

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NAPÁJECÍ ZDROJ ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE  
POWER SUPPLY OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

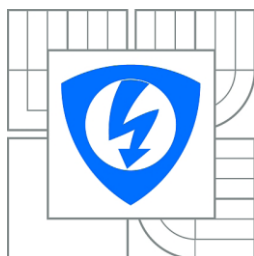
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. KAMIL BROŽÁK

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

NAPÁJECÍ ZDROJ ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE  
POWER SUPPLY OF ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

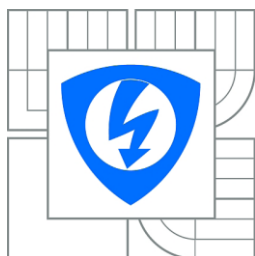
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. KAMIL BROŽÁK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PETR HUTÁK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Bc. Kamil Broďák

**Ročník:** 2

**ID:** 121600

**Akademický rok:** 2014/15

**NÁZEV TÉMATU:**

## Napájecí zdroj elektrostatického odlučovače

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Navrhněte koncepci vhodného napáječe pro zvolený elektrostatický odlučovač.
2. Provedte návrh zdroje pro napájení elektroodlučovače zvolených parametrů (řešení 1f transformátoru s usměrňovačem).
3. Navrhněte obvody řízení výkonu tohoto zdroje, posuďte různé režimy řízení pro optimální provoz.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] Skalický, J.: Teorie řízení, skripta FEKT, 2002

[2] Patočka M.: Vybrané state z výkonové elektroniky, sv.1. Skriptum, FEKT, VUT Brno.

**Termín zadání:** 22.9.2015

**Termín odevzdání:** 26.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Huták, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na seznámení s problematikou napájení elektrických odlučovačů. Vzhledem k doposud dominantnímu postavení jednofázových transformátorů pracujících na síťové frekvenci 50 Hz řízených tyristory, se práce zaměřuje právě na tyto zdroje. První část popisuje princip elektrického odlučování a popis vlastního elektrického odlučovače. Na to navazuje stručné seznámení s teorií návrhu elektrického odlučovače. Dále se práce zabývá popisem zdroje velmi vysokého napětí, který je rozdělen na transformátor s usměřovačem a řídicí skříň se silovými obvody a obvody zajišťujícími řízení dodávaného výkonu transformátorem. Je také stručně popsán systém řízení zdroje vvn při různých provozních stavech. V poslední části je proveden návrh chlazení rozvaděče včetně tyristorů a návrh silového vedení řídicí skříně zdroje, přívodního vedení a vedení k transformátoru.

## **Klíčová slova**

elektrické odlučovače; transformátor; usměřovač; zpětné vazby; tyristor; výkon; přeskok; průtočné množství; oteplení; teplota; zkratový proud

## **Abstract**

The diploma thesis focuses on the problems of electric power precipitators. Due to their current dominant position, the work concentrates on the sources of single phase transformers operating at the frequency of 50 Hz controlled by thyristors. The first part describes the electrostatic precipitator and its principle. This is followed by a brief insight into the proposal for an electrostatic precipitator. The work also explains the high voltage source that is divided into a transformer with a rectifier and into a control box with power circuits and control circuits that provide the power supplied by a transformer. The work also offers an explanation of the HV source system that operates at different conditions. The last part suggests a proposal for cooling cabinet including thyristors, for power line control box resources, for a supply line and a line to the transformer.

## **Keywords**

electrical precipitators; transformer; rectifier; feedback; thyristor; electric power; spark; flow rate; warming; temperature; short-circuit current

## **Bibliografická citace**

Brodák, K. *Napájecí zdroj elektrostatického odlučovače*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Huták, Ph.D.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Napájecí zdroj elektrostatického odlučovače, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 25.4. 2015

Podpis autora



## Obsah

1.	Úvod	9
2.	Seznámení s principem elektrického odlučování	10
3.	Seznámení s konstrukcí elektrického odlučovače	11
4.	Stručné seznámení s teorií návrhu elektrického odlučovače	12
5.	Zdroj pro napájení elektrického odlučovače	13
5.1.	Popis transformátoru	13
5.2.	Řešení usměrňovače	17
5.3.	Zpětné vazby	17
5.3.1.	Měření sekundárního proudu	17
5.3.2.	Měření sekundárního napětí	17
6.	Řízení výkonu VVN transformátoru	20
6.1.	Silová část	20
6.2.	Řídící část	22
7.	Stručný popis systému řízení zdroje VVN	23
8.	Příklad návrhu výkonové části zdroje elektrického odlučovače	26
9.	Výběr zdroje vvn	28
10.	Návrh řídicí skříně - stanovení oteplení uvnitř rozváděče nn extrapolací, podle normy ČSN IEC 890 + A1	29
10.1.	Výpočet účinného chladicího povrchu rozváděčového krytu $A_e$	30
10.2.	Výpočet vnitřního oteplení vzduchu $\Delta T_{0,5}$ v rozváděči, ve střední výšce krytu. Bez ventilačního otvoru, $A_e > 1.25 \text{ m}^2$	30
10.3.	Výpočet vnitřního oteplení vzduchu $\Delta T_{1,0}$ v rozváděči, v horní výšce krytu. Bez ventilačního otvoru, $A_e > 1.25 \text{ m}^2$	32
10.4.	Výpočet vnitřního oteplení vzduchu $\Delta T_{0,5}$ v rozváděči, ve střední výšce krytu. S ventilačním otvorem, $A_e > 1.25 \text{ m}^2$	33
10.5.	Výpočet vnitřního oteplení vzduchu $\Delta T_{1,0}$ v rozváděči, v horní výšce krytu. S ventilačním otvorem, $A_e > 1.25 \text{ m}^2$	34
11.	Aktivní chlazení rozváděčové skříně za pomoci nucené ventilace	35
12.	Výpočet skutečné teploty v rozváděči při daných podmínkách	37
13.	Určení vhodného tyristoru a způsobu jeho chlazení	38
13.1.	Teorie tyristoru	38
13.2.	Provedení pouzder tyristorů	39
13.3.	Ztrátový výkon tyristoru	39
13.4.	Určení vhodného tyristoru	40
13.5.	Výpočet chlazení tyristoru	42
14.	Návrh jištění řídicí skříně	46
14.1.	Určení omezeného proudu $I_c$ pro zvolenou pojistku	47
14.2.	Určení vypínací doby $t_v$ pro zvolenou pojistku	48
14.3.	Doba vypnutí pojistky, při zkratu na sekundární straně transformátoru	49
15.	Návrh silového vedení řídicí skříně	50
15.1.	Teorie návrhu	50
15.2.	Vlastní návrh silového vedení přívodního kabelu transformátoru, podle normy 33 2000-5-523	50
15.3.	Výpočet jmenovitého proudového zatížení vodiče	52
15.4.	Kontrolní výpočet úbytku napětí na zvoleném kabelu	53
15.5.	Kontrola tepelných účinků zkratových proudů pro přívodní kabel k transformátoru	53
15.6.	Návrh silových vodičů v řídicí skříně	55

15.7.	Návrh přívodního kabelu k řídicí skříni.....	55
15.8.	Kontrola tepelných účinků zkratových proudů pro přívodní kabel řídicí skříň.....	56
16.	Návrh stykače pro silový obvod řídicí skříň.....	57
17.	Závěr.....	57
18.	Literatura.....	59



## 1. Úvod

S rostoucí populací a s tím spojenou průmyslovou výrobou se stále více nabízí zamyšlení jak alespoň zmírnit vliv zvyšující se životní úrovně. Ta sebou nese nemalou zátěž pro životní prostředí. Je třeba se zamýšlet nad udržitelnou mírou tohoto trendu, který se pravděpodobně samovolně nebude měnit.

Celosvětové znečištění nebo změna chemického složení ovzduší, vod i půdy v krátkém časovém období a to převážně za posledních 150 let, způsobuje životnímu prostředí velké problémy. Některé méně odolné živé organismy se během tak krátké doby nedovedou adaptovat na nové podmínky, nebo jsou vlivem lidské činnosti vytlačovány ze svých přirozených prostředí na jiná a to většinou méně vhodná.

Pro zmírnění dopadů lidské činnosti na životní prostředí se vytvořil soubor hygienických norem a ochrana prostředí se stala celosvětovou záležitostí. Je tomu tak i v ochraně ovzduší, kde platí nařízení, které stanovují emisní limity pro znečišťující zdroje. K čištění technologických a odpadních plynů se používají různé zařízení. V této práci se budu zabývat elektrostatickými odlučovači a jejich napájecími obvody.

Popsání principu navazování elektrických nábojů na prachové částice se datují do první čtvrtiny devatenáctého století. První elektrické odlučovače se začínají zavádět počátkem dvacátého století.

Elektrostatické odlučovače mají doposud výhradní postavení v čištění plynů ze stacionárních zdrojů znečištění ovzduší. Rozsah jejich využití je poměrně veliký. V dnešní době se používají převážně k čištění plynů od tuhých znečišťujících látek ze spalovacích procesů a to od menších kotelen až po velké elektrárenské bloky. Objemové průtoky mohou být od 3000 m<sup>3</sup>/h do 3600000 m<sup>3</sup>/h. V těchto případech se jedná převážně o tak zvané komorové uspořádání odlučovače. Využívají se též pro čištění plynů z výrobních hal a různých chemických procesů a to od tuhých i kapalných příměsí. Velký rozmach elektrických odlučovačů je spojen s dostupností vhodných zdrojů velmi vysokého napětí, především pak vynálezem rotačního usměrňovače. V dnešní době je převážná část zdrojů velmi vysokého napětí pro elektrostatické odlučovače řešena jednofázovým transformátorem s dvoucestným diodovým usměrňovačem (Graetzův můstek).

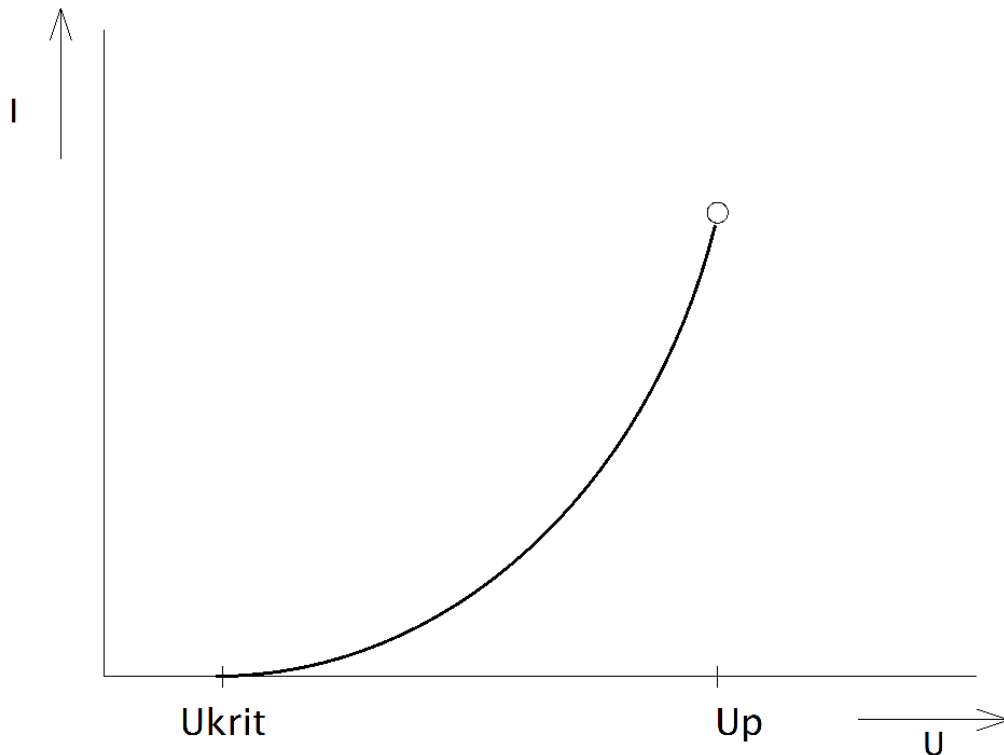
## 2. Seznámení s principem elektrického odlučování

Proces odstraňování tuhých látek z nosného plynu je založen na principu navazování elektrických nábojů na prachové částice. Důležitou úlohu hraje tvar a výše intenzity elektrického pole mezi elektrodami. Elektrické pole vyvolává silové působení na částice prachu. Překročí-li někde intenzita elektrického pole kritickou hodnotu  $U_{krit}$  dojde v tomto místě k nárazové ionizaci plynu, tak zvanému koronovému výboji. Dochází k lavinovité ionizaci. V určité vzdálenosti od vysokonapěťových elektrod již rychlost elektronů klesá a elektrony difundují na neutrální molekuly plynu. Působením elektrické síly se kladné ionty přesouvají k vysokonapěťové elektrodě (na které je přiváděno záporné napětí) a záporné ionty spolu s částicemi prachu se pohybují směrem k usazovací elektrodě. Ta je uzemněna a částice jsou silovými účinky pole přitlačovány k jejímu povrchu.

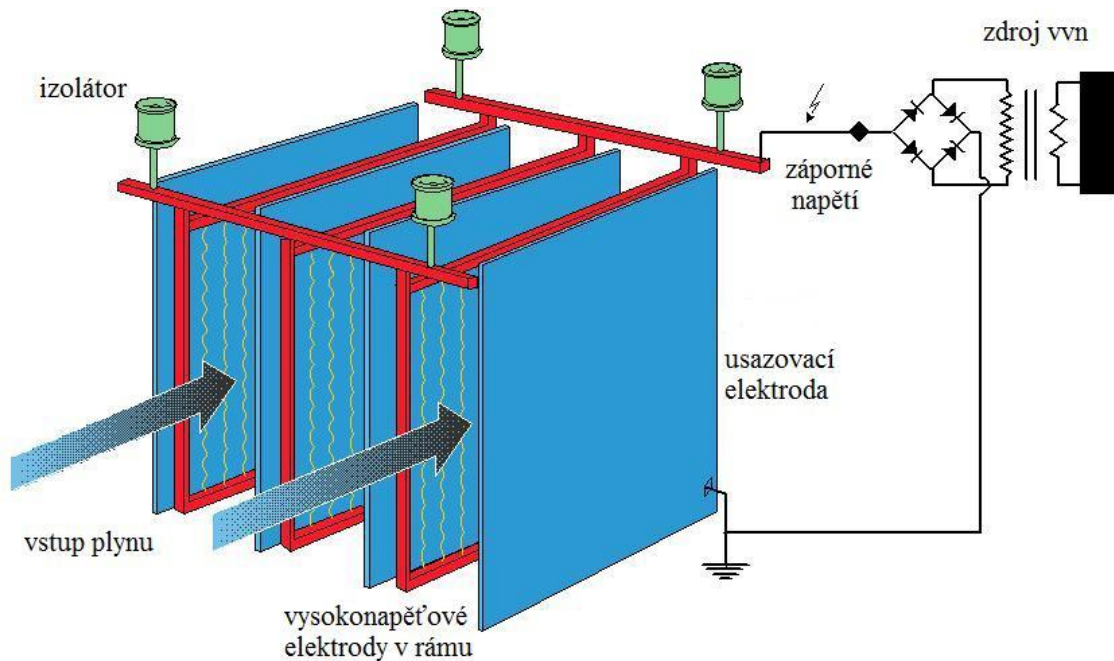
$$E(\text{V/m}) = R(\Omega \cdot \text{m}) \cdot I(\text{A/m}^2) \quad (1)$$

Jak již bylo řečeno na vysokonapěťové elektrody, se přivádí usměrněné záporné napětí. Důvodem je větší pohyblivost volných elektronů a také to, že při záporné koruně se dá odlučovač provozovat na vyšší napětí (vyšší přeskokové napětí  $U_p$  - napětí při němž dochází k jiskrovému výboji mezi elektrodami), což vede k lepší účinnosti elektrofiltru.

[ 1, 4 ]



Obrázek 1: Voltampérová charakteristika elektrostatického odlučovače



Obrázek 2: Detail aktivní části elektrického odlučovače (systém elektrod)

### 3. Seznámení s konstrukcí elektrického odlučovače

Horizontální komorové odlučovače, používané k čištění plynu ze spalovacích procesů v energetice, se skládají ze dvou základních funkčních částí. Je to systém vysokonapětových sršících elektrod a systém usazovacích sběracích elektrod. Usazovací elektrody jsou tvořeny z plochých profilovaných desek vodivě spojených s konstrukcí odlučovače, která musí být dobře uzemněna. Jsou umístěny svisle ve směru proudění tak, aby mezi nimi mohl plyn proudit bez větší tlakové ztráty. Mívají rozteč 300 mm – 500 mm. Mezi usazovací elektrody jsou vloženy rámy, ve kterých jsou nataženy vysokonapětové elektrody. Nejčastěji to jsou roztažené drátové pružiny nebo hrotové elektrody s vyšší nabíjecí schopností pro elektricky rezistivní prachy. Rámy jsou zavěšeny na nosných izolátorech. Tyto dva systémy jsou od sebe vzájemně izolovány tak, že jediným propojením je nosný plyn obsahující odlučovaný prach. Plyn je do odlučovače přiváděn potrubím rychlostí zhruba 12 m/s. Přes tvarové díly přejde do rozměrově většího průřezu odlučovače, kde se jeho rychlost výrazně sníží přibližně na 1 m/s. Tato rychlost už je dostatečně malá k tomu, aby se nabitě prachové částice mohly přesouvat k usazovacím elektrodám a nebyly strhávány proudem vzdušninou z odlučovače přes kouřový ventilátor do komína. Oba systémy musí být čištěny od nachytaného prachu. K tomu účelu jsou rámy elektrod osazeny nárazníky, do kterých v pravidelných intervalech narážejí přepadová kladiva poháněná přes převodovku elektromotorem. Nachytaná vrstva prachových částic se nárazem uvolní a spadne do trychtýřovité výsypky. Oklepy musí být načasovány tak, aby vrstva usazeného prachu byla dostatečně hmotná, došlo k jejímu odtržení a zároveň nedocházelo k opětovnému strhávání padající masy částic proudící vzdušninou. Pokud by nebyl usazený prach odstraněn včas, mohlo by docházet vzhledem k zvýšení intenzity elektrického pole k výbojům v této vrstvě. Tento jev se nazývá zpětná korona. Prach totiž

tvoří překážku v podobě elektrického odporu a pro dobrou funkci je potřeba zvyšovat napětí v elektrickém odlučovači. Zpětná korona má za následek vznik iontů opačné polarity a částice při svém pohybu k usazovacím elektrodám ztrácejí náboj při styku s těmito ionty. Snižuje se odlučovací rychlost, snižuje se přeskokové napětí a zvyšuje se proud [ 2, 3, 4 ]. Z výsypek je popílek dopravován do zásobníku, odkud je většinou odvážen buď na další zpracování, nebo k likvidaci.

#### 4. Stručné seznámení s teorií návrhu elektrického odlučovače

Nejdříve je třeba zvolit tak zvanou odlučovací rychlost  $w$ . Ta je určena experimentálně a je funkcí mnoha fyzikálních, chemických, elektrických a geometrických parametrů. U většiny elektrostatických odlučovačů je zhruba desetkrát menší než střední průtočná rychlost plynu  $v$ . Ta by neměla přesahovat z výše uvedených důvodů 1 m/s.

Výpočet odlučivosti (účinnosti).

$$\alpha = 1 - \frac{k_2}{k_1} \quad [-] \quad (2)$$

$k_1$  - vstupní koncentrace TZL v plynu [ $\text{g}/\text{m}^3_{\text{ef}}$ ], musí se přepočítat na provozní teplotu a tlak  
 $k_2$  - výstupní koncentrace TZL v plynu [ $\text{g}/\text{m}^3_{\text{ef}}$ ], musí se přepočítat na provozní teplotu a tlak  
 TZL – tuhé znečišťující látky

Výpočet specifické usazovací plochy.

$$-f_{\text{us}} = \frac{\ln(1-\alpha)}{w} \quad [\text{s}/\text{m}] \quad (3)$$

$w$  – odlučovací rychlost

Výpočet celkové plochy usazovacích elektrod.

$$F_{\text{us}} = f_{\text{us}} \cdot Q_v \quad [\text{m}^2] \quad (4)$$

$Q_v$  [ $\text{m}^3_{\text{ef}}/\text{s}$ ] - průtočné množství plynu při provozní teplotě a tlaku

Pro dobrou funkci elektrického odlučovače je potřeba zajistit dostatečný měrný elektrický proud  $i_2$  na  $1\text{m}^2$  plochy usazovacích elektrod. Tato hodnota je minimálně  $i_2 = 0,4 \text{ mA}/\text{m}^2$ . Je zjištěna experimentálně pro danou technologii.

Výpočet potřebného minimálního proudu dodaného zdrojem.

$$I_2 = i_2 \cdot F_{\text{us}} \quad [\text{mA}] \quad (5)$$

Podle zvolené rozteče mezi usazovací a vysokonapěťovou elektrodou se určí napětí  $U_{2-0}$ , které zdroj musí mít na prázdko. Jedná se o tabulkovou hodnotu určenou experimentálně. Zdroj musí zaručovat, že při plném zatížení jmenovitým proudem  $I_2$  dodá potřebné napětí  $U_2$  do odlučovače. Předpokládá se, že při zatížení kdy odlučovač odebírá jmenovitý proud  $I_2$  je napětí  $U_2$  zhruba 70%  $U_{2-0}$ .

Z těchto hodnot lze určit přibližný výkon  $P_2$  potřebný pro napájení odlučovače.

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \quad [\text{W}] \quad (6)$$

Z výkonu  $P_2$  můžeme určit přibližný příkon  $P_1$  napájecího zdroje, vynásobením koeficientem 1,4. Tento je určený experimentálně a respektuje vliv zátěže a také tvar nesinusového průběhu proudu (efektivní hodnotu proudu).

$$P_1 = P_2 \cdot 1,4 \quad [\text{W}] \quad (7)$$

Takto hrubé určení nám pro návrh potřebného zdroje pro elektrický odlučovač stačí.  
[ 4 ]

## 5. Zdroj pro napájení elektrického odlučovače

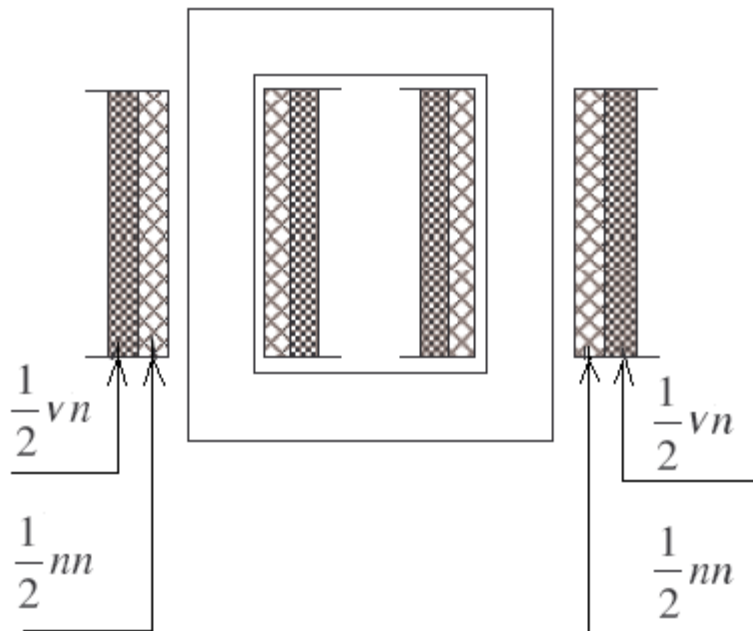
Zdroje velmi vysokého napětí záporné polaritý pro elektrické odlučovače jsou v dnešní době řešeny dvěma způsoby. Nejrozšířenější jsou jednofázové transformátory pracující na frekvenci sítě 50Hz, jejichž výkon se řídí pomocí tyristorů. Druhý způsob jsou jednofázové transformátory pracující na frekvenci stovek až kHz s měničem, kde se výkon řídí pomocí IGBT tranzistorů. V obou případech je jádro s vinutím transformátoru umístěno do olejové nádoby společně s usměrňovačem a zpětnovazebními prvky.

Tato práce se bude zabývat prvním případem transformátoru pracujícího na frekvenci 50Hz řízeného tyristory. Takto je v České republice a na Slovensku v současné době řešena převážná většina elektrických odlučovačů.

Výrobce zdroje většinou nabízí 5 -10 výkonových řad transformátorů rozložených tak, aby pokryli rozsah standardně vyráběných elektrických odlučovačů pro energetiku. Výstupní napětí zdroje na prázdko  $U_{2,0}$  bývá 70 – 150 kV a výstupní proud  $I_{2-n}$  200 – 2000 mA. Tyto hodnoty si určí výrobce odlučovače na základě informací od provozovatele nebo zhotovitele kotle (zařízení).

### 5.1. Popis transformátoru

Magnetický obvod transformátoru je většinou řešen jako jádrový. Z důvodu ztrát vířivými proudy je jádro složené ze vzájemně izolovaných elektromagnetických plechů, za studena válcovaných, magneticky orientovaných. Plechy musí kvůli lepšímu využití transformátoru co nejlépe vyplňovat vnitřní prostor cívky a musí být dostatečně staženy, aby při provozu “nevrčely“. Vinutí je řešeno tak, že nižší napětí (nn) navinuté na kartitové trubce je umístěno blíže železného jádra a na něho je soustředně nasunuto vinutí vyššího napětí (vn) navinuté také na kartitové trubce. Pro zmenšení rozptylových toků se umísťuje polovina vinutí nižšího napětí (nn) a polovina vinutí vyššího napětí (vn) na každý sloupek jádra.



Obrázek 3: Umístění vinutí na jádře

Před primární vinutí se umísťuje tlumivka, která eliminuje proudové rázy vznikající při přeskocích v elektrofiltru, zároveň zlepšuje průběh napájení transformátoru. Nízkonapěťové vinutí je většinou z lakovaného plochého vodiče. Ten vzhledem k poměrně velkým primárním proudům  $I_1$  a tím pádem potřeby větších průřezů vodiče, zaručuje maximální využití místa na cívce. Kompletní cívka se vysuší v peci při teplotě asi  $80^\circ\text{C}$  po dobu 2 hodin. Poté se ponoří do nádoby s lakem (např. S1942) a nechá se ve vakuovací komoře asi 1 hodinu. Po vytáhnutí z lázně a okapání se dá do vypalovací pece. Pozvolna se zahřívá na teplotu  $125^\circ\text{C}$  a nechá se při této teplotě asi 12 hodin vypalovat.

Vysokonapěťové vinutí je z lakovaného měděného drátu o průřezu  $0,8 - 2\text{mm}^2$  (podle požadovaného výstupního proudu  $I_2$ ). Každá navinutá vrstva vn cívky, se ke konci prokládá několika vrstvami papírové izolace (cca 10 vrstev dle tloušťky papíru). Někdy se pro zvýšení izolačního odporu proklady papírem dělají i v polovině navinuté vrstvy. Uvážíme-li, že transformátor má výstupní napětí  $U_{2-0} - 100\text{kV}$ , na každé vn cívce je tedy  $50\text{kV}$ . Sekundární cívka pro jmenovitý výkon přibližně  $110\text{kVA}$  má běžně okolo 4500 závitů, na jednu vrstvu počítáme 250 závitů, dvě pak 500 závitů. Jednoduchým výpočtem zjistíme, že napětí mezi vrstvami (začátkem spodní a koncem následující-500 závitů) je  $5555\text{V}$ .

$$\frac{U_{2-0}}{N_2} \cdot N_{\text{závitů ve dvou vrstvách}} = \frac{100000}{4500} \cdot 500 = 5555\text{V} \quad (8)$$

V případě zmenšení počtu závitů na vrstvu by se nám sice podařilo snížit napětí mezi vrstvami na jedné straně, ale zároveň by se nám zvýšila šířka cívky. Proto se musí volit kompromis mezi dodržením určitých rozměrů a vyhovující izolační vzdáleností.

Vzhledem k velkému množství navinutého izolačního papíru, který nám vodič zároveň izoluje i tepelně, by se mohlo stát, že uvnitř cívky dojde k nadměrnému oteplení. Vyšší teplota

způsobuje degradaci olejové náplně transformátoru a také papírová izolace rychleji stárne. Odvod tepla se řeší tak, že po navinutí určitého počtu závitů jsou vloženy po obvodu svisle kartitové vymešovací tyče, na které se vine další vrstva. V mezerách mezi tyčemi pak může cirkulovat olej a odvádět teplo z vnitřního prostoru cívky.



*Obrázek 4: Navíjení vysokonapěťové cívky s proklady na cirkulaci oleje pro lepší chlazení vinutí*

Poslední vrstvu pak tvoří závit z hliníkové fólie o šířce navinutých vrstev kvůli zlepšení homogenity (tvaru) elektromagnetického pole. Na tu se napájí měděný drát, který se po té vyvede čelem ven z cívky. Navinutá cívka se osadí pertinaxovými čely s otvory na cirkulaci oleje a lehce zabandážuje tkanicí. Poté se cívka nasune na jádro, kde již máme osazenou nn cívku.



*Obrázek 5: Vnitřní provedení transformátoru*



*Obrázek 6: Kompletní transformátor*



Pro lepší izolační a chladicí účinky je transformátor ponořen v nádobě s olejem. Olejová nádoba má po obvodu umístěna chladicí a dilatační žebra. Způsob chlazení je přirozený ONAN.

## 5.2. Řešení usměrňovače

Jak již bylo řečeno výše, je ve společné nádobě s transformátorem umístěn také usměrňovač velmi vysokého napětí. Jedná se o můstkový usměrňovač, jehož jedno “rameno“ (dioda) je tvořena velkým množstvím speciálních lavinových usměrňovacích dvojdiód (dvě diody v sérii v jednom pouzdře) cca 100 na každou větev – celkem tedy okolo 400 dvojdiód v usměrňovači, spojených do série. Dostatečný počet dvojdiód nám musí zaručit rozložení velmi vysokého napětí tak, aby nedošlo k průrazu usměrňovače. Dvojdiody mají závěrné napětí okolo 2,5 kV a velmi dobře odolávají přepět'ovým špičkám při přechodových dějích i proudovým rázům od vznikajících přeskoků ve filtru. Pro tento účel se dají použít dvojdiody KY255D (výrobce Semikron). Vývody diód jsou k sobě spojené v zamáčknutých dutinkách, zakápnutých cínem a v podstatě namotány na pertinaxovou lištu. Použité diody a provedení může být různé podle výrobce.



Obrázek 7: Provedení můstkového usměrňovače (Graetzův můstek)

## 5.3. Zpětné vazby

Pro měření sekundárního napětí  $U_2$  se používá, děličů napětí (viz obr.8) RM R5,6,7,8. Pro sekundární proud  $I_2$  děliče napětí R1,2,3,4. Ty zaručují pokles napětí na bezpečnou úroveň vhodnou k dalšímu zpracování.

Kvůli možnosti vzniku přepět'ových špiček na zpětnovazebných signálech, jsou pro jejich oříznutí instalovány na výstupu těchto signálů z transformátoru bleskojistky.

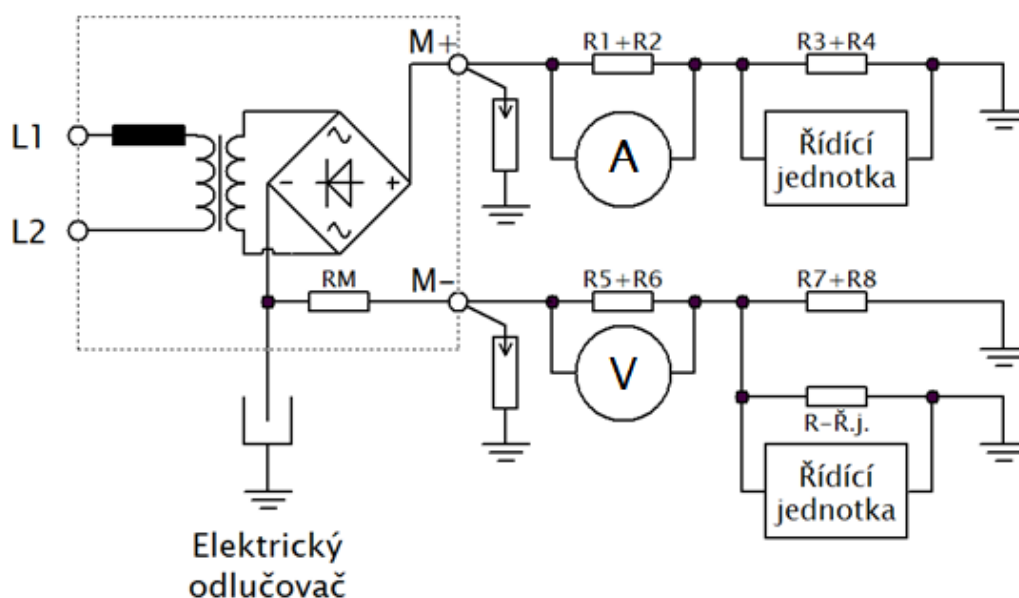
### 5.3.1. Měření sekundárního proudu

Měření sekundárního proudu se provádí na kladném vývodu usměrňovaného napětí, který je přes měřicí bočníky R1-4 uzemněn. Je vedený přímo z usměrňovače přes keramickou izolační

průchodku v nádobě transformátoru (M+) na desku zpětných vazeb. Vše je umístěno v krabici vně transformátoru. Bočník je tvořen výkonovými drátovými rezistory. Řešení může být různé. Často se používá dvou paralelně spojených rezistorů a k nim do série další dva paralelně spojené rezistory s uzemněným koncem (viz obr. 8).

Pro příklad uvedu jednoduchý návrh proudové zpětné vazby.

Transformátor má jmenovitý sekundární proud  $I_2 = 500\text{mA}$ . Pro měření proudu použiji voltmetr s rozsahem 0 – 4V, se stupnicí 0 – 500mA (panelové měřidlo na dveřích). Pro úbytek 4V při proudu 0,5A vypočtu podle Ohmova zákona rezistor hodnoty  $8\Omega$ . Pro zlepšení bezpečnosti a rozložení výkonu volím dva  $16\Omega$  paralelně ( $R_1, R_2$ ). Do série k nim zapojím další dva paralelně spojené rezistory  $68\Omega$  ( $R_3, R_4$ ), celková hodnota  $34\Omega$ , na nichž je úbytek napětí 0-17V a po další úpravě, slouží k informaci o sekundárním proudu pro řídicí jednotku.



Obrázek 8: Vnitřní zapojení transformátoru včetně zpětných vazeb

Zkontroluji výpočtem ztrátový výkon rezistorů.

$$P = R \cdot I^2 \quad (9)$$

$$P_1 = R_1 \cdot (I_2)^2, P_1 = 8 \cdot 0,5^2 = 2\text{W (1W na jednom)}, P_2 = 34 \cdot 0,5^2 = 8,5\text{W (4,25W na jednom)}$$

Kvůli proudovým rázům od přeskoků v elektrofiltru, ke kterým občas dochází a také lepší mechanické pevnosti, volíme rezistory na větší výkony. Raději volíme rezistory 20W, například TR 260 nebo (výrobce Tesla Blatná)

### 5.3.2. Měření sekundárního napětí.

K měření sekundárního napětí nám slouží záporný potenciál usměrněného napětí. Z usměrňovače vede hlavní cesta záporného potenciálu vysokého napětí přes tlumící odpor na vysokonapětovou průchodku (určenou k připojení zátěže). Další odbočka z usměrňovače vede na napěťový dělič, jehož hodnota může být různá podle rozsahu zvoleného měřidla. Tento dělič nám sráží napětí na bezpečnou hodnotu. Proud protékající děličem slouží k určení velikosti vvn.

Pro příklad uvedeme. Máme transformátor dávající napětí na prázdno  $U_{2-0}$  90kV. Pro měření vysokého napětí použijeme měřidlo s rozsahem 0 – 1mA se stupnicí 0 – 100kV, pak lehce vypočtu podle Ohmova zákona potřebnou velikost rezistoru.  $R=100000/0,001$ . Potřebná hodnota rezistoru ( $R_M$ ) je 100M $\Omega$ . Z děliče pak záporné napětí vede přes keramickou izolační průchodku v nádobě (M-) na zpětnovazební desku vně transformátoru, kde je obvod přes odpory ( $R_5, R_6, R_7, R_8$ , každý mající odpor okolo 1M $\Omega$ ) přichycen k zemi. Důvodem je, aby se v případě poruchy (rozpojení měřicího obvodu), nezavedlo vysoké napětí do řídicí skříně, viz obr. 8.

Měřicí rezistor je umístěn v olejové nádobě. Olej tak plní zároveň izolační i chladicí funkci. Většinou je řešen do série spojenými vrstevnými vysokoohmovými rezistory 5 – 8 M $\Omega$  například **3WK 680 08 (výrobce Tesla Blatná)**, které jsou rozmístěny a propojeny oboustranně na pertinaxové desce, viz obr. 9. Při návrhu musí být dodrženy potřebné rozestupy mezi jednotlivými odpory, protože rozdíly potenciálů mezi začátkem a koncem dvojice odporů mohou být velké. Řádově do 10 - 16 kV, podle použitých rezistorů.



Obrázek 9: Vysokoohmový “měřicí“ rezistor

Transformátor je také osazen bezpečnostními prvky, které jsou určeny ke včasnému rozpoznání závady. Standardně to bývá kontaktní jímkový teploměr na měření teploty oleje, jež signalizuje přetížení transformátoru a při dosažení havarijní teploty se zdroj vypíná (60-65°C). Jímka je umístěná v prostoru vrchní části transformátoru. Dále kontaktním tlakovým snímačem na hlídání vnitřního tlaku o rozsahu 100-300 mbar (pro případ vývinu plynů od případných výbojů) a hladinovým snímačem pro hlídání úniku oleje netěsnostmi nebo prasklou keramickou průchodkou. Snímač na hlídání hladiny oleje je umístěn z vrchu transformátoru tak, aby zareagoval vypnutím zdroje, když dojde k úniku oleje, ještě před obnažením vysokonapětových částí transformátoru. Tím se zabrání například proražení usměrňovače nebo zničení děliče od vvn, které jsou umístěny ve vrchní části transformátoru.

Na přání zákazníka se osazuje integrované bezpečnostní zařízení R.I.S. od společnosti Comem, případně podobné zařízení od jiných firem. Přístroj v sobě kombinuje několik signalizačních a ochranných funkcí. Kontaktní teploměr, tlakový snímač, hladinový snímač, indikátor vývoje plynu v transformátoru.



Obrázek 10: Integrované bezpečnostní zařízení R.I.S.

U průchodky vvn bývá také osazeno zkratovací zařízení, sloužící k vybití náboje z elektrického odlučovače a zároveň jeho koncové spínače blokuje zdroj vvn.

## 6. Řízení výkonu vvn transformátoru

### 6.1. Silová část

Jak již bylo řečeno dříve, budeme se zabývat pouze řízením výkonu transformátoru pomocí tyristorů. Řídící skříň s regulátorem musí umožňovat dodávat do filtru výkon na základě různých provozních stavů.

Silová část skříně obsahuje výkonové tyristory, jistící prvky, měření U a I, ovládací a signalizační prvky.

Hlavní silové pojistky je vhodné volit rychlé s vypínacím rozsahem  $\alpha$  nebo  $g$  a kategorie užití  $R$ , vzhledem k polovodičovým prvkům. Například OEZ P51U06, P51V06. Jejich nevýhodou je, že mají větší Jouleovy ztráty (více topí). Větší ztráty jsou způsobené tím, že mají-li rychle vypínat v oblasti  $3-4xI_n$ , musí mít slabší průřez zkratových můstků a průchodem provozního proudu více hřejí.

Musí platit:  $I^2t_{\text{pojistky}} < I^2t_{\text{polovodiče}}$ .

$I^2t$  je hodnota propuštěné energie daným zařízením

Propuštěná energie zařízením

$$W = \int_0^t R \cdot i^2 dt = R \cdot I^2 \cdot t < k \quad (10)$$

$k$  – reprezentuje hodnotu tepelné energie, kterou snese jištěné zařízení, aniž dojde k poškození  
 $I$  – efektivní hodnota proudu

Při konstantní rezistanci  $R$

$$I^2 t < \frac{k}{R} = c \quad (11)$$

$c$  – propuštěná energie daným zařízením

[ 5 ]

Zapojení silové části mají různí výrobci prakticky stejné. Liší se jen v použitých přístrojích od různých firem a jejich umístění v řídicí skříni. Větší rozdíl je ve volbě tyristorů a jejich chlazení. Někteří výrobci používají dva tyristory antiparalelně spojené, každý na vlastním chladiči, jiní volí dva tyristory ve společném pouzdře na jednom chladiči. Základní údaje pro volbu tyristoru jsou, velikost jmenovitého primárního proudu vvn transformátoru, napětí napájecí sítě, pak to mohou být také různé okolnosti dané prostředím, prostorem nebo přáním zákazníka. Nejdůležitějším předpokladem pro spolehlivý a dlouhodobý provoz tyristoru je dodržení dovolené provozní teploty polovodičového přechodu. Ta může být 100 – 130 °C (u speciálních až 150°C). Tato teplota je především určena propustným proudem a z něho vzniklých ztrát v tyristoru. Tento ztrátový výkon musí být odveden chladičem do okolního vzduchu.

Chladič musí být navržen tak, aby celkový ztrátový výkon  $P$  nezpůsobil zahřátí polovodičového přechodu nad jeho maximální přípustnou hodnotu  $\vartheta_{j \max}$ .

V ustáleném stavu musí platit rovnováha

$$P \leq \frac{\vartheta_{j \max} - \vartheta_a}{\sum R_g} \quad (12)$$

$P$  - celkový ztrátový výkon

$\sum R_g$  - součet všech přechodových tepelných odporů mezi polovodičovým čipem součástky a okolím chladiče (tepelný přechod polovodič-pouzdro součástky, pouzdro součástky-chladič, chladič-okolní vzduch)

$\vartheta_a$  - teplota okolí chladiče

$\vartheta_{j \max}$  - maximální dovolená teplota polovodičového přechodu

Krátkodobě můžeme tyristor zatížit podstatně větším proudem než za ustáleného stavu. Je to možné díky tomu, že polovodičový materiál a částečně i pouzdro diody má schopnost akumulovat určité množství tepelné energie definované tzv. mezním přetěžovacím integrálem  $I^2 t$  (Jouleův integrál), o kterém jsme se již zmiňovali výše. [ 6 ] Toho se využívá při případných přeskokích ve filtru, kdy může být tyristor zatěžován poměrně častými proudovými špičkami.

V těchto případech musí regulátor vynechat několik zapalovacích cyklů pro deionizaci prostředí v EO. Obvykle stačí vynechat 3 cykly (60 ms).

U menších výkonů je chladič s tyristory umístěn přímo na montážním panelu rozvaděče, jedná se o provedení s bezpotenciálovými tyristorovými moduly, v němž jsou integrovány dva tyristory spojené do série (např. IXYS MCC). Pro větší výkony se používá pastilkových tyristorů (např. ABB, ČKD polovodiče a.s.), kde se využívá oboustranné chlazení tyristoru. Chladiče se montují přímo na anodu a katodu každého tyristoru (přes dosedací podložky). K sobě jsou stažené přes pružný přitlačný nosník a dotažené předepsaným momentem. Vzhledem k tomu, že chladiče plní zároveň úlohu vodičů, jsou jejich součástí praporce na připojení jednak propojů mezi oběma sestavami a pak také silových přívodních a odvodních kabelů. Z uvedeného vyplývá, že je na nich po zapnutí trvalé napětí, proto musí být přichyceny k montážnímu panelu přes bezpečný pevný izolant.

Na chladičích jsou rozmístěny kontaktní snímače teploty, které spínají nucený ofuk chladičů (je-li instalován), při jejich zahřátí na určitou teplotu. Podají také hlášení do řídicí jednotky o překročení maximálního dovoleného oteplení. Ten poté vypíná zapalovací pulsy a silové stykače.

Celá silová část je většinou složena z hlavního pojistkového odpojovače s připojovací sadou na přívodní vodiče, stykače, sestavy tyristor-chladič a svorky pro připojení odvodních vodičů.

Měření primárního proudu se provádí měřícím transformátorem a slouží jak k zobrazování na panelovém měřidle na dveřích řídicí skříně, tak pro informaci do řídicí jednotky. Primární napětí je měřeno přímo panelovým měřidlem na dveřích řídicí skříně a to přes pojistky, mezi primární fází a spínanou fází za tyristory. Regulátor si většinou primární napětí dopočítává sám, nebo je měřeno přes transformátor.

## 6.2. Řídicí část

Řídicí část pro zdroj vvn se dá shrnout do následujících oblastí.

Obvod detekce průchodu síťového napětí nulou.

Slouží k přesnému načasování zapalovacích pulsů pro tyristory. Abychom nemuseli pracovat přímo s napájecím napětím 400V, snížíme napětí pro obvod transformátorem 400V/24V. Čas spuštění zapalovacích pulsů se dá též využít k výpočtu primárního napětí, je-li tato informace potřeba.

Obvod pro regulaci výkonu (zapalovací obvod).

Vlastní zapalovací obvod si buď výrobci řídicích skříní navrhnu sami, nebo se dá koupit přímo od výrobce tyristorů tzv. modul pro regulaci výkonu. Ten mívá většinou poměrně široký rozsah vstupního napětí pro zapalovací pulsy (4-32V/10-30mA).

Obvody na úpravu zpětných vazeb.

Signály zpětných vazeb se většinou upravují na hodnoty potřebné pro další zpracování regulátorem (procesorem).

Obvod detekce přeskočků (jiskrového výboje v EO).

U starších typů řídicích skříní bylo vyhodnocení přeskočků v elektrickém odlučovači řešeno většinou analogovým obvodem. V dnešní době už většina výrobců řeší vyhodnocení přeskočků softwarově z prudkého poklesu sekundárního napětí nebo z proudové špičky na měřeném sekundárním proudu.

Tyto obvody mohou být buď umístěny na jednotlivých deskách plošných spojů mimo regulátor, což bylo běžné u starších typů řídicích skříní, nebo integrované v řídicí jednotce (regulátoru).

Obvody vstupů a výstupů.

Ty mají za úkol galvanicky oddělit binární signály z různých bezpečnostních prvků, technologie filtru, dálkové ovládání, hlášení stavů zdroje vvn na nadřazený systém. Signalizovány a detekovány mohou být různé provozní stavy, podle přání zákazníka. Signály jsou odděleny přes relé.

Komunikace s nadřazeným systémem je řešena dle přání zákazníka. Řídicí jednotka většinou mívá různé možnosti (PROFIBUS, MODBUS, Ethernet).

Dále skříň obsahuje jištění ovládacích obvodů, transformátor 400V/230V pro napájení osvětlení a ventilátorů, zdroje pro napájení obvodů vstupů-výstupů a regulátoru, síťový filtr, odrušovací členy, svorkovnice.

Na dveřích skříně jsou umístěny ovládací prvky pro ruční zapnutí - vypnutí - přepnutí do dálkového ovládání. Dále grafický dotykový displej pro možnost kontroly a nastavení parametrů, sledování aktuálního stavu a výpisů poruchových hlášení, panelová měřidla primárního a sekundárního U, I, signálky aktivní poruchy a provozu zdroje vvn, bezpečnostní vypínač - nouzové vypnutí zdroje.

Na základě celkového ztrátového výkonu řídicí skříně se zvolí způsob chlazení, pokud nedostačuje přirozené chlazení. Ve většině případů to znamená zvolit typ ventilátoru spínaného termostatem a k tomu navrhnout odpovídající velikost ventilačních otvorů.

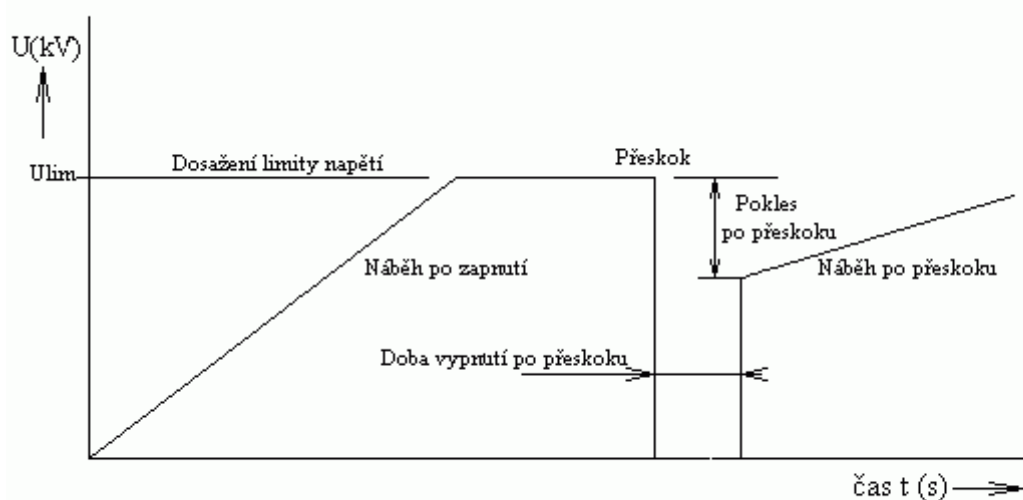
## **7. Stručný popis systému řízení zdroje vvn**

Řídicí jednotku (regulátor) můžeme považovat za nejdůležitější část řídicí skříně zdroje vvn. Jedná se o integrovaný mikroprocesorový systém, jehož hlavními úkoly je dodávat do elektrického odlučovače požadovaný výkon podle zvoleného režimu řízení, nastavených limitů (sekundární proud a napětí) a zvolených parametrů. Dále dohlíží na stav transformátoru a také na základní bezpečnost provozu EO.

Po zapnutí zdroje vvn se zvyšuje výkon dodávaný do EO podle spouštěcí rampy nastaveného programu a to do doby nedosáhne-li sekundární napětí nebo proud nastavené limitní hodnoty ( $U_{2lim}$ ,  $I_{2lim}$ ). Na první dosažené limitě se najíždění zastaví a řídicí jednotka drží  $U_2$  nebo  $I_2$  na nastavené hodnotě. Takové chování lze považovat za ideální provozní podmínky. Ty jsou ale v reálném provozu spíš výjimkou. Běžně se mění výkon kotle v řádu

desítek minut, spaluje se nestejnorodé palivo (například ve spalovnách komunálního odpadu), to znamená, že jsou velké rozdíly v chemickém složení spalin. Mění se vlhkost spalin, průtok, teplota, velikost TZL atd.

Z výše uvedeného plyne, že se neustále mění elektrický odpor mezi elektrodami a dochází k přeskokům (jiskrovým výbojům mezi elektrodami). Na tyto výboje musí regulace reagovat. V praxi to znamená, že po detekovaném prvním (nebo dvou po sobě jdoucích) přeskoku vypíná regulátor zapalovací pulsy tyristorům na dobu nezbytnou pro deionizaci prostředí v EO. Tato doba se dá nastavit, většinou však trvá 3 periody (60ms). Po této době se vrátí na původní výkon poníženy o hodnotu určenou parametrem “Pokles napětí  $U_2$  po přeskoku“ (bývá nastaveno 2 až 4 kV). Pak následuje nárůst výkonu určený parametrem “Strmost nárůstu napětí  $U_2$ “ (bývá nastaveno 0,2 až 0,6 kV/s) a to do dosažení některé z limit, nebo do dalšího přeskoku.



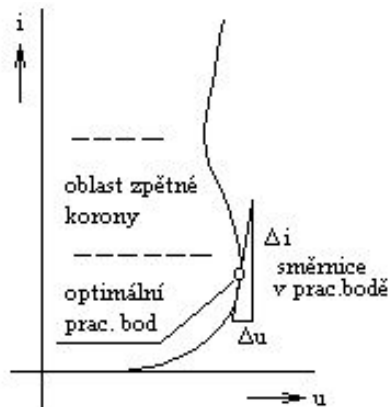
Obrázek 11: Průběh regulace

Součástí programu je často i parametr “Žádaný počet přeskoků za minutu“ kde se zadává počet přeskoků za minutu. Program si zapamatuje informaci o napětí, při kterém k přeskoku došlo a dopočítá strmost nárůstu napětí (kV/s) tak, aby se dosáhlo přeskokového napětí ve spočítané době, podle zvoleného počtu přeskoků za minutu. Pro příklad, je požadováno 6 př/min, nastavený pokles napětí po přeskoku je 2 kV. Tzn. je potřeba dosáhnout přeskokového napětí za 10s. Jednoduchým výpočtem nastavíme strmost nárůstu napětí na 0,2 kV/s.

Většina regulátorů také nabízí hlídání optimálního pracovního bodu na voltampérové charakteristice filtru tzv. řízení podle tangenty. Hlídá se poměr aktuálního přírůstku napětí a proudu  $\Delta U/\Delta I$ . Je-li dosaženo hodnoty poměru dané nastaveným parametrem, udržuje se zdroj v okolí tohoto pracovního bodu. Toto řízení se používá při nepříznivých vlastnostech odlučovaného materiálu, kdy se pracovní bod dostává do tzv. oblasti zpětné korony. Při zpětné koruně je intenzita elektrického pole tak veliká, že se začínají tvořit výboje i ve vrstvě prachu na usazovacích elektrodách, jak již bylo řečeno dříve. Tento proces má za následek, že se



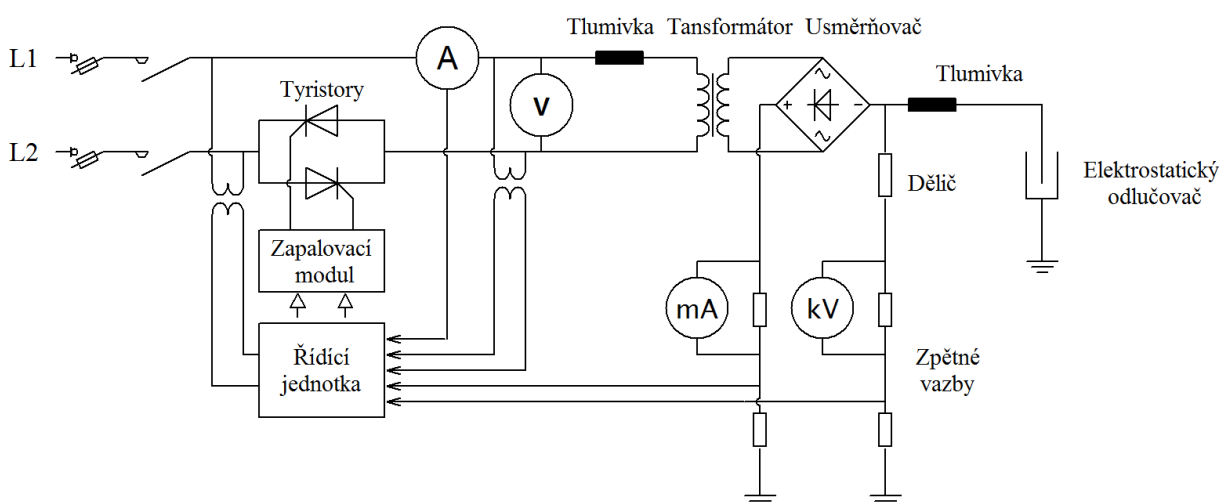
nabité částice v místech, kde ke koruně dochází, neutralizují a odlučovací proces přestává fungovat.



Obrázek 12: Regulace pomocí tangenty

Za určitých podmínek může být výhodný tzv. semipulzní režim. V tomto režimu se střídá doba plného výkonu a žádného nebo sníženého výkonu. V praxi to znamená, že tyristor v jedné půlce sepně a další (dle nastaveného počtu) vynechá nebo poníží výkon podle nastaveného parametru. Toho se využívá při vysokém odporu prachu, kdy je obtížné rovnoměrné rozložení proudu na elektrodách a střední hodnota napájecího proudu musí být nízká  $0,1$  až  $0,5 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$ . Hodnota okamžitého proudu je však dostatečná pro udržení potřebné intenzity a přidržení prachu na usazovacích elektrodách  $E(\text{V/m}) = R(\Omega\text{m}) \cdot I(\text{A/m}^2)$ . [ 4 ]

Z důvodu šetření elektrické energie, mohou být jednotlivé zdroje stejného odlučovače řízeny optimalizací provozu. Program optimalizace bývá součástí řídicí jednotky a spočívá v tom, že jedna řídicí jednotka (MASTER) do které je přiveden signál z prachoměru  $4\text{-}20\text{mA}$ , zadává proudové limity ostatním jednotkám (SLAVE). Používá se integrovaného PID regulátoru.



Obrázek 13: Zjednodušené schéma napájecích obvodů elektrického odlučovače

## 8. Příklad návrhu výkonové části zdroje elektrického odlučovače

Tato část práce se bude zabývat návrhem silových obvodů řídicí skříně zdroje vvn, včetně chlazení a kabeláže. V návrhu místy použijeme určité zjednodušení, které by se na výsledku nemělo projevit. Většinou vyplývá z dříve zjištěných skutečností.

### POPTÁVKA ELEKTROČÁSTI EO

Poptáváme dodávku, montáž a uvedení do provozu napájení a řízení 3-sekcvého EO pro technologii odlučování TZL za kotlem na spalování biomasy 23 t/h.

#### Zadané parametry:

Napěťová soustava:	3 PEN, AC 50Hz, 400/230 V, TN-C-S
Typ EO:	EMO 1-12-5,5-2-0,35/3,2-21-D-L– viz. příložené schéma
	Poč. el. sekcí v sérii (-) 3
	Rozteč komor v sekci 1,2,3 (mm) 350,350,350
	Usazovací plocha sekce (m <sup>2</sup> ) 1610+1610+1610=4830

Pohony a spotřebiče pro EO

#### 1. Zdroje VVN - 3 ks

- $U_{2p} = 105/70$  kV,  $I_2 = 800$ mA,  $U_1 = 400$ V. Včetně regulátorů a řídicích vyzbrojených skříní pro řízení a blokadu VVN. Rozváděčové skříně OEZ, typ QA40, IP 40
- rozšířeno o komplet propojovací sadu (stěnové průchodky + tlumicí odpory)
- umístění na střeše EO bez speciálních nároků na povrchovou úpravu – 3x zdroj + 3x stěnová průchodka + 3x propojovací sada s 3x tlumícím odporem. Rozvodna kotle na úrovni +0 vedle patky EO – skříně a řízení

Požadujeme:

- nabídnout řídicí jednotky bez rozšířené funkce technologie a vč. dalších potřebných komponentů (jištění atd.)
- řídicí nadřazený systém Simatic S7 pro 3x CU2 + celou technologii EO
- komunikace na systém kotle po lince PROFIBUS
- včetně kabeláží, lávek, žlabů, kabelových průchodek a montáže elektro

#### 2. Oklepy elektrod EO - celkem 5 ks

Oklep USE	3x	0,12 kW/400V	na boku EO
Oklep VNE	3x	0,12 kW/400V	na střeše EO (čidlo polohy rotační kliky)
Oklep RS	1x	0,12 kW/400V	na vstupním díle EO shora (čidlo polohy rotační kliky)

Požadujeme:

- komplet výbavu z hlediska řízení z S7 a jištění
- vč.el. připojení vč. dodávky a montáže kabeláží a deblokačních skříněk pro místní ovládní, pro tyto části požadujeme rovněž projekt
- řízení z S7

### **3. Vyhřívání izolátorů EO - celkem 12 ks**

Každý z 12 izolátorů je vybaven topením 2x800W/2x400V

- umístění na střeše EO v nosnících

Požadujeme:

- komplet výbavu z hlediska řízení z S7 a jištění (aut. odpojení po dosažení žádané teploty) a dodávku teploměrů PT 100 – 4 ks
- vč. el. připojení vč. dodávky a montáže kabeláží, pro tyto části požadujeme projekt
- řízení z S7

### **4. Vyhřívání výsypek EO – topná tělesa - celkem 15 ks**

Topná tělesa – každé 500W/2x400V

- umístění z boků výsypky EO

Požadujeme:

- komplet výbavu z hlediska řízení z S7 a jištění (aut. odpojení po dosažení žádané teploty) a dodávku teploměru PT 100 – 3 ks
- vč. el. připojení vč. dodávky a montáže kabeláží, pro tyto části požadujeme projekt
- řízení z S7

### **7. Řízení doprav odprašků**

Posloupnost od EO ke kontejneru:

1 ks – šnekový dopravník ŠD250 L=7400 pod výsypkou EO – 2,2 kW/400V

1 ks – rotační podavač RTA 250 pod ŠD250 – 0,75 kW/400V

Požadujeme:

- komplet výbavu z hlediska řízení z S7 a jištění, čidla rotace
- vč.el. připojení vč. dodávky a montáže kabeláží a deblokačních skříněk pro místní ovládání, pro tyto části požadujeme projekt
- řízení z S7 – posloupnost odstávek od kontejneru, vazba na odstávku zdrojů VVN, funkce ručního odstavení dopravy z místa od kontejneru se zpětným automatickým zapnutím po cca 30 minutách

### **8. Teplota spalin**

- 1 ks – dodávka čidla pro teplotu spalin za EO – monitoring na S7 + projekt zapojení
- vč. zapojení a dodávky kabeláží

## 9. Výběr zdroje vvn

Podle zadaných parametrů objednatele byl zvolen transformátor BA-T/R 103/110/940, výrobce Bas Elektra.

AKCE / CONTRACT:				ZAKÁZKOVÉ ČÍSLO / ORDER NUMBER:					
TYP / TYPE: <b>BA-T/R 103/110/940</b>				OZNAČENÍ / MARKING:					
VÝROBNÍ ČÍSLO / SERIES NUMBER:									
ZAPOJENÍ CÍVEK:		I.	II.	III.	WINDING INTERCONNECTION:		I.	II.	III.
JMENOVITÉ NAPĚTÍ / RATED VOLTAGE					VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ / OUTPUT VOLTAGE				
U1 [V]		<b>400</b>			U2av [kV]				
JMENOVITÝ PROUD / RATED CURRENT					ŠPIČ. VÝST. NAPĚTÍ / PEAK OUT. VOLTAGE				
I1 [A]		<b>258</b>			U2p [kVp]		<b>110</b>		
JMENOVITÝ VÝKON / RATED POWER					VÝSTUPNÍ PROUD / OUTPUT CURRENT				
S1 [kVA]		<b>103</b>			I2av [mA]		<b>940</b>		
STŘEDNÍ PROUD / AVERAGE CURRENT									
Iav [A]		<b>232</b>							
FREKVENCE / FREQUENCY: f				<b>50</b> [Hz]		ROK VÝROBY / YEAR OF PRODUCTION:			
ISOLAČNÍ ODPOR PŘI 20 °C: INSULATION RESISTANCE AT 20 °C:				VVN/Fe [GΩ] VHV/EARTH	<b>10</b>	VVN/NN [GΩ] VHV/LV	<b>10</b>	NN/Fe [GΩ] LV/EARTH	<b>10</b>
OHMICKÉ ODPORY VINUTÍ PŘI 20 °C: WINDING RESISTANCE AT 20 °C:				[mΩ]		1 - 2	<b>3,7</b>	2 - 3	<b>5,5</b>
MĚŘICÍ VVN ODPOR / MEASURING VHV RESISTOR:				Rm		<b>240</b> [MΩ]		TLUMÍCÍ TLUMIVKA/DUMPING COIL Lt - [mH]	
TYP USMĚRŇOVAČE / RECTIFIER TYP				<b>KU 200 / 255D1</b>		TLUMÍCÍ ODPOR/DUMPING RESISTOR Rd <b>150</b> [Ω]			
ZAPOJENÍ CÍVEK / WINDING INTERCONNECTION:				I.	II.	III.	POZNÁMKA / NOTE: T835		
<b>MĚŘENÍ NAPRÁZDNO / OPEN-CIRCUIT TEST</b>									
VSTUPNÍ NAPĚTÍ / INPUT VOLTAGE		U1 [V]	<b>400</b>						
ŠPIČ. VÝSTUP. NAP. / PEAK OUT. VOLTAGE		U2p [kV]	<b>112</b>						
VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ / OUTPUT VOLTAGE		U2av [kV]	<b>91</b>						
PROUD NAPRÁZDNO / NO-LOAD CURRENT		I1mag [A]	<b>8,9</b>						
ZTRÁTY NAPRÁZDNO / NO-LOAD LOSS		P0 [W]	<b>701</b>						
<b>MĚŘENÍ NAKRÁTKO / SHORT-CIRCUIT TEST</b>									
VÝSTUPNÍ PROUD / SHORT CIRCUITED CURRENT		I2av [mA]	<b>940</b>						
ŠPIČ. VÝSTUPNÍ PROUD / PEAK OF CURRENT		I2p [mA]	<b>1740</b>						
NAPĚTÍ NAKRÁTKO / SHORT CIRCUIT VOLTAGE		U1k [V]	<b>137</b>						
NAPĚTÍ NAKRÁTKO / PERCENTAGE VOLTAGE		uk [%]	<b>32,2</b>						
PROUD NAKRÁTKO / SHORT CIRCUIT CURRENT		I1k [A]	<b>207</b>						
ZTRÁTY NAKRÁTKO / SHORT CIRCUIT LOSS		Pk [kW]	<b>2,10</b>						
PRŮRAZNÉ NAPĚTÍ OLEJE / BREAKDOWN VOLTAGE OF OIL:				<b>&gt; 60</b> [kV]					
TYP OLEJE / OIL TYPE:				<b>INHITO 100</b>					
CELKOVÁ HMOTNOST / TOTAL WEIGHT:				<b>1 990</b> [kg]		HMOTNOST OLEJE / WEIGHT OF OIL: <b>820</b> [kg]			
VSTUPNÍ SVORKY / LINE TERMINALS		PROPOJENÍ SVOREK / TERMINALS CLAMPING							
<b>1 - 3</b>					<b>I.</b>				

Tabulka 1: Parametry zvoleného transformátoru vvn.

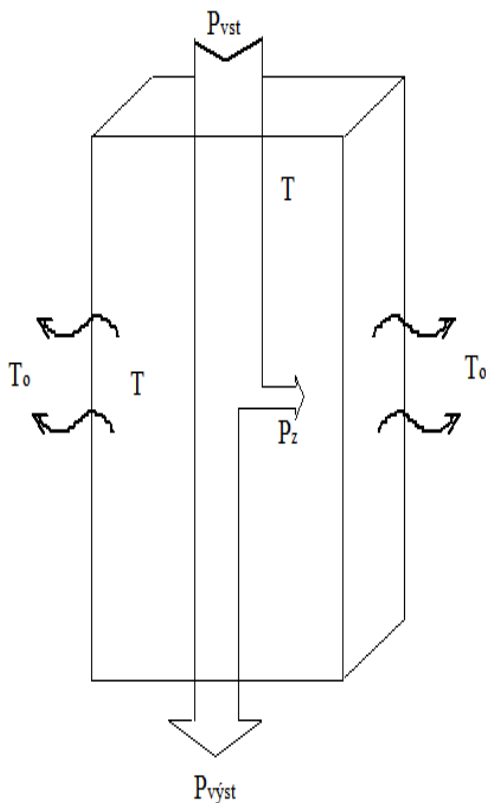
## 10. Návrh řídicí skříně - stanovení oteplení uvnitř rozváděče nn extrapolací, podle normy ČSN IEC 890 + A1

Na přání zákazníka a s přihlédnutím k prostoru rozvodny je řízení zdroje vvn umístěno do celoplechové rozváděčové skříně OEZ, typ QA40 - 200604.

- IP 40
- pro vnitřní použití
- maximální teplota okolí 40°C
- rozměry skříně jsou: šířka - 600mm, výška - 2000mm, hloubka - 400mm

Postup výpočtu:

Maximální teplota okolního vzduchu na rozvodně je stanovena 35°C.  
Rozváděč je umístěn v řadě s ostatními skříněmi.



Obrázek 14: Schéma toků v rozváděči.

- $P_{vst}$  [W] - elektrický výkon, vstupující do rozváděče.
- $P_{výst}$  [W] - elektrický výkon, vystupující z rozváděče.
- $P_z$  [W] - ztrátový výkon vnitřního vybavení rozváděče.
- $T$  [°C] - teplota uvnitř rozváděče
- $T_o$  [°C] - teplota okolí rozváděče

Na určení ztrátového výkonu vnitřního vybavení řídicí skříně  $P_z$ , byl použit wattmetr pro výkonovou analýzu jednofázových a třífázových sítí Chauvin Arnoux C.A 8210. Měření bylo provedeno na zařízení stejných parametrů instalovaném pro EO za kotlem na biomasu v Dorogi Erömü (Maďarsko) do stávajícího rozvaděčového pole.

Ztrátový výkon vybavení rozvaděče byl určen z rozdílu vstupního a výstupního elektrického výkonu.

$$P_z = P_{vst.} - P_{výst.} \quad (13)$$

$$P_z = 44,71 - 43,90 = 0,81 \text{ kW}$$

$$P_z = 810 \text{ W}$$

### 10.1. Výpočet účinného chladícího povrchu rozvaděčového krytu $A_e$ .

Jak již bylo řečeno, rozvaděč je umístěn v řadě s ostatními skříněmi. Z umístění plyne hodnota činitele povrchu  $b$  reprezentujícího rozptyl tepla z jednotlivých povrchů krytu  $A_o$ , vzhledem k typu instalace skříně viz. tabulka 2.

Typ instalace	Činitel povrchu $b$
Nekrytý horní povrch	1,4
Krytý horní povrch, např. u vestavěných krytů	0,7
Nekryté boční plochy, např. čelní, zadní a boční stěny	0,9
Kryté boční plochy, např. zadní strana krytu montovaných na stěnu	0,5
Boční plochy středních krytů	0,5
Povrch podlahy	nebere se v úvahu

Tabulka 2: Činitel povrchu  $b$  podle typu instalace.

Jednotlivé povrchy  $A_o$  jsou vypočteny z rozměrů krytu a činitele povrchu:

- horní kryt:  $A_o = \text{šířka} \cdot \text{hloubka} \cdot b = 0,6 \cdot 0,4 \cdot 1,4 = 0,336 \text{ m}^2$
- přední kryt:  $A_o = \text{šířka} \cdot \text{výška} \cdot b = 0,6 \cdot 2 \cdot 0,9 = 1,08 \text{ m}^2$
- zadní kryt:  $A_o = \text{šířka} \cdot \text{výška} \cdot b = 0,6 \cdot 2 \cdot 0,9 = 1,08 \text{ m}^2$
- boční levý kryt:  $A_o = \text{hloubka} \cdot \text{výška} \cdot b = 0,4 \cdot 2 \cdot 0,5 = 0,4 \text{ m}^2$
- boční pravý kryt:  $A_o = \text{hloubka} \cdot \text{výška} \cdot b = 0,4 \cdot 2 \cdot 0,5 = 0,4 \text{ m}^2$

Celková účinná chladící plocha  $A_e$ :

$$A_e = \sum(A_o \cdot b) \quad (14)$$

$$A_e = 0,336 + 1,08 + 1,08 + 0,4 + 0,4 = 3,296 \text{ m}^2$$

### 10.2. Výpočet vnitřního oteplení vzduchu $\Delta T_{0,5}$ v rozvaděči, ve střední výšce krytu. Bez ventilačního otvoru, $A_e > 1.25 \text{ m}^2$ .

$$\Delta T_{0,5} = k \cdot d \cdot P_z^x \quad (15)$$

- k - konstanta krytu v závislosti na účinném chladičím povrchu, viz. graf 1.
- d - činitel krytu, vyjadřuje závislost oteplení na počtu vnitřních vodorovných mezistěn v rozváděči viz. tabulka 3
- x - exponent vyjadřující závislost oteplení v rozváděči na efektivní tepelné ztrátě P  
x = 0,804 pro kryt bez ventilačních otvorů
- P<sub>z</sub> [W] - ztrátový výkon vnitřního vybavení rozváděče

Výpočet oteplení ve střední části rozváděče:

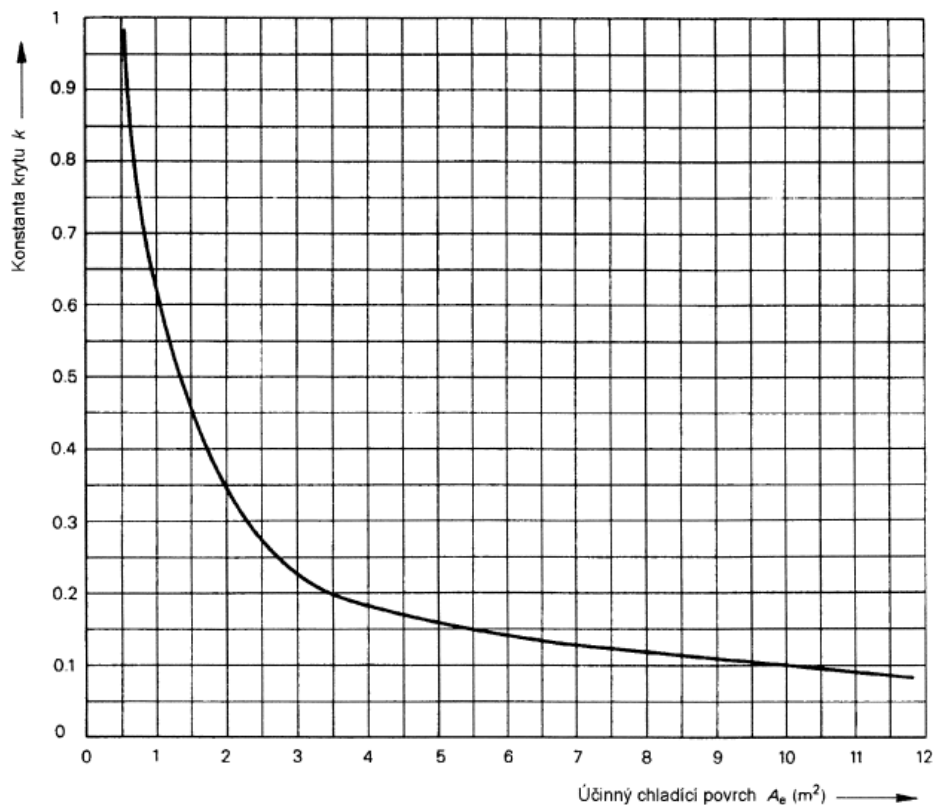
$$\Delta T_{0,5} = k \cdot d \cdot P_z^x$$

$$\Delta T_{0,5} = 0,205 \cdot 1 \cdot 810^{0,804} = 44,67 \text{ K}$$

Teplota ve střední části rozváděče:

$$T = T_o + \Delta T_{0,5} \tag{16}$$

$$T = 35 + 44,76 = 79,76 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Graf 1: Konstanta krytu k pro kryty bez ventilačních otvorů.

Počet vodorovných mezistěn n	0	1	2	3
Činitel d	1,00	1,05	1,15	1,30

Tabulka 3: Činitel krytu d pro kryty bez ventilačních otvorů.

**10.3. Výpočet vnitřního oteplení vzduchu  $\Delta T_{1,0}$  v rozváděči, v horní výšce krytu. Bez ventilačního otvoru,  $A_e > 1.25 \text{ m}^2$ .**

$$\Delta T_{1,0} = c \cdot \Delta T_{0,5} \quad (17)$$

c - činitel krytu, reprezentuje rozdělení teploty uvnitř krytu (zahrnuje provedení a typ instalace rozváděče). Pro náš případ volíme křivku č. 3, pro mezilehlý přístupný kryt, viz. graf 2.

Výpočet činitele  $f$ , reprezentujícího poměr výška /základna krytu:

$$f = \frac{h^{1,35}}{A_b} \quad (18)$$

$$f = \frac{2^{1,35}}{(0,4 \cdot 0,6)} = \frac{2,549}{0,24} = 10,6213$$

h [m] - výška krytu

$A_b$  [m<sup>2</sup>] - plocha základny krytu

Výpočet oteplení v horní části rozváděče:

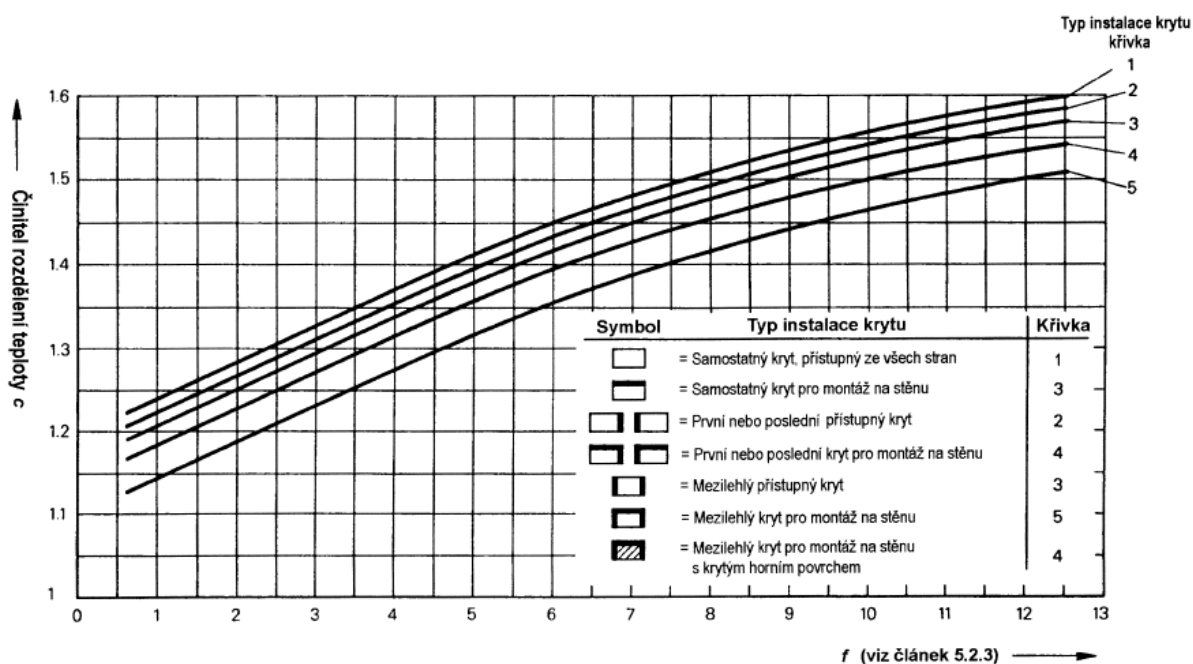
$$\Delta T_{1,0} = c \cdot \Delta T_{0,5}$$

$$\Delta T_{1,0} = 1,535 \cdot 44,67 = 68,57 \text{ K}$$

Teplota v horní části rozváděče:

$$T = T_o + \Delta T_{0,5}$$

$$T = 35 + 68,57 = 103,57 \text{ }^\circ\text{C}$$



Graf 2: Činitel rozdělení teploty  $c$  pro kryty bez ventilačních otvorů.



Z výpočtů plyne, že pokud by byla řídicí skříň bez ventilačních otvorů, teplota uvnitř by byla příliš vysoká. To by mělo vliv především na izolanty jak kabelů, tak přístrojů umístěných uvnitř rozváděče. Pro snížení vnitřní teploty umístíme do krytu ventilační otvory.

#### 10.4. Výpočet vnitřního oteplení vzduchu $\Delta T_{0,5}$ v rozváděči, ve střední výšce krytu. S ventilačním otvorem, $A_e > 1.25 \text{ m}^2$ .

Zvolíme ventilační mřížku Rittal, typ 3243.200, umístěnou ve spodní části rozváděčových dveří (v 1/4 výšky rozváděče). Mřížka má montážní otvor  $29,2 \times 29,2 \text{ cm}$ .

Výstup vzduchu bude řešen otvorem v horním krytu rozváděče o průřezu minimálně 1,1 násobku průřezu otvoru vstupního, může být řešen různými způsoby. Instalací ventilačních otvorů se nám změní celková účinná chladicí plocha.

Průřez vstupního ventilačního otvoru:

$$S = 29,2 \cdot 29,2 = 852,64 \text{ cm}^2 = 0,085264 \text{ m}^2$$

Průřez výstupního ventilačního otvoru:

$$S = 0,85264 \cdot 1,1 = 0,09379 \text{ m}^2$$

Celková účinná chladicí plocha  $A_e$ , zmenšená o ventilační otvory:

$$A_e = \sum(A_o \cdot b)$$

$$A_e = 0,205 + 1,003 + 1,08 + 0,4 + 0,4 = 3,09 \text{ m}^2$$

Z průřezu vstupního ventilačního otvoru musíme odečíst plochu, kterou zabírají vlastní mřížky krytu ventilačního otvoru což je cca 23%. To odpovídá ploše  $S_m = 196,11 \text{ cm}^2$ .

Plocha vstupního ventilačního otvoru osazeného mřížkou:

$$S_v = S - S_m = 852,64 - 196,11 = 656,5 \text{ cm}^2$$

Výpočet oteplení ve střední části rozváděče:

$$\Delta T_{0,5} = k \cdot d \cdot P_z^x$$

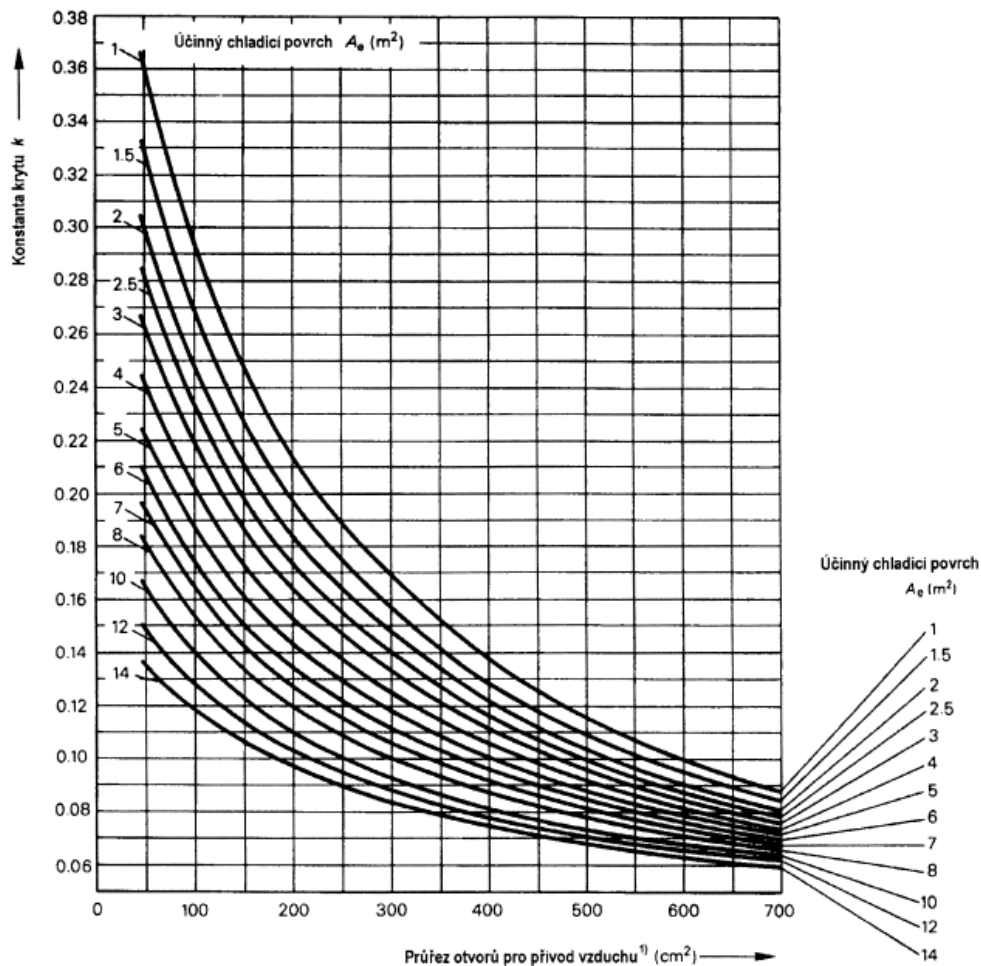
$$\Delta T_{0,5} = 0,08 \cdot 1 \cdot 810^{0,715} = 9,61 \text{ K}$$

Teplota ve střední části rozváděče:

$$T = T_o + \Delta T_{0,5}$$

$$T = 35 + 9,61 = 44,61 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- k - konstanta krytu v závislosti na účinném chladicím povrchu, viz. graf 3.
- d - činitel krytu, vyjadřuje závislost oteplení na počtu vnitřních vodorovných mezistěn v rozváděči, viz. tabulka 4.
- x - exponent vyjadřující závislost oteplení v rozváděči na efektivní tepelné ztrátě  $P$   
 $x = 0,715$  - pro kryt s ventilačními otvory .
- $P_z$  [W] - ztrátový výkon vnitřního vybavení rozváděče



Graf 3: Konstanta krytu  $k$  pro kryty s ventilačními otvory.

Počet vodorovných mezistěn $n$	0	1	2	3
Činitel $d$	1,00	1,05	1,10	1,15

Tabulka 4: Činitel krytu  $d$  pro kryty s ventilačními otvory.

**10.5. Výpočet vnitřního oteplení vzduchu  $\Delta T_{1,0}$  v rozváděči, v horní výšce krytu. S ventilačním otvorem,  $A_e > 1.25 \text{ m}^2$ .**

Výpočet oteplení v horní části rozváděče:

$$\Delta T_{1,0} = c \cdot \Delta T_{0,5}$$

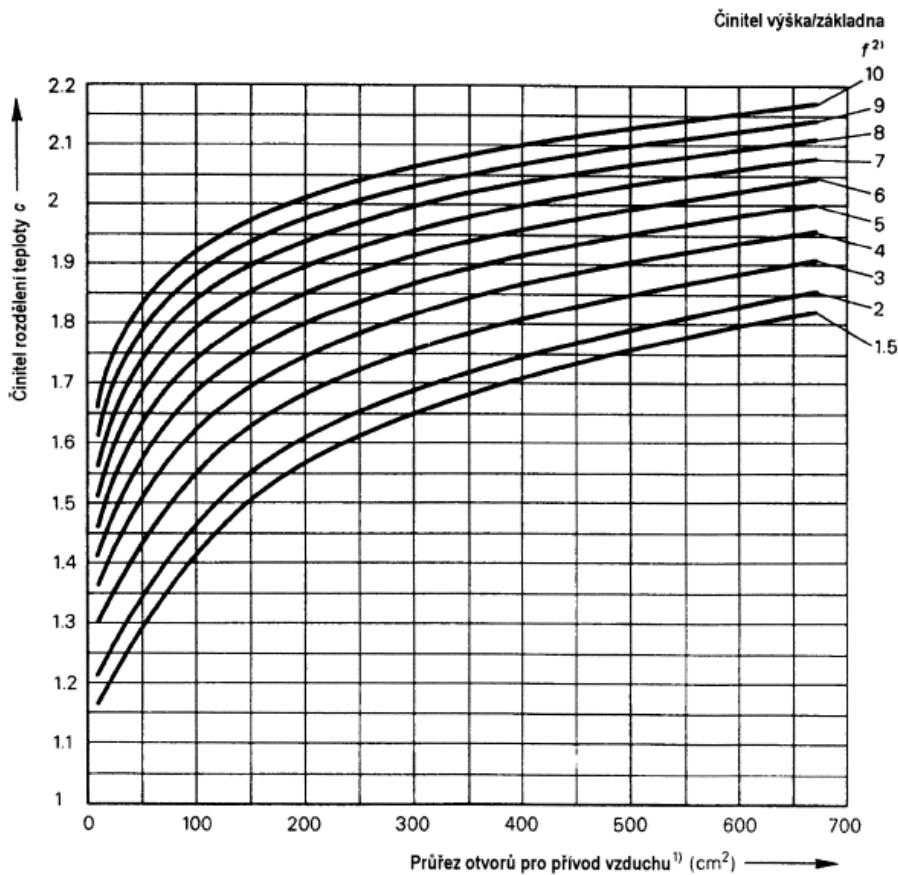
$$\Delta T_{1,0} = 2,18 \cdot 9,61 = 20,95K$$

Teplota v horní části rozváděče:

$$T = T_o + \Delta T_{0,5}$$

$$T = 35 + 20,95 = 55,95^\circ C$$

- c - činitel krytu, reprezentuje rozdělení teploty uvnitř krytu (zahrnuje provedení a typ instalace rozváděče). viz. graf 4.
- f - činitel reprezentující poměr výška /základna krytu ( $f = 10,6213$  - vypočteno výše) pro graf 4.



Graf 4: Činitel rozdělení teploty  $c$  pro kryty s ventilačními otvory.

[ 7 ]

Z výpočtu vyplývá, že po instalaci ventilační mřížky se sice maximální teplota v rozváděči poměrně výrazně sníží, ale i tak je vyšší než maximální dovolená teplota použitých elektrických přístrojů. U většiny přístrojů je dovolená teplota okolí maximálně 50 °C (jistící prvky, transformátory), některé až 55 - 60°C (stykače, relé a pod.).

U izolovaných vodičů může mít zvýšená teplota okolí za následek měknutí až poškození izolace (pro PVC maximální pracovní teplota  $T_{max} = 70^{\circ}C$ ). Vyšší okolní teplota vede k nutnému snížení jejich maximálního pracovního proudu.

Z tohoto důvodu, kdy přirozená ventilace nestačí, nebo nemůžeme umístit větší ventilační otvory, musíme zvolit pro rozváděč aktivní chlazení pomocí tlačného ventilátoru.

## 11. Aktivní chlazení rozváděčové skříně za pomoci nucené ventilace.

Skříň OEZ QA40 má při našem způsobu instalace (řada rozváděčů umístěných bočnicemi k sobě) podle katalogu výrobce rozptyl tepelných ztrát 283W (měřeno při oteplení uvnitř skříně  $\Delta t = 15$  K ve 3/4 výšky skříně).

Od celkového ztrátového výkonu  $P_z$  odečteme ztrátový výkon, který se rozptýlí povrchem skříně  $P_{zs}$ . Tím dostaneme tepelný výkon  $P$ , který je potřeba odvést ventilací.

$$P = P_z - P_{zs}$$

$$P = 810 - 283 = 527 \text{ W}$$

S využitím středního oteplení vzduchu (středního oteplení vzduchu v rozváděči), platí pro tepelnou kapacitu vzduchu rovnice.

Z definice tepelné kapacity:

$$C_{\theta} = \frac{W}{\Delta T/2} = c \cdot m \quad (19)$$

Rovnici vydělím časem  $t$ :

$$\frac{W}{\Delta T/2} = c \cdot m \quad |:t$$

$$\frac{W}{\Delta T/2} = \frac{c \cdot m}{t}$$

$$\text{Víme že: } \frac{W}{t} = P; \quad m = \gamma \cdot V \text{ pak,} \quad (20)$$

$$\frac{P}{\Delta T/2} = \frac{c \cdot \gamma \cdot V}{t}$$

$$\text{Víme že: } \frac{V}{t} = Q \text{ pak,} \quad (21)$$

$$\frac{P}{\Delta T/2} = c \cdot \gamma \cdot Q \quad |:(c \cdot \gamma)$$

Po vydělení rovnicí upravíme na vhodný tvar.

Výsledná rovnice pro výpočet průtočného množství vzduchu:

$$Q = \frac{2 \cdot P}{\Delta T \cdot c \cdot \gamma} \quad (22)$$

$C_{\theta}$	[J/K] - tepelná kapacita
$W$	[J] - tepelná energie
$P$	[W] - tepelný výkon
$\Delta T$	[K] - oteplení vzduchu, $\Delta T = (T_o - T)$
$T_o$	[°C] - teplota okolí rozváděče (vstupní)
$T$	[°C] - požadovaná teplota uvnitř rozváděče (výstupní)
$\Delta T/2$	[K] - průměrné oteplení vzduchu v rozváděči
$c$	[J/K·kg] - měrné teplo
$\gamma$	[kg/m <sup>3</sup> ] - měrná hmotnost
$m$	[kg] - hmotnost
$V$	[m <sup>3</sup> ] - objem
$Q$	[m <sup>3</sup> /s] - průtočné množství

Vlastní výpočet průtočného množství tlačného ventilátoru:

$$Q = \frac{2 \cdot P}{\Delta T \cdot c \cdot \gamma}$$

[ 8 ]

Měrné teplo pro vzduch při normálním tlaku  $c = 1005 \text{ J/K} \cdot \text{kg}$ .

Měrná hmotnost vzduchu  $\gamma = 1,28 \text{ kg/m}^3$ .

Požadovanou teplotu uvnitř rozváděče s ohledem na vnitřní výbavu rozváděče volím  $T_o = 45^\circ\text{C}$ .

$$Q = \frac{2 \cdot 527}{(45 - 35) \cdot 1005 \cdot 1,28} = 0,081934 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0,081934 \cdot 3600 = 294,96 \text{ m}^3/\text{h}$$

Podle výsledného průtočného množství, vybereme z katalogu výrobce vhodný ventilátor. Zvolil jsem Rittal TopTherm 3243.100 s filtrem SK. Při použití výstupní mřížky SK 3243.200 s filtrem je dodávané množství vzduchu ventilátorem  $465 \text{ m}^3/\text{h}$ . Jeho montážní otvor je  $292 \times 292 \text{ mm}$ . Provozní napětí a proud  $230\text{V} / 0,37\text{A}$ . Jeho příkon je  $71\text{W}$ .

Příkon ventilátoru musíme započítat do tepelného výkonu (ztrátového), který musíme také odvést ventilací. Proto potřebné průtočné množství ještě přepočítáme s upraveným výkonem.

$$Q = \frac{2 \cdot (527 + 71)}{(45 - 35) \cdot 1005 \cdot 1,28} = 0,092973 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0,092973 \cdot 3600 = 334,7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Zvolený ventilátor vyhovuje našim požadavkům a odvede ztrátový tepelný výkon mimo vnitřní prostor rozváděče.

## 12. Výpočet skutečné teploty v rozváděči při daných podmínkách.

Množství vzduchu dodávané ventilátorem za hodinu:  $Q = 465 \text{ m}^3/\text{h}$

Množství vzduchu dodávané ventilátorem za sekundu:  $Q = 465/3600 = 0,129167 \text{ m}^3/\text{s}$

Úpravou vyjádříme skutečné oteplení v rozváděči:

$$Q = \frac{2 \cdot P}{\Delta T \cdot c \cdot \gamma}$$

$$\Delta T = \frac{2 \cdot P}{Q \cdot c \cdot \gamma} = \frac{2 \cdot 598}{0,129167 \cdot 1005 \cdot 1,28} = 7,198 = 7,2 \text{ K} \quad (23)$$

Teplota v rozváděči při daných podmínkách:

$$T = T_o + \Delta T = 35 + 7,2 = 42,2^\circ\text{C}$$

Teplota v rozváděči při dodržení stanovené maximální teploty okolí a při provozu na jmenovité hodnoty, by neměla přesáhnout  $42,2^\circ\text{C}$ .

### 13. Určení vhodného tyristoru a způsobu jeho chlazení.

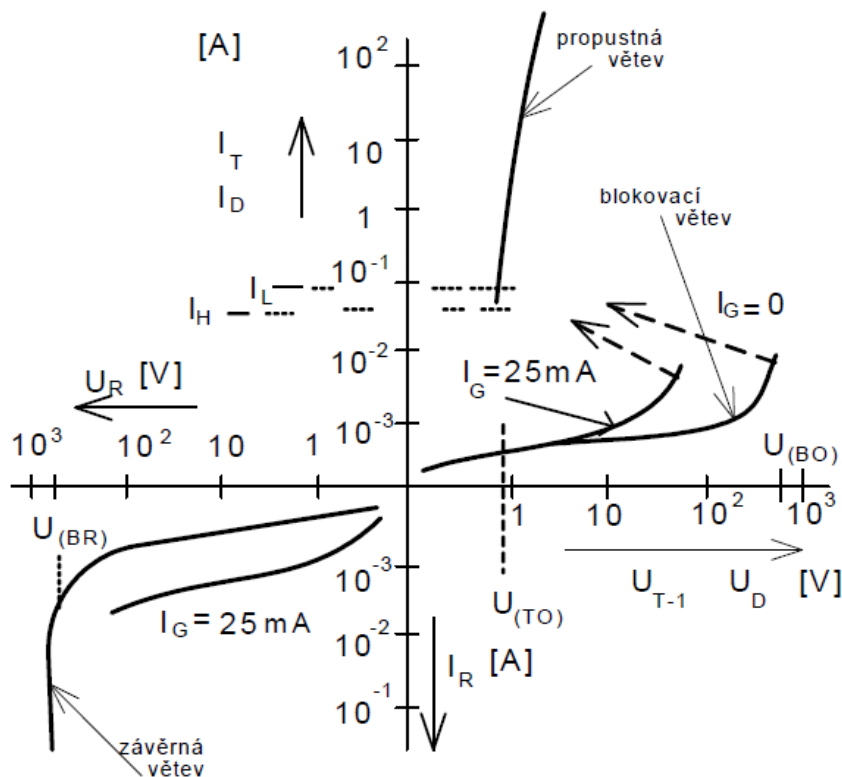
#### 13.1. Teorie tyristoru.

Tyristor je říditelná čtyřvrstvá polovodičová součástka se třemi PN přechody. V hlavním proudovém obvodu je zapojena anoda označovaná A a katoda K. Pro řízení je určena řídicí elektroda G. Tyristor může pracovat ve vypnutém nebo sepnutém stavu. Za vypnutý se považuje závěrný a blokovací stav tyristoru.

Tyristor se nachází v závěrném stavu, když na anodě je vzhledem ke katodě záporné napětí  $u_R$ . Pokud není překročeno závěrné průrazné napětí  $U_{(BR)}$ , vykazuje tyristor velký závěrný odpor a tyristorem protéká závěrný zbytkový proud  $i_R$ . Velikost tohoto proudu nepříznivě zvyšuje teplota polovodiče  $T_j$  a proud řídicí elektrody  $i_G$ .

Tyristor se nachází v blokovacím stavu, když na anodě je vzhledem ke katodě kladné napětí  $u_B$  a nedošlo k překročení spínacího napětí  $U_{(BO)}$ . Po překročení tohoto napětí dochází k sepnutí tyristoru. Parametrem blokovací charakteristiky je proud řídicí elektrody  $i_G$ . Největší hodnotu má  $U_{(BO)}$  při nulovém proudu řídicí elektrody.

V propustném stavu se tyristor nachází po sepnutí. Charakteristika má podobný tvar jako propustná charakteristika diody. Proud v sepnutém stavu musí být větší než hodnota vratného proudu  $i_H$ . Při spínání tyristoru musí propustný proud narůst alespoň na hodnotu  $i_L$ .



Obrázek 15: Výstupní voltampérová charakteristika tyristoru.

Zapínání tyristoru se provádí dostatečně dimenzovanými impulsy proudu  $i_G$  do obvodu G – K. Vypínání tyristoru je nutné provést vnějším obvodem. Základní podmínka vypnutí je pokles propustného proudu  $i_T$  pod hodnotu přídržného proudu  $i_H$ .

Konstrukční provedení konkrétního tyristoru odpovídá především jeho ztrátovému výkonu, resp. velikosti propustného proudu, napět'ovému zatěžování a požadované aplikaci.

### 13.2. Provedení pouzder tyristorů

Pro průmyslové použití a menší výkony se s výhodou využívá provedení bezpotenciálových modulů, do jejichž jednoho pouzdra lze integrovat několik tyristorů. Časté je provedení se dvěma tyristory v sérii.

Pro větší propustné proudy  $I_{TAV}$  až 1000 A se využívají pastilková pouzdra tyristorů. Jejich výhodou je oboustranné chlazení, což umožňuje odvést z pouzdra větší ztrátový výkon. Malá povrchová izolační vzdálenost pouzdra mezi anodou a katodou se zvětšuje obvodovým žebrováním izolačního keramického pouzdra a kovovým stínícím límcem na straně katody.

### 13.3. Ztrátový výkon tyristoru

Základním předpokladem spolehlivého provozu tyristorů je dodržení dovolené provozní teploty  $T_j$  polovodičové struktury tyristoru. Tato teplota se pohybuje podle typu tyristoru v rozmezí 100 až 130 °C, u speciálních provedení do 150°C. Změna teploty nepříznivě ovlivňuje velikost závěrného i blokovacího zbytkového proudu tyristoru, zvýšení teploty snižuje velikost spínacího napětí  $U_{(BO)}$  a zvyšuje riziko samovolného sepnutí tyristoru při strmém nárůstu blokovacího napětí.

Nejnižší přípustná pracovní teplota dosahuje hodnoty -40°C. Nízké teploty (záporné), snižují zapínací schopnost řídicí elektrody a způsobují problémy při konstrukci pouzdra součástky.

Teplota polovodiče je, podobně jako u diody, určena zatížením tyristoru, tj. velikostí ztrát vznikajících v tyristoru. Podle mechanismu jejich vzniku rozeznáváme ztrátový výkon propustným proudem, ztrátový výkon závěrným proudem, ztrátový výkon blokovacím proudem a zapínací a vypínací ztrátový výkon. Při kmitočtech v mezích 50 až 400 Hz je podstatný pouze ztrátový výkon propustným proudem. Ztrátový výkon vznikající při zapínání tyristoru nabývá významu až při vyšších kmitočtech (nad 400 Hz), kdy se rovněž uplatní ztráty vznikající při vypínání tyristoru. Ztrátový výkon způsobený závěrným, případně blokovacím proudem je obvykle zanedbatelný.

Pro dlouhodobý a bezproblémový provoz součástky nesmí být překročena dovolená maximální teplota přechodu. Tato podmínka vyžaduje, aby vzniklý ztrátový výkon byl odveden chladicím systémem, nejčastěji chladičem, do okolního vzduchu. Pro výpočet tohoto rovnovážného stavu je tedy nutné znát maximální dovolenou teplotu polovodičového přechodu  $T_{jmax}$  a pak, na jedné straně celkový ztrátový výkon součástky, na druhé straně schopnost chladicího systému tento výkon odvést do okolí, tzn. součástku ochladit. Uvedený proces platí pro ustálené a dlouhodobé zatěžování. Rozhodujícím kritériem při dimenzování tyristoru je jeho proudová zatížitelnost.

Při krátkodobých proudových přetíženích se uplatní schopnost polovodičového materiálu a částečně i pouzdra tyristoru akumulovat určitou tepelnou energii, takže při tomto krátkodobém procesu můžeme součástku zatížit podstatně větším proudem, než by odpovídalo ustálenému stavu. Vzhledem k návrhu nadproudového jištění pomocí speciálních, velmi rychlých pojistek je definovaný tzv. mezní přetěžovací integrál  $I^2t$  (Jouleův integrál). Tento integrál je definovaný pro tvar proudu daný půlperiodou sinusového proudu při frekvenci 50Hz, jehož maximální hodnota je  $I_{TSM}$  a doba trvání je obvykle 10 ms. Za těchto podmínek můžeme napsat rovnici:

$$I^2t = \int_0^T (I_{TSM} \cdot \sin\omega t)^2 \cdot d\omega t = \frac{1}{2} I_{TSM}^2 \cdot T \quad (24)$$

[ 6 ]

### 13.4. Určení vhodného tyristoru

Z parametrů zvoleného vvn transformátoru vyplývá, že každým tyristorem v antiparalelním zapojení bude protékat polovina primárního proudu. Jedním kladná půlvlna napájecího napětí a druhým záporná. Pro transformátor vvn  $I_{AV} = 232A$  (tabulka 1) to znamená přes každý tyristor 116A.

Pro náš případ je lepší volit tyristory na větší proudy a to vzhledem k provozním stavům vznikajících v elektroodlučovači (přeskoky mezi elektrodami, zkraty - proudové rázy). Ty se přes transformátor přenášejí na primární stranu a mohou způsobovat nadměrné ohřátí přechodu. Následkem toho klesá prahové napětí  $U_{TO}$  a roste diferenciální odpor  $r_T$ .

Se vzrůstající teplotou přechodu se prudce snižuje velikost propustného proudu a roste výkonová ztráta. Pro příklad uvádím údaj z katalogových listů tyristoru SKET 400, který při teplotě polovodičového přechodu  $T_j = 84^\circ C$  má střední hodnotu propustného proudu  $I_{TAV} = 400A$ , ale při teplotě  $100^\circ C$  už jen 280 A.

Pro náš případ jsem vybral tyristorový modul Semikron SKET 400/16E. Vzhledem ke střední hodnotě propustného proudu je tento typ značně předimenzovaný. Výhodou je, že při daném propustném proudu má menší napěťový úbytek (menší prahové napětí  $U_{TO}$  a diferenciální odpor  $r_T$ ), tedy menší ztrátový výkon  $P_z$ , jak vyplývá ze vztahu pro výpočet ztrátového výkonu.

$$P_z = \frac{1}{T} \int_0^T (U_{TO} \cdot i(t) + r_a \cdot i^2(t)) dt = U_{TO} \cdot I_{AV} + r_a \cdot I_{ef}^2 \quad (25)$$

[ 6 ]

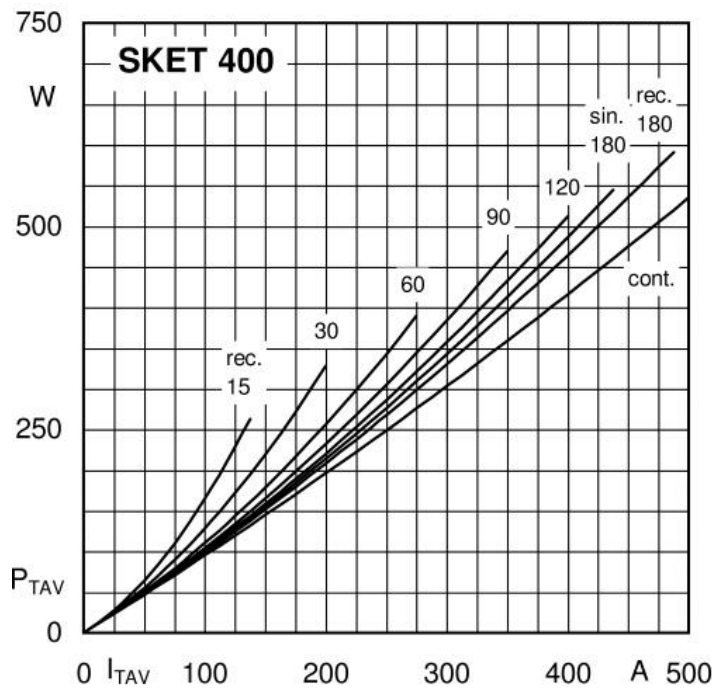
Pro účely napájení elektroodlučovače je výhodné, že má vyšší nárazový neopakovatelný propustný proud  $I_{TSM}$  a mezní přetěžovací integrál  $I^2t$ . Při použití výkonově nižší řady tyristoru typ Semikron SKET 330/16E jsou tyto parametry mnohem menší, což se v praxi neosvědčilo. Zároveň nám vzroste ztrátový výkon na každém tyristoru o 50W (celkem 100W) (tepelný odpor  $R_{\theta j-c}$  a  $R_{\theta c-h}$  zůstávají stejné - velikost pouzdra se nezměnila). Řídící skříně jsou většinou umístěny v blízkosti zařízení pro manipulaci s odloučeným prachem. Touto volbou do značné míry předcházíme problémům, s rychlým zanášením filtrů ventilačních mřížek řídicí skříně, což při opomenutí kontroly stavu filtrů může vést ke značnému zvýšení teploty uvnitř rozvaděče.

Napěťová zatížitelnost v blokovacím stavu  $U_{DRM}$ , určuje největší přípustnou hodnotu napětí, které se může na tyristoru v dopředném směru periodicky opakovat. V našem případě  $U_{DRM} = 1600V$  zohledňuje napěťové špičky, vznikající při provozu elektrofiltru vlivem přeskoků.

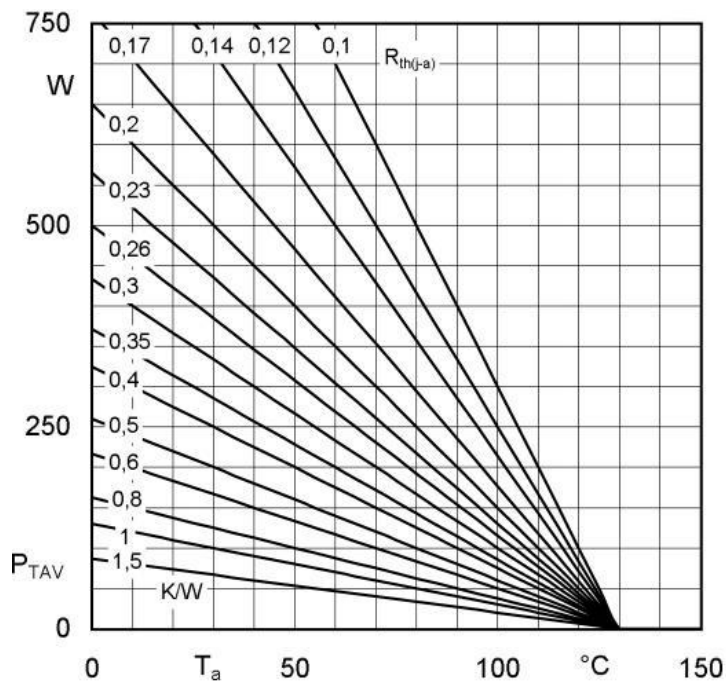


Symbol	Conditions	Values	Units
$I_{TAV}$	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C;	392 (280)	A
$I_D$	P16/300F; $T_a = 35$ °C; B2 / B6	700 / 880	A
$I_{RMS}$	P16/400F; $T_a = 35$ °C; W1 / W3	905 / 3 * 720	A
$I_{TSM}$	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	14000	A
	$T_{vj} = 130$ °C; 10 ms	12000	A
$i_{\text{ft}}$	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	980000	A <sup>2</sup> s
	$T_{vj} = 130$ °C; 8,3 ... 10 ms	720000	A <sup>2</sup> s
$V_T$	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 2400$ A	max. 1,7	V
$V_{T(TO)}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 0,92	V
$r_T$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 0,3	mΩ
$I_{DD}; I_{RD}$	$T_{vj} = 130$ °C; $V_{RD} = V_{RRM}; V_{DD} = V_{DRM}$	max. 130	mA
$t_{gd}$	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $di_G/dt = 1$ A/μs	1	μs
$t_{gr}$	$V_D = 0,67 * V_{DRM}$	2	μs
$(di/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 125	A/μs
$(dv/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 130$ °C	max. 1000	V/μs
$t_q$	$T_{vj} = 130$ °C,	150 ... 200	μs
$I_H$	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 500	mA
$I_L$	$T_{vj} = 25$ °C; $R_G = 33$ Ω; typ. / max.	500 / 2000	mA
$V_{GT}$	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
$I_{GT}$	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 200	mA
$V_{GD}$	$T_{vj} = 130$ °C; d.c.	max. 0,25	V
$I_{GD}$	$T_{vj} = 130$ °C; d.c.	max. 10	mA
$R_{th(j-c)}$	cont.	0,09	K/W
$R_{th(j-c)}$	sin. 180	0,095	K/W
$R_{th(j-c)}$	rec. 120	0,11	K/W
$R_{th(c-s)}$		0,02	K/W
$T_{vj}$		- 40 ... + 130	°C
$T_{stg}$		- 40 ... + 130	°C
$V_{isol}$	a. c. 50 Hz; r.m.s.; 1s / 1 min.	3600 / 3000	V~
$M_s$	to heatsink	$5 \pm 15$ % <sup>1)</sup>	Nm
$M_t$	to terminal	$17 \pm 15$ %	Nm
$a$		$5 * 9,81$	m/s <sup>2</sup>
$m$	approx.	940	g
Case		A 36	

Tabulka 5: Parametry zvoleného tyristoru.



Graf 5: Závislost ztrátového výkonu tyristoru na středním propustném proudu (v našem případě při úhlu otevření 120°)



Graf 6: Závislost ztrátového výkonu tyristoru na teplotě okolí.

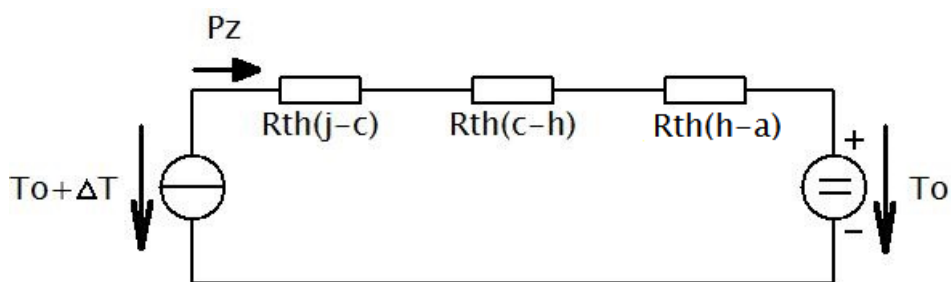
### 13.5 Výpočet chlazení tyristoru

Teplota chladiče se na jeho povrchu liší. Vzniká na něm teplotní spád a to od místa s umístěnou součástkou po konce žeber. Čím je teplotní spád menší, tím lepší je chladič. Při

velkém spádu by mohly být konce žeber studené, to znamená neúčinné. Nedocházelo by na nich k výměně tepla s okolním vzduchem, nebo jen minimálně. Pro termín "ideální chladič" platí, že má stejnou teplotu na celém jeho povrchu (nemá teplotní spád). Takový chladič nedovedeme vyrobit.

Pro lepší chlazení volíme takovou koncepci, že každý z tyristorů má svůj samostatný vzduchový chladič. Jsou umístěny ve stejné výšce v rozváděči, vedle sebe. Mezi chladiči necháme minimálně 1cm mezeru k vůli proudícímu vzduchu v Newtonově mezní vrstvě, která bývá ve vzduchu okolo 4mm.

Podle katalogových údajů tyristoru si vypočteme jaký by měl být maximální tepelný odpor chladiče tyristoru. Rozumíme tím tepelný odpor povrch chladiče - okolní vzduch ( $R_{\theta(h-a)}$ ). Vnitřní tepelný odpor chladiče zpravidla zanedbáváme, protože je mnohokrát menší než tepelný odpor  $R_{\theta(h-a)}$ .



Obrázek 16: Tepelné schéma tyristoru umístěného na chladiči.

- $R_{\theta(j-c)}$  [K/W] - tepelný odpor přechod - pouzdro
- $R_{\theta(c-h)}$  [K/W] - tepelný odpor (stykový) pouzdro - chladič
- $R_{\theta(h-a)}$  [K/W] - tepelný odpor chladič - vzduch
- $P_z$  [W] - ztrátový výkon tyristoru, určen z katalogu součástky, graf 5
- $T_{jmax}$  [°C] - maximální pracovní teplota polovodičového přechodu
- $T_o$  [°C] - maximální teplota okolí tyristoru, (vypočteno, viz. výše)
- $\Delta T$  [K] - dovolené oteplení čipu tyristoru

Parametry z katalogu Semikron pro SKET 400/16E (tabulka 5):

$$R_{\theta(j-c)} = 0,11 \text{ K/W (při otevření tyristoru } \psi = 120^\circ)$$

$$R_{\theta(c-h)} = 0,02 \text{ K/W}$$

$$P_z = 125 \text{ W}$$

$$T_{jmax} = (T_o + \Delta T) = 130^\circ \text{C}$$

$$T_o = 42,2^\circ \text{C}$$

Dovolené oteplení čipu tyristoru:

$$\Delta T = T_{jmax} - T_o \tag{26}$$

$$\Delta T = 130 - 42,2 = 87,8 \text{ K}$$

Podle Fourierova zákona musí pro celkový tepelný odpor ve smyčce platit:

$$R_{\vartheta(j-c)} + R_{\vartheta(c-h)} + R_{\vartheta(h-a)} = \frac{\Delta T}{P_z} \quad (27)$$

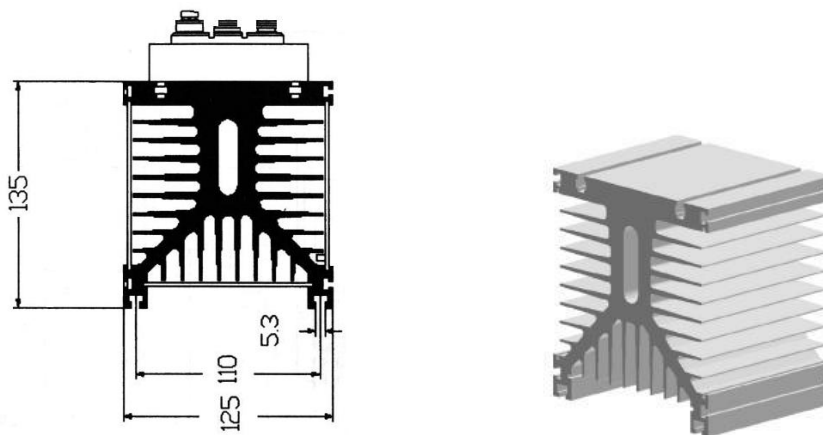
Po úpravě vypočítáme tepelný odpor chladiče:

$$R_{\vartheta(h-a)} = \frac{\Delta T}{P_z} - R_{\vartheta(j-c)} - R_{\vartheta(c-h)} \quad (28)$$

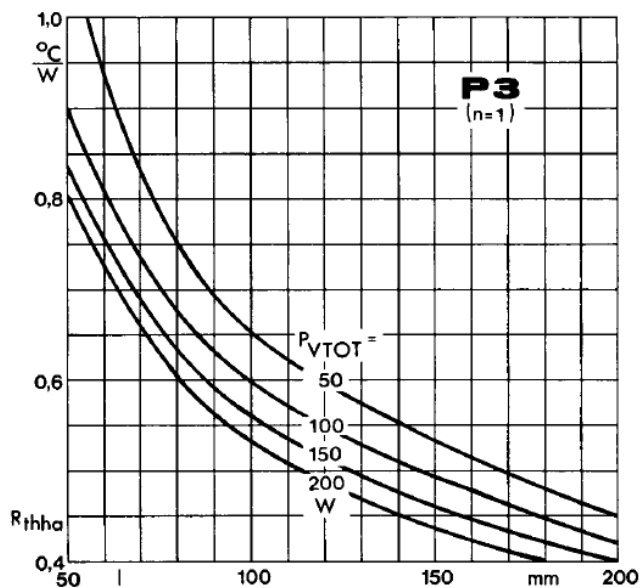
$$R_{\vartheta(h-a)} = \frac{87,8}{125} - 0,11 - 0,02 = 0,5724 \text{ K/W}$$

[ 9 ]

Vybereme vhodný chladič s menším tepelným odporem než jsme vypočetli. Zvolil jsem z katalogu Semikron typ P3/120 (délka 120mm).



Obrázek 17: Chladič typ P3/120.



Graf 7: Závislost celkového tepelného odporu chladiče na délce chladiče, při daném ztrátovém výkonu.

Z grafu 7 jsme odečetli celkový tepelný odpor chladiče:

$$R_{\theta(h-a)} = 0,53K/W$$

Zpětně můžeme spočítat oteplení polovodič. přechodu tyristoru při použití tohoto chladiče:

$$\begin{aligned}\Delta T_j &= P_z \cdot \sum R_{\theta} = P_z \cdot (R_{\theta(j-c)} + R_{\theta(c-h)} + R_{\theta(h-a)}) \\ \Delta T_j &= 125 \cdot (0,11 + 0,02 + 0,53) = 82,5K\end{aligned}\quad (29)$$

Teplota přechodu (čipu) tyristoru:

$$\begin{aligned}T_j &= \Delta T + T_o \\ T_j &= 82,5 + 42,2 = 124,7^{\circ}C\end{aligned}$$

Celkový ztrátový výkon nesmí způsobit zahřátí polovodičové struktury tyristoru nad maximální přípustnou hodnotu  $T_{jmax}$ . V ustáleném stavu to znamená, že chladič je navržen tak, že platí rovnováha

$$P \leq \frac{T_{jmax} - T_o}{\sum R_{\theta}} \quad (30)$$

$$125 \leq \frac{130 - 42,2}{(0,11 + 0,02 + 0,53)}$$

$$125 \leq 133$$

Navržený chladič vyhovuje našim požadavkům, nicméně podle mého uvážení neposkytuje dostatečnou rezervu pro zvláštní provozní situace.

Pro větší jistotu, že nebude překročena maximální teplota polovodičového přechodu, bych navrhol osadit chladič ventilátorem. Z katalogu jsem vybral SKF 3-230-01. Jeho výhodou je, že se dá nasadit přímo na tento typ chladiče. Do boků chladiče se nasunou krycí plechy pro lepší vedení vzduchu žebrováním chladiče, proudící vzduch tak neobtéká chladič jinou cestou.

Takto upravený chladič s nucenou ventilací dosahuje podle katalogu tepelného odporu:

$$R_{\theta(h-a)} = 0,167 K/W.$$

Výpočtem podle předešlých rovnic přepočítáme teplotu s novým tepelným odporem chladiče s ventilátorem.

$$\begin{aligned}\Delta T_j &= 125 \cdot (0,11 + 0,02 + 0,167) = 37,13K \\ T_j &= 37,13 + 42,2 = 79,33^{\circ}C\end{aligned}$$

Tímto řešením bychom snížili teplotu polovodičového přechodu tyristoru na  $T_j = 79,33^{\circ}C$ .

Ventilátory chladičů mohou pracovat buď společně se zapnutím řídicí skříně (při povelu na zapnutí vvn transformátoru) nebo se můžou spínat kontaktním teploměrem připevněným na tělo chladiče při teplotě 60-70°C.

Vzhledem k umístění dvou kusů ventilátorů se nám zvýší ztrátový výkon celé skříně o 30W (2x15W). Po přepočítání teploty uvnitř skříně se zvýšeným ztrátovým výkonem (viz. výpočet oteplení, podle normy ČSN IEC 890 + A1), se nám zvýší teplota uvnitř skříně na

42,56°C. Rozdíl oproti původní teplotě je 0,34°C. Tak malý nárůst teploty se nám na celkové bilanci v podstatě neprojeví, proto ho můžeme zanedbat.

## 14. Návrh jištění řídicí skříně

Pro jištění primární strany transformátoru použijeme nožové pojistky na jištění polovodičů, od výrobce OEZ Letohrad.

Jištění na primární straně transformátoru nám jistí:

- přívodní vedení k transformátoru proti zkratu
- při závitovém zkratu v transformátoru omezuje rychlým odpojením od sítě jeho destruktivní účinky
- při zkratu na sekundární straně transformátoru jistí vinutí proti poškození

Na sekundární straně žádné jištění není. Proti přetížení je transformátor hlídán elektronickou ochranou, která je součástí vlastního regulátoru (řídící jednotky) zdroje vvn.

Vzhledem k tomu, že zapnutí transformátoru, je regulováno tyristory od nulového úhlu otevření a najíždí podle nastavené spouštěcí rampy, není potřeba uvažovat se zapínacím magnetizačním proudem. Pojistku zvolíme podle jmenovitého primárního proudu transformátoru dle údaje výrobce. Ten v dokumentaci uvádí efektivní hodnotu  $I = 258 \text{ A}$ .

Z dokumentace OEZ jsme vybrali pojistkovou vložku pro jištění polovodičů pro jmenovité napětí 690 Vac, typ P51V06 315A aR.

Písmeno *a* určuje rozsah vypínacích schopností. Tato pojistka je schopná přerušit všechny proudy mezi stanovenou minimální hodnotou a jmenovitou vypínací schopností. Nemá cínovou pájku a je určena pouze pro ochranu proti zkratu. Písmeno R určuje kategorii použití, v našem případě pro jištění polovodičů.

[ 5 ]

Pojistky budou umístěny v řadovém pojistkovém odpínači Varius FH2. Při použití pojistkového odpínače s danou pojistkou je nutné redukovat průřezy připojovacích kabelů podle tabulky v katalogu výrobce. Pro náš případ vychází minimální průřez připojeného měděného vodiče  $185 \text{ mm}^2$ . Toto opatření je nutné pro odvod tepla z pojistky, přes připojovací praporce a šroubové spoje do kabelu. Důvodem je, že pojistky pro jištění polovodičů mají obecně kvůli velké rychlosti reakce na nadproud slabší průřez zkratových můstků (kladou větší odpor procházejícímu proudu) a proto větší ztrátový výkon tzn. více hřejí (jsou předehtáté). Vybraná pojistka má ztrátový výkon 68 W.

Pojistka musí zaručovat, že hodnota propuštěné energie  $I^2t$  (Joulův integrál) během zkratu nepřekročí přípustnou hodnotu propuštěné energie daného zařízení silového obvodu. V našem případě to znamená především tyristory, ale také odpojovač, stykač nebo přívodní kabel.

$$I^2t_{\text{pojistky}} < I^2t_{\text{tyristoru}}$$

$$I^2t_{a \text{ pojistky}} = 38445 \text{ A}^2\text{s} \text{ (vypínací hodnota přepočtená na provozní napětí 400 V)}$$

$$I^2t_{\text{tyristoru}} = 730000 \text{ A}^2\text{s} \text{ (při teplotě přechodu 130°C)}$$

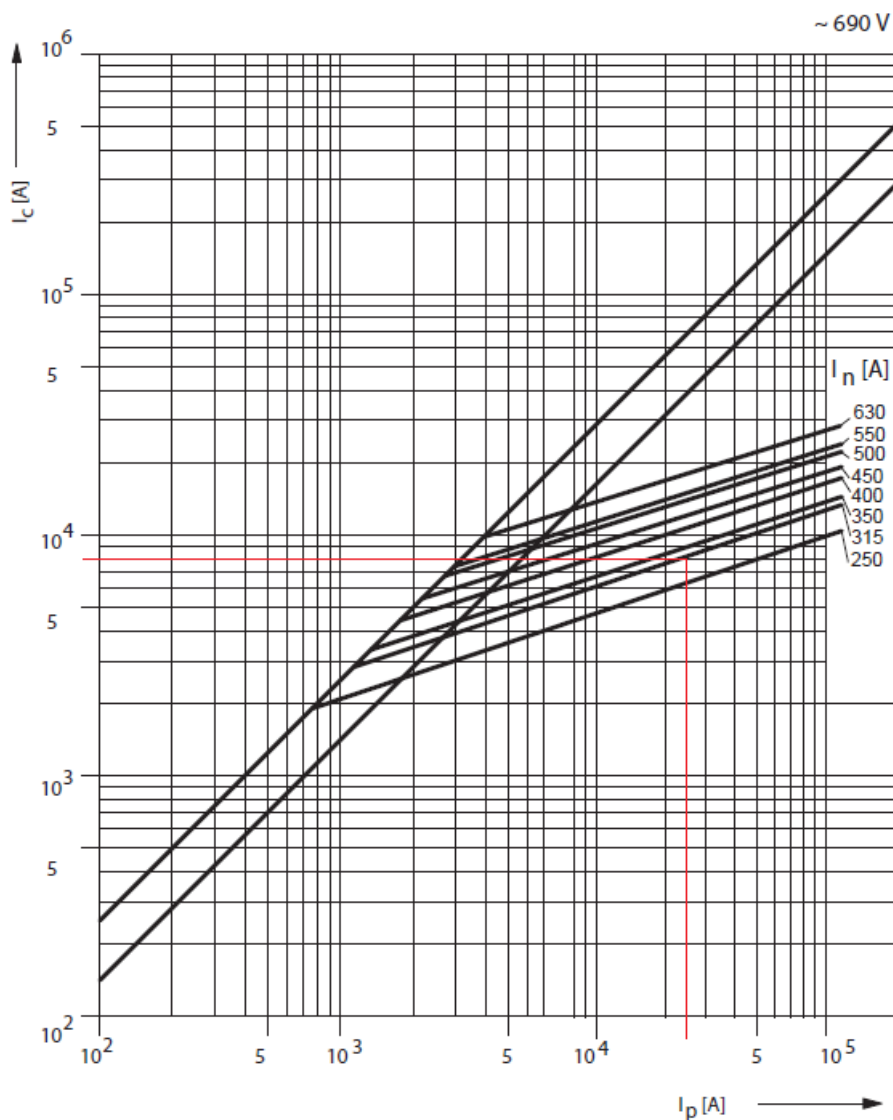
Podle dodaných podkladů od zadavatele vychází zkratové poměry v rozvodně kde je umístěna řídicí skříň zdroje EO,  $I_k'' = 23,1\text{kA}$ .

$I_k''$  [A] - počáteční symetrický rázový zkratový proud, je roven proudu předpokládanému  $I_p$

$I_p$  [A] - předpokládaný proud, je proud který by obvodem procházel, kdyby byla pojistka nahrazena vodičem o zanedbatelném odporu.

#### 14.1. Určení omezeného proudu $I_c$ pro zvolenou pojistku

Z omezovací charakteristiky odečteme maximální hodnotu omezeného proudu  $I_c$  (proud při kterém pojistka vypíná) v závislosti na efektivní hodnotě předpokládaného proudu  $I_p$ .

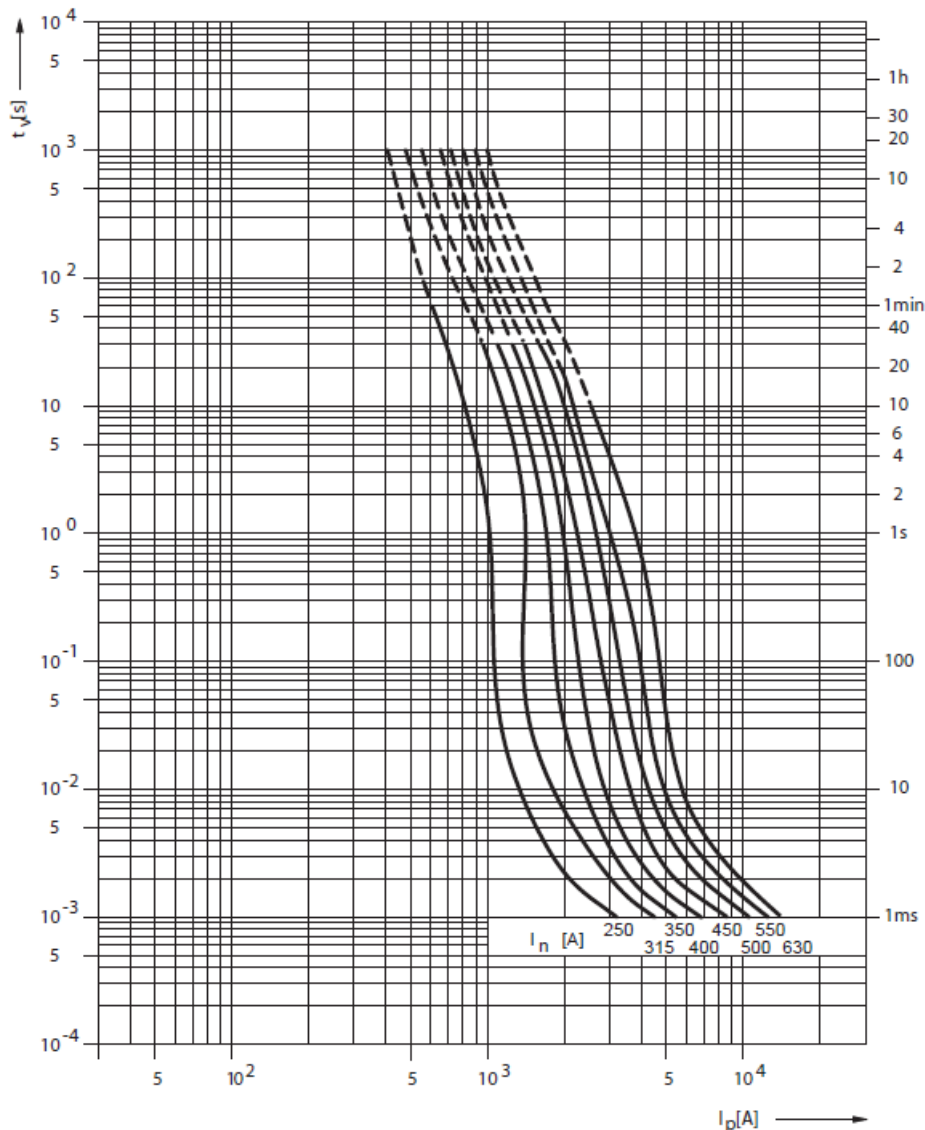


Graf 8: Omezovací charakteristika pojistek P51V06 aR

Z grafu 8 vyplývá, že pojistka P51V06 315A aR omezí předpokládaný proud  $I_p$  (roven zkratovému  $I_k''$ ) na hodnotu omezovacího proudu  $I_c = 8 \text{ kA}$ .

## 14.2. Určení vypínací doby $t_v$ pro zvolenou pojistku

Z ampérsekundové charakteristiky odečteme dobu  $t_v$ , za kterou nám pojistka vypne obvod v závislosti na předpokládaném proudu  $I_p$ .



Graf 9: Tavná ampérsekundová charakteristika pojistek P51V06 aR

Z grafu 9 vyplývá, že pojistka P51V06 315A aR vypne předpokládaný proud  $I_p$  (roven zkratovému  $I_k''$ ) v čase  $t_v$  mnohem menším než 1ms.



Pokud potřebujeme znát přesnější údaj o tavném čase pojistky, můžeme tento přibližně určit podle následujícího vztahu, kde  $t_k$  je doba zkratu do vypnutí.

$$t_k = \frac{i^2 t_a}{I_p^2} \quad (31)$$

$$t_k = \frac{38445}{23100^2} = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ s} = 72 \mu\text{s}$$

[ 5 ]

### 14.3. Doba vypnutí pojistky, při zkratu na sekundární straně transformátoru

Z parametrů transformátoru si přibližně vypočítáme, jaký bude proud na primární straně transformátoru, při zkratu na sekundární straně transformátoru. V našem případě to mohou být částečně i přeskoky v elektrofiltru, nebo spadená vysokonapěťová elektroda, která se spojí se systém uzemněných usazovacích elektrod, což se běžně stává.

$$I_{k1} = \frac{I_1}{u_k} \quad (32)$$

$$I_{k1} = \frac{258}{0,322} = 801,24 \text{ A}$$

$I_{k1}$  [A] - proud na primární straně transformátoru při zkratu na sekundární straně.

$I_1$  [A] - jmenovitý primární proud transformátoru.

$u_k$  [%] - napětí nakrátko.

Při kontrole v grafu 9 (tavná ampérsekundová charakteristika pojistky) zjistíme, že proud 801 A nám pojistka vypne přibližně za 65 sekund. Tato doba je dlouhá a tento proud by mohl způsobit škody. Z uvedeného plyne, že řídicí jednotka zdroje vvn musí tyto nadproudy v krátkém čase vyhodnotit a zareagovat podle potřeby. Znamená to, že musí jinak reagovat na "tvrdý zkrat" kde po splnění požadavků na zkrat v EO vypíná zdroj vvn a jinak na provozní stavy filtru (přeskoky). Pro vyhodnocení zkratu v EO je podmínkou dosažená limita sekundárního proudu a pokles sekundárního napětí pod nastavenou minimální hodnotu. Tento stav musí trvat po danou dobu. Řídicí jednotka zastává také funkci rychlé nadproudové ochrany, kdy od určité hodnoty primárního proudu vypíná zdroj okamžitě. Na přeskoky ve filtru (běžný provozní stav), reaguje podle nastavených parametrů a to vypnutím tyristorů na nezbytnou dobu deionizace prostředí mezi elektrodami a dočasným poklesem sekundárního napětí.

## 15. Návrh silového vedení řídicí skříňe

### 15.1. Teorie návrhu

Pro návrh silnoprůduvého vedení se musí respektovat určité zásady. Dimenzování vedení se provádí tak, aby:

- nebyla překročena jeho provozní teplota
- vodiče odolaly tepelným a dynamickým účinkům zkratových proudů
- úbytek napětí byl ve stanovených mezích
- vodiče byly dostatečně mechanicky pevné
- průřezy vodičů byly voleny hospodárně

Vlivem vysokých teplot dochází ke změně mechanických vlastností materiálu. Spoje vodičů zvyšují svůj přechodový odpor. Nejvíce se však zvýšená teplota projeví na izolantech. Ty vlivem vyšší teploty rychleji stárnou a znehodnocují se.

Z těchto důvodů norma stanovuje nejvyšší dovolené trvalé provozní teploty a tím i proud, kterými lze vodič při daných podmínkách trvale zatěžovat.

Provozní teplota a přípustné zatížení vodičů závisí na:

- typu kabelu (vodiče)
- charakteru provozu
- charakteru zátěže
- charakteru prostředí
- způsob uložení

[ 11 ]

Návrh silového vedení v našem případě spočívá v návržení přívodu pro řídicí skříň zdroje vvn a návrhu vedení z řídicí skříňe k transformátoru vvn.

Přívod pro řídicí skříň je řešen v rámci rozvodny ze silového rozvaděče, kde bude umístěn řadový pojistkový odpojovač. Vedení bude umístěno v prostoru pod zvýšenou podlahou rozvodny, položeno v jednoduché vrstvě na perforovaných lávkách společně s dalšími třemi kabely. Délka vedení je 15 m.

Přívodní kabel k transformátoru, který je umístěn na střeše elektroodlučovače je zvýšenou podlahou vyveden ven z rozvodny, pokračuje prostorem kotelny a po venkovní stěně elektroodlučovače na střechu EO. Vedení je položeno v jednoduché vrstvě na perforovaných lávkách společně s dalšími třemi kabely. Délka vedení je 126 m.

### 15.2. Vlastní návrh silového vedení přívodního kabelu transformátoru, podle normy 33 2000-5-523

Nejprve navrhne kabel mezi řídicí skříň a transformátorem vvn. Vzhledem k tomu, že maximální teplota na rozvodně je stanovena 35°C a přívodní kabel transformátoru jde částečně prostorem kotelny, budeme považovat za referenční teplotu okolí 35°C.

Protože transformátor je jednofázový na 400 V, použijeme hospodárnější variantu a to izolované vodiče (jednožilové kabely) s PVC izolací. V případě použití vícežilového kabelu

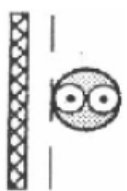
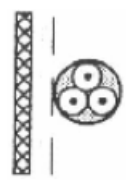
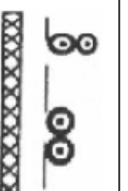
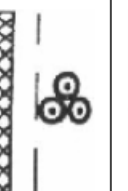
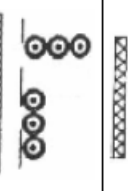
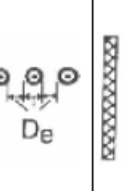
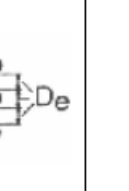
by byl jeden vodič nevyužitý.

Podle zadání je elektrický odlučovač rozdělen na tři samostatně napájené sekce o stejném příkonu. To znamená tři řídicí skříně a transformátory. Z toho plyne, že silové napájecí kabely transformátorů půjdou společně na perforované lávce v jedné vrstvě, těsně seskupené. Lávky budou dvě nad sebou. Na druhé lávce budou položeny silové a ovládací kabely pro motory oklepů a topná tělesa izolátorů.

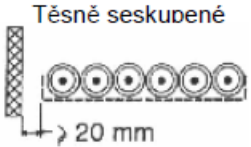
Začneme tím, že si z tabulky 6 vybereme způsob uložení vodičů. Pro naši koncepci je to způsob uložení F, pro tři zatížené dotýkající se vodiče (sloupec 6).

Tři jednožilové vodiče vedle sebe volíme proto, že v dalším kroku budeme muset určit přepočítací součinitel pro seskupení vodičů. Ten je pro náš případ určen pro tři jednožilové kabely ve vodorovné vrstvě což nám nevadí, viz. tabulka 7.

Vzhledem k tomu, že návrh počítá s uložení přívodního vedení od všech tří transformátorů vedle sebe na lávce, musíme počítat se součinitelem pro seskupení více jednožilových kabelů navzájem se dotýkajících, celkem tedy bude šest vodičů vedle sebe. Šest zatížených vodičů vedle sebe se dá chápat jako dva třífázové obvody vedle sebe. Uvažujeme dvě lávky nad sebou. Výsledný součinitel určený z tabulky 7 je tedy  $k_I = 0,87$ .

Jmenovitý průřez vodičů mm <sup>2</sup>	Způsoby uložení						
	Vícežilové kabely		Jednožilové kabely				
	Dva zatížené vodiče	Tři zatížené vodiče	Dva zatížené dotýkající se vodiče	Tři zatížené dotýkající se vodiče	Tři zatížené vodiče v rovině		
					v dotyku	volně seskupené	
						vodorovně	svisle
							
	Způsob E	Způsob E	Způsob F	Způsob F	Způsob F	Způsob G	Způsob G
1	2	3	4	5	6	7	8
1,5	22	18,5	-	-	-	-	-
2,5	30	25	-	-	-	-	-
4	40	34	-	-	-	-	-
6	51	43	-	-	-	-	-
10	70	60	-	-	-	-	-
16	94	80	-	-	-	-	-
25	119	101	131	110	114	146	130
35	148	126	162	137	143	181	162
50	180	153	196	167	174	219	197
70	232	196	251	216	225	281	254
95	282	238	304	264	275	341	311
120	328	276	352	308	321	396	362
150	379	319	406	356	372	456	419
185	434	364	463	409	427	521	480

Tabulka 6: Hodnoty dovolených proudů pro měděné vodiče s izolací z PVC a způsoby uložení E, F, G. Teplota jádra 70°C, referenční teplota okolí 30°C.

Způsob uložení			Počet lávek	Počet třífázových obvodů			Pro použití k vynásobení jmenovitých hodnot pro
				1	2	3	
Perforované lávky	13		1	0,98	0,91	0,87	Tři kabely ve vodorovné vrstvě
			2	0,96	0,87	0,81	
			3	0,95	0,85	0,78	

Tabulka 7: Přepočítací součinitele pro seskupení více než jednoho obvodu z jednožilových kabelů.

V dalším kroku určíme přepočítacího součinitele pro okolní teplotu vzduchu, která se nám také uplatní při určení dovoleného proudu kabelu. Je určena 35°C. Součinitel zjistíme z tabulky 8 a je  $k_2 = 0,94$ .

Okolní teplota °C	Izolace			
	PVC	XLPE a EPR	Minerální	
			s pláštěm PVC nebo bez pláště, přístupné dotyku - povrchová teplota 70 °C	bez pláště, nepřístupné dotyku - povrchová teplota 105 °C
10	1,22	1,15	1,26	1,14
15	1,17	1,12	1,2	1,11
20	1,12	1,08	1,14	1,07
25	1,06	1,04	1,07	1,04
35	0,94	0,96	0,93	0,96
40	0,87	0,91	0,85	0,92
45	0,79	0,87	0,87	0,88
50	0,71	0,82	0,67	0,84

Tabulka 8: Přepočítací součinitele pro okolní teploty vzduchu odlišné od 30°C.

[ 12 ]

### 15.3. Výpočet jmenovitého proudového zatížení vodiče

$$I_n \geq \frac{I_z}{k_1 \cdot k_2} \quad (33)$$

$$I_n \geq \frac{258}{0,87 \cdot 0,94} = 315,5 \text{ A}$$

$I_n$  [A] - jmenovité proudové zatížení vodiče

$I_z$  [A] - maximální provozní zatížení vodiče

Podle tabulky 6 vyberu průřez kabelu s nejbližší vyšší hodnotou jmenovitého zatížení, tzn. 120mm<sup>2</sup>.

Pro vedení jsem vybral jednožilový kabel o průřezu 120 mm<sup>2</sup>, Prakab 1-YY 120. Jedná se o kabel s PVC izolací a PVC pláštěm.

#### 15.4. Kontrolní výpočet úbytku napětí na zvoleném kabelu

Výpočet rezistance přívodního vedení transformátoru:

$$R = 2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{s} = 2 \cdot \frac{0,01786 \cdot 126}{120} = 0,03751 \Omega \quad (34)$$

Specifický odpor mědi při 20°C je:  $\rho = 0,01786 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

Výpočet úbytku napětí na přívodním vedení transformátoru:

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos\varphi + X \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (35)$$

Na určení účinníku, byl použit wattmetr pro výkonovou analýzu jednofázových a třífázových sítí Chauvin Arnoux C.A 8210. Měření bylo provedeno na zařízení přibližně stejných parametrů instalovaném pro EO za kotlem na biomasu v Dorogi Erömü (Maďarsko), jak již bylo řečeno výše.

Účinník byl naměřen:  $\cos\varphi = 0,73$ .

Měrná reaktance pro vodiče nn se dá zjednodušeně uvažovat:  $X_k = 0,06 \Omega/\text{km}$ .

Měrná reaktance při délce vedení 252m (2x126m) je:

$$X = X_k \cdot l = 0,06 \cdot 0,252 = 0,01512 \Omega \quad (36)$$

Úbytek napětí na vedení:

$$\Delta U = 0,03751 \cdot 258 \cdot 0,73 + 0,01512 \cdot 258 \cdot \sin(\arccos 0,73) = 9,74 \text{ V}$$

$$\Delta u\% = \frac{\Delta U \cdot 100}{U_n} = \frac{9,74 \cdot 100}{400} = 2,44\% \quad (37)$$

Úbytek napětí je menší jako 5%, tzn. vyhovuje normě.

#### 15.5. Kontrola tepelných účinků zkratových proudů pro přívodní kabel k transformátoru

Návrhem musíme zabezpečit aby nebyla překročena maximální dovolená teplota vodiče při zkratu, kdy se nestačí teplo odvádět do okolí. Znamená to, že vodič musí být schopen akumulovat teplo vyvinuté zkratovým proudem aniž by se jeho teplota zvýšila nad dovolenou teplotu (při zkratu PVC-160°C viz.tabulka 9).

Druh izolace vodiče	Zkratka názvu	Značka	Základní teplota okolního vzduchu	Nejvyšší dovolená provozní teplota	Nejvyšší dovolená teplota	
					při proudovém přetížení	při zkratu
Polyvinylchlorid měkčený	PVC	Y	30	70	120	140-160

Tabulka 9: Dovolená provozní a maximální teplota vodičů s izolací z PVC.

Jako podmínka správného jištění proti zkratu musí platit:

$$I^2 t_{\text{pojistky}} \leq k^2 \cdot S^2 \quad (38)$$

$$38445 \leq 115^2 \cdot 120^2$$

$$38445 \leq 190440000$$

[ 5 ]

k - činitel respektující materiál vodiče a typ izolace (měď a PVC)

Tento vztah se dá použít u krátkých vypínacích časů, zejména když dochází k omezení proudu jisticím prvem, což je náš případ.

Navržené jištění a vodič vyhovují kontrole na tepelné účinky zkratového proudu. Výsledný rozdíl je způsobený velkým zkratovým proudem v místě instalace řídicí skříně a zároveň velice rychlou reakcí pojistky tento proud vypnout. Z výsledku se dá také usuzovat, že oteplení vodiče při zkratu na primární straně transformátoru bude minimální a nemá význam ho tedy počítat.

Zdá se, že použití speciálních pojistek pro jištění polovodičů není nezbytně nutné. Daly by se použít pojistky typu PHNA2 315A gG, které jsou levnější a zároveň nemají tak velkou výkonovou ztrátu. Přestože jsou pomalejší, tak pro náš účel by mohly být dostačující. Vypínací hodnota Jouleova integrálu  $I^2t$  pro vypínací dobu pojistkové vložky je 567800 A<sup>2</sup>s. To je oproti námi zvolené pojistce mnohonásobně více, ale méně než  $I^2t$  námi zvoleného tyristoru.

## 15.6. Návrh silových vodičů v řídicí skříni

Způsob uložení vodičů v krytu		
		
Průřez (Cu)	Teplota vzduchu uvnitř krytu kolem vodičů	
	35°C pracovní proud	55°C pracovní proud
mm <sup>2</sup>	A	A
1,5	12	8
2,5	20	12
4	25	20
6	32	25
10	50	32
16	65	50
25	85	65
35	115	85
50	150	115
70	175	149
95	225	175
120	250	210
150	275	239
185	350	273
240	400	322
300	460	371

Tabulka 10: Pracovní proud vodičů v rozváděči s PVC izolací v závislosti na teplotě okolí a způsobu uložení podle normy IEC 890.

Maximální teplota uvnitř skříně při daných podmínkách byla vypočtena 42,2°C. Podle normy IEC 890 (tabulka 10) při daném uložení a teplotě ( $I_n = 315,5A$ ) musíme použít měděný vodič s PVC izolací o průřezu 185 mm<sup>2</sup>. Zkontrolujeme také průřez vodičů připojených k pojistkovému odpojovači z důvodu odvedení tepla od pojistek. Podle požadavků výrobce a jeho podmínek pro použití pojistkových vložek v pojistkových odpínačích, je nutné k odpojovači připojit vodič o průřezu minimálně 185 mm<sup>2</sup>. Z důvodu dodržení této podmínky bude pro připojení přívodního kabelu (ukončeného lisovacími oky) použita měděná pásovina 40x5mm, délky 250mm, upevněná k montážnímu panelu přes izolační přichytky.

## 15.7. Návrh přívodního kabelu k řídicí skříni

Pro přívodní vedení k řídicí skříni můžeme opět použít jednožilový kabel Prakab 1-YY 120, stejně jako v případě návrhu přívodního vedení k transformátoru. Způsob uložení v rámci rozvodny je prakticky stejný. Délka je 15m. Odběr vlastní řídicí skříně je přibližně

2,5A, což nám zvedne jmenovité proudové zatížení vodiče na 318,5 A. Tato hodnota stále vyhovuje dovolenému proudu vodiče pro dané uložení (321 A). Tento nárůst proudu se nám v návrhu nijak neprojeví.

Pro jištění jednožilových kabelů použijeme opět pojistky, které budou umístěny v řadovém pojistkovém odpínači Varius FH2. Pojistky zvolíme PNA2 350A gG, jejichž vypínací hodnota Jouleova integrálu  $I^2t$  pro vypínací dobu pojistkové vložky je 1003000 A<sup>2</sup>s (při 400V).

Údaj o tavném čase pojistky, můžeme opět přibližně určit podle následujícího vztahu, kde  $t_k$  je doba zkratu do vypnutí.

$$t_k = \frac{i^2 t_a}{I_p^2}$$

$$t_k = \frac{1\,003\,000}{23100^2} = 1,88 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 1,88 \text{ ms}$$

Porovnáním vypínacích časů je jasné, že vzájemná časová selektivita pojistek bude pravděpodobně zajištěna. Vypínací čas pojistky P51V06 315A aR je mnohonásobně kratší než PNA2 350A gG.

U vyšších zkratových proudů, kde se u pojistek projevuje omezovací efekt, je potřebné posoudit také energetickou selektivitu dvou tavných pojistek za sebou.

Podmínkou je, že celková propuštěná energie  $I^2 t_a$  přiřazené pojistky (P51V06 315A aR), musí být menší než energie  $I^2 t_s$  potřebná k natavení předřazené pojistky (PNA2 350A gG).

$$I^2 t_s \text{ předřazená} > I^2 t_a \text{ přiřazená} \quad (40)$$

$$441000 > 38445$$

Touto kontrolou jsme zjistili, že zvolené pojistky vyhovují, je dodržena jejich selektivita.

Pro výše uvažovanou alternativní pojistku v řídicí skříni PHNA2 315A gG ( $I^2 t_a = 567800$  A<sup>2</sup>s) nám již kontrola energetické selektivity nevyhoví. V kombinaci se zvolenou předřazenou pojistkou ji nelze použít. Hodnoty jsou převzaty z katalogu O EZ - Pojistkové systémy Varius.

$$I^2 t_s \text{ předřazená} > I^2 t_a \text{ přiřazená}$$

$$441000 < 567800$$

## 15.8. Kontrola tepelných účinků zkratových proudů pro přívodní kabel řídicí skříně

$$I^2 t_{\text{pojistky}} \leq k^2 \cdot S^2 \quad (38)$$

$$38445 \leq 115^2 \cdot 120^2$$

$$1003000 \leq 190440000$$

[ 5 ]

Navržené jištění i vodič vyhovují kontrole na tepelné účinky zkratového proudu. Velký rozdíl je opět způsobený velkým zkratovým proudem v místě instalace řídicí skříně a z toho plynoucí rychlé reakce (vypnutí) pojistky.



V obou navržených vedeních budeme společně se silovými vodiči vést také ochranný vodič (zelenožlutý). Podle normy ČSN 33 2000-4-41, musí být při použití silových vodičů s průřezem nad 35 mm<sup>2</sup> průřez ochranného vodiče alespoň poloviční. Volíme zelenožlutý jednožilový kabel Prakab 1-YY 70.

[13]

## 16. Návrh stykače pro silový obvod řídicí skříně

Podle katalogových parametrů zvolíme stykač V250F výrobce Elektopřístroj Modřany s ovládací cívkou na 400V.

Stykač nebude za normálního provozu zapínat ani vypínat zatížený obvod. Řídicí jednotka zaručí, že spínání a rozspínání je vždy při zavřených tyristorech.

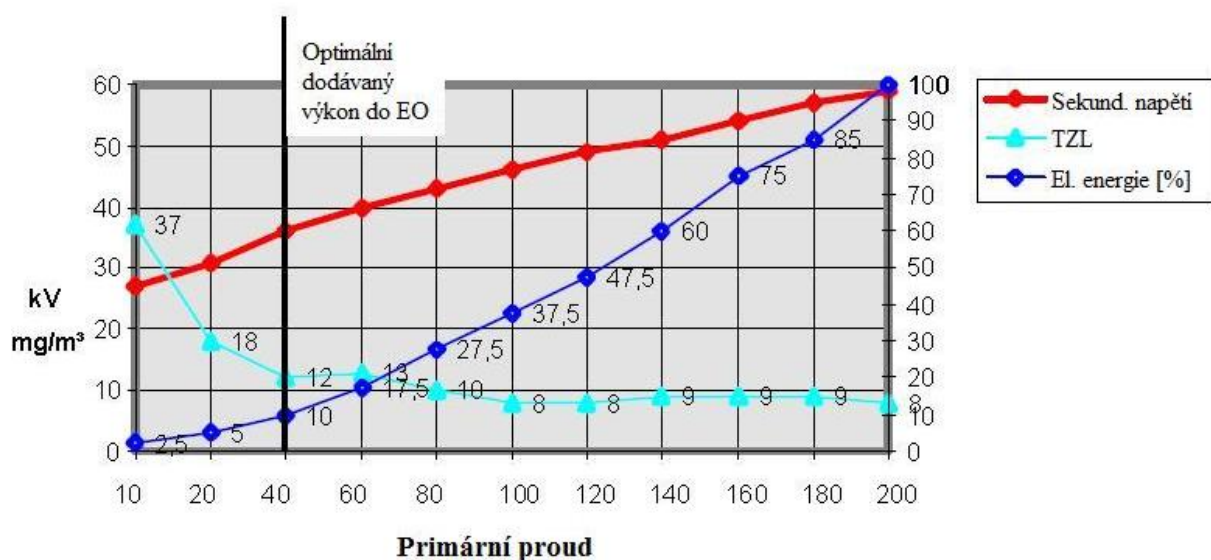
Jmenovitý pracovní proud v kategorii užití AC-1 pro 400V je 350 A. Nejvyšší četnost spínání za hodinu při maximálním zatížení není pro naše účely omezující. Charakter provozu je spíše trvalý chod, nepředpokládá se časté přerušování provozu.

Tímto je výkonová část řídicí skříně zdroje navržena. Zbývající výbavu tvoří ovládací, měřicí, regulační obvody, kterými se v této práci zabýváme jen teoreticky a to v první části.

## 17. Závěr

Práce je zaměřená na možnosti napájení elektrostatického odlučovače. Je v ní popsán doposud nepoužívanější způsob napájecích zdrojů vvn. Tím je transformátor s usměrňovačem řízený tyristory pracující na síťové frekvenci 50 Hz. V současnosti se začínají nasazovat zdroje vvn řízené měničem pracujícím na frekvenci okolo 500 Hz. Někteří výrobci nabízejí zařízení pracující na frekvenci v řádech kHz. Tyto se zatím v České republice až na pár výjimek téměř nevyskytují a většinou mívají problémy s častou poruchovostí. Jejich nespornou výhodou je, že vlastní transformátor může být díky pracovní frekvenci o mnoho menší, což znamená úspory na materiálu. Prokazují také vyšší účinnost a to díky tomu, že elektroodlučovač se dá provozovat při minimálně zvlněném napětí na vyšší limitní hodnoty (vyšší přeskokové napětí). Nevýhodou je větší složitost řídicí skříně a také to, že celá sestava transformátor – řídicí skříně je asi o polovinu dražší než sestava pracující na síťové frekvenci. Vysoká cena se však bude pravděpodobně časem snižovat s příchodem větší konkurence do tohoto prostředí.

Závěrem je třeba zmínit ještě důležitou část a to spotřebu elektrické energie. Velké úspory elektrické energie se dá dosáhnout správným nastavením pracovního bodu (dodávaného výkonu). Od určitého výkonu je už snižování emisí vykoupeno zbytečným nárůstem dodávané elektrické energie. Malého poklesu úletu TZL je dosaženo za cenu obrovské spotřeby energie. V dnešní době, kdy dříve navržené elektroodlučovače (menší komory - menší usazovací plocha), jedou vzhledem k přísnějším požadavkům na hranici svých možností je tato skutečnost bohužel běžná. Platí zažitá představa, víc proudu = menší úlet TZL. To je do určité míry pravda (ne však vždy), ale spotřeba el. energie je neúměrně vysoká a spíš se jedná o plýtvání přírodními zdroji.



Graf 10: Graf spotřeby elektrické energie v závislosti na odlučivosti TZL

Jiným případem je, pokud se za elektroodlučovačem nachází odsiřovací jednotka. U nás se převážně používá mokrá vápencová vypírka. Kouřové plyny prochází několikasupňovou sprchou, která rozstříkuje vápencovou suspenzi (rozemletý vápenc smíchaný s vodou). Vzniklý produkt tzv. energovápenc se používá ve stavebnictví.

Při této technologii je naopak nutné nechat určité množství TZL projít do odsiřovací jednotky a někdy se záměrně snižuje výkon dodávaný do elektroodlučovače.

## 18. Literatura

- [ 1 ] Böhml. Elektrické odlučovače. 1. vydání. Praha. SNTL, 1977.
- [ 2 ] Nový a kol. Technika životního prostředí (skripta). Praha. ČVUT, 2000.  
ISBN 80-01-02108-4.
- [ 3 ] Hemerka. Odlučování tuhých částic (skripta). Praha. ČVUT, 1994.  
ISBN 80-01- 01088-0.
- [ 4 ] Kabát. Elektrické odlučovače - vnitrofiremní dokumentace. ZVVZ Milevsko.
- [ 5 ] Valenta. Diagnostika a jištění elektrických zařízení, učební text. Brno. VUT, 2013.
- [ 6 ] Chlebiš. Výkonová elektronika I. Učební text. Ostrava. VŠB, 2007.
- [ 7 ] ČSN IEC 890 + A1. Metoda stanovení oteplení extrapolací pro částečně typově zkoušené rozváděče (PTTA) pro spínací a řídicí zařízení nízkého napětí. Praha. Český normalizační institut, 1998.
- [ 8 ] Patočka. Vybrané statě z výkonové elektroniky, svazek I. Učební text. Brno. VUT, 2005.
- [ 9 ] Patočka. Výkonová elektronika BVEL. Učební text. Brno. VUT, 2010
- [ 11 ] Orságová. Rozvodná zařízení. Učební text. Brno. VUT.
- [ 12 ] ČSN 33 2000-5-523. Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.  
Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení.  
Oddíl 523: Dovalené proudy v elektrických rozvodech.  
Praha. Český normalizační institut, 2002.
- [ 13 ] ČSN 33 2000-4-41. Elektrické instalace nízkého napětí  
Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti. Ochrana před úrazem elektrickým proudem.  
Praha. Český normalizační institut, 2007.