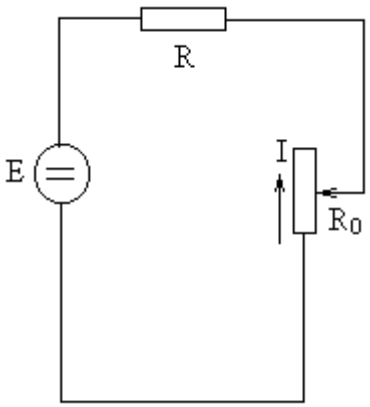
I. Teoretický rozbor elektrického oblouku

Vznik stejnosměrného oblouku v elektrickém poli

Vznik elektrického oblouku lze vysvětlit na jednoduchém případě elektrického obvodu napájeného ss zdrojem napětí E, obsahující regulační odpor R a proměnlivý odpor oblouku R_0 – obr. 1.1.

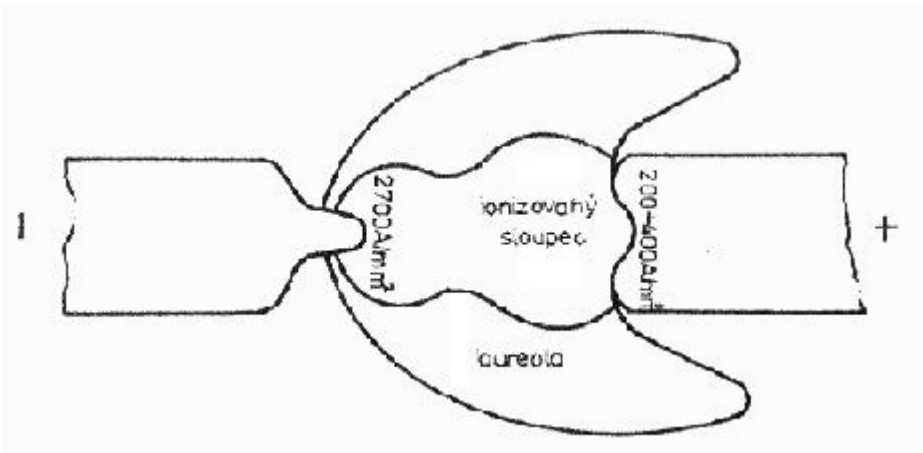
Oblouk vzniká mezi dvěma elektrodami. Přiblížíme-li obě elektrody ke vzájemnému dotyku, začne obvodem protékat proud I, daný veličinami obvodu E, R. Opatrným oddálením elektrod dochází ke vzniku elektrického oblouku, který hoří v parách materiálu elektrod a v částicích vzduchu.

Odpor elektrického oblouku R_0 se vyznačuje značnou nelineárnosti a závisí na charakteru oblouku.
Jeho velikost se mění od nulové hodnoty až po nekonečno.



Obr. 1.1

Obloukový výboj je složen z ionizovaného sloupce, kterým protéká proud a okolních plynů tzv. aureoly - obr 1.2.



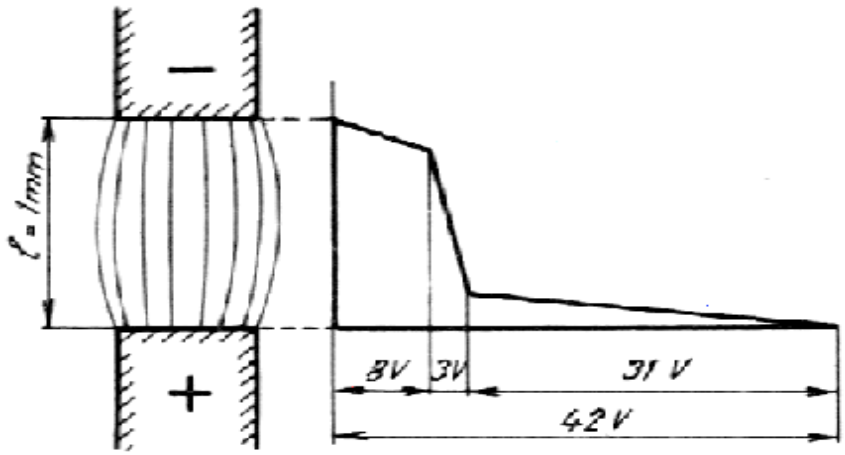
Obr. 1.2

Délka výboje je dána vzdálenosti elektrod (anody a katody). Při delším hoření oblouku dochází k tvarování katody do kužele a u anody dochází v její střední částí k prohloubení. Bezprostředně ke katodě přiléhá tzv. katodová oblast vodivého výboje. Velikost této oblasti je přibližně 10^{-5} cm a nezávisí na délce oblouku. V této katodové oblasti dochází k ionizaci. Uprostřed katodové oblasti se nachází tzv. katodová skvrna, kde je největší hustota proudu. Hustota proudu se zde pohybuje v rozmezí 2700 A/mm^2 až 2900 A/mm^2. Za katodovou oblastí následuje ionizovaný sloupec, tvořící nejdelší část vodivé cesty. V tomto ionizovaném sloupci se transformuje základní část elektrické energie na energii tepelnou. Za ionizovaným sloupcem se nachází anodová oblast. Velikost této anodové oblasti je nepatrná a stejně jako u

katodové oblasti nezávisí na délce oblouku. Uprostřed anodové oblasti se nachází anodová skvrna. Hustota proudu v této anodové skvrně se pohybuje v rozmezí 200 A/mm^2 až 600 A/mm^2.

Rozdělení napětí na oblouku

Rozdělení napětí na oblouku mezi dvěma uhlíkovými elektrodami ve vzduchu při vzdálenosti elektrod 1 mm a proudu 3 A je znázorněno na obr. 1.3.

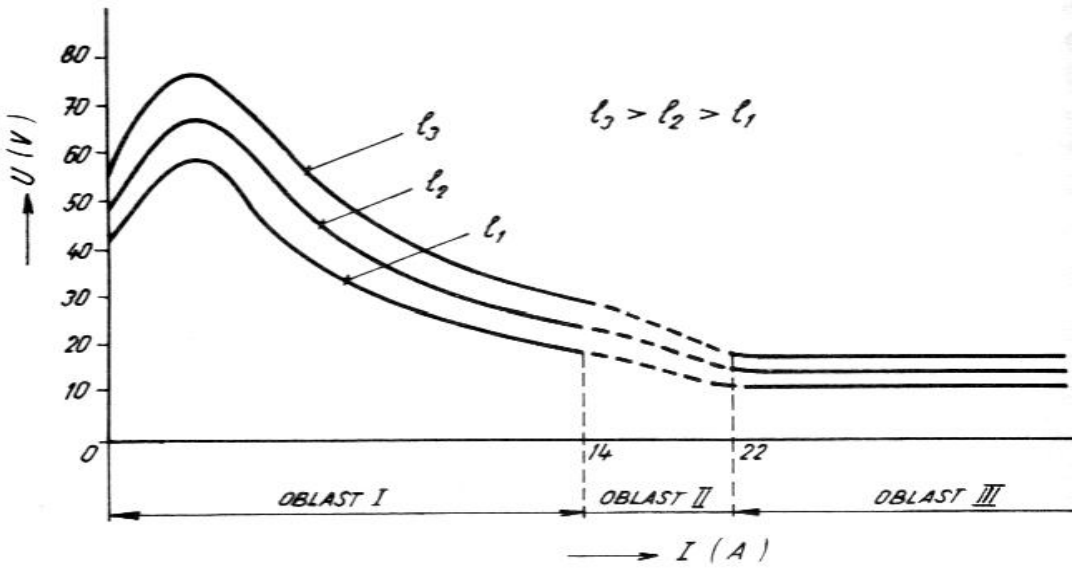


Obr. 1.3

Největší úbytek napětí spadá do oblasti anody, menší úbytek se pak projevuje v oblasti katody. Anodové a katodové úbytky napětí nejsou závislé na délce oblouku, ani na velikosti přiloženého napětí, ale jsou úměrné potenciálu ionizace plynu, nebo par oblouku.

Voltampérové charakteristiky stejnosměrného oblouku

Typický průběh voltampérové charakteristiky oblouku pro několik konstantních délek oblouku je uveden na obrázku obr. 1.4.



Obr. 1.4

Pro oblouk U = f(I) platí Ayrtonové formule

a) Pro oblast I tzv. klidný oblouk

$$U = a + bl + \frac{c + dl}{I}$$

kde a, b, c, d …konstanty závislé na materiálu elektrod

U …napětí na oblouku

I …proud oblouku

l … délka oblouku

V oblasti I je zřejmé, že oblouk má zápornou charakteristiku a musí být proto ke zdroji stejnosměrného napětí připojen se stabilizačním odporem. Ten se řadí s obloukem do série.

Oblast II je nestabilní mezi oblastmi I a III.

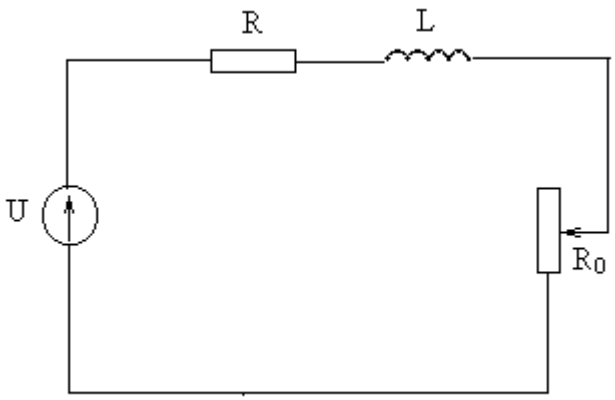
Oblast III je tzv. hlučící oblouk a platí:

U = a´ + b´l,

Kde konstanty a´ a b´ jsou jiné, než v oblasti I. Jestliže se pro danou délku oblouku proud zvětší (např. zmenšením odporu předřadného rezistoru při konstantním napětí zdroje), oblouk začne hučet.

Vznik střídavého oblouku

Obdobně jako u stejnosměrného oblouku , tak i u střídavého oblouku lze jeho vznik vysvětit na jednoduchém případě elektrického obvodu. Tento obvod tvoří prvky: střídavý zdroj U, činné odpory R a R_0 a indukčnost obvodu L – obr. 1.5.



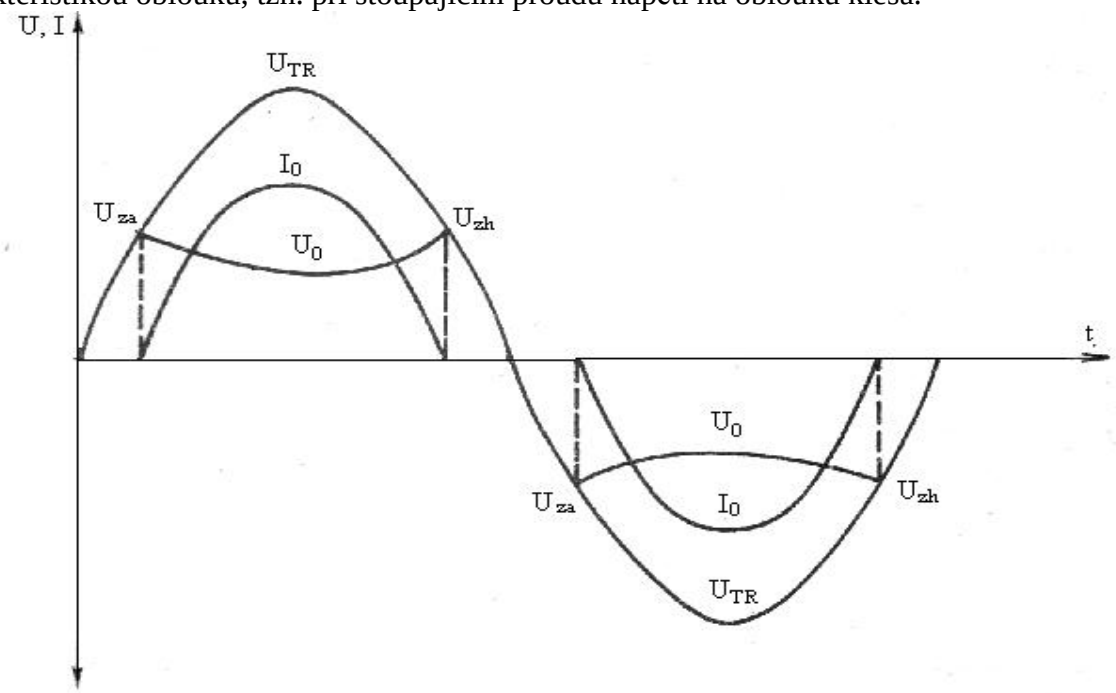
Obr. 1.5

Jestliže budeme zvyšovat napětí zdroje při konstantní vzdálenosti elektrod, dojde při určité hodnotě napětí k průrazu a začne mezi elektrodami prostřednictvím oblouku protékat elektrický proud. Při periodickém sinusovém napětí bude docházet při hoření oblouku k nuceným přestávkám, které jsou způsobeny poklesem napětí na oblouku pod hodnotu Umin.

Průběh napětí a proudu v obvodě , který obsahuje jen ohmický odpor R bez indukčnosti L je zobrazen na obr. 1.6, kde

U_{TR} představuje napětí zdroje (transformátoru)
U_o napětí na oblouku
I_o proud oblouku
U_{za} zapalovací napětí
U_{zh} zhášecí napětí

Napětí na transformátoru U_{TR} má periodický sinusový průběh. Jakmile toto napětí dosáhne zapalovací hodnoty oblouku začne obvodem protékat proud I_o. Tento proud bude obvodem protékat do té doby, než hodnota napětí transformátoru neklesne pod hodnotu zhášecího napětí U_{zh}. Přitom velikost zhášecího napětí je o něco nižší než velikost napětí zapalovacího. Prohnutý tvar průběhu napětí na oblouku U_o je způsoben zápornou charakteristikou oblouku, tzn. při stoupajícím proudu napětí na oblouku klesá.

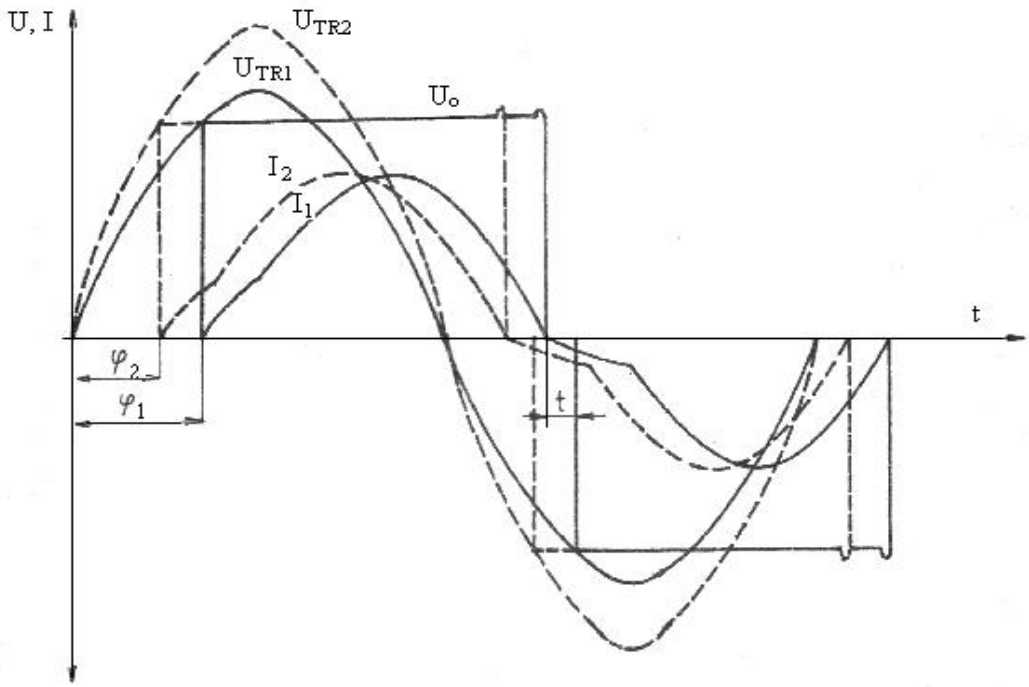


Obr. 1.6

Stabilizace střídavého oblouku

Obdobně jako u stejnosměrného oblouku, tak i u střídavého oblouku musíme provést stabilizaci. Stabilizace oblouku sériovým rezistorem má nevýhodu ve ztrátách výkonu v tomto rezistoru a v hasnutí oblouku při průchodu napětí transformátoru U_{TR} nulou. Proto se u střídavého proudu jako stabilizačního členu používá sériově zapojená tlumivka s indukčností L. Zapojíme-li do obvodu oblouku sériově indukčnost, nastává fázový posuv mezi napětím a proudem a zároveň prodloužení doby hoření oblouku. Navíc indukčnost nezpůsobuje téměř žádné činné ztráty. Způsobuje ovšem zhoršení účiníku celého obvodu. Teoreticky se dá odvodit, že k trvalému hoření oblouku je potřeba minimální fázový posuv cos φ = 0,85. Další důležitý faktor pro udržení stability hoření oblouku je poměr napětí na oblouku U_o k amplitudě přiloženého napětí U_{TRmax}. Tento poměr značíme β a jeho velikost by neměla překročit hodnotu 0,54. Stabilizaci střídavého oblouku lze také zajistit zvýšením napětí na transformátoru.

Na obr. 1.7 je znázorněna stabilizace střídavého oblouku fázovým posunutím (vožením přídavné indukčnosti takové hodnoty, že fázový posuv cos φ = 0,85) a čárkovaně je znázorněna stabilizace zvýšením napětí na transformátoru.



Obr. 1.7

Napětí na oblouku je obdélníkové , t.j. charakteristické pro velmi velké proudy, kde se již napětí na oblouku s proudem nemění.

U skutečných elektrických obloukových pecí tvoří jednu elektrodu např. uhlík (grafit) a druhou tvoří tavený materiál. Jestliže při průchodu proudu první půlperiodu tvoří katodu uhlíková (grafitová) elktroda, pak druhou půlperiodu ji tvoří tavený materiál. Ten má ovšem jiné elektrické a tepelné vlastnosti než katoda uhlíková. Toto se projevuje zejména při natavování vsázky, kdy tavený materiál má dobrou tepelnou vodivost a tím dochází k rychlému ochlazování katodová skvrny. Důsledek je takový, že v době kdy katodu tvoří uhlíková (grafitová) elektroda, protéká obvodem větší proud než v době, kdy elektrodu tvoří tavený materiál.

2. TEORETICKÉ ZÁKLADY ELEKTRICKÝCH OBLOUKOVÝCH PECÍ

Úvod

Obloukové pece na ocel patří v současnosti k největším budovaným odběratelům elektrické energie. V obloukových pecích se ve světě vyrábí okolo třiceti procent oceli. V některých zemích to činí dokonce sto procent jejich výroby oceli. Můžeme předpokládat, že v 21. století to bude dominující zařízení pro produkci oceli, hlavně z hlediska růstu velkých požadavků na oceli vysoké jakosti.

Ekonomické zhodnocení tavby není dáno pouze spotřebou elektrické energie, ale také opotřebováním jednotlivých součástí pece. Proto musíme k optimalizaci přistupovat také z tohoto hlediska, a to jak výběrem jednotlivých součástí pece, tak i optimálním namáháním těchto součástí.

Rozbor problematiky z hlediska výběru základních elektrických veličin pro hodnocení energetického režimu EOP.

V této kapitole se budeme zabývat teorií elektrických obloukových pecí, a to přes samotné rozdělení elektrických obloukových pecí, k elektrickému zařízení těchto pecí a teoretickým vztahům elektrické obloukové pece pro výběr základních elektrických veličin pro pozdější hodnocení energetického režimu EOP a teoretické vzorce, ze kterých bude vycházet při optimalizaci energetického provozu EOP.

2.1. Primární a sekundární metalurgie

V současné době používají elektroocelárny technologický systém s následujícími agregáty (v daném pořadí):

- EOP (elektrická oblouková pec)
- LF pec (pánvová pec)
- VAKUOVÁNÍ

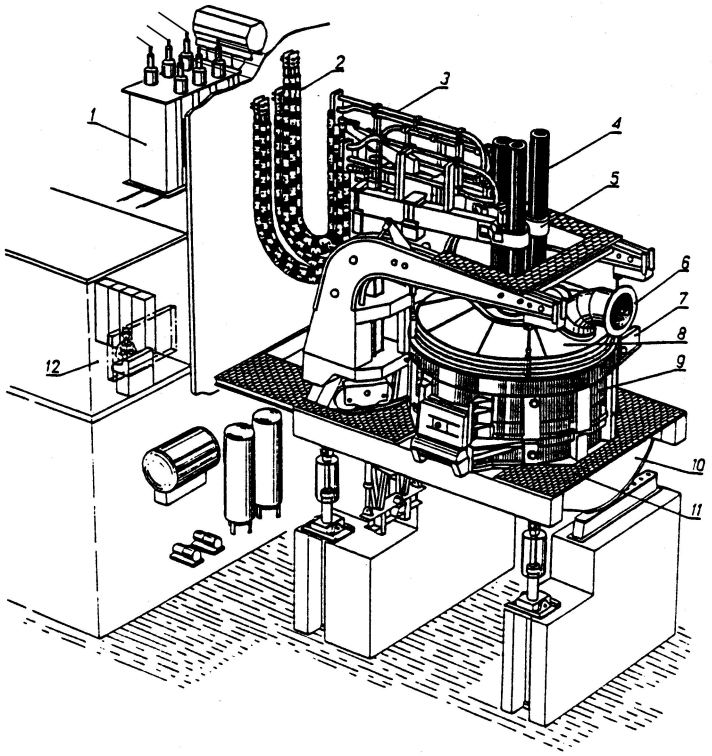
Systém moderní ocelárny je charakterizován mohutným objemem toku materiálu, kdy se vstupní materiál (šrot a přísady kusové nebo sypké) transformuje na kontilitní slitky. Kromě těchto slitek se vytváří odpad a to struska a nežádoucí příměsi. Transformace probíhá v postupném předávání materiálu EOP - LF - VAKUOVÁNÍ. V praxi samozřejmě nemusí být použity všechny agregáty, ale vždy se začíná v EOP.

EOP
- elektrická oblouková pec (nístějová pec), představuje tzv. primární metalurgii
- pecní agregát slouží k výrobě tekuté „surové“ oceli
- energii k výrobě dodáváme převážně elektrickým obloukem, ale můžeme pomoci kyslíkovými hořáky nebo spalováním uhlíku

LF
- pánvová pec - patří k zařízením tzv. sekundární metalurgie
- toto zařízení udržuje respektive zvyšuje teplotu tekuté oceli v odlévací pánvi
- slouží také k definitivnímu legování, odpíchnutí od pánve(přidávání legur)

VAKUOVÁNÍ
- další ze zařízení tzv. sekundární metalurgie
- zařízení slouží k zlepšení kvality vyráběné oceli
- zbavuje se definitivně zbytku nežádoucích plynů

Klasická elektrická oblouková pec je ukázaná na následujícím obrázku – obr. 1.



Obr. 2.1 Elektrická oblouková pec
1 — pecní transformátor, 2 — ohebná část krátké cesty (kabely chlazené vodou), 3 — pevná část krátké cesty,
4 — elektrody, 5 — uchycení elektrod, 6 — odsávač plynu a prachu, 7 — odpichový žlab, 8 — víko pece,
9 — kotel (vana) pece, 10 — kolébka, 11 — plošina, 12 — řídící stanoviště

2.2 Rozdělení EOP dle používaného oblouku

V teorii rozboru rozdělení elektrických obloukových pecí podle používaného oblouku se budeme zabývat pouze elektrickými obloukovými pecemi s třífázovým napájením . To znamená, že se nebudeme zabývat elektrickými obloukovými pecemi jednofázovými a stejnosměrnými.

Elektrické obloukové pece se stavějí nejčastěji přímo na střídavý trojfázový proud. Mají obvykle tři elektrody a oblouk hoří mezi elektrodami a vsázkou. Vsázka nemá většinou zpětný nulovací vodič, takže se na ni vytvoří určitý střední potenciál, proti kterému hoří jednotlivé oblouky.

Rozdělení EOP podle hoření oblouku

a) pece s přímým obloukem - zde oblouk hoří mezi elektrodou a vsázkou, někdy se tyto pece nazývají pece se závislým obloukem. Tyto pece se používají především k výrobě oceli a litin. Jelikož proudový obvod se uzavírá přes taveninu hořením oblouku mezi elektrodou a vsázkou, je přenos tepla do vsázky přímý, což přispívá k větší rychlosti ohřevu taveniny. Snížení doby tavby a tím i snížení doby zahřívání stěn snižuje ztráty a zvyšuje účinnost. Svislé uložení elektrod snižuje možnost ulomení elektrod a poruchovost.

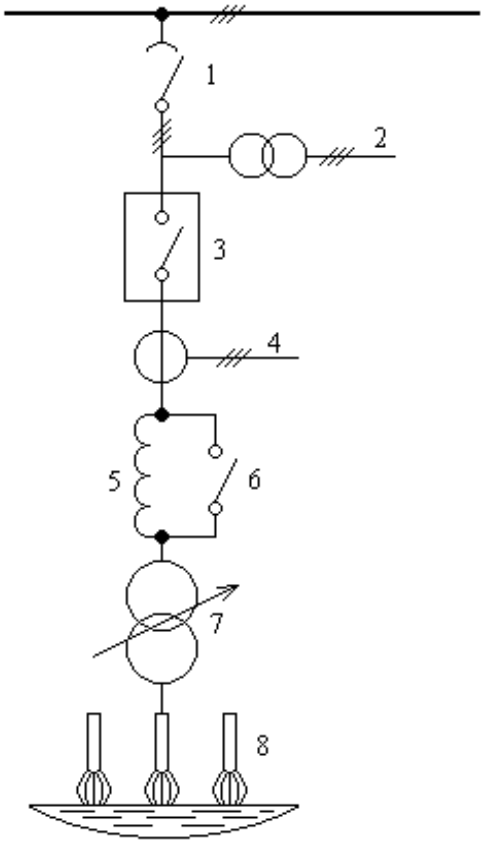
b) pece s nepřímým obloukem - oblouk hoří mezi dvěma elektrodami a teplo se do vsázky dostává výlučně sáláním, proto se tyto pece nazývají pece se sálavým obloukem. Oblouk hořící nezávisle na vsázce se nazývá nezávislý oblouk. Pece se používají k výrobě litiny, bronzu, mědi, feroslitin, karbidů a některých legovaných ocelí. Tyto pece mají však oproti předchozím několik nevýhod, a to především ve větší spotřebě elektrické energie na jednotku vsázky, dále ve vodorovném uložení elektrod, které se často lámou a tím nauhličují lázeň, což není dobré z metalurgického hlediska. Díky nezávislé hořícímu oblouku dochází k většímu opotřebení stěn. Výhodou těchto pecí jsou menší investiční náklady a jednoduchost obsluhy.

c) pece se zakrytým obloukem - zde oblouk opět hoří mezi elektrodami a vsázkou, ale elektrody jsou ponořeny do roztavené strusky a obsypány zavážkou rud a příměsí, oblouk je tedy zcela zakryt. Určitá část proudu prochází mezi elektrodami struskou a zavážkou, které jsou v horkém stavu dobře vodivé. Vzniká tak vlastně zároveň odporový ohřev strusky a zavážky přímým průchodem elektrického proudu, proto se pece nazývají také pece oblouk - odporové. Tento mechanismus se používá především u rudných termických pecí.

2.3 Elektrické zařízení obloukových pecí

Elektrické zařízení se podílí podstatnou částí na pořizovacích nákladech elektrické obloukové peci a značně ovlivňuje její chod. Nejdůležitější skupinu tvoří silnoproudý obvod, který představuje převážnou část hodnoty elektrického zařízení pece a má podstatný vliv na chod pece. Zjednodušené připojení elektrické obloukové pece na síť, včetně prvků silnoproudého obvodu, je na následujícím obrázku 2.

Na obrázku 2 jsou tyto prvky silnoproudého obvodu: 1 odpojovač, 2 měřící transformátor napětí, 3 výkonový vypínač, 4 měřící transformátor proudu, 5 tlumivka, kterou lze spojit po zahoření oblouku nakrátko spínačem 6, 7 je regulační pecní transformátor a 8 elektrody obloukové pece.



Obr. 2.2 Principiální schéma připojení ocelárenské obloukové pece na síť

Dálkově lze nastavit výstupní napětí transformátoru, toto se obvykle nastavuje pod zatížením. Na měřící transformátory jsou zapojeny ochrany proti zkratu a přetížení a také všechny důležité měřící přístroje.

Další důležitou a podstatnou části elektrického obvodu elektrické obloukové pece je obvod automatické regulace pohybu elektrod, o této problematice se podrobněji zmíním v kapitole 2.3.- Automatická regulace elektrod obloukové pece. Mezi další elektrické části elektrické obloukové pece patří například: mechanismy pro odklápění víka, otáčení, naklánění vany atd..

Součástí pecních zařízení je pak také chladící rozvod, který je kontrolován speciálním zařízením. U velkých pecí se chladí i určitá místa na víku pece, objímky elektrod, lanové a pevné přívody proudu k elektrodám, tak je tomu i v případě pece, o kterou se zajímám v praktické části této diplomové práce.

V poslední době se u tzv. pecí UHP s mimořádně velkými měrnými výkony chladí vodou i vyzdívka pecí.

2.4 Pecní transformátor pro obloukové pece

Z hlediska elektrického zařízení EOP patří mezi jedno z nejdůležitějších pecní transformátor. Tyto transformátory jsou většinou trojfázové, olejové a regulovatelné pod zatížením. Napětí se vzhledem k velkým výstupním proudům přepíná vždy na vstupní straně. Dnes se používá zapojení buď Dd0 nebo Yd1. Výstupní vedení je spojeno do trojúhelníku a

má vyvedeno všech 6 konců tak, aby bylo možno elektrody napájet bifilárně. Do trojúhelníku se potom spojuje až na objímkách elektrod před ohebnými lany nebo za nimi.

Pecní transformát, který napájí LF pec, na které bude probíhat praktická část mé diplomové práce má výkon 10/15 MVA, je napájený na primární straně napětím 22 kV, frekvencí 50 Hz, s napětím na sekundární straně 90 až 300 V a jmenovitém proudu 19245 A.

2.5 Krátká cesta

Krátkou cestou nazýváme elektrické vedení od vývodu sekundárního vinutí pecního transformátoru do pracovního prostoru pece. Jednotlivé pece se mohou lišit konstrukcí těchto krátkých cest, ale vždy můžeme tyto krátké cesty rozdělit na následující části:

1. pásovou část
2. ohebná lana
3. vodiče ramen držáků elektrod
4. držáky elektrod (Cu čelisti)
5. elektrody a spojky

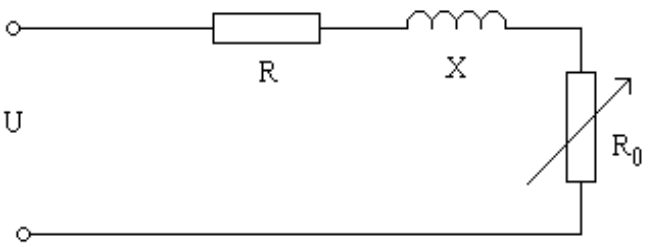
Přestože je snaha o dosažení co nejmenší reaktance krátké cesty (v současné době řádově 10^{-3} Ω), přesto při přenosu velké energie, tedy při průchodu velkých proudů krátkou cestou dochází k velkým ztrátám. Na tuto reaktanci a tedy i na ztráty má vliv nejen délka vodičů jednotlivých fází, ale i jejich vzájemná poloha a poloha vůči okolním ocelovým konstrukcím. Toto uspořádání má vliv na nerovnoměrné rozložení výkonů v jednotlivých fázích a to má pak vliv na práci pece a životnost vyzdívky.

Při průchodu velkých proudů dochází tedy k velkým ohmickým ztrátám, toto můžeme omezit například chlazením vodičů vodou nebo jiným chladícím médiem, čímž se zvyšuje jejich proudová zatížitelnost. Kromě těchto ztrát dochází ještě k vzájemnému ovlivňování jednotlivých fází. Díky tomuto ovlivňování teče pak jednou fází nejmenší proud a tato fáze se nazývá „mrtvou“, naopak fáze kterou teče největší proud se nazývá „živou“. Tento jev se snažíme omezit použitím bifilárního zapojení, kde se vlastně indukčnost vyrovnává jednotlivými protichůdnými složkami.

Rekonstrukcí krátké cesty pak můžeme docílit lepší podmínky pro energetickou náročnost tavby. Jedná se především o veličiny R a X, což jsou základní veličiny pro teoretické určení kruhového diagramu.

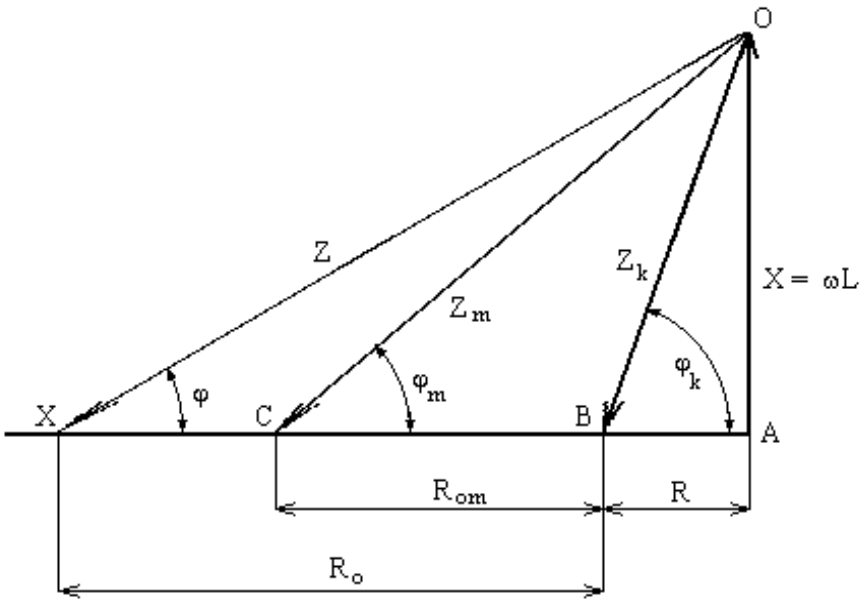
2.6 Teoretické zákony elektrických obloukových pecí

Proudový obvod EOP sestává z konstantního ohmického a induktivního odporu, daného vlastnostmi krátké cesty, viz. předchozí kapitola. Dále je v proudovém obvodě zastoupen odpor oblouku, který si můžeme nahradit proměnlivým ohmickým odporem viz. - obr. 3.



Obr. 2.3 Proudový obvod EOP

Fiktivní odpor oblouku R_o je hodnota proměnlivá, přičemž se tato hodnota může měnit od nuly, kdy jsou elektrody ve zkratu, až do nekonečna, kdy obvod je přerušený a oblouk nehoří. Poměry v peci se dají dobře znázornit vektorovým diagramem - obr. 4.



Obr. 2.4 Vektorový diagram

Impedance nakrátko, vychází z vektorového diagramu - obr. 4, určuje proud nakrátko pece. Pracovní bod se pohybuje po přímce BX v závislosti na velikosti odporu oblouku. Odpor pece pak určuje i okamžitou hodnotu impedance pece.

$$Z = \sqrt{\left(R + R_o\right)^2 + (wL)^2} \qquad 2.1$$

Dále z vektorového diagramu můžeme určit účiník pece. Pro libovolný pracovní bod označený X potom platí:

$$\cos j = \frac{R + R_o}{\sqrt{\left(R + R_o\right)^2 + (wL)^2}} \qquad 2.2$$

Pro hodnotu účiníku nakrátko cos φ_K, tady pro podmínku $R_o = 0$, pak platí:

$$\cos j_K = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (wL)^2}} \qquad 2.3$$

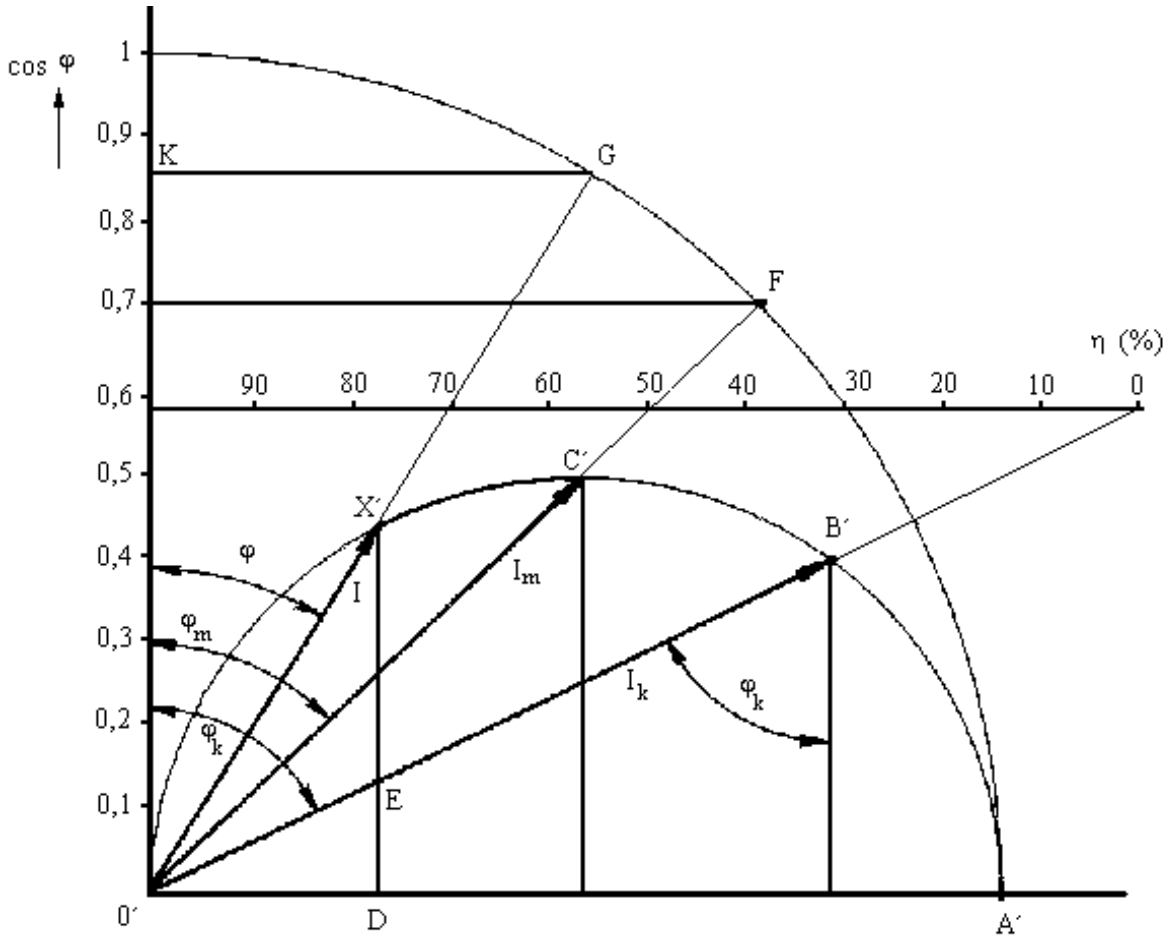
Proud oblouku je nepřímo úměrný proměnlivé hodnotě impedance Z:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{\left(R + R_o\right)^2 + (wL)^2}} \qquad 2.4$$

Předpokládám-li, že při provozních zkratech pracují magnetické materiály obvodu pouze v přímé části magnetizační charakteristiky, pak jednotlivé reaktance X nezávisí na procházejícím proudu. Obdobně i konstantní část činných odporů R (kromě odporu oblouku) také nezávisí na procházejícím proudu. Vycházíme-li z tohoto předpokladu, pak koncové body vektorů proudů pro různé hodnoty odporu oblouku R_o se budou pohybovat po kružnici. Tato charakteristika se pak nazývá kruhový diagram obloukové pece - obr. 5.

Na obr. 5 je kružnice s vyznačenými body A´, B´, C´, X´ a O´. Tyto jednotlivé body jsou ekvivalentní k převrácené hodnotě impedance Z, která se mění v závislosti na hodnotě odporu R_o. Na tomto kruhovém diagramu pak rozlišujeme tři základní oblasti:

1. oblast nestabilního chodu - úsek O´X´ - tzv. dlouhý oblouk, oblouk se trhá a je nestabilní
2. oblast optimálního chodu - úsek X´C´ - v této oblasti by mělo zařízení pracovat
3. oblast zaručeně stabilního chodu - úsek C´B´ - krátký oblouk, oblouk je energeticky náročný



Obr. 2.5 Kruhový diagram EOP

2.7. Maximální příkon obloukové pece

Jak vyplývá ze vzorce 2.2 pro účiník, kdy tento účiník závisí jak na pevné složce činného odporu R a reaktance X, tak na hodnotě proměnlivého odporu oblouku R_o. Pak v případě, že velikost odporu R se blíží velikosti reaktance X, elektrody jdou do zkratu a

každá změna odporu oblouku R_o vyvolá tím pádem i změnu účiníku, a tím i změnu přenášené energie do oblouku. Podle obr. 4 (vektorový diagram) platí:

$$tg\,j = \frac{wL}{R + R_o} \qquad 2.5$$

Z toho vyplývá:

$$R_o = \frac{wL}{tg\,j} - R \qquad 2.6$$

Výkon oblouku:

$$P_o = R_o I^2 = R_o \left(\frac{U}{Z}\right)^2 \qquad 2.7$$

Pro impedanci Z použijeme vztah:

$$\sin j = \frac{wL}{Z} \qquad 2.8$$

Tento vztah 2.8 pak dosadíme do vztahu 2.7 a pro výkon oblouku pak dostáváme vztah:

$$P_o = R_o \left(\frac{U}{wL}\right)^2 \sin^2 j \qquad 2.9$$

Do vztahu 2.9 nyní dosadíme za odpor oblouku R_o vztah 2.6 a dostaneme:

$$P_o = \frac{U^2}{wL} \sin j \cos j - \frac{U^2 R}{(wL)^2} \sin^2 j = \frac{U^2}{2wL} \sin 2j - \frac{R}{wL} \cdot \frac{U^2}{wL} \sin^2 j \qquad 2.10$$

První část výsledku vztahu 2.10 je příkon do obvodu obloukové elektrické obloukové pece, kde tento vztah se dá upravit:

$$\frac{U^2}{2wL} \sin 2j = \frac{U^2}{wL} \sin j \cos j = \frac{U^2}{wL} \cdot \frac{wL}{Z} \cos j = UI \cos j \qquad 2.11$$

Tento výsledný vztah vyjadřuje výkon do celého obvodu včetně celkových ztrát a pomocí tohoto vzorce nyní můžeme odvodit maximum energie. Tohoto maxima dosáhne vztah při maximu funkce sin 2φ, tedy jestliže:

$$\sin 2j = 1$$

$$2j = 90^0 \quad \Rightarrow \quad j = 45^0$$

Největší výkon v obvodě tedy dostaneme v případě, kdy při konstantním napětí bude fázový posun 45^0. Tedy induktivní odpor X se bude rovnat ohmickému R + R_o.

$$R + R_o = wL \qquad 2.12$$

Z toho vyplývá účiník pro maximální výkon:

$$\cos j = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \qquad 2.13$$

Maximální výkon v celém obvodě elektrické obloukové pece je roven:

$$P_{o\max} = \frac{U^2}{2wL} \qquad 2.14$$

Ze vztahu 2.14 můžeme usuzovat, že maximální výkon závisí tedy pouze na napětí zdroje a indukčnosti přívodu. Zvýšení výkonu pece se dá tedy při konstantním napětí dosáhnout jedině snížením indukčnosti přívodu. Tuto indukčnost ovšem nemůžeme snižovat libovolně, protože indukčnost přívodu je nutná v minimální míře pro udržení stability. Určitým řešením pro zvýšení výkonu je zařazení sériové kapacity na primární straně napájení obloukových pecí. Tímto řešením se stabilizuje hladina napětí pro elektrický oblouk a zmenší

se složka ωL. Toto řešení je ovšem vhodné pouze v případě, že je dostatečná rezerva vzhledem ke stabilitě oblouku.

2.8. Maximální výkon na oblouku

Maximální výkon na oblouku není totožný s maximálním výkonem v obvodu elektrického oblouku, jak jsme teoreticky odvodili v předchozí kapitole 2.7. Grafické znázornění této odlišnosti je v následující kapitole, kde se zabýváme pracovními charakteristikami. Výkon na oblouku se zmenší o ztráty v přívodech a ztráty energie elektromagnetickým polem, vyzařované do okolí. Vzcházíme ze vztahu 2.10:

$$P_o = \frac{U^2}{wL}\sin j\,\cos j - \frac{U^2 R}{(wL)^2}\sin^2 j \qquad 2.10$$

Kde maximální výkon dostaneme derivací předchozího vztahu:

$$\frac{dP_o}{dj} = \frac{U^2}{wL}\left(\cos^2 j - \sin^2 j\right) - \frac{2U^2 R}{(wL)^2}\sin j\,\cos j \qquad 2.15$$

Po úpravě:

$$\frac{dP_o}{dj} = \frac{U^2}{wL}\left(\cos 2j - \frac{R}{wL}\sin 2j\right) \qquad 2.16$$

Nyní uplatníme podmínku pro maximum:

$$\frac{dP_o}{dj} = 0 \qquad 2.17$$

Z toho vyplývá:

$$\cos 2j_m = \frac{R}{wL}\sin 2j_m \qquad 2.18$$

Což můžeme zjednodušit a za pomocí upraveného vzorce 2.3 psát:

$$tg 2j_m = \frac{R}{wL} = tg\, j_K \qquad 2.19$$

Porovnáním předchozího vztahu 2.19 pak můžeme psát:

$$2j_m = j_K \qquad 2.20$$

Maximální výkon na oblouku tedy dosáhneme při fázovém posunu, který má poloviční hodnotu než zkratový fázový posun. Pak tedy výkon na oblouku závisí na ohmickém a induktivním odporu přívodu a pro danou konstrukci elektrické obloukové pece je dán vztahem:

$$P_o = \frac{U^2}{2wL}\sin 2j_m - \frac{R}{wL}\cdot\frac{U^2}{wL}\sin^2 j_m \qquad 2.21$$

Kde podle vztahu 2.20:

$$\sin 2j_m = \sin j_K \qquad 2.22$$

Pak tedy:

$$\sin 2j_m = \frac{wL}{\sqrt{R^2 + (wL)^2}} \qquad 2.23$$

A dále upravený:

$$\sin j_m = \sin\frac{j_K}{2} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 - \cos j_K\right)} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 + (wL)^2}}} \qquad 2.24$$

Dosazením vztahu 2.23 do původního vztahu pro maximální výkon 2.21 pak dostáváme vztah:

$$P_{o\max'} = \frac{U^2}{2\sqrt{R^2+(wL)^2}} - \frac{R}{2\sqrt{R^2+(wL)^2}} \cdot \frac{U^2}{\left(\sqrt{R^2+(wL)^2}+R\right)} \qquad 2.25$$

Což můžeme upravit:

$$P_{o\max'} = P_{celkovy} - \Delta P_{ztratovy} \qquad 2.26$$

První část výrazu je tedy celkový výkon obvodu při maximálním výkonu na oblouku:

$$P_{celkovy} = \frac{U^2}{2\sqrt{R^2+(wL)^2}} \qquad 2.27$$

A druhá část vztahu 2.25 jsou ztráty v obvodu elektrického oblouku:

$$\Delta P_{ztraty} = RI_{\max}^2 = \frac{R}{2\sqrt{R^2+(wL)^2}} \cdot \frac{U^2}{\left(\sqrt{R^2+(wL)^2}+R\right)} \qquad 2.28$$

Účiník při maximálním výkonu na oblouku pak je:

$$\cos j_{\max} = \cos\frac{j_K}{2} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(1+\cos j_K\right)} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1+\frac{R}{\sqrt{R^2+(wL)^2}}} \qquad 2.29$$

Maximální účiník je funkcí odporu R a indukčnosti přívodu L. Praktická hodnota účiníku pro skutečné pece se pohybuje v rozmezí 0,75 - 0,8, u LF pecí je to 08 - 0,87. Přičemž optimum je 0,707 - 0,87.

Pokud porovnám vztah pro maximální výkon na oblouku (2.25) se vztahem pro maximální možný výkon v obvodě (2.14) odvozeném v předchozí kapitole 2.7, zjistím, že maximální výkon na oblouku je menší než maximální výkon v obvodě.

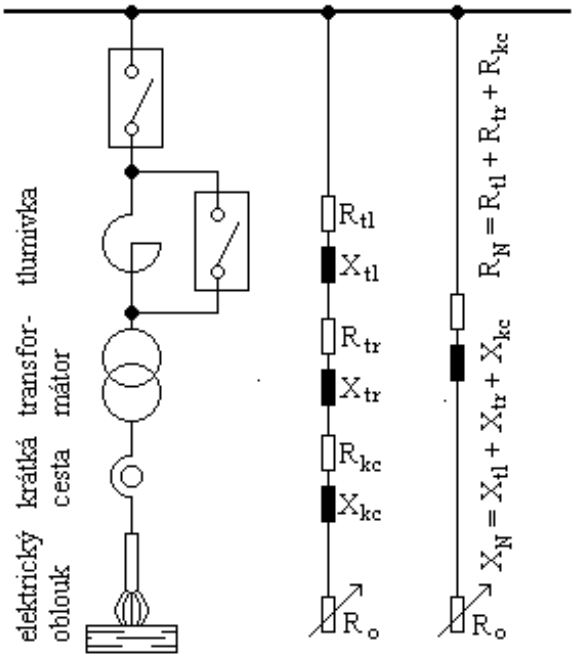
2.9. Pracovní charakteristiky

Pro dobré pochopení optimálního chodu elektrické obloukové pece je důležité seznámit se se závislostí hlavních elektrických veličin pecních obvodů. Mezi tyto hlavní veličiny patří výkon, účiník a účinnost v závislosti na nezávisle proměnném proudu. Tyto charakteristiky lze stanovit buď početně nebo graficky pomocí kruhového diagramu. Nejčastěji se však tyto charakteristiky odměřují na hotové peci, aby se z nich mohl určit správný pracovní režim.

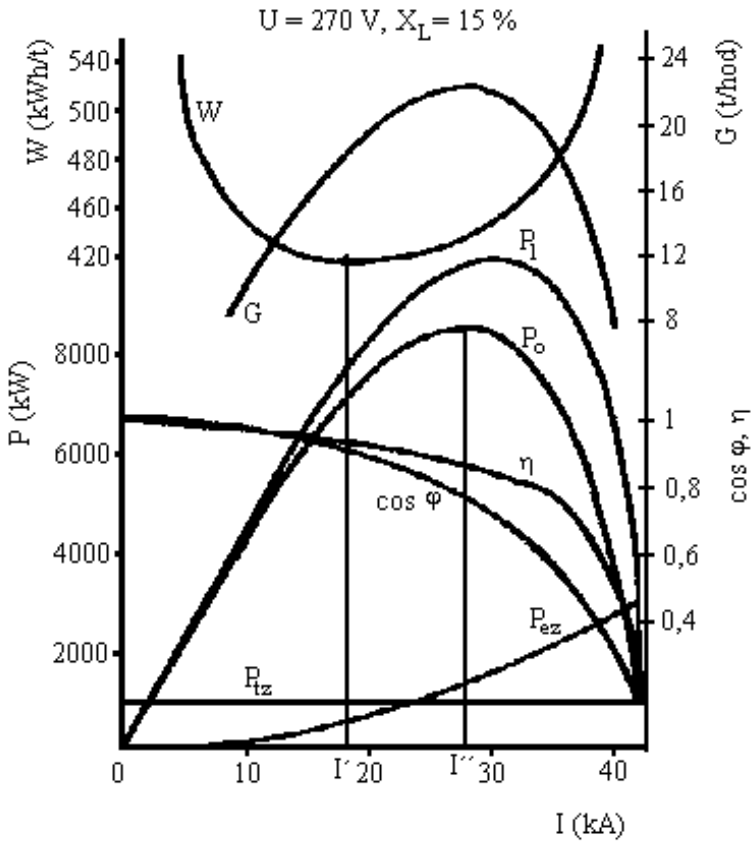
Vyjádříme si silový obvod elektrického zařízení elektrické obloukové pece náhradním schématem podle obr. 6. Toto jednofázové schéma je v podstatě sériové zapojení jednotlivých prvků elektrického zařízení elektrické pece.

Ze schéma vidíme, že postupným transformováním jsme došli k náhradnímu schématu pro odpory R_N, X_N a R_o. Při této transformaci vycházíme z určitých zjednodušení, která v praxi nelze opominout.

1. Napětí sítě je symetrické a nezávislé na napětí
2. Impedance jednotlivých fází (mimo odpor elektrického oblouku) jsou stejné a nezávislé na proudu
3. Odpor elektrického oblouku je lineární
4. Proud transformátoru při chodu naprázdno je nulový



Obr. 2.6 Jednofázové náhradní schéma EOP



Obr. 2.7 Pracovní charakteristika EOP

Hodnoty náhradního odporu R_N a reaktance X_N se zpravidla zjišťují při měření nakrátko, pomocí dvoufázových a třífázových máčecích zkouškách. Vlastní elektrické charakteristiky je

pak možno sestrojit pomocí kruhových diagramů. Teoretický příklad takovéto pracovní charakteristiky je na předcházející stránce na obr. 7.

Na pracovních charakteristikách jsme vyznačili proudy odpovídající maximálnímu primárnímu výkonu I´ a maximálnímu výkonu na oblouku I´´. Tento proud je někdy mylně považován za optimální proud odpovídající největší rychlosti tavení. Avšak určovat optimální hodnotu proudu pouze podle teoretických charakteristik představuje velmi zúžený přístup. Především uvedené zjednodušující předpoklady nelze v praxi akceptovat. Dále je nutno uvažovat také tepelné ztráty - zvláště na konci vedení - které jsou větší než ztráty elektrické a ovlivňují tak rychlost tavení a měrnou spotřebu elektrické energie.

2.10 Vybrané základní elektrické veličiny EOP

Tyto veličiny v podstatě charakterizují chod elektrické obloukové pece a většinou jsou znázorněny na pracovních charakteristikách elektrické obloukové pece, viz. obr. 7.

Jestliže vyjdeme z posledního odstavce předchozí kapitoly a z předpokladu, že tepelné ztráty lze pokládat za konstatní a v podstatě nezávislé na elektrických veličinách, pak výkon kompenzující tyto tepelné ztráty se odečítá od výkonu elektrického oblouku. Užitečný výkon se tedy rovná:

$$P_{uz} = P_1 - P_{ez} - P_{tz} \qquad [\mathrm{W}] \qquad 2.30$$

kde P_{uz} . . . užitečný výkon
P_1 . . . příkon pece
P_{tz} . . . výkon kompenzující tepelné ztráty
P_{ez} . . . výkon kompenzující elektrické ztráty

Energetická účinnost tavení:

$$h_{en} = \frac{P_{uz}}{P_1} 100 \qquad [\%] \qquad 2.31$$

Měrná spotřeba elektrické energie:

$$w = \frac{W_{uz}}{h_{en}} \qquad [\mathrm{kWh/t}] \qquad 2.32$$

W_{uz} je energie spotřebovaná na roztavení jedné tuny vsázky bez uvažování ztrát

Vztah pro rychlost tavení je dán poměrem celkového užitečného výkonu spotřebovaného pouze k roztavení vsázky k příkonu užitečné energie:

$$G = \frac{P_{uz}}{W_{uz}} \qquad [\mathrm{t/h}] \qquad 2.33$$

Kromě těchto veličin uvedených v této kapitole patří k základním elektrickým veličinám i ostatní veličiny uváděné v předchozích kapitolách. Dále mezi tyto důležité veličiny patří i hodnoty odporu a reaktance krátké cesty, které lze získat pomocí máčecí zkoušky.

Kromě spotřeby elektrické energie je dalším důležitým ukazatelem např. spotřeba grafitových elektrod, která prudce roste úměrně se čtvercem proudu.