro vypnutí ohříváče.

Požadavky na vlastnosti:

- 1) Jednoduchá obsluha
- 2) Musí odolávat podmínkám v kovárně (otřesy, teplota, prašnost, hrubé zacházení)
- 3) Nemá přetáčet obsluhu
- 4) Ovládací prvky v dosahu obsluhy
- 5) Indikační prvky v dohledu obsluhy
- 6) Odolnost proti rušení ze sítě a VF polem.

Tento navržený regulační obvod je možné realizovat samozřejmě i ve zjednodušené formě, upustíme-li od některých požadavků. Ze elektrické stránky jsou některé obvody dosti jednoduché, uvážíme-li použití polovodičových prvků (například integrovaných obvodů TTL), což se také projeví v dobré provozní spolehlivosti.

2.5. Popis statických měničů a porovnání s navrženou koncepcí

Středofrekvenční statický měnič je v dnešní době nejmodernějším zdrojem stř. elektrické energie pro indukční ohřev v kovárně.

Měnič se skládá z napájecího transformátoru, který slouží ke galvanickému oddělení měniče od napájecí sítě a který dále vytváří potřebný napěťový převod z vn sítě na vstupní, na měnič. Dále následuje trojfázový šestipolární celokřízený usměrňovač, který usměrní střídavý proud na proud stejnosměrný. Pro vyhlazení tohoto proudu a pro oddělení obou obvodů slouží meziobvodová tlumivka. Za ní následuje tyristorový střídač, který vytvoří ze stejnosměrného proudu proud střídavý, střední frekvence, obdélníkového průběhu, jímž se napájí ohříváče.

Statické měniče mají několik nesporných předností. Je to především jejich velká účinnost (nad 90 %), poktevé spouštění umožňující vypnutí i při krátkodobém přerušení provozu a tím prakticky vyloučení ztrát vznikajících při ohodu na-prázdko. Dále je to snadná regulace a schopnost rychlého při-

způsobení požadavků technologie. Statické měniče, na rozdíl od měničů rotačních mají frekvenci proměnnou - je totiž komutována topným (paralelním případně paralelně-seriovým oscilačním) obvodem ohříváče. Tím je zaručeno, že tento obvod je stále v rezonanci a odpadá zde doladování kapacity během provozu.

Z principu však plynou i některé nedostatky nebo spíše konstrukční problémy, jako například rušení vyššími harmonickými, které jsou obsaženy v nasinusovém (oběšníkovém) průběhu generovaného střídavého proudu. Oscilační obvod ohříváče totiž zpracuje činnou složku výkonu první harmonické. Další problém vzniká při regulaci výkonu snižováním stejnosměrného napětí na řízeném usměrňovači. Při snižování napětí, řízení thyristorů v usměrňovači se statický měnič vzhledem k síti začne chovat jako indukční zátěž, začne se tím tedy zhoršovat účinník v napájecí síti a také poněkud účinnost vlastního měniče.

Typová řada statických měničů SMK, kterou n. p. ZEZ Praha nabízí pro kovářnu v AZMP byla převážně podobně navržena pro těžší provozy s většími hodinovými výkony kovaného materiálu. Srovnáme-li tyto výkony s hodnotami z pracovních postupů (viz tab. 1 a příklad výpočtu v kap. 2.2.), zjistíme, že by měniče pracovaly v průměru méně než na 50 % výkonu. Pokud by tento výkon byl snížen na řízeném usměrňovači, vzniká zde právě výše uvedený problém s účinníkem.

Dalším problémem je, že výrobce dodává k ohřívacím strojům typu ITO, jenž jsou přiřazeny k těmto měničům, jen velmi řídko odstupňovanou sadu induktorů. Vzhledem k účinnosti ohřevu je velmi důležitá, aby rozdíl mezi jmenovitým průměrem induktoru a průměrem ohřívajícího materiálu byl co nejmenší. Potvrzují to také desavadní zkušenosti z provozu. Podle [7] do 25 % rozdílu průměrů vzrůstá měrná spotřeba energie o polovinu procent rozdílu. Jestliže je tento rozdíl větší, pak spotřeba roste mnohem rychleji. Porovnáním nabízených induktorů se sortimentem používaného materiálu zjistíme, že by nakonec celková účinnost soustavy měnič - ohříváč byla menší než u stávajícího zařízení, tj. že by spotřeba elektrické energie na vstupních svorkách statického měniče byla větší než desavadní spotřeba 0,6 kWh/kg.

U soustavy statický měnič - ohřivač předpokládám, že je již vybavena automatickou regulací doby ohřevu a měření teploty podobně, jak je to navrhováno v předchozích kapitolách pro napájení z rotačních měničů. U navržené koncepce však nemůžeme nikdy dosáhnout tak velký rozsah automatické regulace, jak je tomu u měničů statických (viz kap. 2.3.).

Podle výše uvedeného je velkou předností statických měničů jejich pohotovost spouštění umožňující automaticky vypínat ohřev i během provozu. Jestliže se to děje na řízeném naměřovači ve chvíli, kdy okamžitá hodnota střídavého proudu je právě rovna nule, nevznikají ani proudové nárazy do sítě. Rotační měniče jsou naopak v nepřetržitém chodu (viz kap. 1.1.) a ani ohřivače samotné nemají možno automaticky zapínat (viz kap. 2.3.).

U statických měničů se dá také předpokládat jejich další vývoj a inovace, kdežto vývoj rotačních měničů je už prakticky u konce. Například nejnovější rotační měniče firmy Siemens mají velmi vhodné parametry a nyní používanými měniči, které jsou vyráběny od roku 1969 (pouze účinnost je o 5 % větší).

3. Návrh způsobu kontroly teploty při ohřívání a využití výsledků měření k regulaci přikovu ohříváče

Z podmínek, za kterých má být měření teploty prováděno, tj. uvnitř indukteru, na povrchu polotovarů, plyne, že měření musí být prováděno bezkontaktně.

Bezkontaktní teploměry - pyrometry využívají k měření teploty tepelného záření. V oblasti viditelného záření se pohybuje rozsah měření od 600°C až do 3500 (5000°C).

3.1. Rozdělení pyrometrů a posouzení možnosti použití

Podle principu lze rozdělit pyrometry do tří skupin [3]:

- 1) pyrometry radiální - k měření teploty využívají záření všech vlnových délek, tedy záření celkového.
- 2) pyrometry spektrální - k měření teploty využívají záření pouze určité vlnové délky (tav. jasevé nebo optické pyrometry).
- 3) pyrometry barvé - k měření teploty využívají barvy tepelného záření.

V dosavadní praxi používají v kovárně pyrometr spektrální, kterým obaluh kontroluje teplotu pouze několikrát za směnu. Aby mohla být prováděna kontrola teploty nepřetržitě u každého kusu, který má opustit ohříváčku bez nároku na další pracovní sílu, je nutno použít pyrometru, který by pracoval samočinně. Zde se nabízí použití pyrometru radiálního. Tyto pracují tak, že soustava čoček nebo zrcadel soustřeďuje tepelné záření na přijímač. Tím může být termoelektrický článok, termistor, bimetal nebo fotočlánky. Ještě lépe je možno použít pyrometr intenzitový. Je to v podstatě upravený pyrometr radiální. Liší se od něho buď tím, že mezi zářič a přijímač je zařazen monochromatický filtr nebo tím, že přijímač pohlcuje záření pouze určité vlnové délky. U těchto pyrometrů se obvykle používají fotočlánky, protože činná vstava fotočlánku je citlivá na záření v oblasti určitých vlnových délek.

3.2. Problém závislosti vlnové délky a intenzity světla na teplotě

Při volbě metody měření a volbě vhodného přijímače záření je nutno vycházet ze znalosti zákonitostí vztahů záření - teplota /3, 4/. Pro zjednodušení předpokládám záření žhavého polotovaru v dutině induktoru jako záření černého tělesa.

Za prvé zde platí Wienův zákon posunu:

$$\lambda^{\circ} T = b \quad b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{deg}$$

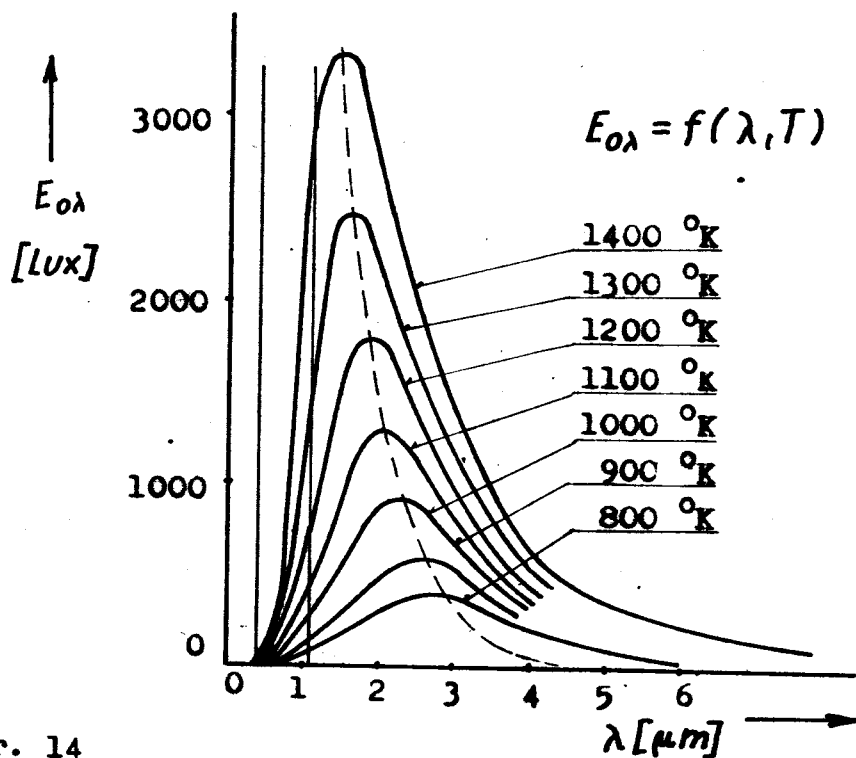
Z něho plyne, že se maximum monochromatického vyzařování s rostoucí absolutní teplotou posouvá ke kratším vlnovým délkám. Souhlasí to se známou zkušeností, že se s tečupající teplotou přechází barva žhavého tělesa od červené ke žluté, která se stává stále bělejší. Dále zde platí Stefanův-Boltzmannův zákon:

$$H_0 = \sigma T^4 \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{deg}^{-4}$$

který říká, že celková intenzita tepelného záření H_0 vyzařované černým zářičem je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty. Obě zákony jsou zahrnuty v Planckově zákonu spektrálního rozdělení monochromatického vyzařování:

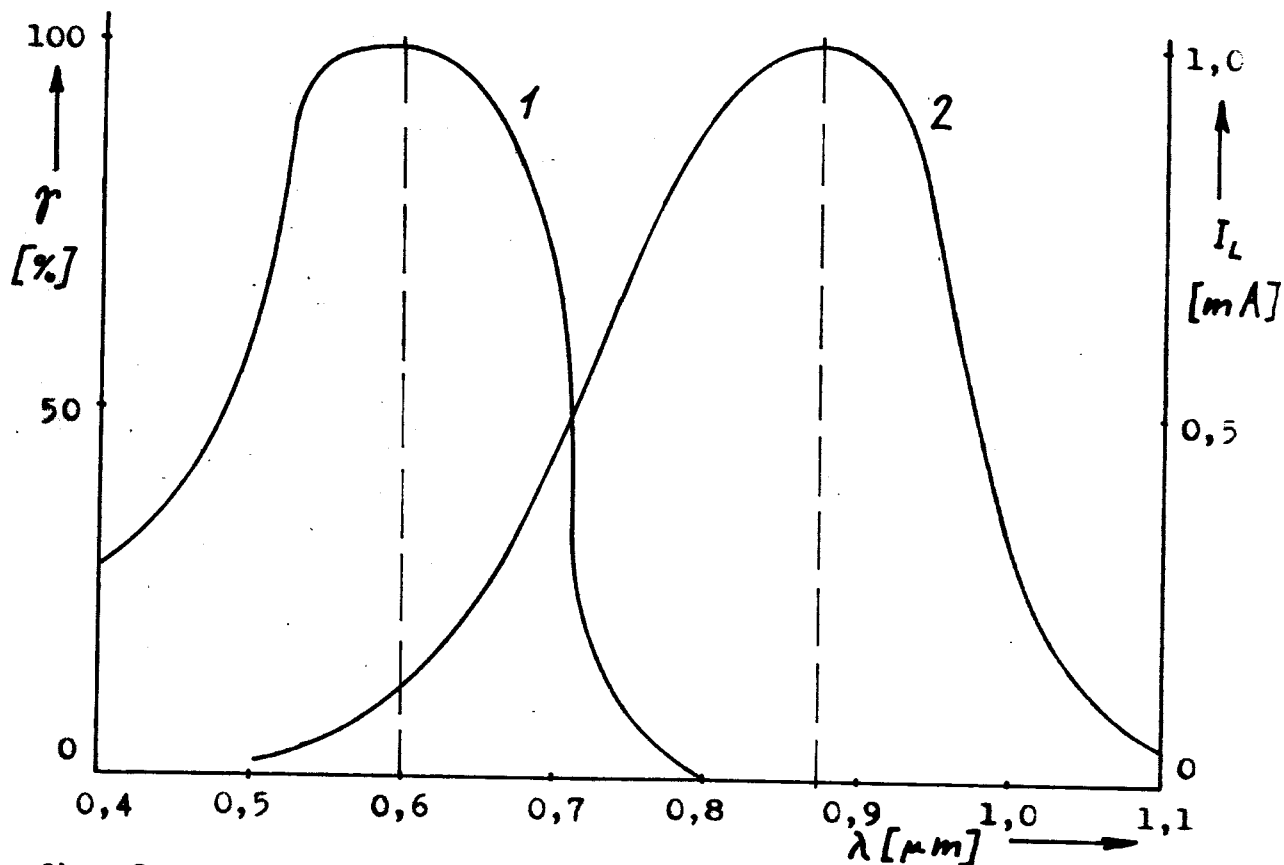
$$H_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (16)$$

Podle něho můžeme konstruovat graf závislosti intenzity spektrálního záření černého tělesa na vlnové délce při různých teplotách. Z grafu je zřejmé, že s rostoucí teplotou roste urychleně plocha křivky rovně úměrně září a zároveň se maximum křivky posouvá ke kratším vlnovým délkám. Obr. 14



Obr. 14

Intenzita spektrálního záření černého tělesa v závislosti na vlnové délce a teplotě /4/



Obr. 15

Spektrální charakteristika fotoodporů 1 a kř. fotony 2 /14,15/

3.3. Porovnání fotočlánků a posouzení jejich použití jako přijímače světelného záření

U nás se vyrábí několik typů křemíkových a germaniových fotonek a fotoodporů, jejichž světlocitlivá vrstva je tvořena sítíkem kadmiovým nebo sítíkem olovnatým:

WK 650 36a	1	W	
WK 650 37	0,15W		plošné
WK 650 49	0,1 W		
WK 650 60			
WK 650 61			
WK 650 66	0,05W		napařované
WK 650 67			
WK 650 68			
WK 650 69	-		PbS

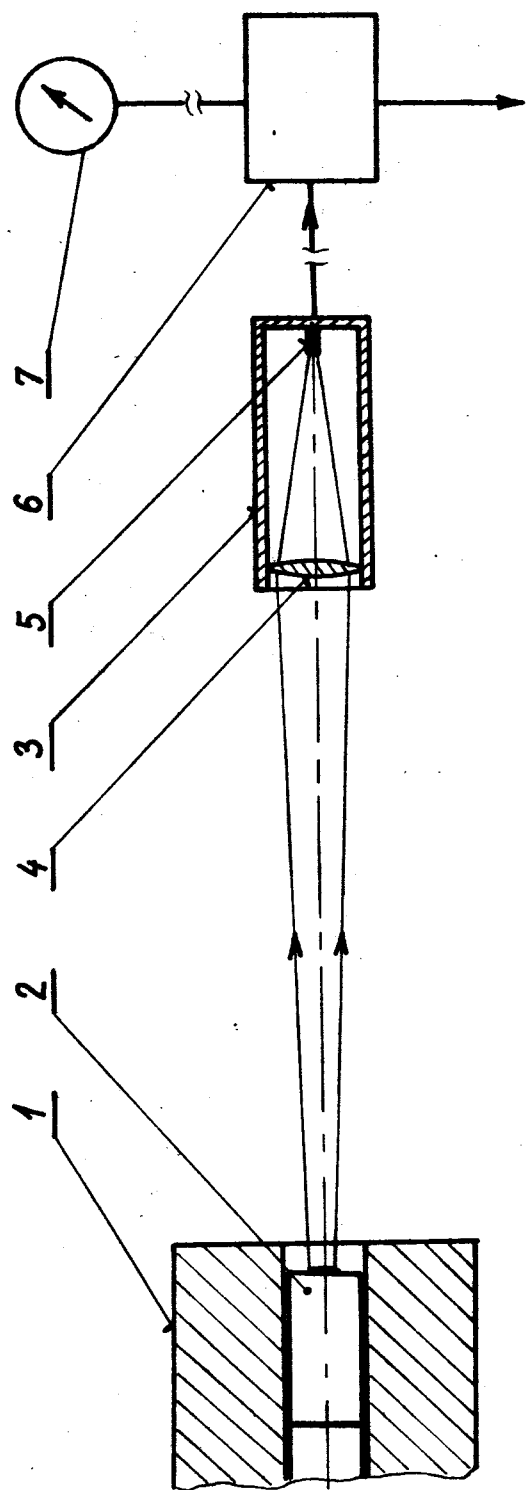
Křemíkové fotonky:

KP 101 - (fototranzistor typu NPN)

1 PP 75 - určená pro měření a regulaci

Subminiaturní germaniová fotodioda 10 PH 40 - pro snímání údajů z černé pásky

Srovnáme-li spektrální charakteristiky fototranzistorů a křemíkových fotonek obr. 15 s grafem intenzity spektrálního záření černého tělesa obr. 14, vidíme, že jsou nejvhodnější křemíkové fotonky, protože fotonky mají maximum spektrální citlivosti vzhledem k fotoodporům posunuto poněkud doprava k delším vlnovým délkám, což je v našem případě výhodné. Zvláště vhodná je fotonka typu KP 101, protože má malou světlocitlivou plošku a ve srovnání s typem 1 PP 75 je několikanásobně citlivější. Křemíkové fotonky mohou také spolehlivě pracovat při vyšších teplotách okolí a jejich parametry jsou méně ovlivňovány teplotou okolí než např. u germaniových fotodiód.



Obr. 16

Schéma snímáče teploty

- 1 ... konec induktoru
- 2 ... ohřátý materiál
- 3 ... těleso přístroje
- 4 ... spojná čočka

- 5 ... křemíková fotodka KP 101
- 6 ... vyhodnocovací obvod
- 7 ... ukazovací přístroj

3.4. Vlastní návrh

Jestliže předpokládáme měření teploty v rozsahu $1100^{\circ}\text{C} - 1300^{\circ}\text{C}$ a vezmeme-li v úvahu také ekonomickou stránku problému, dojdeme k závěru, že není nutno použít univerzální měřicí přístroj (pyrometr). Stačí jednoduchý jednoúčelový přístroj na principu intenzitového pyrometru, jenž bude mít v tomto úzkém měřicím rozsahu dostačující přesnost a který lze lehce skonstruovat. Jeho nastavení by bylo možné nejjednodušší provést přímo za provozu pomocí doposud používaného pyrometru optického - spektrálního.

Schéma navrhovaného zařízení je na obr. 16. Světelné záření vysařované žhavým polotvarem na konci induktoru je soustřeďováno spojnou čočkou na fototransistor KP 101. Ten převede měřenou veličinu na veličinu elektrickou, která se ve vyhodnocovacím obvodu zesiluje a porovnává s předem nastavenou hodnotou. Výsledkem tohoto porovnání je určitý elektrický impuls, jenž je veden do dalších regulačních obvodů. Současně je zde připojen ukazovací přístroj, který je přímo ocejchován ve $^{\circ}\text{C}$.

3.5. Ověření v praxi

Zde je nutno se zmínit o tom, že tento problém kontroly teploty se stal již předmětem zlepšovacího návrhu pracovníků kovárny. Bylo navrženo a skonstruováno zařízení, které je již ve zkušebním provozu na jednom ohříváči.

Zařízení měří teplotu kusů materiálu na konci induktoru. Pokud není kus, který je vysunut z induktoru, ohřát na předepsanou teplotu, nepustí jej jednoduchá vřhybka na dopravník ke kovacímu lisu, nýbrž spadne do bedny. Po vychlazení se tento kus může znovu použít.

Snímač teploty tohoto zařízení pracuje na principu pyrometru, kde jako přijímače je použito fototransistoru. Na první pohled je patrné, že neodstraní stráty tepelné energie, která se spotřebovala na ohřev kusů spadlých do bedny.

Teoretické závěry v této kapitole však plně potvrzují způsob měření teploty, který je použit u tohoto zlepšovacího návrhu.

4. Ekonomický rozbor

Máme-li vyjádřit ekonomický efekt navržené rekonstrukce, musíme určit za prvé, o kolik se sníží veškeré výrobní náklady a za druhé, jaké budou náklady na rekonstrukci.

V našem konkrétním případě, tj. v kovárně s indukčním ohřevem, bude převážnou část úspor výrobních nákladů tvořit úspora elektrické energie. Tuto lze vypočítat pomocí měrné spotřeby elektrické energie na 1 kg ohřátého materiálu, za předpokladu, že určíme měrnou spotřebu rekonstruovaného ohřívacího zařízení.

Měrná spotřeba S_1 na svorkách ohříváče je určena vztahem:

$$S_1 = \frac{P}{P_h}$$

kde P je elektrický příkon na svorkách ohříváče v kW

P_h hodinový výkon ohříváče v kg/h ohřátého materiálu na kovací teplotu.

Dosazením jmenovitých hodnot P a P_h nám vyjde u všech použitých ohříváčů typu ISOK hodnota $S_1 = 0,4$ kWh/kg.

Měrná spotřeba S_2 (na vstupních svorkách rotačního měniče) je ještě zvětšena o účinnost měniče η , a tak:

$$S_2 = S_1 \frac{1}{\eta}$$

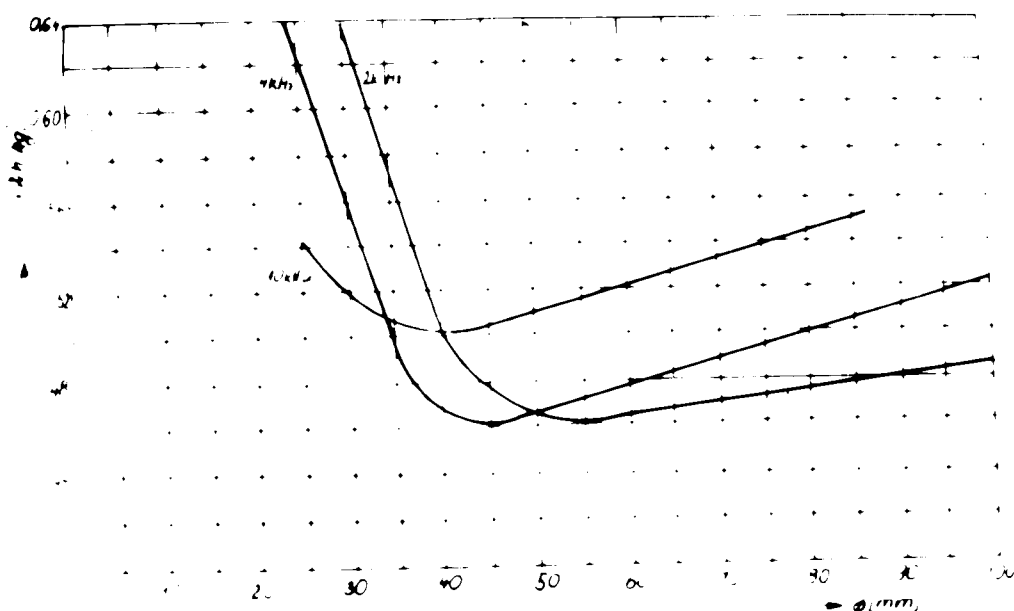
Účinnost η středofrekvenčního rotačního měniče FZ 13a 4/4 je podle katalogu 81,5 % a tak tedy $S_2 = 0,495$ kWh/kg.

Tato hodnota je pro nejpoužívanější průměr mat. 40 mm podle grafu na obr. 17 dokonce rovna 0,47 kWh/kg.

K této spotřebě se však přičte ještě ekvivalentní část spotřeby rotačních měničů při chodu naprázdno.

Dále předpokládáme, že z celkového počtu 14-ti měničů je v trvalém provozu 10. Jejich příkon při chodu naprázdno činí 400 kWh.

Pro výrobu 200 000 vozů musí kovárna vykovat 13 100 tun výkovků, při koeficientu využití materiálu 1,26 to znamená, že je nutno ohřát 16 500 tun materiálu za rok. Vynásobíme-li to S_2 , pak spotřeba elektrické energie činí 8 150 MWh. Aby



Obr. 17

Měrná spotřeba síťové elektrické energie pro indukční ohřev ocelí na kovací teplotu /7/

tuto roční spotřebu přeměnily rotační generátory na energii středofrekvenční při předpokládaném průměrném zatížení 85%, musí pracovat 3 410 hodin. Po zbylý čas (bez sobot a nedělí a závodní dovolené), tj. 2466 hodin běží naprázdno, takže jejich spotřeba naprázdno činí 983 MWh za rok. Výsledná celková spotřeba el. energie pro ohřev je tedy 9 133 MWh, což odpovídá měrné spotřebě 0,554 kWh/kg. Stávající spotřeba je 0,6 kWh/kg.

Z těchto propočtů je vidět, že optimalizací provozu na ohřívacím stroji je možno ušetřit 7,65% el. energie, což je 700 MWh, tj. 230 000 Kčs.

Náklady na rekonstrukci se dají prozatím pouze odhadnout, že budou pravděpodobně menší než roční úspora elektrické energie. Znamená to, že doba úhrady nové investice by byla kratší než 1 rok.

Závěrem je nutno zdůraznit, že navrhovaná rekonstrukce se mnohem více odrazí ve zvýšení kvality výkovků, produktivity práce, životnosti zárustek a poklesu zmetkovitosti. Tento ekonomický efekt se však nedá předem vyčíslit.

Závěr

Tato práce byla zaměřena na technologické i ekonomické problémy dosavadního provozu kovárny v AZNP Mladá Boleslav. Cílem bylo navrhnout neoptimálnější rekonstrukci měnírny a ohřivačů za daných podmínek, t.j. použít rotační měniče pro napájení ohřivačů a uskutečnit celou rekonstrukci měnírny během provozu, aniž by se vážně narušila výroba.

Již z počátku bylo jasné, že má-li být použito k napájení ohřivačů rotačních měničů, bude nejlépe ponechat stávající zařízení a jít cestou automatické regulace a optimalizace procesu ohřevu materiálu.

Jelikož měniče umístěné v měnárně pracují paralelně do společné sítě, ponechává je tato práce v původním stavu. Paralelní chod totiž skýtá dosti velké výhody /viz kap.1/. A tak nám zůstává řešit problém regulace a automatizace na samotném ohřívacím stroji. Regulací výkonu a doby ohřevu se zabývá kap.2., kde je také uvedeno regulační schéma. Problém automatického měření teploty je vyřešen v kap.3., kde je také schéma navrženého měřicího zařízení.

V kapitole 4. je vyčíslen maximální ekonomický efekt, kterého by tato rekonstrukce mohla dosáhnout v oblasti spotřeby elektrické energie. Je zde také naznačeno, že doba úhrady nové investice bude kratší než jeden rok. Její hlavní efekt však spočívá v tom, že zvýší produktivitu práce, rozměrovou stálost výkovků, zlepší koeficient využití materiálu /protože se sníží zmetkovitost/ a bude mít také pozitivní vliv na životnost zápusťek.

Závěrem je nutno upozornit, že pokud bude v tomto směru prováděna další práce, měla by se zaměřit hlavně na zjištění rozsahu regulace /viz kap.2.3./, který bude hlavním kritériem při hodnocení této koncepce.

Literatura

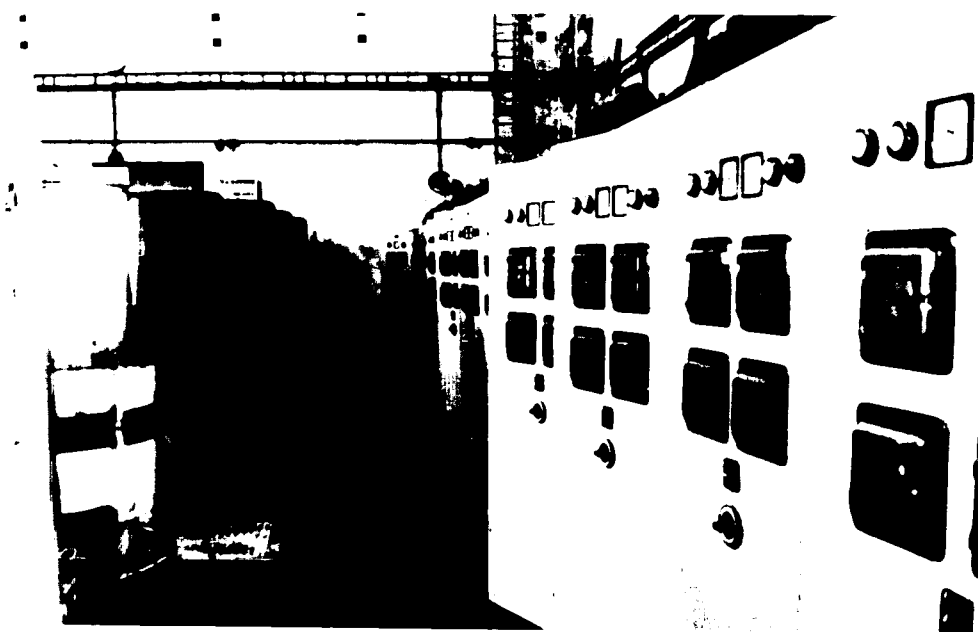
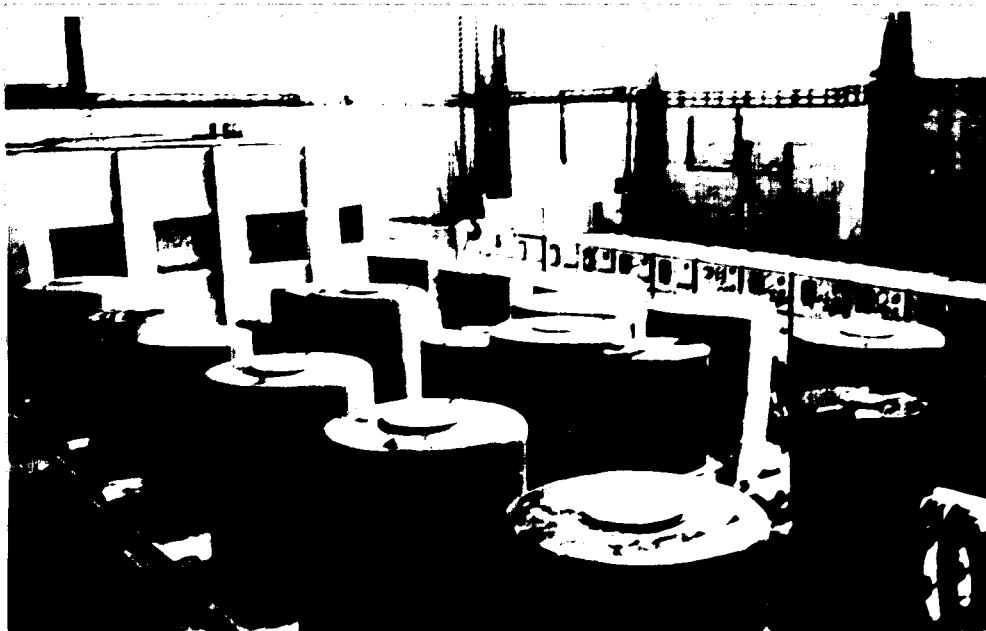
- /1/ Čabelka J. Mechanická technológia, SAV Bratislava 1967
- /2/ Sandler Polovodičové meniče kmitočtů
- /3/ Jenčík J., Vecetka J. Měření tepelných veličin v automatizaci, SNTL Praha 1967
- /4/ Horák Z., Krupka F. Fyzika, SNTL Praha 1966
- /5/ Bašta, Chaládek, Mayer Teorie elektrických strojů
- /6/ Stivín J. a kol. Vysokofrekvenční ohřev v průmyslu I SNTL Praha 1955
- /7/ Hašek V. a kol. Kování, SNTL Praha 1965
- /8/ Macháček Z. Ohřev kovů, učební texty VŠ, SNTL Praha 1967
- /9/ Podnikové podklady AZNP Mladá Boleslav
- /10/ Sborník přednášek, proslouvených v rámci sympézia
"Elektrický ohřev ve slévárnách a kovospracovatelském průmyslu", organizovaného firmou Brown, Boveri & CIE.,
v Bratislavě ve dnech 20. a 21. 3. 1972 a v Praze
ve dnech 23. a 24. 3. 1972
- /11/ Katalog: Středofrekvenční meniče kmitočtu výrobního podniku
BEZ Bratislava; číslo katalogu 15.02, ZSE Praha 1969
- /12/ Technický popis středofrekvenčního subového alternátoru
typu P 37/25-4; BEZ Bratislava

- /13/ Katalog firmy Siemens
- /14/ Příruční katalog součástek pro elektrotechniku
n. p. Tesla Lanškroun
- /15/ Sbělovací technika, ročník XVIII. 1970 str. 93

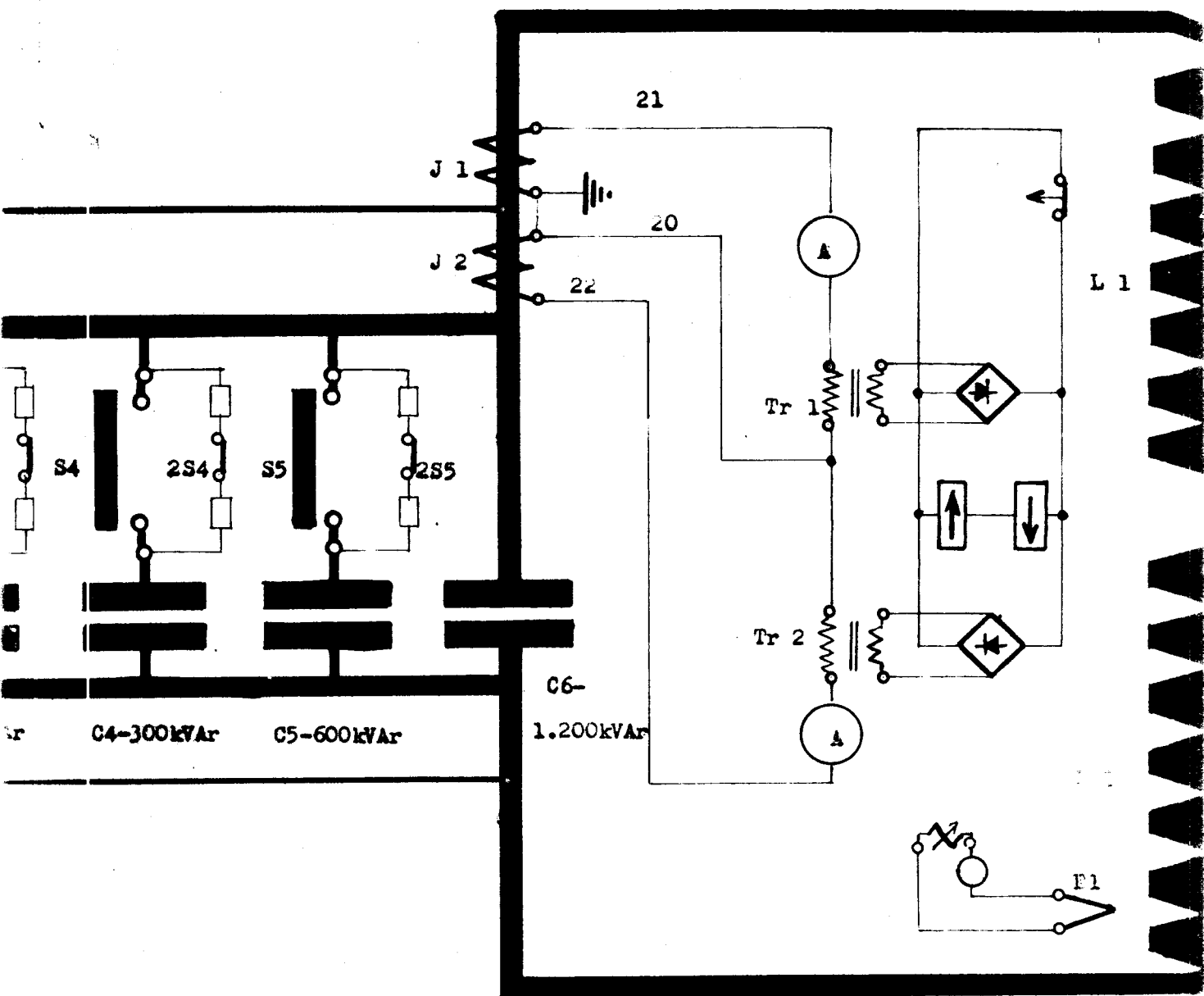
/13/ Katalog firmy Siemens

/14/ Příruční katalog součástek pro elektrotechniku
n. p. Tesla Lanškroun

/15/ Sbělovací technika, ročník XVIII. 1970 str. 93



Příloha č.3
Pohled do měnírny

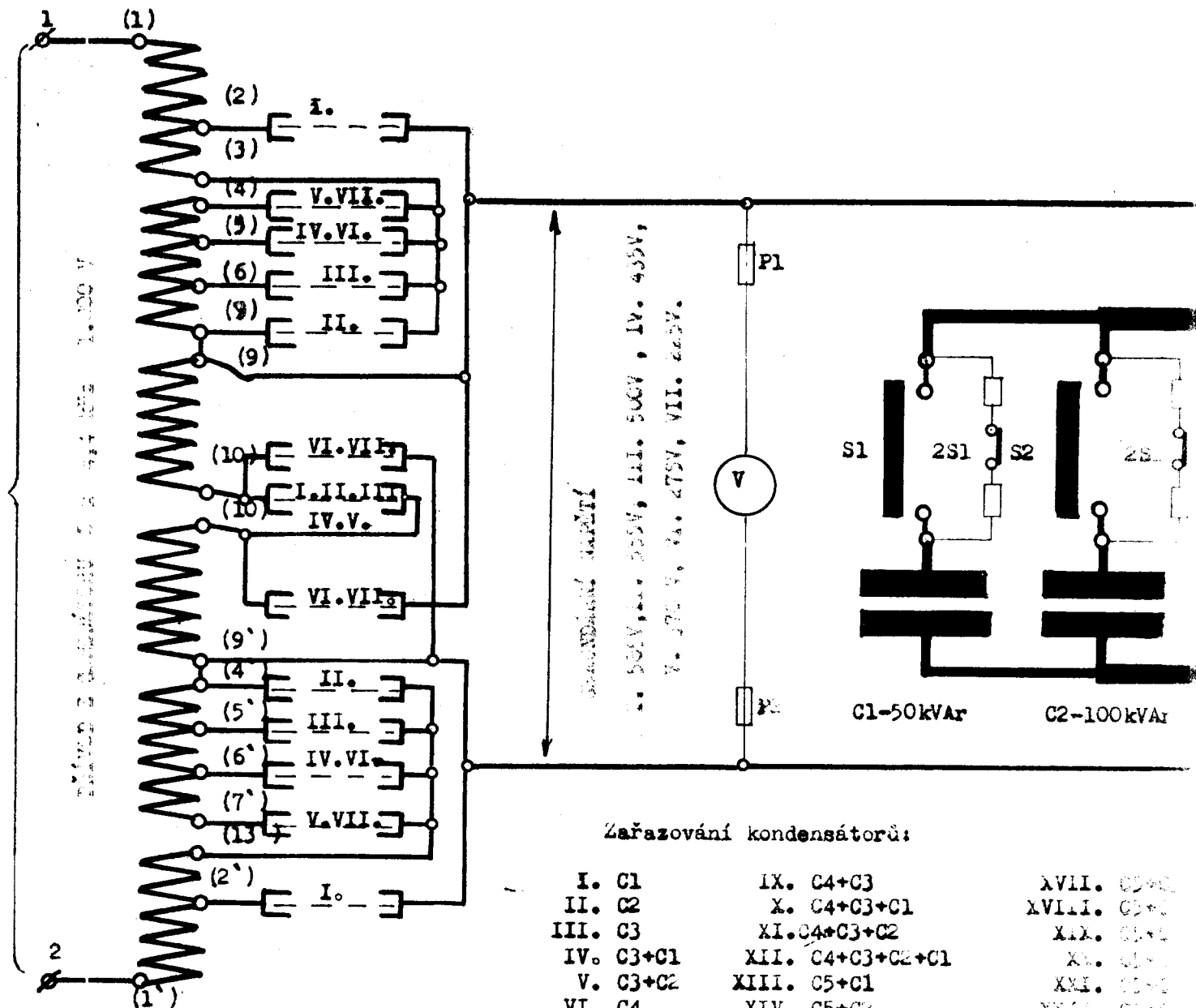


Příloha č. 2

1ETP

HP-20

TRAFO 1 400kVA



Zařazování kondenzátorů:

I. C1	IX. C4+C3	XVII. C5+C1
II. C2	X. C4+C3+C1	XVIII. C5+C1
III. C3	XI. C4+C3+C2	XIX. C5+C1
IV. C3+C1	XII. C4+C3+C2+C1	XX. C5+C1
V. C3+C2	XIII. C5+C1	XXI. C5+C1
VI. C4	XIV. C5+C2	XXII. C5+C1
VII. C4 +C1	XV. C5+C3	XXIII. C5+C1
VIII. C4+C2	XVI. C5+C3+C1	XXIV. C5+C1