

## Koncept moderního návrhu elektrotepelných zařízení se zaměřením na výkonovou část elektrických odporových pecí

J. Lucák

Katedra energetiky a ekologie. Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni,

Univerzitní 26, Plzeň

E-mail : jlucak@kee.zcu.cz

### Anotace:

Elektrický ohřev je proces, při kterém je potřebná tepelná energie k ohřevu získávána přeměnou z elektrické energie. Tento druh ohřevu má celou řadu výhod, jako jsou poměrně vysoká účinnost, nízká investiční náročnost, nízké náklady na údržbu, malé rozměry a tím i nároky na prostor, přesné řízení ohřívacího procesu a šetrnost k okolnímu prostředí. Toto vše hovoří pro jeho široké použití. Nevýhodou omezující jeho masivnější nasazení v nejrůznějších průmyslových aplikacích je však vysoká cena elektrické energie oproti jiným druhům energie. Proto je nutné hledat nová řešení ke snížení energetické náročnosti elektrického ohřevu a jeden ze způsobů vidím v řešení optimálního způsobu návrhu řízení výkonové části pece. V současné době se touto problematikou zabývá jen malý počet odborných článků. Tímto článkem poukazuji na skutečnost, že toto téma je v dnešní době důležité. V tomto příspěvku uvádím potřebné informace pro efektivní řešení návrhu moderního zařízení. Na základě studie této problematiky zde shrnuji poznatky potřebné pro návrh tohoto zařízení splňujícího potřebná kritéria na úsporný provoz. Článek také obsahuje příklady využití zmíněných poznatků v průmyslové praxi.

### MATERIÁLY POUŽÍVANÉ NA VÝROBU TOPNÝCH ČLÁNKŮ V ODPOROVÝCH PECÍCH

Soustředil jsem se na materiály od firmy Kanthal, která představuje světový standard v této oblasti. KANTHAL nabízí široký sortiment produktů, které můžeme použít pro více či méně náročné aplikace. Mají vlastnosti potřebné pro zvládnutí těchto nejrůznějších aplikací. Materiály pro topné články se vyrábějí ve formě pásek, drátů nebo tyčí. Při výběru materiálů na topné články je nutno brát v úvahu následující skutečnosti:

- pracovní teplotu v pracovním prostoru pece
- materiál použitý na pracovní vzdívkou, která může přijít do přímého kontaktu s topným článkem nebo nepříznivě ovlivnit složení atmosféry v pracovním prostoru pece
- složení řízené atmosféry v pracovním prostoru pece (při použití ochranné atmosféry)
- všechny aspekty, které mohou nepříznivě ovlivnit správnou funkci topných článků (druh vsázky, vibrace, stárnutí atd.)
- možnosti řízení výkonů těchto topných článků

Materiál pro topné články má vykazovat co největší měrný odpor, malý teplotní odporový součinitel a odolnost vůči atmosférám, jež se v pecích vyskytují, a hlavně odolnost proti působení vysokých teplot.

Konstrukční materiály topných článků lze rozdělit na materiály:

- kovové - které lze použít do teplot 1300 °C
- nekovové - které lze použít do teplot 1900 °C

Materiály kovových topných článků do teplot 1300 °C lze všeobecně rozdělit na čisté kovy a slitiny

- Slitiny feritické - obsahují Cr, Al, Fe, (Co)
  - Slitiny austenitické - obsahují Ni, Cr, Fe
- Slitiny se od sebe liší krystalickou strukturou, fyzikálními, mechanickými, elektrickými a tepelnými vlastnostmi.

Materiály nekovových topných článků do teplot 1900 °C lze všeobecně rozdělit např. podle teplot:

Pro teploty 1400 - 1450 °C

- Používají se topné články z karbidu křemíku (SiC) známé jako silitové topné články s obchodními názvy např. globar, crusilit aj. ve tvaru tyčí a trubek.

Pro vyšší teploty v peci -1900 °C

- Pro tyto případy se používají topné články Kanthal SUPER – Molybdendisilicid, u nichž je nejvhodnější svislé zavěšení článků. Vodorovné uložení článků podmiňuje pečlivé podložení.

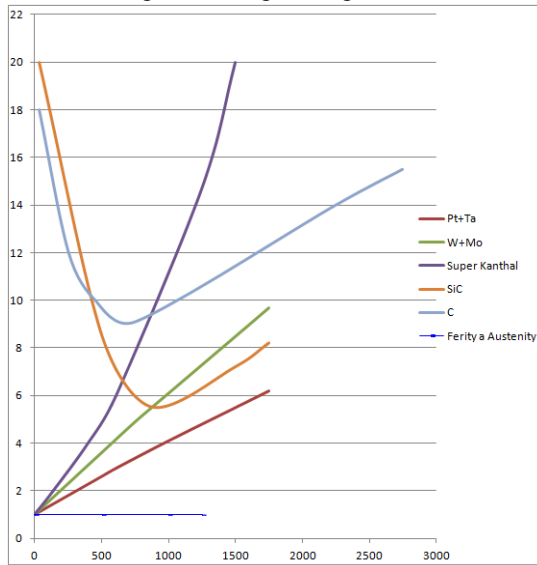
- Pece s uvedenými druhy článků vyžadují regulaci napětí (3 - 4 stupně) pomocí regulačních transformátorů. K regulaci výkonu těchto článků se dnes používají speciální tyristorové jednotky.

Jak je vidět ze stručného popisu, volba topných článků pro ohřev v elektrotepelných odporových zařízeních není jednoduchá záležitost a s tím se objevují další problémy. Jeden z těchto problémů, který je nutno řešit již při samotném návrhu a následně při regulaci, jsou elektrické vlastnosti použitých materiálů pro výrobu topných článků. Pro zajímavost uvádím elektrické vlastnosti materiálu KANTHAL SUPER, patří do skupiny tzv. cermetů.

Odpor materiálu KANTHAL SUPER se prudce zvyšuje s rostoucí teplotou. To znamená, že pokud budou články připojeny ke konstantnímu napětí, výkon bude vyšší při nízkých teplotách a bude se postupně snižovat s narůstající teplotou. Takto je tedy snížena čas potřebný k dosažení požadované pracovní teploty článku. Dále pak, jak se výkon článku snižuje, snižuje se tak i riziko přehřátí. Odpor materiálu

KANTHAL SUPER se nemění se stářím ani při dlouhodobém zatížení při vysokých teplotách. Pouze v první fázi je malé snížení odporu asi o 5%. Díky těmto vlastnostem může být vadný článek jednoduše vyměněn za nový, aniž by byly ovlivněny vlastnosti ostatních zapojených článků.

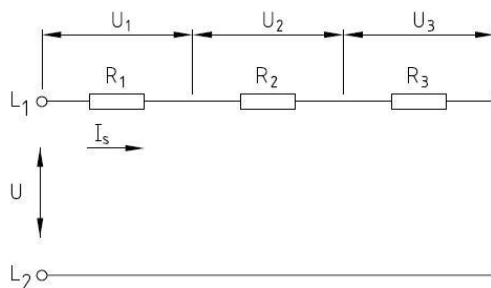
Na obr. 1 uvádím závislosti odporů nejpoužívanějších materiálů na pracovní teplotě topného článku.



Obr. 1: Závislost odporu na teplotě materiálu topných článků

Další problém, který je nutno řešit, je zapojení topných článků. Volba zapojení topných článků do série, paralelně, do hvězdy, do trojúhelníku nebo jejich různých modifikací ovlivňuje proud protékající těmito články a tím i jejich výkon. Proto zde uvedu základní zapojení a jejich napěťové, proudové a výkonové poměry.

#### Sériové zapojení topných článků



Obr. 2: Řazení topných článků do série

Pro toto zapojení platí:

Pro odpor:

$$R_c = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad [\Omega]$$

Pro napětí:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i \quad [V]$$

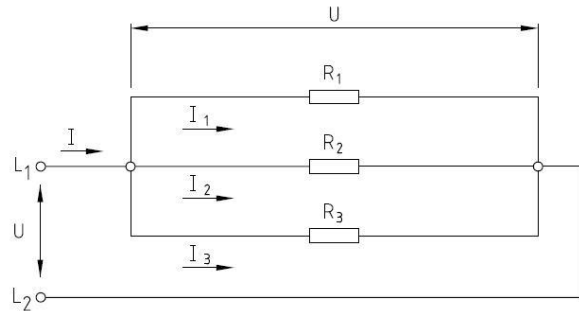
Pro proud:

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad [A]$$

Pro výkon:

$$\frac{1}{P_c} = \frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} + \frac{1}{P_3} + \dots + \frac{1}{P_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{P_i} \quad [W]$$

#### Paralelní zapojení topných článků:



Obr. 3: Řazení topných článků paralelně

Pro toto zapojení platí:

Pro odpor:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad [\Omega]$$

Pro napětí:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad [V]$$

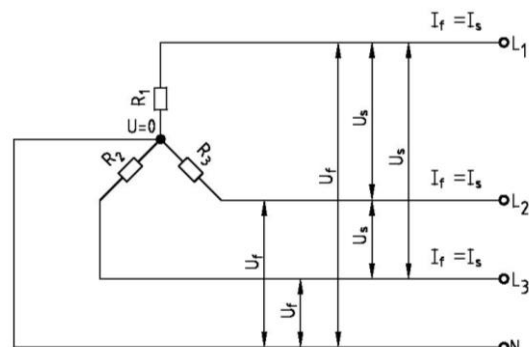
Pro proud:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = \sum_{i=1}^n I_i \quad [A]$$

Pro výkon:

$$P_c = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad [W]$$

#### Zapojení topných článků do hvězdy



Obr. 4: Zapojení topných článků do hvězdy

Pro toto zapojení platí:

Vztahy mezi fázovými a sdruženými hodnotami napětí a proudu

$$I_f = I_s \quad [A]$$

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad [V]$$

Pro jednotlivé fáze platí:

Příkon pro jednotlivé fáze:

Pomocí fázových hodnot napětí a proudu:

$$P'_y = U_f I_f = R I_f^2 = \frac{U_f^2}{R} \quad [W]$$

Pomocí sdružených hodnot napětí a proudu:

$$P'_y = \frac{U_s I_s}{\sqrt{3}} = R I_s^2 = R \left( \frac{U_s}{\sqrt{3}R} \right)^2 = \frac{U_s^2}{3R} \quad [W]$$

Pro 3 fáze společně:

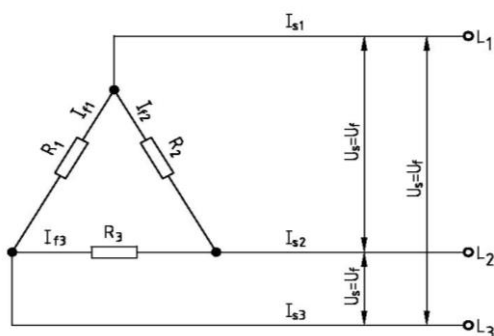
Pomocí fázových hodnot napětí a proudu

$$P_y = 3U_f I_f = 3R I_f^2 = \frac{3U_f^2}{R} \quad [W]$$

Pomocí sdružených hodnot napětí a proudu

$$P_y = \sqrt{3} U_s I_s = \sqrt{3} (\sqrt{3} R I_s) I_s = 3R I_s^2 = 3R \left( \frac{U_s}{\sqrt{3}R} \right)^2 = \frac{U_s^2}{R} \quad [W]$$

**Zapojení topných článků do trojúhelníku**



Obr. 5: Zapojení topných článků do trojúhelníku

Pro toto zapojení platí:

Vztahy mezi fázovými a sdruženými hodnotami napětí a proudu

$$U_f = U_s \quad [V]$$

$$I_f = \frac{I_s}{\sqrt{3}} \quad [A]$$

Pro jednotlivé fáze platí:

Příkon pro jednotlivé fáze:

Pomocí fázových hodnot napětí a proudu:

$$P'_\Delta = U_f I_f = R I_f^2 = \frac{U_s^2}{R} \quad [W]$$

Pomocí sdružených hodnot napětí a proudu:

$$P'_\Delta = U_s \frac{I_s}{\sqrt{3}} = \frac{R I_s^2}{3} = \frac{U_s^2}{R} \quad [W]$$

Pro 3 fáze společně platí:

Pomocí fázových hodnot napětí a proudu:

$$P_\Delta = 3U_f I_f = 3R I_f^2 = \frac{3U_s^2}{R} \quad [W]$$

Pomocí sdružených hodnot napětí a proudu:

$$P_\Delta = \sqrt{3} U_s I_s = 3R I_s^2 = \frac{3U_s^2}{R} \quad [W]$$

## SOUČASNÉ MOŽNOSTI ŘÍZENÍ VÝKONU TOPNÝCH ČLÁNKŮ

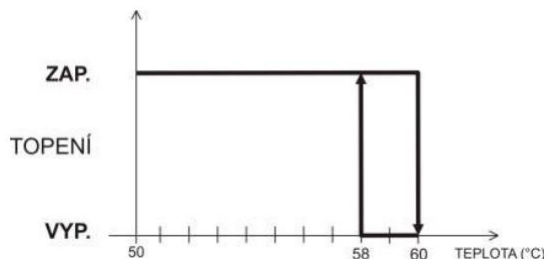
Silovým prvkem v regulačních obvodech elektrotepelných odporových zařízení s nepřímým ohřevem jsou spínací prvky. V teorii automatického řízení jsou označovány jako akční členy regulované soustavy. To znamená, že mluvíme o členu, který vykoná konkrétní zásah ovlivňující průběh regulované veličiny.

Spínání elektrických obvodů je nejčastějším jevem, který se v elektrotechnice vyskytuje. Spínací přístroje, které jsou pro tento účel konstruovány, prošly rozsáhlým technickým vývojem jak v oblasti elektromechanických přístrojů (kontaktní spínání), tak v oblasti elektronických spínacích přístrojů (bezkontaktní spínání). Z kontaktních přístrojů jsou nejpoužívanější stykače a z elektronických přístrojů jsou pro tento účel používány výkonové spínací jednotky (tyristorové jednotky) a SSR relé (Solid State Rele). Základním stavebním kamenem těchto elektronických spínačů a relé jsou výkonové diody, triaky, tyristory a tranzistory. Vlastnosti jednotlivých výkonových prvků se využívají podle požadavku kladených např. na systém řízení uvažovaného technologického procesu.

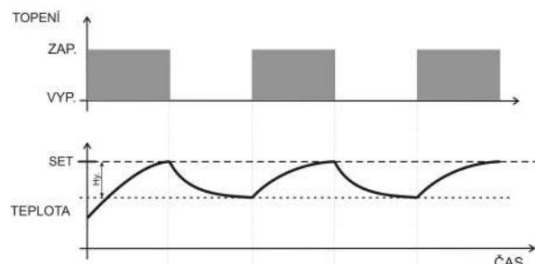
## REGULACE VÝKONU TOPNÝCH ČLÁNKŮ POMOCÍ MECHANICKÝCH PŘÍSTROJŮ

Omezené možnosti mechanických spínačů se projeví v možnostech použití při různých typech regulací teplotních procesů. Mechanických spínacích kombinací se nejčastěji používá při regulacích typu zapnuto / vypnuto (ON – OFF), které se vyznačují méně častým spínáním. Nejčastějším využitím je regulace na konstantní hodnotu, kdy se žádaná veličina (teplota) s časem nemění.

Základními parametry jsou zadaná hodnota regulované veličiny a její hystereze. Hystereze je vlastně necitlivost na změnu regulované veličiny. Na následujících obrázcích je názorně tento princip regulace vysvětlen.



Obr. 6: Typický průběh teploty při ON/OFF



Obr. 7: Průběh regulované veličiny

Rychle řízené procesy není možné zvládnout běžnou stykačovou kombinací. A tak se v praxi řeší tyto úlohy modernějšími technologiemi, kterým nečiní rychlé časové změny problémy.

Přes velké množství záporných vlastností mají stykačové systémy mnoho vlastností kladných, díky kterým dochází k jejich využívání i dnes, zejména pro jednoduché procesy tepelného zpracování. Např. jmenujme hlavně nízkou cenu, malé rozměry nebo galvanické rozpojení obvodu po vypnutí.

## REGULACE VÝKONU TOPNÝCH ČLÁNKŮ POMOCÍ ELEKTRONICKÝCH PŘÍSTROJŮ

Polovodičové přístroje jsou moderní spínací jednotky, které si rychle razí cestu do různých oblastí průmyslu. Obvody s těmito přístroji si získávají stále větší oblibu díky své dlouhé životnosti, malým rozměrům, možnosti montáže přímo do rozvaděče a absenci mechanických pohyblivých částí. Je nutno vyzdvihnout jejich odolnost k pracovnímu prostředí. Umístění v rozvaděčích, zvyšuje jejich odolnost proti vlhkosti a prachu. Vstupní obvody jsou dokonale odizolovány od výstupního obvodu, takže neexistuje zpětné ovlivňování vstupu. Jejich izolační schopnost je minimálně 2,5 - 4 kV a vazební kapacita mezi vstupem a výstupem nepřesahuje 10 pF.

Ovládání těchto jednotek je zpravidla pomocí vstupního unifikovaného signálu (0-10V, 2-10V, 0-20mA, 4-20mA). Dnes se stále více objevují přístroje ovládané pomocí komunikačního protokolu, jako jsou PROFIBUS, ETHERNET a další. Využití těchto protokolů s sebou přináší nemalé výhody při použití (např. možnost číst provozní veličiny přímo z přístroje, jako okamžitou hodnotu proudu a napětí

atd). Tím je dán široký rozsah snadného přizpůsobení k různým systémům řízení.

Nejpoužívanějšími režimy spínání jsou cyklické spínání a fázové řízení. To přináší řadu výhod zejména při řízení průmyslových pecí. Další nespornou výhodou těchto obvodů, oproti klasickým kontaktním spínacím přístrojům, je kratší reakční doba, maximální zpoždění oproti vstupnímu signálu je 10 ms při 50 Hz.

Polovodičové přístroje jsou napětově přizpůsobeny pro spínání fázového nebo sdruženého napětí. Konstrukčně jsou provedeny pro spínání třífázové, dvojfázové nebo jednofázové zátěže.

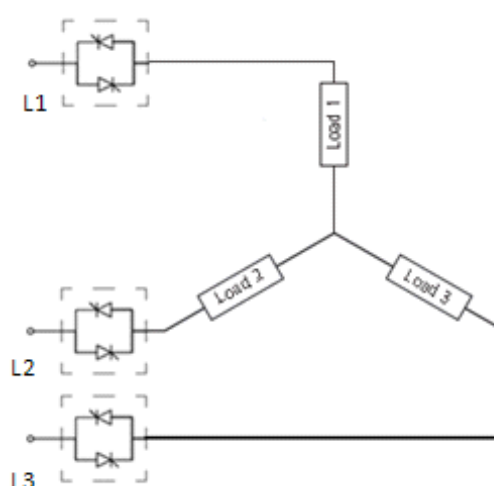
### Oblast použití

Polovodičové přístroje jsou vhodné pro spínání odporové, kapacitní i induktivní zátěže. Každá z nich přináší určitá specifika.

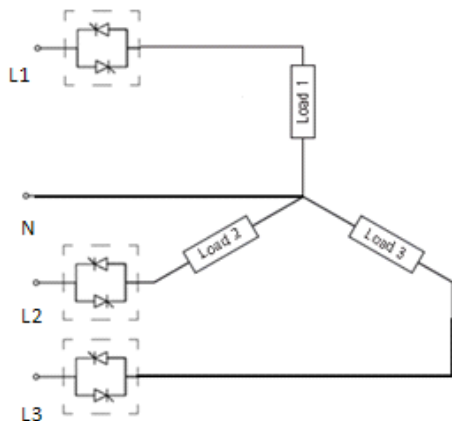
Mnou uvažovaná aplikace spínání zátěže v průmyslové elektrické peci je odporová zátěž. Jedná se o nejjednodušší případ aplikace spínání, zvláště, jedná-li se o zátěž s konstantní hodnotou odporu. Jednotka při spínání sleduje poměr  $di/dt$ , ten je v případě ohmické zátěže omezen pouze impedancí vedení a spínací charakteristikou spínacího prvku na výstupu. Při spínání větších proudů se doporučuje přidat malou sériovou indukčnost, čímž se omezí poměr  $di/dt$ . Dalším, velmi účinným způsobem omezení proudového nárazu je spínání v oblasti nulového napětí, kde nehrozí překročení zmiňovaného poměru.

Na následujících obrázcích uvádím varianty připojení tyristorových jednotek k odporové zátěži.

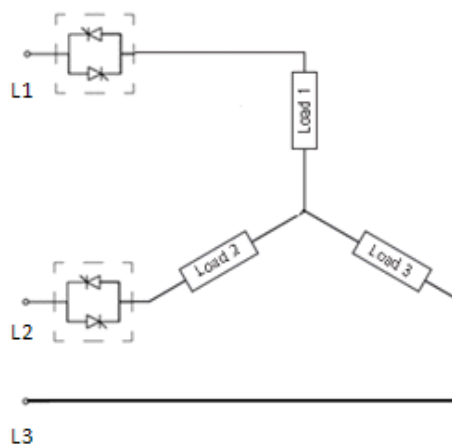
### Zapojení do hvězdy



Obr. 8: Bez nulového vodiče

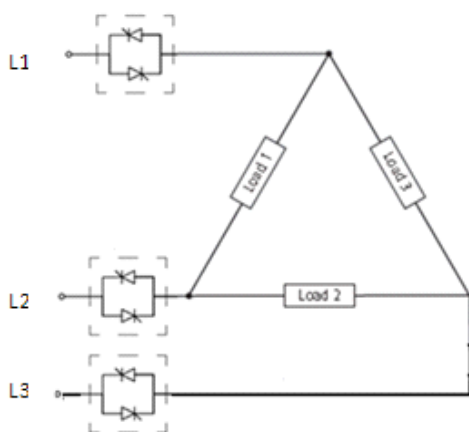


Obr. 9: S nulovým vodičem

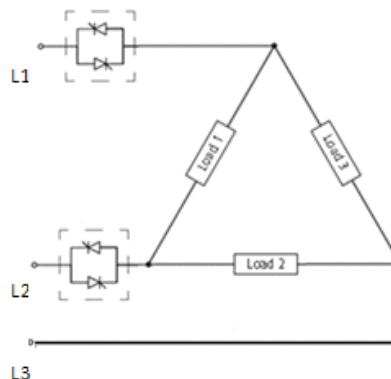


Obr. 12: Zapojení do hvězdy bez nulového vodiče v ekonomickém zapojení

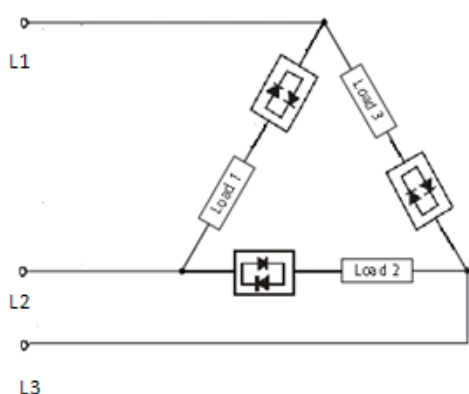
### Zapojení do trojúhelníku



Obr. 10: Uzavřený trojúhelník



Obr. 13: Uzavřený trojúhelník v ekonomickém zapojení



Obr. 11: Otevřený trojúhelník

### Ekonomicky úsporná zapojení

Ekonomická úspora spočívá ve vynechání jednoho výkonového spínače v jedné fázi. To znamená o 1/3 menší náklady na výkonovou část. K tomu lze použít jen následující zapojení.

### Přechodové děje při spínání

Při připojení jakékoliv zátěže ke zdroji dojde k takzvanému přechodovému ději v okamžiku zapnutí jednotlivých zátěží. To má za následek okamžitý nárůst proudu. Je nutné stanovit velikost tohoto špičkového proudu a jeho průběh v závislosti na čase. Tyto hodnoty jsou důležité pro správný návrh polovodičového přístroje, aby nedošlo k překročení jmenovitých hodnot proudu a následně k jeho destrukci.

### Ochrana proti nadproudům

Všechny spínací přístroje mají stanoven špičkový proud i délku jeho trvání. Překročení těchto hodnot může znamenat pro přístroj trvalé zničení. Pro návrh vhodné pojistky pak vycházíme z hodnoty, která je u většiny spínacích přístrojů uvedena. Pojistka by měla mít tuto hodnotu nižší, ale proudovou hodnotu vhodnou pro trvalý proud. Proto se doporučuje užití rychlých pojistek.

Výstupy polovodičových přístrojů jsou nejčastěji osazeny triaky, tyristory a v poslední době i tranzistory. U polovodičových přístrojů,

používajících na výstupu tyristory, se zapojují antiparalelně. Používají se pro náročnější aplikace, jelikož mají řadu výhod - podstatně vyšší  $du/dt$ , což znamená vyšší odolnost přístroje proti nežádoucímu sepnutí při prudkém nárůstu napětí. Vnitřní zapojení přístroje je provedeno v několika variantách. Vybavenost a volná konfigurovatelnost je předurčuje k jejímu širokému použití. Užité hodnota se také projevuje na jejich ceně. Dnes jsou na trhu přístroje jednoduché pro základní aplikace, ale i volně konfigurovatelné pro nejsložitější aplikace. Při návrhu těchto zařízení je nutné zvolit kompromis mezi cenou a vlastnostmi.

### Výběr správného prvku

Vycházíme z maximálního proudu zátěží, tedy včetně přechodového děje, kde jejich odběr je po delší dobu zvýšen. Tuto hodnotu násobíme konstantou 1,25 a najdeme nejbližší vyšší hodnotu polovodičového přístroje. Přesvědčíme se, zda přístroj obsahuje RC obvod, pokud neobsahuje, použijeme externí - zlepšuje  $du/dt$ . Proti napěťovým špičkám chráníme zařízení paralelním varistorem. Jistíme zásadně rychlými pojistkami s hodnotou menší, než je jmenovitá hodnota polovodičového přístroje.

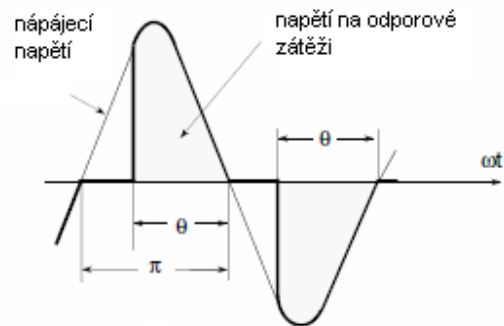
Při použití výkonových prvků je třeba si uvědomit, že se jedná o obvod, na jehož správnou funkci má vliv teplota okolí, se kterou je třeba při návrhu počítat a dle grafu (každý přístroj má vypracovaný graf závislosti zatěžovacího proudu na teplotě) upravit jmenovitý proud či zajistit dostatečné chlazení přístrojů. Při montáži do rozvaděče se doporučuje použít nuceného chlazení pro zlepšení odvodu tepla z přístrojů. Pro výpočet tepelné bilance v rozvaděči je třeba znát ztrátový výkon jednotlivých komponentů. Někteří výrobci uvádějí pro zjednodušený výpočet 1,1 násobek protékajícího proudu. Ofukováním přístrojů se snižuje tepelný odpor. Nejhorším konstrukčním řešením je uzavření přístrojů do skříní bez cirkulace vzduchu. Při vyšších proudech a ztrátových výkonech jsou přístroje vystaveny velkému tepelnému namáhání, které může způsobit jejich destrukci.

Další důležitou skutečností je to, že i v rozepnutém stavu protéká zátěži zbytkový proud výstupního spínacího prvku, a tudíž obvod není galvanicky oddělen, jak tomu bývá u stykačů.

## ZPŮSOBY ŘÍZENÍ ELEKTRONICKÝCH PŘÍSTROJŮ

### Fázové řízení

Tyristorové jednotky jsou taktéž schopné přijmout požadavek na výstupní výkon pomocí analogového signálu tak, aby podle něj dokázaly nastavit úhel otevření, jak je vidět na následujícím obrázku (obr. 14). Vysoká rychlost spínání dovoluje sepnout v takto definovaný okamžik v obou půlvlnách.



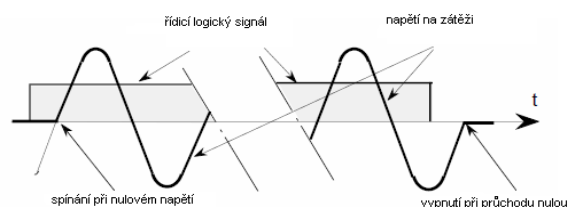
Obr. 14: Průběhy proudu a napětí při fázovém řízení.

U čistě odporových zátěží tímto typem spínání vzniká značné elektromagnetické rušení, protože dochází k sepnutí skokovou změnou na určitou velikost napětí a tomu odpovídající velikost proudu. Vzniklé rušení je nutné odfiltrovat. Tento problém vlivem přechodových jevů odpadá u induktivních zátěží, pro něž je tak fázové řízení vhodnější.

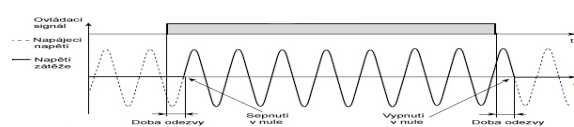
### Cyklické ovládání

#### Spínání v nule

Klasický režim spínání v nule je založen, stejně jako u stykačů, na regulaci typu ON-OFF, kdy časový interval ovládacího signálu určuje dobu sepnutí tyristorové jednotky, a tudíž i dobu, po kterou působí napájecí napětí na zátěži. Oproti stykačům však elektronické systémy tyristorové jednotky zaručí sepnutí při nejbližším průchodu nulovou hodnotou napětí. Jak je zřejmé z následujícího obrázku (obr. 15 a obr. 16), od okamžiku náběžné hrany ovládacího signálu do okamžiku sepnutí a obdobně u sestupné hrany ovládacího signálu do vypnutí může vzniknout krátká prodleva. Tato prodleva nemůže ovlivnit teplotní setrvačnost soustavy (několik milisekund). Největší výhodou sepnutí v okamžiku průchodu napěťové nuly je ta, že zátěží bude při sepnutí protékat minimální proud, což zároveň zajistí i minimální elektromagnetické rušení.



Obr. 15: Průběh napětí při spínání v nule – zapnutí a vypnutí.

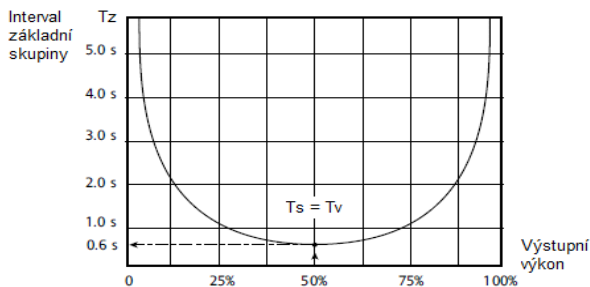


Obr. 16: Průběh napětí při spínání v nule na zátěži

Vedle tyristorových jednotek, které pracují s klasickým režimem řízeným logickým signálem, jsou jednotky pracující v „BURST“ režimu, které jsou schopné přijmout požadavek výkonové regulace ve spojitém spektru ovládacího signálu. Typickým signálem bývá proudový rozsah 4 až 20 mA nebo napěťový rozsah 0 až 10 V. V uvedených rozsazích zpracovává jednotka požadavky na výstupní výkon dodávané do zátěže lineárně, tzn. na dolních mezích je tyristorová jednotka rozpojena, v polovině rozsahu (12 mA resp. 5 V) je tedy výkon 50% a na horní mezi pak je do zátěže dodáván plný výkon. Tyristorová jednotka opět spíná při průchodu nulou, spínání je ale v tomto případě častější, protože bývá řízeno PID regulací a dochází při něm k vytvoření základní skupiny několika period síťového napětí.

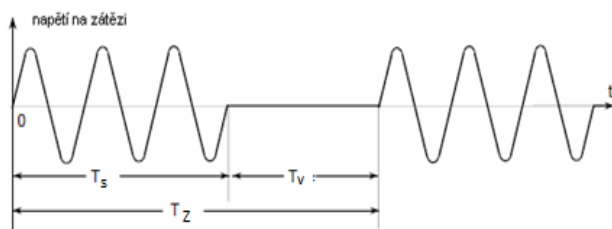
Další možnosti nastavení tyristorové jednotky jsou intervaly základní periody, se kterou při regulaci pracuje. Toto dává možnosti následujícího výběru:

- pevné nastavení určitého počtu period síťového napětí
- variabilní nastavení počtu period síťového napětí (viz. obr. 17)



Obr. 17: Teoretický příklad variabilního nastavení intervalu skupiny síťových period.

Splnění požadavku na dodávaný výkon do zátěže je realizováno proporčním rozdělením intervalu základní skupiny  $T_z$  na dobu  $T_s$ , po kterou je tyristorová jednotka sepnuta, tzn. do zátěže je dodáván plný výkon, a na dobu  $T_v$ , po kterou je jednotka vypnuta. Na obr. 18 je principiálně naznačen průběh napájení zátěže tyristorovou spínací jednotkou pracující v režimu tzv. „BURST“.

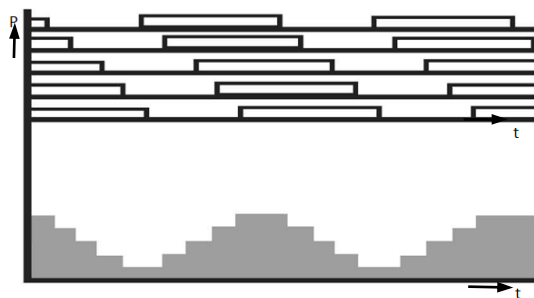


Obr. 18: Průběh napětí v režimu „BURST“.

V současné době se začínají vyvíjet algoritmy, které napomáhají řešit problémy týkající se problémů při spínání mnoha zónových zařízení, které mají při regulaci nepříznivé dopady na energetickou soustavu. Zde uvádím dva způsoby, které se snaží tyto dopady zmírnit.

### Sekvenční řízení

Jedna z metod, jak předcházet nárazům do sítě je sekvenční rozmístění okamžiku sepnutí tyristorových jednotek. Tato metoda však má také svoje nevýhody, zejména v situaci, kdy regulace požaduje nižší příkon do topného systému.



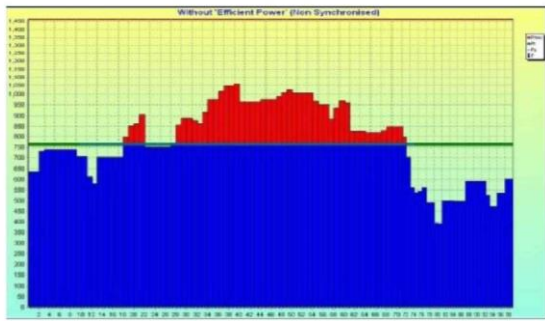
Obr. 19: Sekvenční spouštění spínání tyristorových jednotek

I v tomto případě může dojít k nerovnoměrnému zatěžování sítě, což je patrné z obr. 19. Vylepšením této metody je stanovení rozdílných časů pracovních cyklů jednotlivých tyristorových jednotek, ale vždy po určité době se i cykly s nestejnou periodou setkají. Je jasné, že pevně stanovený pracovní cyklus neumožňuje tak jemné odstupňování regulace příkonu do topných článků.

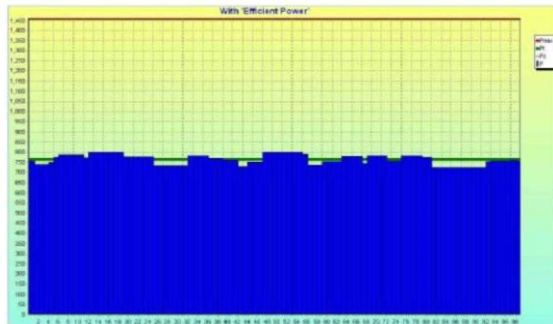
### Prediktivní řízení

Pro zabránění rázům do sítě byl vyvinut nový algoritmus řízení vícenásobných zátěží. Tento algoritmus pohlíží na mnohazónový systém řízený tyristorovými jednotkami jako na jeden komplexní systém.

V každém okamžiku je znám požadovaný příkon do topné soustavy pece. Algoritmus určí, kdy má která tyristorová jednotka být sepnuta a případně „rozdělí“ čas sepnutí na více dílčích sepnutí. V případě prediktivního řízení příkonu zná systém tyristorových jednotek požadovaný příkon v jednotlivých zátěžích a „skládá“ jednotlivé „balíčky“ příkonu tak, aby co nejvíce „vyhladil“ celkový odběr ze sítě. Je jasné, že čím více zátěží, tím lépe je možno příkon „vyhladit“. Na následujících grafech je porovnání obou metod řízení. Na obr. 20 červeně vyznačená část jsou ztráty, což je vlastně předností prediktivního řízení, které je dokáže odstranit.

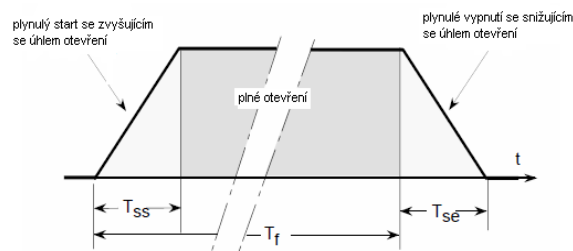


Obr. 20: Průběh příkonu do soustavy s tyristorovými jednotkami bez prediktivního řízení

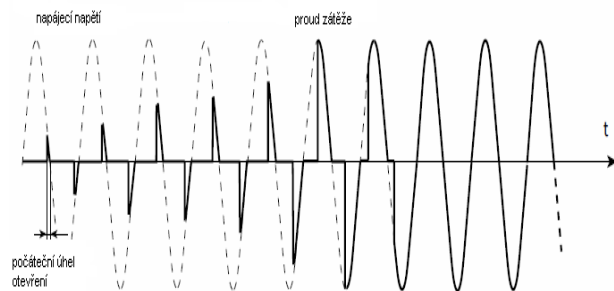


Obr. 21: Průběh příkonu do soustavy s tyristorovými jednotkami (stejná soustava) s prediktivním řízením.

V současné době se dbá především na dopady zařízení na elektrizační soustavu. K vylepšení dopadu spínání velkých odporových zátěží slouží spojení fázového a cyklického spínání, které omezuje velké proudové nárazy do sítě. Můžeme ho najít pod názvem SOFT START. Princip je vysvětlen na obr. 22 a obr. 23.



Obr. 22: Princip řízení



Obr. 23: Praktická ukázka náběhu.

## ZÁVĚR:

Cílem tohoto příspěvku bylo shrnout současné poznatky a představit nové metody řízení elektrických odporových pecí s nepřímým ohřevem. Závěrem chci připomenout zejména aplikační část se sekvenčním a prediktivním řízením. Na těchto metodách demonstrují vznik nových moderních algoritmů řízení, které se podstatným způsobem liší od klasického zónového řízení. Moderní přístup k řízení, zejména mnoha zónových energeticky náročných zařízení, má pozitivní vliv jednak na provoz a také na zpětné působení zařízení na elektrizační soustavu.

Přínosem je:

- - omezení zpětných rázů do sítě
- - omezení ztrát
- - odstranění rušení
- - symetrické rozdělení výkonu

Uvažovaná řešení jsou v souladu s novými trendy řízení elektrotepelných zařízení. Mé zkušenosti potvrzují, že zmíněné metody napomáhají k dosažení zefektivnění provozu energeticky náročných zařízení v nejrůznějších odvětvích průmyslu.

## PODĚKOVÁNÍ:

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS-2015-020.

## LITERATURA

- [1] Pavel Novák, Elektrické teplo - Vydavatel: Equilibria s.r.o Košice, 2010
- [2] Franz Beneke, Bernard Nacke, Herbert Pfeifer, Handbook of Thermoprocessing Technologies - Vydavatel: Vulkan - Verlag GmbH, 2012
- [3] Konstruktions – Handbuch, KANTHAL, 1966
- [4] Kanthal Globar SD Silikon karbide heating elements S-KA011-B-ENG 10-B-2,06.2011 Printed in Sweden
- [5] Resistance Heating Alloys for Industrial Furnaces 1- A -5 -3 ISBN 91 86720 06 6 Printed in Sweden
- [6] J. H. Brunklau, Stavba průmyslových pecí - Vytiskl TISK, knižní výroba, n.p. Brno
- [7] M. Dolejší, V. Tomek, Elektrické pece sušárny SNTL – Vydavatel: Nakladatelství technické literatury
- [8] M. Hodinka, Š. Fecko, F. Němeček, Přenos a rozvod elektrické energie – Vydavatel: SNTL Praha 1
- [9] J. Rada a kol., Elektrotepelná technika – Vydavatel: SNTL/ALFA Praha, 1985