



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## VÝBĚR OCHRANNÝCH POMŮCEK PRO PRÁCE POD NAPĚTÍM V DISTRIBUČNÍ SÍTI NÍZKÉHO NAPĚTÍ

SELECTION OF PROTECTIVE EQUIPMENT FOR WORKS DONE UNDER VOLTAGE IN LOW-VOLTAGE  
DISTRIBUTION GRID

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Kadlčík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO 2023

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Matěj Kadlčík

**ID:** 230380

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## Výběr ochranných pomůcek pro práce pod napětím v distribuční síti nízkého napětí

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s riziky práce pod napětím v sítích nízkého napětí z hlediska působení elektrického oblouku.
2. Popište osobní ochranné pracovní prostředky pro práce pod napětím.
3. Prostudujte požadavky dostupných norem z hlediska ochrany před působením elektrického oblouku.
4. Seznamte se se situací v konkrétní lokalitě distribuční sítě a aplikujte požadavky normy na výpočet možné obloukové energie v zadaných bodech.
5. Určete vhodné osobní ochranné pracovní prostředky v zadaných bodech.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] BGI/GUV-I 5188 E. Thermal hazards from electric fault arc. 1. Berlin: German Social Accident Insurance e.V (DGUV), 2012.

[2] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985

[3] ČSN EN 61482-1-2. Práce pod napětím - Oblečení chránící před tepelným účinkem elektrického oblouku - Část 1-2: Zkušební metody - Metoda 2: Stanovení třídy ochrany materiálu a oblečení použitím soustředěného a řízeného oblouku (zkouška v boxu). 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

**Termín zadání:** 6.2.2023

**Termín odevzdání:** 29.5.2023

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

**prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

Tato bakalářská práce se zabývá výběrem vhodné třídy ochranných pomůcek pro práci pod napětím v distribuční síti nízkého napětí. Práce pod napětím představuje pro pracovníky vážné bezpečnostní riziko, zvláště z hlediska působení elektrického oblouku. Proto je důležité používat vhodné ochranné pomůcky. V teoretické části se tato práce zabývá seznámením se s riziky práce pod napětím z hlediska působení elektrického oblouku, popsáním dostupných osobních ochranných pracovních prostředků a prozkoumáním dostupných norem z hlediska ochrany před působením elektrického oblouku. V praktické části se práce zaměřuje na výpočet obloukové energie v jednotlivých bodech distribuční sítě nízkého napětí a výběrem vhodné třídy tepelné ochrany osobních ochranných pracovních prostředků.

## **Klíčová slova**

práce pod napětím, osobní ochranné pracovní prostředky pro práci pod napětím, rizika elektrického oblouku, energie elektrického oblouku

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the selection of suitable class of protective equipment for working under voltage in the low voltage distribution network. Working under voltage poses a serious safety risk for workers, especially in terms of the effects of an electric arc. Therefore, it is important to use appropriate protective equipment. In the theoretical part, this thesis deals with the risks of working under voltage in terms of the effects of an electric arc, describes available personal protective equipment, and explores available standards for protection against the effects of an electric arc. In the practical part, the thesis focuses on calculating the arc energy at various points in the low voltage distribution network and selecting the appropriate class of thermal protection for personal protective equipment.

## **Keywords**

working under voltage, personal protective equipment for working under voltage, electric arc risks, electric arc energy

## **Bibliografická citace**

KADLČÍK, Matěj. *Výběr ochranných pomůcek pro práce pod napětím v distribuční síti nízkého napětí*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152498>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jiří Valenta.

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Matěj Kadlčík</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>230380</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Bakalářská práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2022/23</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Výběr ochranných pomůcek pro práce pod napětím v distribuční síti nízkého napětí</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 27. května 2023

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za pomoc při zpracovávání mé bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat panu Petrovi Dadákovi za odbornou pomoc.

V Brně dne: 27. května 2023

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. PRÁCE POD NAPĚTÍM.....</b>	<b>12</b>
<b>2. RIZIKA PRÁCE POD NAPĚTÍM .....</b>	<b>13</b>
<b>3. METODY PPN .....</b>	<b>14</b>
3.1 PRÁCE NA VZDÁLENOST – PRÁCE NA BEZPEČNOU VZDÁLENOST.....	14
3.2 PRÁCE S IZOLAČNÍMI RUKAVICEMI.....	14
3.3 PRÁCE V PŘÍMÉM DOTYKU .....	14
3.4 C3M.....	15
<b>4. VZDÁLENOSTI A PRACOVNÍ ZÓNY .....</b>	<b>16</b>
<b>5. OSOBNÍ OCHRANNÉ PRACOVNÍ PROSTŘEDKY PRO PPN .....</b>	<b>18</b>
5.1 NAPĚŤOVÉ TŘÍDY .....	18
5.2 KATEGORIE .....	19
5.3 TŘÍDA TEPELNÉ OCHRANY.....	19
5.4 ZNAČENÍ .....	20
5.5 RUKAVICE PRO PPN.....	21
5.6 RUČNÍ NÁŘADÍ PRO PPN NN.....	22
5.7 OCHRANNÉ PŘILBY.....	24
5.8 OCHRANNÉ OBLEKY .....	25
<b>6. TEPELNÉ NEBEZPEČÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU .....</b>	<b>27</b>
6.1 ENERGIE ELEKTRICKÉHO OBLOUKU $W_{LB}$ .....	27
6.2 EKVIVALENTNÍ ENERGIE OBLOUKU $W_{LBA}$ .....	29
<b>7. PRACOVNÍŠTĚ DISTRIBUČNÍ SÍŤE URČENÁ PRO VÝPOČET TEPELNÉ ENERGIE ELEKTRICKÉHO OBLOUKU .....</b>	<b>30</b>
7.1 NAPÁJECÍ ZDROJE.....	31
7.2 JISTÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	32
7.3 REÁLNÉ ZAPOJENÍ .....	33
7.4 PARAMETRY PRACOVNÍŠŤ .....	34
7.5 POPIS PRACOVNÍŠŤ .....	34
7.5.1 Pracoviště č.1.....	34
7.5.2 Pracoviště č.2.....	35
7.5.3 Pracoviště č.3.....	35
7.5.4 Pracoviště č.4.....	36
7.5.5 Pracoviště č.5.....	36
7.5.6 Pracoviště č.6.....	37
7.5.7 Pracoviště č.7.....	37
7.5.8 Pracoviště č.8.....	37
7.5.9 Pracoviště č.9.....	37

7.5.10 Pracoviště č.10.....	38
<b>8. VÝPOČET OBLOUKOVÉ ENERGIE A STANOVENÍ TŘÍDY TEPELNÉ OCHRANY</b>	
<b>OOPP .....</b>	<b>39</b>
8.1 PRACOVIŠTĚ NAPÁJENÉ ZE DVOU STRAN – XSPIDER.....	39
8.1.1 Výpočet energie elektrického oblouku $W_{LB}$ .....	39
8.1.2 Výpočet ekvivalentní energie oblouku $W_{LBA}$ .....	44
8.1.3 Stanovení vhodné třídy tepelné ochrany.....	45
8.2 PRACOVIŠTĚ NAPÁJENÉ Z JEDNÉ STRANY – XSPIDER.....	45
8.2.1 Výpočet energie elektrického oblouku $W_{LB}$ .....	45
8.2.2 Výpočet ekvivalentní energie oblouku $W_{LBA}$ .....	48
8.2.3 Stanovení vhodné třídy tepelné ochrany.....	48
8.3 PRACOVIŠTĚ NAPÁJENÉ Z JEDNÉ STRANY – SICHR.....	48
8.3.1 Výpočet energie elektrického oblouku $W_{LB}$ .....	48
8.3.2 Výpočet ekvivalentní energie oblouku $W_{LBA}$ .....	51
8.3.3 Stanovení vhodné třídy tepelné ochrany.....	51
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>52</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>55</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>57</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

4.1	Vzdušné vzdálenosti a zóny pro pracovní postupy (převzato z [1]).....	16
4.2	Ohraničení ochranného prostoru s použitím izolačního ochranného materiálu (převzato z [1]).....	17
5.1	Vhodné pro práce pod napětím – dvojitý trojúhelník (převzato z [4]) .....	20
5.2	Izolační rukavice (převzato z [9]).....	21
5.3	Kombinované rukavice (převzato z [9]).....	22
5.4	Značka kombinované rukavice – Kladivo (převzato z [4]) .....	22
5.5	Značka pro smontovatelné ruční nářadí a konstruované jako zaměnitelné mezi různými výrobci IEC 60417–6168 (2012-07) (převzato z [10]) .....	23
5.6	Ochranná přilba IDRA 2 (převzato z [12]).....	24
5.7	Ochrana před tepelným účinkem elektrického oblouku (převzato z [13]) .....	26
7.1	Celkové schéma pracovišť .....	31
7.2	Rozváděč NN v TS.....	34
7.3	Elektroměrový rozváděč.....	35
7.4	Rozpojovací skříň SR.....	36
7.5	Rozpojovací skříň SD.....	36
7.6	Pracoviště T-spojky.....	37
7.7	Pojistková skříň SP100.....	38
8.1	Pracoviště č.7 – výpočet $I_{k3}''$ při napájení ze dvou stran .....	40
8.2	Vypínací charakteristika pojistky NH, gG, velikost 2, $I_n = 224 \text{ A}$ a $I_n = 160 \text{ A}$ .....	41
8.3	Pracoviště č.7 – výpočet $I_{k3}''$ při napájení z jedné strany .....	42
8.4	Vypínací charakteristika pojistky NH, gG, velikost 2, $I_n = 160 \text{ A}$ .....	42
8.5	Pracoviště č.7 – stanovení R/X při působení $I_{k3}''_1$ .....	43
8.6	Pracoviště č.7 – stanovení R/X při působení $I_{k3}''_2$ .....	44
8.7	Pracoviště č.8 – výpočet $I_{k3}''$ .....	46
8.8	Vypínací charakteristika pojistky NH, gG, velikost 2, $I_n = 224 \text{ A}$ .....	47
8.9	Pracoviště č.8 – stanovení R/X.....	47
8.10	Vypínací charakteristika pojistky NH, gG, velikost 2, $I_n = 160 \text{ A}$ .....	49

## SEZNAM TABULEK

4.1	Doporučené vzdálenosti $D_L$ a $D_V$ (převzato z [1]).....	17
5.1	Napěťové třídy (převzato z [4], [5]).....	19
5.2	Kategorie speciálních vlastností (převzato z [4], [5], [6]).....	19
5.3	Povolený rozsah energie oblouku pro třídy 1 a 2 (převzato z [7]).....	20
5.4	Zkušební parametry oblouku pro třídy 1 a 2 (převzato z [7]).....	20
6.1	Referenční hodnoty pro normalizovaný výkon oblouku (převzato z [2]).....	28
6.2	Hodnoty součinitele přenosu pro různé pracovní prostory (převzato z [2]).....	29
7.1	Pracoviště určená pro výpočet energie elektrického oblouku.....	30
7.2	Štítkové hodnoty TR1.....	32
7.3	Štítkové hodnoty TR2 a TR3.....	32
7.4	Nastavení kompaktních jističů dle použitých transformátorů.....	33
7.5	Nožové pojistky použité ve skříních SD a SR.....	33
7.6	Geometrické parametry pracovišť.....	34
7.7	Použité hodnoty jističů a pojistek pro pracoviště č.2.....	35

# ÚVOD

V dnešní době je kladen velký důraz na stabilitu dodávky elektrické energie. Distributoři elektrické energie se proto snaží co nejvíce tyto výpadky eliminovat. Při běžných pracích na elektrizační síti dochází k úplnému odpojení dané sítě, což má za následek selhání dodávky. Z tohoto důvodu se využívá prací pod napětím.

Osoby pracující na elektrických zařízeních pod napětím, nebo v jeho blízkosti, jsou vystavovány několika nebezpečím. Mimo nebezpečí spojená s elektrickým napětím jsou pracovníci vystavováni nebezpečí elektrického oblouku. Elektrické oblouky jsou události, které v sítích nízkého napětí vznikají spíše ojediněle, nicméně pro případ jejich výskytu je nutná spolehlivá ochrana. Elektrické oblouky vznikají nejen při zkratu, ale mohou vzniknout také v souvislosti s rozpojením částí pod zatížením. Působením elektrického oblouku dochází mimo jiné k uvolňování vysoké tepelné energie, která může v mnoha případech stát i život člověka. Právě tato vysoká tepelná energie elektrického oblouku je jedno z nejzávažnějších druhů nebezpečí při práci pod napětím. Vhodným výběrem tepelné třídy osobních ochranných pracovních prostředků se proti tomuto nebezpečí dá chránit.

Tato práce se tedy věnuje výběrem ochranných pomůcek pro práci pod napětím z hlediska třídy tepelné ochrany v zadaných bodech distribuční sítě nízkého napětí. Cílem této bakalářské práce je určit vhodnou třídu tepelné ochrany v zadaných místech distribuční sítě a poukázat na taková pracoviště, která nejsou pro práci pod napětím bezpečná ani při využití některé z třídy tepelné ochrany.

Tato bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. Těmito částmi jsou teoretická a praktická část. V teoretické části jsou popsána rizika spojená s elektrickým obloukem, metody práce pod napětím a s nimi spojené vzdálenosti kolem živých částí. Podrobněji jsou popsány také nejzákladnější osobní ochranné pracovní prostředky používané při práci pod napětím. Následně jsou v této práci představeny vybraná místa a jejich rozložení v distribuční síti. V praktické části jsou spočítány velikosti energie elektrického oblouku a ekvivalentní energie oblouku pro stanovení vhodné třídy tepelné ochrany v zadaných místech. Pro výpočet je uvažováno několik druhů napájecích transformátorů pro zjištění těchto hodnot i při jiných konfiguracích sítě.

# 1. PRÁCE POD NAPĚTÍM

Práce pod napětím (PPN) se od běžných prací na elektrizačních sítích značně odlišuje. Při běžných pracích se pracuje při odpojeném elektrickém zdroji, takzvaně bez napětí. Toto odpojení má za následek přerušení dodávky elektrické energie v určitých místech soustavy. Při práci pod napětím k tomuto odpojení nedochází a je tímto tedy zaručena dodávka elektrické energie i při provozování tohoto druhu práce. Práce pod napětím je tedy *„veškerá práce, při které se osoba vědomě dostává do kontaktu s živými částmi nebo zasahuje do ochranného prostoru buď částmi svého těla, nářadím, vybavením, nebo předměty, se kterými pracuje“* [1].

Zásadními výhodami PPN je tedy vyšší stabilita dodávky elektrické energie, což je velice pozitivní jak pro dodavatele el. energie, tak i pro zákazníka. S novými postupy se však váže i několik negativ. Mezi ty nejzásadnější jsou nově vzniklá rizika, která byla vlivem odstavení sítě zcela eliminována. Tato rizika jsou popsána v kapitole 2. Mezi další nevýhody PPN patří také ze začátku vysoké pořizovací náklady na vhodné osobní ochranné pracovní prostředky a pomůcky. Osobní ochranné pracovní prostředky (OOPP) pro PPN jsou podrobněji popsány v kapitole 5. S prací pod napětím se dnes můžeme potkat na všech napěťových hladinách.

## 2. RIZIKA PRÁCE POD NAPĚTÍM

S rozvíjející se poptávkou práce pod napětím roste také důraz na bezpečnost při práci. Osoby pracující na elektrickém zařízení pod napětím jsou vystavovány několika nebezpečím. Mimo nebezpečí úrazu elektrickým proudem či napětím se také potýkají s nebezpečím spojeným s elektrickým obloukem. Přestože je vznik elektrického oblouku v síti spíše vzácný, nelze ho však vyloučit. Elektrický oblouk nevzniká pouze při zkratu, ale může vzniknout i při běžné práci pod napětím kdy jsou dvě proudovodné části od sebe odděleny, jako tomu je třeba při výměně pojistek při zatížení. Vlivem konfigurace elektrické sítě a zařízení může být oblouk velice nebezpečný. Elektrický oblouk s sebou nese řadu nebezpečí jako je:

- Vysoká tepelná energie oblouku
- Rázová vlna a s tím související úlomky uvolněné při explozivním šíření obloukového záblesku
- Elektromagnetické záření vysoké intenzity v pásmu ultrafialového a infračerveného záření, ale také v pásmu viditelného světla, které může vést k poškození zraku a pokožky
- Vysoká úroveň akustického šoku
- Toxické plyny a částice vznikající při tavení či odpařování materiálu
- Vznik požáru

[2]

Každé z těchto nebezpečí může mít vliv na zdraví či dokonce život osoby v blízkosti. Při dodržování bezpečných vzdáleností a vhodným použitím ochranných pomůcek a prostředků dochází ke snížení těchto rizik. Jednotlivé metody PPN a vzdálenosti kolem živé části jsou popsány v kapitolách 3 a 4.

Nejzávažnější rizika jsou spojena s tepelnými účinky elektrického oblouku. Proti tepelným účinkům se dá chránit správným výběrem osobních ochranných pracovních pomůcek se správnou třídou tepelné ochrany. Tepelným nebezpečím elektrického oblouku a následným stanovením správné třídy tepelné ochrany se zabývá kapitola 6.

## 3. METODY PPN

Metody PPN jsou způsoby práce, při kterých je pracovník pracující na elektrickém zařízení chráněn před účinky napětí. Při každé metodě PPN se pro zachování bezpečnosti pracovníka využívají vhodné ochranné pomůcky. Tyto pomůcky jsou popsány v kapitole 5. Dle [1] se můžeme setkat se třemi metodami PPN. Těmito metodami jsou:

- Práce na vzdálenost – práce na bezpečnou vzdálenost
- Práce s izolačními rukavicemi
- Práce v přímém dotyku

Doplňující podniková norma [3] dále udává čtvrtou metodu:

- C3M

### 3.1 Práce na vzdálenost – práce na bezpečnou vzdálenost

Tato pracovní metoda popisuje práce pod napětím, při kterém pracující osoba koná práci v určité vzdálenosti od živých částí. Tato práce je vykonávána s pomocí izolačních tyčí nebo pomocí izolačního nářadí, které udržují bezpečnou vzdálenost pracovníka od živé části.

Při této metodě musí pracující osoba dodržovat minimální vzdálenost jakékoliv části těla včetně oblečení od nekrytých živých částí pod napětím. Pracovník by se měl tedy pohybovat ve vzdálenostech stejných nebo vyšších, než je hodnota ochranného prostoru nezakryté živé části (vzdálenost  $D_L$ ). Při větším přiblížení (blíže než  $D_L$ ) se již nejedná o práci na vzdálenost.

Tato metoda se využívá na všech napěťových hladinách. Jedná se převážně o jednodušší typy prací [1].

### 3.2 Práce s izolačními rukavicemi

Dříve byla tato metoda práce označována jako práce v dotyku. Při této pracovní metodě se využívá speciálních dielektrických rukavic s možností izolačních rukávů, které slouží k přímému mechanickému dotyku s živými částmi.

Při této metodě se pracovník nachází v menších hodnotách, než je hodnota ochranného prostoru nezakryté živé části (vzdálenost  $D_L$ ). Pracovník je izolován jak od zemního potenciálu (např. pomocí izolovaných výsuvných plošin), tak od potenciálu živé části (právě pomocí dielektrických rukavic).

Tato metoda se využívá převážně na sítích NN a VN [1].

### 3.3 Práce v přímém dotyku

Tato práce byla dříve označována jako práce na potenciálu. Jedná se o metodu práce pod napětím, při které je pracující osoba v přímém dotyku s živými částmi.

Při této metodě je tělo pracující osoby na stejném potenciálu jako živá část, na které pracuje.

U této metody se využívá speciálních vodivých oblečení. Toto oblečení má vetkaná vodivá vlákna, které zajišťují elektrickou vodivost mezi všemi částmi oblečení a slouží ke snížení elektrického pole uvnitř oblečení. Tyto obleky chrání pracovníka před nebezpečnými účinky elektrického napětí a pracující osoba se tedy stává přímou součástí elektrického zařízení. Pracující osoba je dokonale izolován od zemního potenciálu.

Tato metoda se používá u elektrických zařízení VN, VVN a ZVN [1].

### **3.4 C3M**

Jedná se o metodu PPN, která kombinuje všechny tři výše zmíněné metody práce. Používá se při pracích na venkovních sítích VN [3].

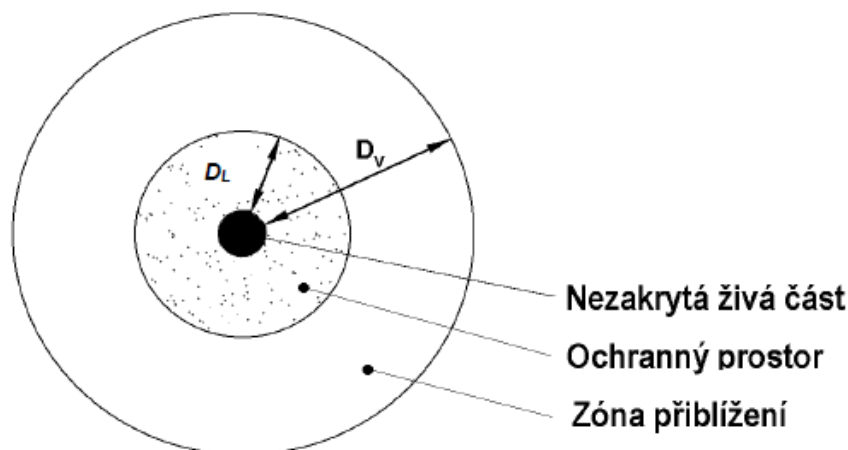
## 4. VZDÁLENOSTI A PRACOVNÍ ZÓNY

Definice vzdáleností rozdělující prostor kolem nezakrytých živých částí.

- Vzdálenost  $D_L$  je vzdálenost definující vnější hranici ochranného prostoru
- Vzdálenost  $D_V$  je vzdálenost definující vnější hranici zóny přiblížení

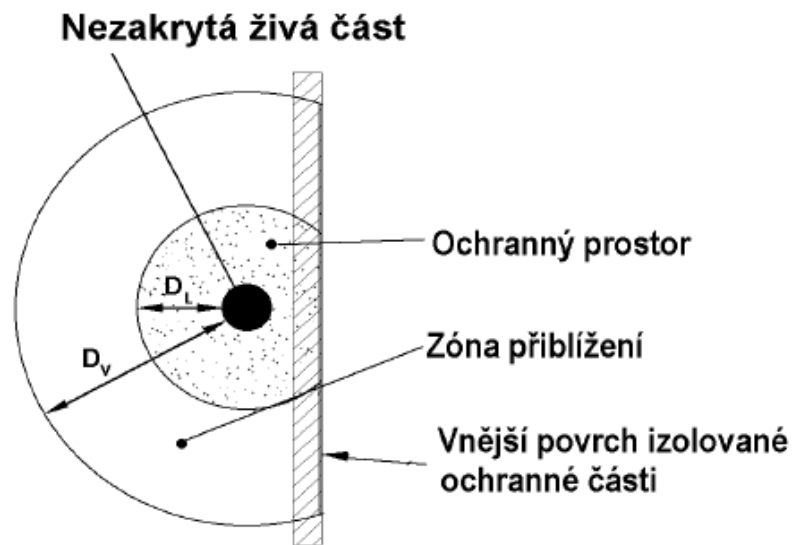
[1]

V obrázku 4.1 je popsáno rozdělení prostoru bez použití izolované zábrany. Při použití izolovaných zábran/přepážek/krytů je možné se přiblížit až k těmto zábranám. Použití těchto izolovaných pomůcek je znázorněno v obrázku 4.2. Tyto hodnoty se pro různé napěťové hladiny mění. Pro vybrané napěťové hladiny jsou tyto hodnoty vypsány v tabulce 4.1. Tyto hodnoty jsou minimálními dovolenými vzdálenostmi a jsou stanoveny dle [1]. Některé podnikové normy (např. [3]) tyto vzdálenosti zpřísnují za účelem zvýšené bezpečnosti pracovníka. Veškeré práce, které zasahují do vzdálenosti menší než  $D_L$ , jsou práce pod napětím (PPN). Práce, které jsou ve vzdálenostech větší než  $D_L$ , ale zároveň menší než  $D_V$ , se nazývají práce v blízkosti napětí. Pokud se však jedná o vzdálenosti větší než  $D_V$ , jedná se pak o práce bez napětí.



Obrázek 4.1 Vzdušné vzdálenosti a zóny pro pracovní postupy (převzato z [1])





Obrázek 4.2 Ohraničení ochranného prostoru s použitím izolačního ochranného materiálu (převzato z [1])

Tabulka 4.1 Doporučené vzdálenosti  $D_L$  a  $D_V$  (převzato z [1])

Jmenovité napětí soustavy $U_n$ [kV]	Minimální dovolené vzdušná vzdálenost definující vnější hranici ochranného prostoru $D_L$ [mm]	Minimální dovolené vzdušná vzdálenost definující vnější hranici zóny přiblížení $D_V$ [mm]
$\leq 1$	-	300
6	90	1120
10	120	1150
22	260	1260
35	370	1370
110	1000	2000
220	1600	3000
400	2600	4600

Poznámka: Při hodnotách jmenovitého napětí do 1 kV je vnější hranice ochranného prostoru (vzdálenost  $D_L$ ) přímo živá část.

## 5. OSOBNÍ OCHRANNÉ PRACOVNÍ PROSTŘEDKY PRO PPN

Osobní ochranné pracovní prostředky (OOPP) pro PPN slouží pro ochranu pracovníka proti rizikům vyvolaných elektřinou a nebezpečným napětím. OOPP nejsou stoprocentní ochranou proti daným nebezpečím, ale vhodným výběrem OOPP lze míru tohoto nebezpečí snížit. OOPP musí být vždy v řádném technickém stavu, který odpovídá příslušným technickým normám. Osobní ochranné pracovní prostředky musí být udržovány a uskladňovány ve stavu vhodném k použití. Dále je potřeba dodržovat technické normy, které předepisují pravidelné prohlídky a periodické zkoušky k prověření jejich mechanických a elektrických vlastností. Podmínky a parametry zkoušení jsou dále popsány v PNE 38 1981 a v PNE 35 970 [3].

Níže jsou vypsány některé z mnoha osobních ochranných pracovních prostředků pro PPN:

- Izolační rukavice, boty a galoše
- Ochranná přilba
- Ochrana očí nebo obličeje
- Ochranný oděv
- Izolované nářadí
- Izolační koberce, plošiny a stojany
- Izolované přenosné a pevné zábrany
- Vyprošťovací (záchranné) háky
- Izolační ovládací tyče a táhla
- a další

[3]

Jednotlivé osobní ochranné pracovní prostředky se musí řídit předepsanými technickými normami pro daný OOPP.

### 5.1 Napět'ové třídy

OOPP pro PPN se dají rozdělit do několika napět'ových tříd dle tabulky 5.1 . Napět'ové třídy udávají nejvyšší možné napětí sítě, na které se dá daný OOPP použít a také napětí, kterým byl daný OOPP zkoušen. Dále je možné tyto napět'ové třídy identifikovat dle barevného kódu pro danou napět'ovou třídu.

Tabulka 5.1 Napěťové třídy (převzato z [4], [5])

Třída	Barevný kód	Nejvyšší napětí sítě AC [kV]	Zkušební napětí [kV]
00	Běžová	0,5	2,5
0	Červená	1,0	5
1	Bílá	7,5	10
2	Žlutá	17,0	20
3	Zelená	26,5	30
4	Oranžová	36,0	40
5	Fialová	46,0	50

## 5.2 Kategorie

Ochranné pomůcky pro PPN se dále rozdělují do několika kategorií. Tyto kategorie popisují speciální vlastnosti ochranných pomůcek a mají zvýšit ochranu pracujících osob proti vlivům, které by jinak ovlivňovali bezpečnost práce. Jednotlivé kategorie jsou zapsány v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2 Kategorie speciálních vlastností (převzato z [4], [5], [6])

Kategorie	Odolnost proti
A	Kyselině
C	Extrémně nízké teplotě
H	Oleji
M	Mechanickému namáhání
P	Vlhkosti
R	Kyselině, oleji a ozónu
W	Extrémně vysoké teplotě
Z	Ozónu

## 5.3 Třída tepelné ochrany

Třída tepelné ochrany se určuje pouze pro OOPP chránící před tepelným účinkem elektrického oblouku. Třída tepelné ochrany je charakterizována zkušební (testovací) úrovní energie vystavením energií oblouku. Velikosti těchto energií pro jednotlivé třídy jsou zapsány v tabulce 5.3. Třída tepelné ochrany se dělí na dva stupně. Třída 1 představuje základní úroveň ochrany a třída 2 představuje zvýšenou ochranu. Stanovení třídy ochranného materiálu a oblečení se stanovuje podle zkoušky v boxu dle [7]. Zkušební parametry oblouku pro jednotlivé třídy jsou popsány v tabulce 5.4 [7].

Tabulka 5.3 Povolený rozsah energie oblouku pro třídy 1 a 2 (převzato z [7])

Třída tepelné ochrany	Testovací úroveň energie elektrického oblouku $W_{LBP}$ [kJ]	Povolený rozsah odchylky [kJ]
Třída 1	168 (158)	$\pm 17$
Třída 2	320 (318)	$\pm 22$
Poznámka: Hodnoty v závorce jsou převzaty z [2]		

Tabulka 5.4 Zkušební parametry oblouku pro třídy 1 a 2 (převzato z [7])

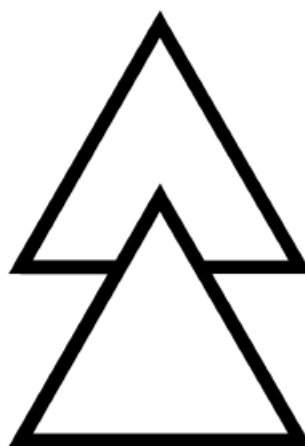
Třída tepelné ochrany	Zkušební proud [kA]	Zkušební napětí AC [V]	Doba trvání oblouku [ms]
Třída 1	$4 \pm 5 \%$	$400 \pm 5 \%$	$500 \pm 5 \%$
Třída 2	$7 \pm 5 \%$	$400 \pm 5 \%$	$500 \pm 5 \%$

## 5.4 Značení

Nářadí či OOPP, které spadají pod práce pod napětím, musí být označeny minimálně následujícím značením:

- Značkou IEC 60417–5216 (2002-10) – viz obrázek 5.1
- Číslem příslušné normy IEC umístěné bezprostředně u značky

Označení musí být zřetelné, trvale čitelné a nesmí snížit výkonnost nářadí, zejména jeho izolační vlastnosti. Značka dvojitého trojúhelníku (obrázek 5.1) signalizuje vhodnost použití pro práci pod napětím a netýká se pouze izolačního nářadí. Značení, které je potřeba pro správnou volbu nářadí, jako jsou napěťové třídy, kategorie nebo speciální vlastnosti nářadí musí být taktéž viditelně označeny [8].



Obrázek 5.1 Vhodné pro práce pod napětím – dvojitý trojúhelník (převzato z [4])

Označení pro jednotlivé OOPP PPN se může lišit, jedná se však o doplňkové informace, které jsou uvedeny v příslušných normách. V následujících kapitolách jsou dále představeny nejzákladnější OOPP PPN, které se používají na síť NN.

## 5.5 Rukavice pro PPN

Rukavice pro PPN se řídí dle [4]. Rozeznávají se dva typy rukavic. Prvním z nich jsou izolační rukavice (viz obrázek 5.2), tyto rukavice jsou vyráběny z elastomeru nebo plastu a jsou používány na ochranu proti elektrickým rizikům. Dalším typem jsou takzvané kombinované rukavice (viz obrázek 5.3). Tyto rukavice mají oproti izolačním rukavicím navíc i mechanickou ochranu. Rukavice pro PPN musí být označeny dle kapitoly 5.4. Rukavice se dále musí označit následujícími údaji:

- Identifikací výrobce
- Napětovou třídou dle tabulky 5.1
- Kategorii dle tabulky 5.2
- Velikostí
- Číslem série nebo dodávky
- Měsícem a rokem výroby
- Prostorem pro značení dat běžné kontroly a daty pro následující periodické kontroly
- Kombinované rukavice musí být navíc označeny speciální značkou pro kombinované rukavice (viz obrázek 5.4)

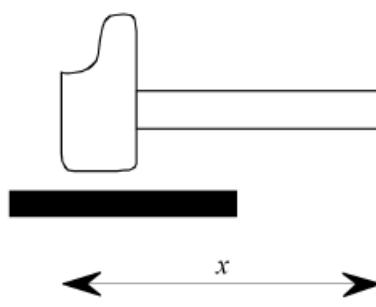
[4]



Obrázek 5.2 Izolační rukavice (převzato z [9])



Obrázek 5.3 Kombinované rukavice (převzato z [9])



Obrázek 5.4 Značka kombinované rukavice – Kladivo (převzato z [4])

## 5.6 Ruční nářadí pro PPN NN

Ruční nářadí používané pro PPN NN se řídí dle [10]. Pojmem ruční nářadí se rozumí nářadí držené v ruce. Rozeznává se několik typů ručního nářadí pro PPN NN a to:

- Kombinované ruční nářadí

*„Ruční nářadí vyrobené z izolačního materiálu (materiálů) s přístupnými vodivými částmi na pracovní hlavici“ [10].*

- Izolované ruční nářadí

*„Ruční nářadí z vodivého materiálu (materiálů) zcela nebo částečně pokryté izolačním materiálem (materiály)“ [10].*

- Izolační ruční nářadí

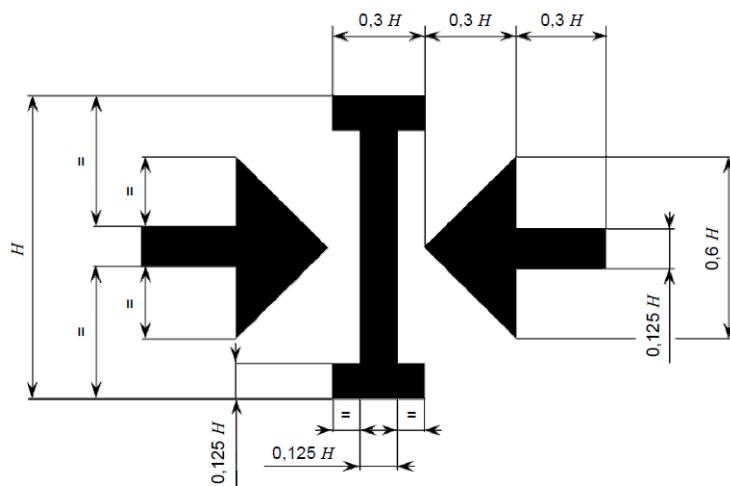
*„Ruční nářadí vyrobené zcela nebo převážně z izolačního materiálu (materiálů) s výjimkou vložky z vodivého materiálu (materiálů) používané pro vytužení, ale bez živých částí“ [10].*

Kombinované, izolované a izolační nářadí musí být navrženo a vyrobeno tak, aby chránilo pracovníka před úrazem elektrickým proudem. Toto nářadí snižuje riziko zkratových proudů mezi dvěma částmi s rozdílnými potenciály. Oboustranné ruční

nářadí, jakou jsou klíče, oboustranné klíče na šestihrany, oboustranné otevřené klíče apod. se v případě, že konstrukce zajišťuje, že není vodivé spojení mezi dvěma pracovními hlavicemi smí použít jako izolační či kombinované ruční nářadí. Nesmí se však používat jako izolované ruční nářadí. Značení ručního nářadí pro PPN NN se řídí podle kapitoly 5.4. Ruční nářadí pro PPN NN se dále musí navíc čitelně a trvanlivě označit následujícími nápisy:

- Značením původu
- Odkazem na model /typ
- Rokem výroby (nejméně dvěma posledními číslicemi daného roku)
- Označením 1 000 V, které musí být umístěné v bezprostřední blízkosti značky dvojitého trojúhelníku (obrázek 5.1)
- V případě použití při extrémně nízkých teplotách musí být rukavice označeny také příslušnou kategorií (viz tabulka 5.2)
- Doplnkovým značením, které určuje zákazníka (např. majetková značka)
- Doplnkovým značením pro ruční nářadí, které je smontovatelné a konstruované tak, že je možná zaměnitelnost mezi různými výrobci (viz obrázek 5.5)

[10]



Obrázek 5.5 Značka pro smontovatelné ruční nářadí a konstruované jako zaměnitelné mezi různými výrobci IEC 60417–6168 (2012-07) (převzato z [10])

Jelikož se jedná o ruční nářadí pro PPN NN, platí tedy, že se toto ruční nářadí používá do 1 000 V střídavých. Tabulka 5.1 pro ruční nářadí pro PPN NN tedy neplatí a toto nářadí nesmí být označeno žádným jiným napětím, než je uvedeno výše. [10]

## 5.7 Ochranné přilby

Pro ochranu hlavy a obličeje se používají elektricky izolující přilby s integrovaným celoobličejovým štítem. Tyto přilby chrání pracovníky před úrazem elektrickým proudem a zamezením průchodu proudu přes hlavu. Přilby používané v elektrických instalacích nebo v jejich blízkosti musí být zařazeny do napěťové třídy 0, což znamená, že jsou určeny pro instalace s jmenovitým napětím 1 000 V AC.

Izolační přilby musí splňovat požadavky ČSN EN 397 nebo ČSN EN 443. Přilby určené pro použití v instalacích nízkého napětí se musí řídit také podle ČSN EN 50365. Přilby nesmí obsahovat vodivé části. Izolační přilby musí vyhovět požadovanému zkušebnímu napětí pro danou napěťovou třídu (viz tabulka 5.1).

Značení izolujících přileb musí mimo značení, které je vyžadováno normou pro přilby obsahovat následující:

- Značku dvojitého trojúhelníku (viz obrázek 5.1)
- Napěťovou třídu
- Číslo série nebo dávky

[11]

Na obrázku 5.6 lze vidět izolující ochrannou přilbu s integrovaným celoobličejovým štítem IDRA 2.



Obrázek 5.6 Ochranná přilba IDRA 2 (převzato z [12])



## 5.8 Ochranné obleky

Ochranné oděvy proti tepelným účinkům elektrického oblouku se řídí podle normy ČSN EN 61482. Ochranné obleky musí mimo jiné být i v souladu s ČSN EN ISO 13688. Oděvy chránící horní část těla musí mít rukávy, které zakrývají celé zápěstí a musí sahát až po krk. Naopak oděvy chránící spodní část těla musí zakrývat tělo od pasu až po kotníky. Všechny nezakryté části oděvu musí být vyrobeny z materiálů poskytující ochranu proti oblouku. Pokud jsou použity dva různé materiály pro přední a zadní stranu obleku, mít být v instrukcích jasně definováno použití slabšího materiálu.

Ochranné obleky a materiály, ze kterých jsou tyto obleky vyrobeny musí splňovat také mechanické vlastnosti jako jsou:

- Odolnost proti roztržení
- Pevnost v tahu
- Pevnost v přetržení
- Změna rozměrů materiálu v důsledku praní

Dalšími parametry jsou:

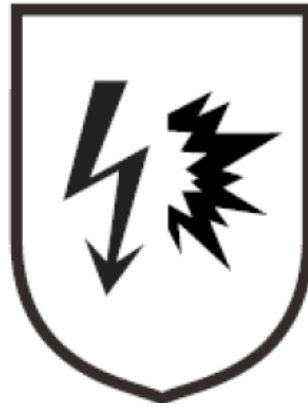
- Tepelná odolnost
- Objemový odpor
- Omezení šíření plamene

Ochranná vlastnost proti tepelným účinkům elektrického oblouku se rozlišuje do dvou tříd. Tato vlastnost je popsána v kapitole 5.3.

Značení musí splňovat požadavky dle ČSN 13688. Značení musí tedy obsahovat:

- jméno, obchodní značka nebo jiné označení výrobce
- označení typu výrobku, obchodní značku nebo kód
- označení velikosti
- označení způsobu ošetřování
- značku IEC–60417–6353 (2016-02) – ochrana před tepelným účinkem elektrického oblouku (viz obrázek 5.7)
- vedle značky číslo příslušné normy a tepelná ochrana proti oblouku ve formě hodnocení oblouku anebo třídu tepelné ochrany dle kapitoly 5.3

[13]



Obrázek 5.7 Ochrana před tepelným účinkem elektrického oblouku  
(převzato z [13])

## 6. TEPELNÉ NEBEZPEČÍ ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

Výpočet energie elektrického oblouku a s tím související výběr třídy tepelné ochrany popisuje norma BGI/GUV-5188 E. Tato norma popisuje tepelné nebezpečí elektrického oblouku a s tím související výběr ochranných pomůcek chránících proti tepelnému nebezpečí způsobeným elektrickým obloukem při elektrotechnických pracích na elektrických zařízeních. To jsou OOPP, které splňují parametry některé třídy tepelné ochrany dle tabulky 5.3 a 5.4. Informace obsažené v této normě platí pro práce prováděné na elektrických zařízeních nebo v jejich blízkosti na napětí větší než 50 V střídavých (AC). Tato norma bere v potaz pouze tepelné nebezpečí elektrického oblouku, nikoliv nebezpečí vzniklé vedlejšími účinky elektrického oblouku jako třeba akustické šoky či toxické plyny (viz kapitola 2). Tato norma porovnává energii elektrického oblouku v systému v případě poruchy ( $W_{LB}$ ) s ekvivalentní energií oblouku ( $W_{LBA}$ ) dle následujícího vztahu:

$$W_{LB} \leq W_{LBA} \quad (6.1)$$

Tepelná rizika spojená s elektrickým obloukem jsou pro jednotlivé třídy tepelné ochrany pokryta, pokud bude platit vztah (6.1). Pokud tento vztah nebude platit, lze zvážit následující příkladná opatření.

- Výměna předřazeného ochranného zařízení za rychleji působící zařízení, nebo změna vypínací charakteristiky během pracovní činnosti
- Zvětšení pracovní vzdálenosti
- Změna zkratového výkonu pomocí změny konfigurace sítě
- Zrušení práce pod napětím na daném elektrickém zařízení

Při změně některých příkladných opatření či parametrů je potřeba opakovat celý výpočetní postup [2].

### 6.1 Energie elektrického oblouku $W_{LB}$

Energie elektrického oblouku je energie, která se v případě poruchy převede na pracovišti. Velikost této energie závisí na několika parametrech. Mezi tyto parametry patří parametry pracovního prostředí, jakou jsou:

- Doba vypnutí ochranného zařízení ( $t_k$ )
- Jmenovité síťové napětí ( $U_n$ )
- Odporový/reaktanční vztah související s impedancí sítě ( $R/X$ )
- Třífázový zkratový výkon ( $S_k$ )
- Vzdálenost mezi dvěma elektrodami pod napětím ( $d$ )

Dalším parametrem je velikost normalizovaného výkonu oblouku ( $k_P$ ). Normalizovaný výkon oblouku lze stanovit s ohledem na vzdálenost mezi dvěma elektrodami ( $d$ ) dle tabulky 6.1. Mimo jiné lze pro výpočet nejhoršího případu použít

vztah (6.2), v tomto případě se jedná o maximální hodnotu normalizovaného výkonu oblouku ( $k_{Pmax}$ ).

$$k_{Pmax} = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}} \quad (6.2)$$

Tabulka 6.1 Referenční hodnoty pro normalizovaný výkon oblouku (převzato z [2])

$U_n$ [kV]	$d$ [mm]	$R/X$	$k_p$
0,4	30	0,2	0,229
		0,5	0,215
		1,0	0,199
		$\geq 2,0$	0,181
	45	0,2	0,289
		0,5	0,263
		1,0	0,240
		$\geq 2,0$	0,222
	60	0,2	0,338
		0,5	0,299
		1,0	0,270
		$\geq 2,0$	0,253
10,0 až 20,0	120 až 240	0,1	0,040 až 0,080

Dále je potřeba znát třífázový zkratový proud ( $I_{k3}''$ ) v místě poruchy. Skutečný zkratový proud ( $I_{kLB}$ ) v oblasti nízkého napětí je výrazně nižší než předpokládaný třífázový zkratový proud ( $I_{k3}''$ ) vlivem tlumících vlastností elektrického oblouku a nelze jej tedy přesně určit. Pro výpočet se používá mezní proudový faktor ( $k_B$ ) roven 0,5. Platí tedy následující vztah:

$$I_{kLB} = k_B \cdot I_{k3}'' = 0,5 \cdot I_{k3}'' \quad (6.3)$$

V sítích s napětím větším než 1 kV je hodnota  $k_B$  rovna 1. V těchto sítích jsou tedy tlumící vlastnosti elektrického oblouku zanedbatelné.

Při znalosti skutečného zkratového proudu ( $I_{kLB}$ ) se podle vypínací charakteristiky ochranného zařízení dá určit jeho doba vypnutí ( $t_k$ ). Při zkratu trvajícím déle než jedna sekunda lze předpokládat, že pracující osoba bude schopna se bezprostředně vzdálit z ohrožené oblasti. Z tohoto důvodu nebude potřeba uvažovat delší dobu vypnutí. Toto však neplatí pro pracovní prostředí, kde je toto vzdálení omezeno.

Při znalosti těchto hodnot je možné dopočítat energii elektrického oblouku v systému v případě poruchy podle následujících vztahů:

$$W_{LB} = k_p \cdot S_k'' \cdot t_k \quad (6.4)$$

$$W_{LB} = k_p \cdot \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{k3} \cdot t_k \quad (6.5)$$

[2]

## 6.2 Ekvivalentní energie oblouku $W_{LBA}$

Ekvivalentní energie oblouku ( $W_{LBA}$ ) je úroveň ochrany, kterou poskytuje OOPP dle třídy tepelné ochrany (viz kapitola 5.3). Je určena úrovní zkoušky pro OOPP, pracovní vzdáleností ( $a$ ) a součinitelem přenosu ( $k_T$ ).

Pracovní vzdálenost ( $a$ ) je vzdálenost mezi elektrickým obloukem a tělem (trupem) pracující osoby, která je účinná při pracovní činnosti nebo musí být dodržena v uvažovaném pracovním prostředí. Pokud se v pracovním prostředí provádějí různé úkoly, měla by být použita nejkratší vzdálenost. Obecně lze říct, že v síti nízkého napětí nebude vzdálenost trupu osoby od elektrického oblouku menší než 300 mm. Tuto hodnotu lze tedy použít jako referenční.

Součinitel přenosu ( $k_T$ ) zohledňuje geometrickou konfiguraci elektrického systému a popisuje šíření tepelného dopadu elektrického oblouku v prostoru. Čím bude otevřenější pracovní prostor, tím více bude rozložený tepelný dopad elektrického oblouku, zde bude dopad na pracovníka nejpřívetivější. Naopak pokud bude pracovník pracovat v uzavřenějším prostoru, tak tepelný dopad na pracovníka bude daleko drastičtější z důvodu nerozložení celkové tepelné energie do prostoru. Referenční hodnoty součinitele přenosu pro různé pracovní prostory jsou uvedeny v tabulce 6.2.

Tabulka 6.2 Hodnoty součinitele přenosu pro různé pracovní prostory (převzato z [2])

Typ systému	Součinitel přenosu $k_T$
(Velmi) malé systémy s bočními, zadními a dělicími stěnami	1
Velkoplošné systémy, prostorová omezení především kvůli konstrukci zadní stěny	1,5 až 1,9
Otevřené systémy bez výrazných omezení v elektrodové komoře	2,4

Při znalosti všech těchto parametrů je možné dopočítat ekvivalentní energii oblouku dle následujícího vztahu:

$$W_{LBA} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP} \quad (6.6)$$

kde  $a$  je pracovní vzdálenost,  $k_T$  je součinitel přenosu a  $W_{LBP}$  je energie testovacího elektrického oblouku pro danou třídu tepelné ochrany (viz kapitola 5.3). [2]

## 7. PRACOVIŠTĚ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ URČENÁ PRO VÝPOČET TEPELNÉ ENERGIE ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

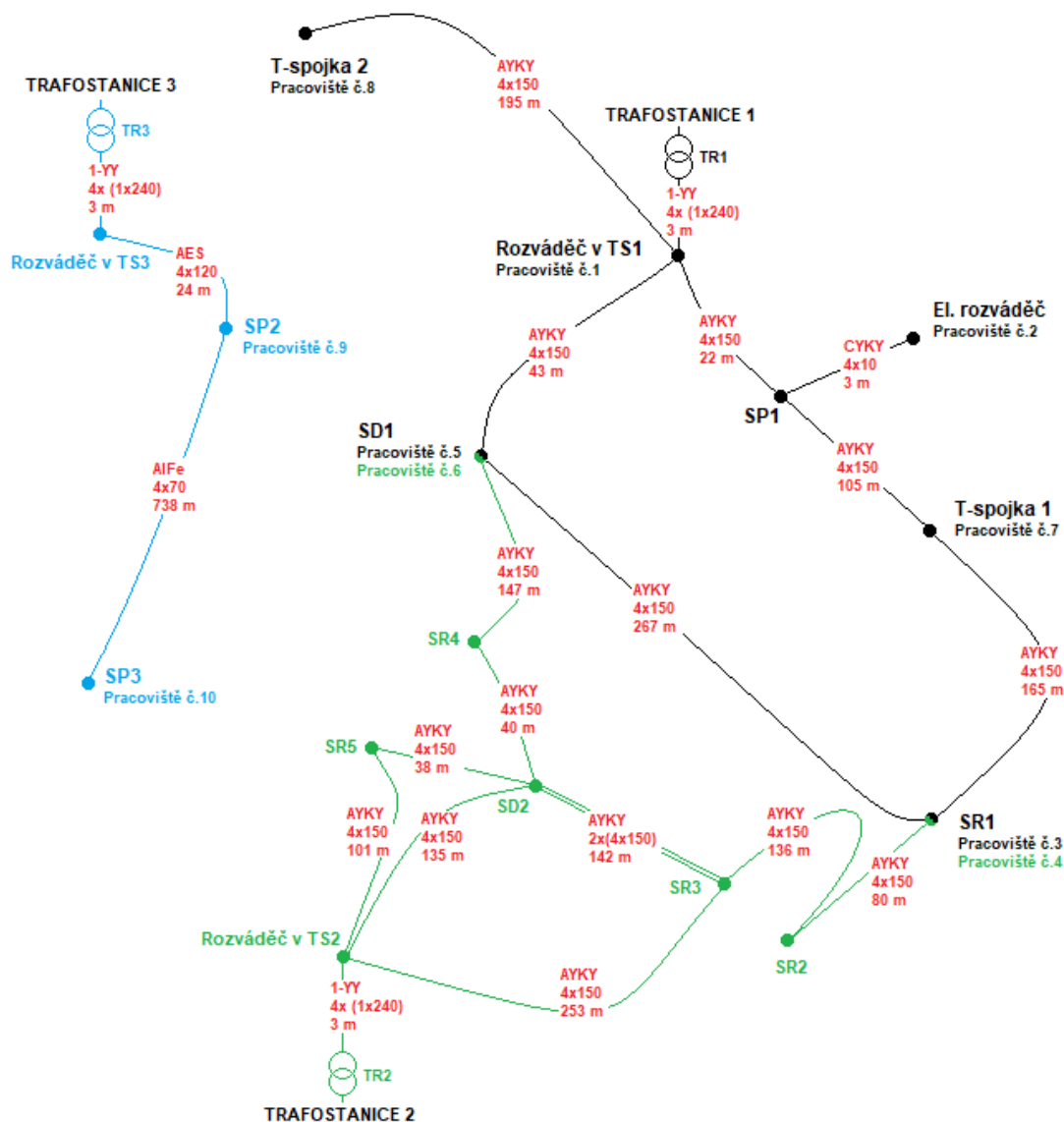
Pro výpočet energie elektrického oblouku a následné stanovení vhodné třídy tepelné ochrany OOPP bylo vybráno několik pracovišť z distribuční sítě nízkého napětí. Pracoviště jsou rozdělena celkem do tří samostatných sítí. Jednotlivé pracoviště a jejich rozdělení jsou uvedeny v tabulce 7.1. Na obrázku 7.1 je zobrazeno celkové rozložení jednotlivých pracovišť a jejich rozdělení do samotných sítí včetně jejich propojení s trafostanicemi. Pracoviště jsou propojena několika druhy kabelů či vedení a to:

- AYKY 4x150 mm<sup>2</sup>
- CYKY 4x10 mm<sup>2</sup>
- 1-YY 4x (1x120 mm<sup>2</sup>)
- AES 4x120 mm<sup>2</sup>
- AlFe 4x70 mm<sup>2</sup>

Tabulka 7.1 Pracoviště určená pro výpočet energie elektrického oblouku

Číslo pracoviště	Pracovní objekt	Označení ve schématu	Síť
1	Rozváděč v TS	Rozváděč v TS1	č.1
2	Elektroměrový rozváděč	El. rozváděč	č.1
3	Rozpojovací skříň SR	SR1	č.1
4	Rozpojovací skříň SR	SR1	č.2
5	Rozpojovací skříň SD	SD1	č.1
6	Rozpojovací skříň SD	SD1	č.2
7	T-spojka	T-spojka 1	č.1
8	T-spojka	T-spojka 2	č.1
9	Pojistková přípojková skříň	SP2	č.3
10	Pojistková přípojková skříň	SP3	č.3

Poznámka:  
 Síť č.1 je na obrázku 7.1 označena černou barvou  
 Síť č.2 je na obrázku 7.1 označena zelenou barvou  
 Síť č.3 je na obrázku 7.1 označena modrou barvou



Obrázek 7.1 Celkové schéma pracovišť

## 7.1 Napájecí zdroje

Jednotlivé sítě jsou napájeny distribučními transformátory, které jsou umístěny v jednotlivých trafostanicích. Pro výpočet je uvažováno několik typů těchto transformátorů s různými výkony (250 kVA, 400 kVA a 630 kVA). Šítkové hodnoty použitého transformátoru TR1 v trafostanici 1 jsou uvedeny v tabulce 7.2. V tabulce 7.3 jsou naopak uvedeny šítkové hodnoty pro transformátory TR2 a TR3. U jednotlivých pracovišť budou tedy uvažovány vždy všechny výkony příslušných transformátorů. Výjimku tvoří pouze pracoviště č.2, u kterého jsou tyto výkony uvažovány pro všechny hodnoty dvojice pojistka – jistič, jak je uvedeno v kapitole 7.5.2.

Tabulka 7.2 Štítkové hodnoty TR1

$U_1$ [V]	22000	22000	22000
$U_2$ [V]	400	400	400
$I_n$ [A]	361	577	909
$S$ [kVA]	250	400	630
$u_k$ [%]	4,10	4,00	6,33
$f$ [Hz]	50	50	50
$P_0$ [W]	290	430	525
$P_k$ [W]	2418	3850	4429
Zapojení	Dyn1	Dyn1	Dyn1

Tabulka 7.3 Štítkové hodnoty TR2 a TR3

$U_1$ [V]	22000	22000	22000
$U_2$ [V]	420	420	420
$I_n$ [A]	344	550	866
$S$ [kVA]	250	400	630
$u_k$ [%]	4,10	4,00	6,33
$f$ [Hz]	50	50	50
$P_0$ [W]	290	430	525
$P_k$ [W]	2418	3850	4429
Zapojení	Dyn1	Dyn1	Dyn1

## 7.2 Jistící zařízení

Jednotlivé transformátory a vedení jsou jištěny příslušnými přístroji. Na sekundární straně transformátoru jsou vždy připojené kompaktní jističe, které chrání daný transformátor proti přetížení. Vlivem použití různých druhů transformátorů se mění jejich nastavení. Mění se tedy nastavení spouště na přetížení ( $I_r$ ) a zkratové spouště ( $I_i$ ). Pro výpočet je uvažováno několik typů těchto jističů, jejich konkrétní typy a jejich nastavení dle použitých transformátorů se řídí dle tabulky 7.4.

Dále jsou v přípojkových skříních SD a SR použity nožové pojistky typu NH gG velikosti 2. Hodnoty těchto pojistek zůstávají při použití různých transformátorů neměnné. Použité pojistky jsou uvedeny v tabulce 7.5. Výjimku tvoří pouze pojistky použité v přípojkové skříně SP1, které se mění na základě použití modulárních jističů v elektroměrovém rozváděči, jak je uvedeno v kapitole 7.5.2.



Tabulka 7.4 Nastavení kompaktních jističů dle použitých transformátorů

TR1			
$S$ [kVA]	250	400	630
Nastavení a typ kompaktního jističe			
Výrobce	EATON	EATON	EATON
Typ	LZMN3-AE630-I	LZMN4-AE1000-I	LZMN4-AE1000-I
$I_n$ [A]	630	1000	1000
$I_r$ [A]	347	550	900
$I_i$ [A]	4410	7000	10000
TR2			
$S$ [kVA]	250	400	630
Nastavení a typ kompaktního jističe			
Výrobce	EATON	EATON	EATON
Typ	LZMN3-AE630-I	LZMN4-AE1000-I	LZMN4-AE1000-I
$I_n$ [A]	630	1000	1000
$I_r$ [A]	315	550	850
$I_i$ [A]	4410	7000	10000
TR3			
$S$ [kVA]	250	400	630
Nastavení a typ kompaktního jističe			
Výrobce	OEZ	OEZ	OEZ
Typ	SE-BL-J630-DTVE	SE-BL-J1000-DTVE	SE-BL-J1000-DTVE
$I_n$ [A]	630	1000	1000
$I_r$ [A]	344	550	866
$I_i$ [A]	4300	6875	10825

Tabulka 7.5 Nožové pojistky použité ve skříních SD a SR

Nožové pojistky NH, gG, velikost 2				
$I_n$ [A]	160	200	224	400

### 7.3 Reálné zapojení

Na základě výše uvedených informací o použitých strojích a přístrojích v daných sítích byly vytvořeny modely zapojení každé sítě. Tyto modely byly vytvořeny za pomoci programů xSpider a Sichr. Modely sítě č.1 a sítě č.2 byly vytvořeny v programu xSpider, model sítě č.3 byl vytvořen v programu Sichr. Reálné zapojení sítí při použití transformátorů o výkonech 250 kVA lze vidět v příloze A tohoto dokumentu. V příloze B, která se nachází na přiloženém disku se nachází elektronické verze těchto modelů v příslušných programech.

## 7.4 Parametry pracovišť

Pro výpočet energie elektrického oblouku ( $W_{LB}$ ) a ekvivalentní energie oblouku ( $W_{LBA}$ ) jak je uvedeno v kapitole 6 je potřeba znát také parametry pracovního prostředí a geometrii zařízení jednotlivých pracovišť. Konkrétní zvolené hodnoty těchto parametrů pro jednotlivé pracoviště jsou uvedeny v tabulce 7.6.

Tabulka 7.6 Geometrické parametry pracovišť

Pracoviště		č.1	č.2	č.3	č.4	č.5
Vzdálenost mezi dvěma elektrodami	$d$ [mm]	60	25	45	45	45
Pracovní vzdálenost	$a$ [mm]	300	300	300	300	300
Součinitel přenosu	$k_T$ [-]	1,7	1,5	1,5	1,5	1,5
Pracoviště		č.6	č.7	č.8	č.9	č.10
Vzdálenost mezi dvěma elektrodami	$d$ [mm]	45	45	45	30	30
Pracovní vzdálenost	$a$ [mm]	300	300	300	300	300
Součinitel přenosu	$k_T$ [-]	1,5	1,9	1,9	1,0	1,0

## 7.5 Popis pracovišť

V následujících částech jsou v krátkosti představeny jednotlivá pracoviště.

### 7.5.1 Pracoviště č.1

Toto pracoviště se nachází přímo na přípojnici rozváděče NN v trafostanici 1, který dále dodává energii do sítě. Příklad takového pracoviště lze vidět na obrázku 7.2. Na tomto pracovišti je očekávaná velká hodnota zkratového proudu, jelikož se toto pracoviště nachází velice blízko distribučnímu transformátoru.



Obrázek 7.2 Rozváděč NN v TS

### 7.5.2 Pracoviště č.2

Jedná se o pracoviště reprezentující elektroměrový rozváděč. Na tomto pracovišti je uvažován vznik oblouku za hlavním jističem přímo v tomto rozváděči. Pro co nejvíce komplexní výsledky možné elektrické energie je uvažováno několik hodnot jmenovitého proudu hlavního jističe, se kterými se mění také velikosti jmenovitého proudu pojistek nacházejících se v přípojkové skříni SP1. Jednotlivé použité hodnoty jističů a pojistek jsou uvedeny v tabulce 7.7. Ve sloupcích pod sebou jsou vypsány hodnoty pro danou dvojici. Na obrázku 7.3 je ukázka elektroměrového rozváděče

Tabulka 7.7 Použité hodnoty jističů a pojistek pro pracoviště č.2

Nožové pojistky NH, gG, velikost 1							
$I_n$ [A]	25	32	40	50	63	80	100
Modulární třípólový jistič s charakteristikou typu B							
$I_n$ [A]	20	25	32	40	50	63	80



Obrázek 7.3 Elektroměrový rozváděč

### 7.5.3 Pracoviště č.3

Pracoviště č.3 se nachází společně s pracovištěm č.4 ve skříni SR1. Na tomto pracovišti je uvažován vznik elektrického oblouku na přívodních kabelech z trafostanice 1. Jelikož se jedná o pracoviště napájené ze dvou stran, je zde předpokládáno větší riziko nebezpečí oproti pracovišti č.4 z důvodu toho, že zkratový proud zde bude téct z obou stran, což znamená že při přerušení zkratového proudu z jedné strany, bude stále protékat zkratový proud ze strany druhé. K úplnému odpojení dojde až při přerušení i z druhé strany. Příklad pracoviště lze vidět na obrázku 7.4.



Obrázek 7.4 Rozpojovací skříň SR

#### 7.5.4 Pracoviště č.4

Toto pracoviště se nachází na přívodním kabelu v rozpojovací skříni SR1. Na rozdíl od pracoviště č.3 je vznik oblouku uvažován na přívodním kabelu, který je však napájený pouze z jedné strany, a to právě z trafostanice 2. Příklad takového pracoviště lze vidět na obrázku 7.4.

#### 7.5.5 Pracoviště č.5

Pracoviště č.5 se nachází společně s pracovištěm č.6 v rozpojovací skříni SD1. Podobně jako u pracoviště č.3 se vznik oblouku uvažuje na přívodních kabelech napájených ze dvou stran z trafostanice 1. Ukázka takového pracoviště je vidět na obrázku 7.5.



Obrázek 7.5 Rozpojovací skříň SD

### 7.5.6 Pracoviště č.6

Jedná se o pracoviště podobné pracovišti č.4. Nachází se v rozpojovací skříni SD1 a vznik oblouku je uvažován na přívodním kabelu, který je napájený z trafostanice 2. Toto pracoviště lze vidět na obrázku 7.5.

### 7.5.7 Pracoviště č.7

Pracoviště č.7 se nachází na kabelové spojce zvané T-spojka, jedná se o kabelový soubor, který slouží k odbočení z kmenového vedení bez jeho přerušení. Toto pracoviště se nachází na místě, které je napájené ze dvou stran. Příklad takového pracoviště můžeme vidět na obrázku 7.6.



Obrázek 7.6 Pracoviště T-spojky

### 7.5.8 Pracoviště č.8

Podobně jako u pracoviště č.7 je toto pracoviště uvažováno na T-spojce. Rozdíl mezi pracovištěm č.7 a pracovištěm č.8 je však jeho umístění v síti. Pracoviště č.8 je napájeno pouze z jedné strany. Příklad takového pracoviště lze vidět na obrázku 7.6.

### 7.5.9 Pracoviště č.9

Jedná se o pracoviště nacházející se společně s pracovištěm č.10 v síti tvořené vzdušným vedením AES a AlFe. Vznik elektrického oblouku se uvažuje v pojistkové skříni SP100 na přívodním kabelu. Jedná se o skříň s velmi malým objemem, takže je zde předpokládán nejnižší možný součinitel přenosu ( $k_T$ ) právě z tohoto důvodu. Ukázku tohoto pracoviště lze vidět na obrázku 7.7.



Obrázek 7.7 Pojistková skříň SP100

#### 7.5.10 Pracoviště č.10

Toto pracoviště se stejně jako pracoviště č.9 nachází v pojistkové skříni SP100 na přírodním kabelu. Na rozdíl od pracoviště č.9, které se nachází relativně blízko u trafostanice se toto pracoviště nachází 762 m daleko. Kvůli této vzdálenosti je zde předpokládán nízký zkratový proud z důvodu vysoké impedance v obvodu. Nižší zkratový proud má za následek delší vypínací čas předřadného jisticího zařízení. Ukázka tohoto pracoviště lze vidět na obrázku 7.7.

## 8. VÝPOČET OBLOUKOVÉ ENERGIE A STANOVENÍ TŘÍDY TEPELNÉ OCHRANY OOPP

Výpočet obloukové energie probíhal dle [2]. Pro ukázkou výpočtu byla zvoleny pouze některá pracoviště. Vypočtené hodnoty pro všechna pracoviště jsou uvedeny v příloze C v elektronické podobě na přiloženém disku. Při ukázce postupu výpočtu bylo bráno připojení transformátorů s výkonem 400 kVA.

### 8.1 Pracoviště napájené ze dvou stran – xSpider

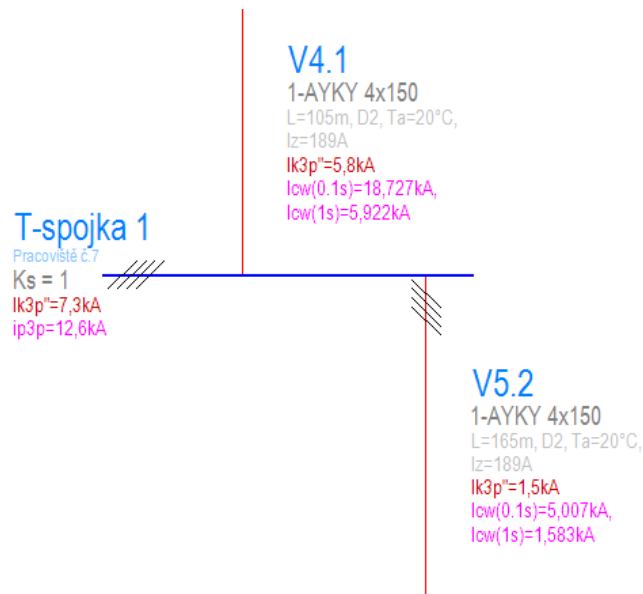
Pro ukázkou výpočtu pro pracoviště napájené ze dvou stran bylo vybráno pracoviště č.7. Následujícím postupem byli vypočítány pracoviště č.3 a pracoviště č.5. Výpočet probíhal za pomoci programu xSpider.

#### 8.1.1 Výpočet energie elektrického oblouku $W_{LB}$

Jak je uvedeno v kapitole 6.1, pro výpočet bylo potřeba znát několik parametrů. Mezi nimi je jmenovité síťové napětí ( $U_n$ ). Na obrázku 7.1 lze vidět, že pracoviště č.7 se nachází v síti č.1, která je napájena z TR1. TR1 má převod mezi primárním a sekundárním napětím 22/0,4 kV.

$$U_n = 400 \text{ V} \quad (8.1)$$

Dalším dílčím parametrem je velikost třífázového zkratového proudu ( $I_{k3}$ ) v místě poruchy. Jelikož se ale jedná o pracoviště napájené ze dvou stran, po odpojení jedné z napájecích stran dochází ke změně velikosti tohoto proudu. Bylo nutné zjistit jaký zkratový proud protékal při době, kdy bylo pracoviště napájené ze dvou stran a také jaký byl zkratový proud při době, kdy bylo toto pracoviště napájeno pouze z jedné strany. Pro získání těchto hodnot bylo nutné využít reálný model sítě v programu xSpider. Jak je vidět na obrázku 8.1, při napájení ze dvou stran dosahoval zkratový proud velikosti 7,3 kA. Doba působení tohoto proudu byla zjištěna tak, že byla určena nejkratší doba vybavení daných pojistek. Pro určení této hodnoty bylo potřeba znát zkratové příspěvky jednotlivých stran.



Obrázek 8.1 Pracoviště č.7 – výpočet  $I_{k3}$  při napájení ze dvou stran

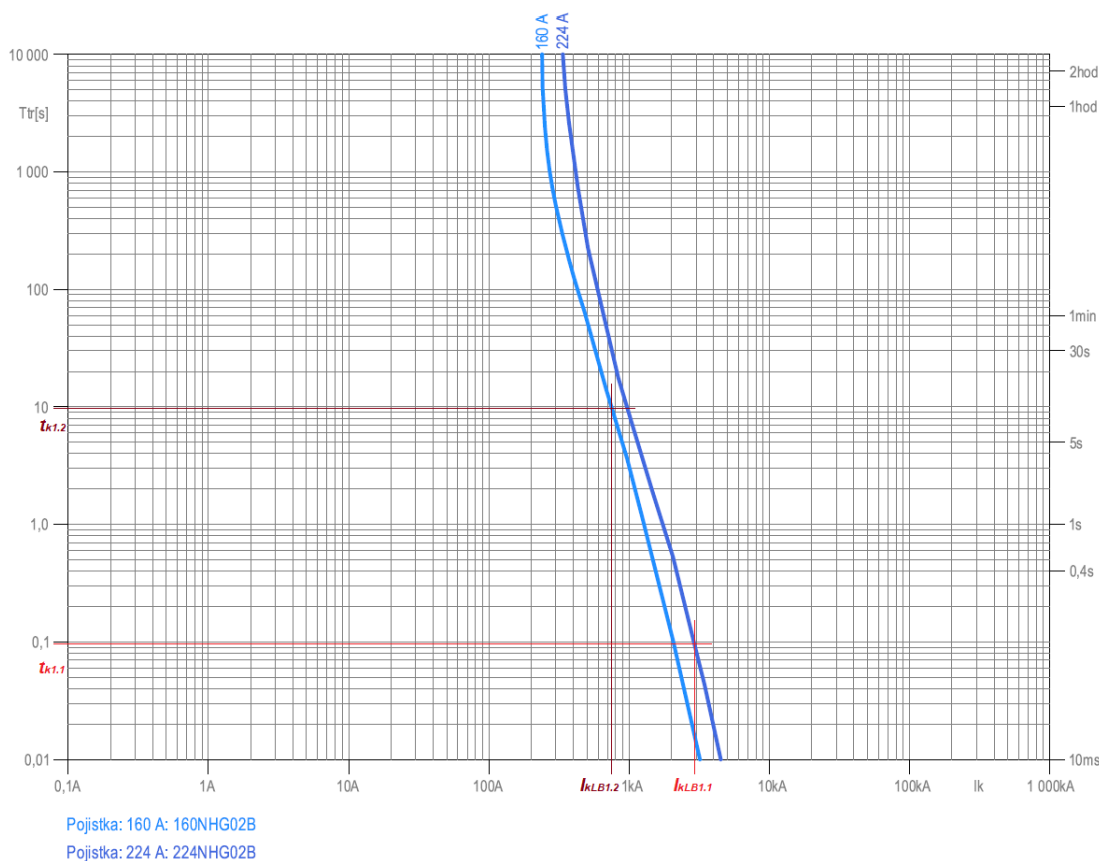
Ze strany č.1 je zkratový příspěvek ( $I_{k3}''_{1.1}$ ) 5,8 kA a ze strany č.2 ( $I_{k3}''_{1.2}$ ) 1,5 kA. Jelikož se však toto pracoviště nachází v síti NN, bylo nutné tyto hodnoty přepočítat na hodnoty skutečného zkratového proudu dle vztahu (6.3).

$$I_{kLB_{1.1}} = k_B \cdot I_{k3}''_{1.1} = 0,5 \cdot 5800 = \mathbf{2900 \text{ A}} \quad (8.2)$$

$$I_{kLB_{1.2}} = k_B \cdot I_{k3}''_{1.2} = 0,5 \cdot 1500 = \mathbf{750 \text{ A}} \quad (8.3)$$

Při znalosti skutečných zkratových proudů bylo možné určit vypínací dobu příslušných pojistek (obrázek 8.2). Ze strany č.1 je reagovala pojistka typu NH, gG, velikost 2,  $I_n = 224 \text{ A}$ . Ze strany č.2 reagovala pojistka stejného typ, avšak s  $I_n = 160 \text{ A}$ .



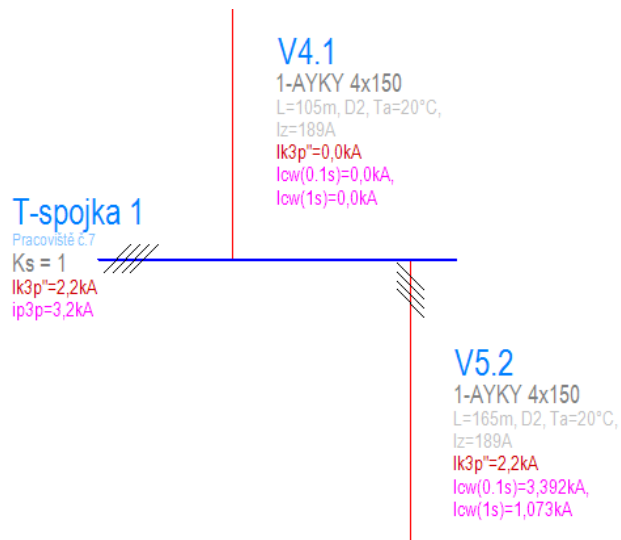


Obrázek 8.2 Vypínací charakteristika pojistky NH, gG, velikost 2,  $I_n = 224$  A a  $I_n = 160$  A

$$t_{k1.1} = 0,098 \text{ s} \quad (8.4)$$

$$t_{k1.2} = 9,8 \text{ s} \quad (8.5)$$

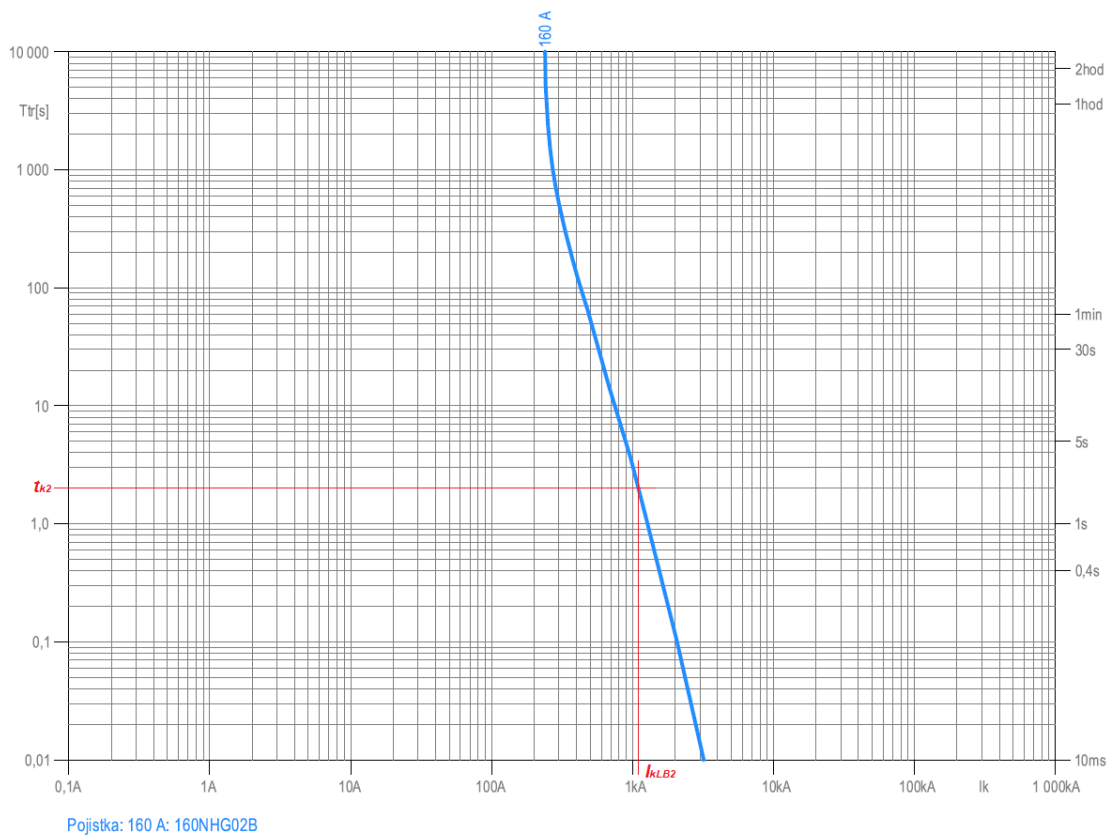
V tomto případě byla rychleji působící pojistka o jmenovitém proudu 224 A. K odpojení ze strany č.1 došlo za 0,098 s. Třífázový zkratový proud o velikosti 7,3 kA tedy tek l v místě poruchy po dobu 0,098 s, tato doba byla označena jako  $t_{k1}$  a tento proud jako  $I_{k3}''_1$ . Pro zjištění velikosti zkratového proudu od tohoto okamžiku až po dobu odpojení bylo nutné znovu využít programu xSpider. Dle obrázku 8.3 byla hodnota třífázové zkratového proudu při napájení z jedné strany ( $I_{k3}''_2$ ) 2,2 kA.



Obrázek 8.3 Pracoviště č.7 – výpočet  $I_{k3}$  při napájení z jedné strany

Pro zjištění doby působení tohoto proudu bylo potřeba hodnotu zkratového proudu opět přepočítat dle vztahu (6.3) a určit dobu odpojení dle vypínací charakteristiky (obrázek 8.4).

$$I_{kLB2} = k_B \cdot I_{k3} = 0,5 \cdot 2200 = 1100 \text{ A} \quad (8.6)$$



Obrázek 8.4 Vypínací charakteristika pojistky NH, gG, velikost 2,  $I_n = 160 \text{ A}$

Doba úplného odpojení od zdroje dle obrázku 8.4 byla 2 s. Jelikož doba odpojení od zdroje přesáhla nejdelší uvažovanou dobu působení elektrického oblouku (1 sekunda), byla doba úplného odpojení od zdroje a také doba působení třífázového zkratového proudu  $I_{k3}''_2$  uvažována jako doba mezi odpojením od zdroje z jedné strany ( $t_{k1}$ ) a časem 1 sekunda. Tato doba byla označena jako  $t_{k2}$ .

$$t_{k2} = 1 - t_{k1} = 1 - 0,098 = \mathbf{0,902\ s} \quad (8.7)$$

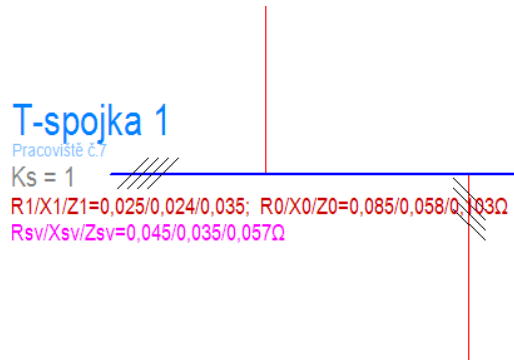
Při znalosti napájecího napětí a velikostí zkratových proudů bylo možné dopočítat zkratový výkon ( $S_k$ ) v jednotlivých dobách.

$$S_{k\ t_{k1}}'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{k3}''_1 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 7300 = \mathbf{5\ 057\ 588\ VA} \quad (8.8)$$

$$S_{k\ t_{k2}}'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{k3}''_2 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 2200 = \mathbf{1\ 524\ 205\ VA} \quad (8.9)$$

Pro výpočet  $W_{LB}$  bylo potřeba spočítat také velikost normalizovaného výkonu ( $k_P$ ). Ke stanovení tohoto výkonu bylo nejdříve potřeba určit poměr činného odporu ku induktivní reaktanci v místě poruchy. Tuto hodnotu lze získat opět použitím programu xSpider. Jelikož je uvažován třífázový zkratový proud, pro stanovení poměru R/X je potřeba znát pouze jejich sousledné složky. Tyto hodnoty po dobu  $t_{k1}$  jsou uvedeny na obrázku 8.5 a jsou označeny indexem 1. Velikost R/X byla dopočtena následujícím způsobem:

$$\frac{R}{X_{tk1}} = \frac{R_1}{X_1} = \frac{0,025}{0,024} = \mathbf{1,042} \quad (8.10)$$



Obrázek 8.5 Pracoviště č.7 – stanovení R/X při působení  $I_{k3}''_1$

Stejným postupem byl zjištěn poměr R/X po dobu  $t_{k2}$ :

$$\frac{R}{X_{tk1}} = \frac{R_1}{X_1} = \frac{0,102}{0,054} = \mathbf{1,889} \quad (8.11)$$

## T-spojka 1

Pracoviště č.7

$K_s = 1$

$R1/X1/Z1=0,102/0,054/0,115$ ;  $R0/X0/Z0=0,386/0,221/0,445\Omega$

$Rsv/Xsv/Zsv=0,197/0,109/0,225\Omega$

Obrázek 8.6 Pracoviště č.7 – stanovení R/X při působení  $I_{k3}''_2$

Následným dosazením do rovnice (6.2) bylo možné získat maximální hodnotu normalizovaného výkonu ( $k_{Pmax}$ ), která je hodnotou pro nejhorší možný případ.

$$k_{Pmax_{tk1}} = \frac{0,29}{(R/X_{tk1})^{0,17}} = \frac{0,29}{(1,042)^{0,17}} = \mathbf{0,288} \quad (8.12)$$

$$k_{Pmax_{tk2}} = \frac{0,29}{(R/X_{tk2})^{0,17}} = \frac{0,29}{(1,889)^{0,17}} = \mathbf{0,260} \quad (8.13)$$

Při znalosti všech výše uvedených parametrů bylo možné dopočítat celkovou energii elektrického oblouku ( $W_{LB}$ ) dosazením do rovnice (6.4). Nejdříve byly vypočteny dílčí energie a následným sečtením těchto energií byla zjištěna celková energie elektrického oblouku na pracovišti.

$$\begin{aligned} W_{LB_{tk1}} &= k_{Pmax_{tk1}} \cdot S_k''_{tk2} \cdot t_k = \\ &= \frac{0,29}{(1,042)^{0,17}} \cdot 5\,057\,588 \cdot 0,098 = \mathbf{142\,735\,J} \end{aligned} \quad (8.14)$$

$$\begin{aligned} W_{LB_{tk2}} &= k_{Pmax_{tk2}} \cdot S_k''_{tk2} \cdot t_k = \\ &= \frac{0,29}{(1,889)^{0,17}} \cdot 1\,524\,205 \cdot 0,902 = \mathbf{357\,840\,J} \end{aligned} \quad (8.15)$$

$$W_{LB} = W_{LB_{tk1}} + W_{LB_{tk2}} = \mathbf{500\,575\,J} \quad (8.16)$$

Výsledná hodnota energie elektrického oblouku na pracovišti č.7 byla 500 575 J.

### 8.1.2 Výpočet ekvivalentní energie oblouku $W_{LBA}$

K výpočtu této energie bylo potřeba znát pracovní vzdálenost ( $a$ ), součinitel přenosu ( $k_T$ ) a energii testovacího elektrického oblouku pro danou třídu tepelné ochrany ( $W_{LBP}$ ). Pracovní vzdálenost ( $a$ ) se v sítích NN uvádí 300 mm. Součinitel přenosu byl zvolen na základě informací uvedených v kapitole 6.2, jeho velikosti pro všechna pracoviště jsou uvedeny v tabulce 7.6. Hodnoty energie testovacího oblouku pro obě třídy tepelné ochrany jsou uvedeny v tabulce 5.3. Výpočet ekvivalentní energie elektrického oblouku

pro obě třídy tepelných ochran je následující. Dosazením do rovnice (6.6) získáme hodnotu ekvivalentní energie pro třídu 1 a pro třídu 2.

$$W_{LBA1} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP1} = 1,9 \cdot \left(\frac{300}{300}\right)^2 \cdot 168000 =$$

$$= \mathbf{319\ 200\ J} \quad (8.17)$$

$$W_{LBA2} = k_T \cdot \left(\frac{a}{300 \text{ mm}}\right)^2 \cdot W_{LBP2} = 1,9 \cdot \left(\frac{300}{300}\right)^2 \cdot 320000 =$$

$$= \mathbf{608\ 000\ J} \quad (8.18)$$

### 8.1.3 Stanovení vhodné třídy tepelné ochrany

Stanovení vhodné třídy tepelné ochrany vychází ze vztahu (6.1). Pokud bude tato podmínka platit alespoň pro jednu ze dvou tříd tepelné ochrany, pak lze danou třídu tepelné ochrany považovat za dostatečnou. Porovnáním energie elektrického oblouku ( $W_{LB}$ ) a ekvivalentní energie elektrického oblouku pro obě třídy tepelné ochrany ( $W_{LBA1}$  a  $W_{LBA2}$ ) získáme informaci o vhodné třídě tepelné ochrany.

$$W_{LB} > W_{LBA1} \quad (8.19)$$

$$W_{LB} < W_{LBA2} \quad (8.20)$$

Na základě výše uvedených nerovnic bylo zjištěno, že podmínka (6.1) byla splněna pouze pro  $W_{LBA2}$ , která je ochrannou úrovní třídy tepelné ochrany 2. V tomto případě bude dostatečná pouze třída 2. Pro třídu 1 tato podmínka splněna nebyla, tudíž při této konfiguraci tato třída není dostatečně bezpečná.

## 8.2 Pracoviště napájené z jedné strany – xSpider

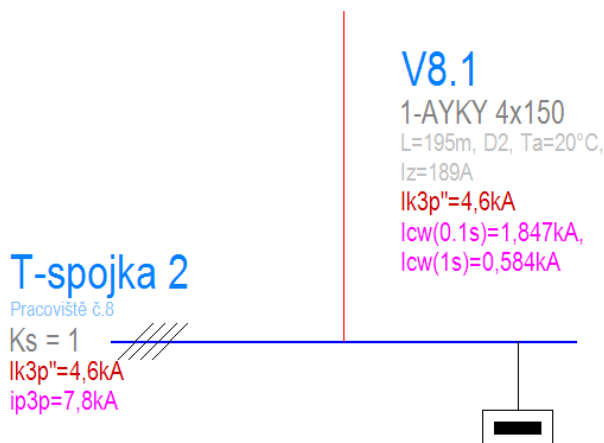
Jako ukázka stanovení vhodné třídy tepelné ochrany na pracovišti napájeném z jedné strany bylo vybráno pracoviště č.8. Dle následujícího postupu byly provedeny výpočty pracoviště č.1, 2, 4 a 6. Výpočet probíhal za pomoci programu xSpider.

### 8.2.1 Výpočet energie elektrického oblouku $W_{LB}$

Stejně jako u pracoviště napájeného ze dvou stran bylo potřeba určit napěťovou hladinu. Toto pracoviště se nachází v síti č.1, která je napájena z TR1. Jedná se tedy o stejnou napěťovou hladinu a to:

$$U_n = \mathbf{400\ V} \quad (8.21)$$

Následně byl v programu xSpider proveden výpočet na třífázový zkratový proud ( $I_{k3}$ ). Výsledná hodnota třífázového zkratového proudu ( $I_{k3}$ ) na pracovišti č.8 byla 4,6 kA (viz obrázek 8.7).



Obrázek 8.7 Pracoviště č.8 – výpočet  $I_{k3}''$

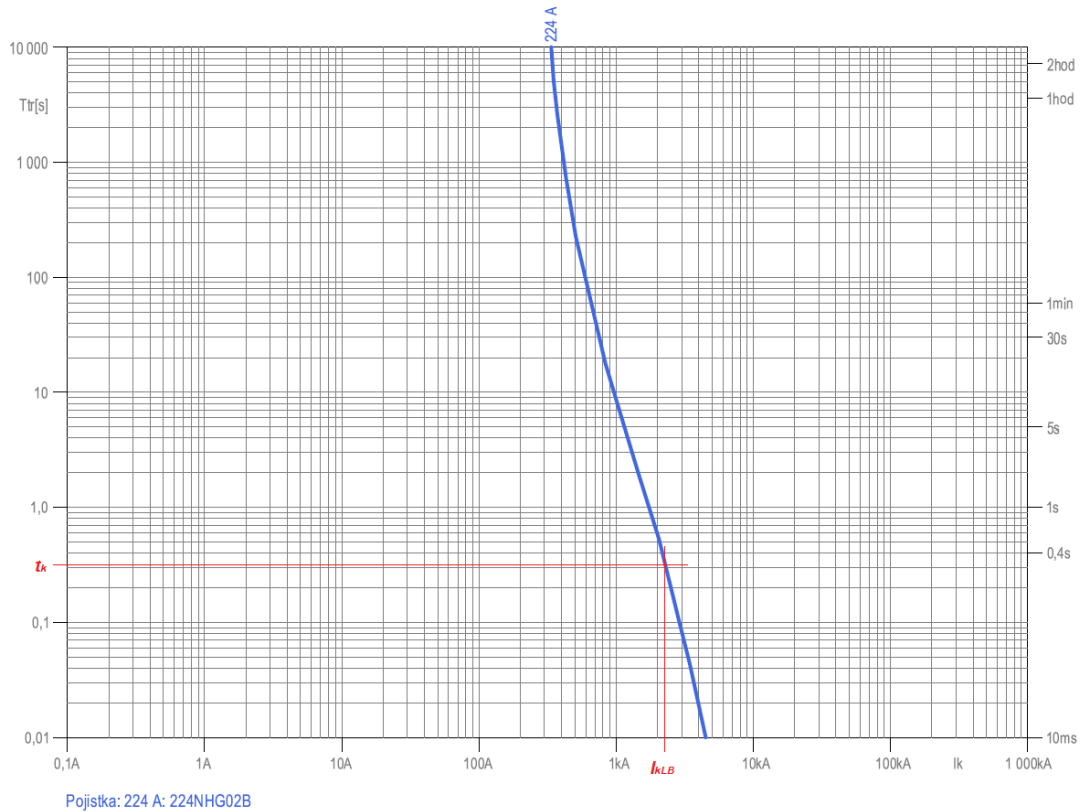
Při znalosti napěťové hladiny a třífázového zkratového proudu lze dopočítat velikost zkratového výkonu ( $S_k$ ).

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 4600 = \mathbf{3\ 186\ 973\ VA} \quad (8.22)$$

Dále bylo potřeba určit dobu odpojení od zdroje ( $t_k$ ), pro získání této hodnoty bylo nutno přepočítat třífázový zkratový proud na skutečný zkratový proud. Přepočtem podle vztahu (6.3) byl získán skutečný zkratový proud.

$$I_{kLB} = k_B \cdot I_{k3}'' = 0,5 \cdot 4600 = \mathbf{2300\ A} \quad (8.23)$$

Následně pomocí vypínací charakteristiky pojistky NH, gG, velikost 2,  $I_n = 200\ A$  zobrazené na obrázku 8.8 byla zjištěna požadovaná doba vybavení pojistky.



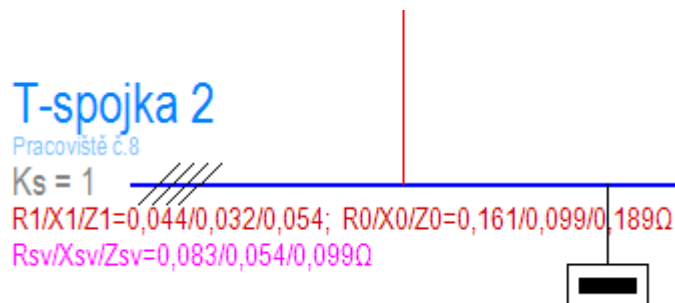
Obrázek 8.8 Vypínací charakteristika pojistky NH, gG, velikost 2,  $I_n = 224$  A

Doba vybavení pojistky dle obrázku byla 0,304 s.

$$t_k = 0,304 \text{ s} \quad (8.24)$$

Pomocí programu xSpider byly určeny velikosti R a X v místě pracoviště, jejichž sousledné složky jsou uvedeny na obrázku 8.9. Dopočtem byla získána následující hodnota:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_1}{X_1} = \frac{0,044}{0,032} = 1,375 \quad (8.25)$$



Obrázek 8.9 Pracoviště č.8 – stanovení R/X

Následným dosazením do rovnice (6.2) bylo možné získat maximální hodnotu normalizovaného výkonu ( $k_{Pmax}$ ), která je hodnotou pro nejhorsí možný případ.:

$$k_{Pmax} = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}} = \frac{0,29}{(1,375)^{0,17}} = \mathbf{0,275} \quad (8.26)$$

Tyto vypočítané parametry byly dosazeny do rovnice (6.4), díky které byla vypočtena výsledná energie elektrického oblouku na pracovišti č.8.

$$\begin{aligned} W_{LB} &= k_{Pmax} \cdot S_k \cdot t_k = \\ &= \frac{0,29}{(1,375)^{0,17}} \cdot 3\,186\,973 \cdot 0,304 = \mathbf{266\,157\,J} \end{aligned} \quad (8.27)$$

Výsledná energie elektrického oblouku v místě pracoviště č.8 byla 266 157 J.

### 8.2.2 Výpočet ekvivalentní energie oblouku $W_{LBA}$

Výpočet této energie se pro pracoviště napájené z jedné strany od pracovišť napájených ze dvou stran nijak neliší. Ekvivalentní energie oblouku byla spočítána dle postupu uvedeného v kapitole 8.1.2. Aplikováním těchto postupů bylo dosaženo následujících hodnot:

$$W_{LBA1} = \mathbf{319\,200\,J} \quad (8.28)$$

$$W_{LBA2} = \mathbf{608\,000\,J} \quad (8.29)$$

### 8.2.3 Stanovení vhodné třídy tepelné ochrany

Pro stanovení vhodné třídy tepelné ochrany se postupovalo stejně jako v kapitole 8.1.3.

Při porovnání vypočtených energií byly získány následující nerovnice:

$$W_{LB} < W_{LBA1} \quad (8.30)$$

$$W_{LB} < W_{LBA2} \quad (8.31)$$

Z výše uvedených nerovnic lze konstatovat, že při vzniku elektrického oblouku a s tím spojeným uvolnění tepelné energie, bude při této konfiguraci dostatečnou ochranou už třída 1.

## 8.3 Pracoviště napájené z jedné strany – Sichr

Dle následujícího postupu byly vypočítány pracoviště č.9 a č.10 za pomoci programu Sichr. Pro ukázkou bylo vybráno pracoviště č.9.

### 8.3.1 Výpočet energie elektrického oblouku $W_{LB}$

Toto pracoviště se nachází v síti č.3. Tato síť je napájena z TR3, který má na výstupních svorkách napětí 420 V.



$$U_n = 420 \text{ V} \quad (8.32)$$

Následně bylo potřeba zjistit velikost třífázového zkratového proudu ( $I_{k3}''$ ), to se provedlo pomocí programu Sichr. V tomto případě byl zkratový proud v místě 11 000 A

$$I_{k3}'' = 11\,000 \text{ A} \quad (8.33)$$

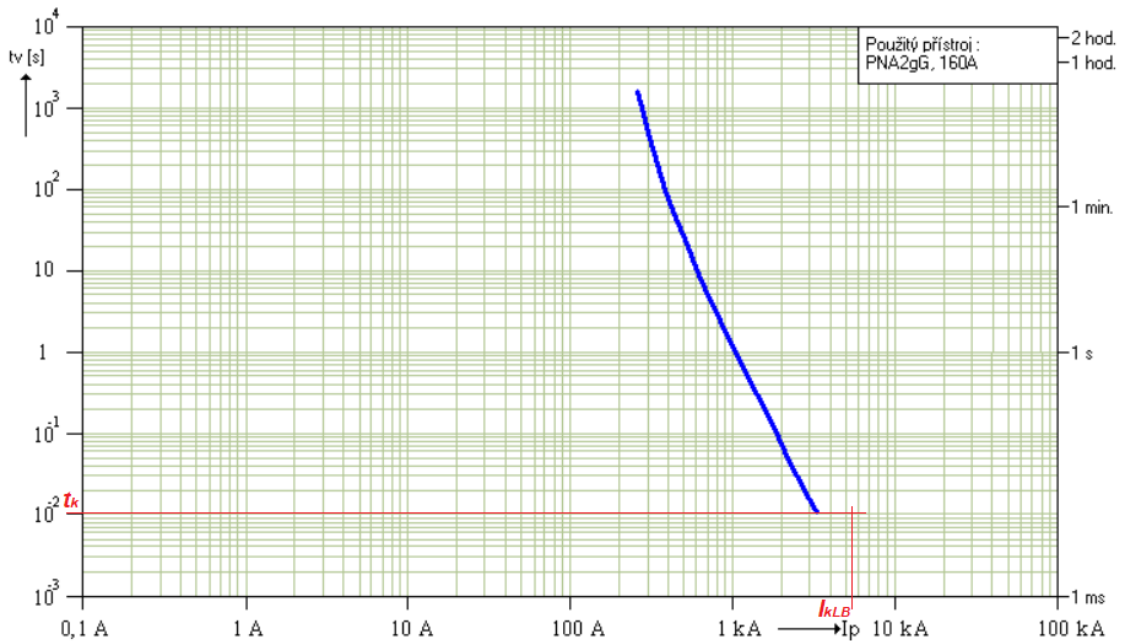
Výsledná hodnota třífázového zkratového proudu byla tedy 11 000 A. Při znalosti napěťové hladiny a třífázového zkratového proudu lze dopočítat velikost zkratového výkonu ( $S_k$ ).

$$S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_{k3}'' = \sqrt{3} \cdot 420 \cdot 11000 = 8\,002\,075 \text{ VA} \quad (8.34)$$

Pro určení doby odpojení od zdroje této hodnoty bylo nutné přepočítat třífázový zkratový proud na skutečný zkratový proud. Přepočtem podle vztahu (6.3) byl získán skutečný zkratový proud.

$$I_{kLB} = k_B \cdot I_{k3}'' = 0,5 \cdot 11000 = 5500 \text{ A} \quad (8.35)$$

Pomocí vypínací charakteristiky příslušné pojistky zobrazené na obrázku 8.10 byla zjištěna doba odpojení. Doba odpojení odpovídala době tavení dané pojistky, která bude maximálně do 10 ms.



Obrázek 8.10 Vypínací charakteristika pojistky NH, gG, velikost 2,  $I_n = 160 \text{ A}$

$$t_k = 0,010 \text{ s} \quad (8.36)$$

Následně bylo potřeba určit poměr R a X v místě pracoviště. Pro určení tohoto poměru je potřeba znát R a X u jednotlivých částí obvodu, a to u transformátoru a u vedení.

Pro stanovení jednotlivých složek je potřeba znát impedanci transformátoru při zkratu ( $Z_T$ ). Tuto impedanci lze dopočítat z napětí nakrátko ( $u_k$ ), sekundárního napětí ( $U_2$ ) a zdánlivého výkonu ( $S$ ).

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_2^2}{S} = \frac{4}{100} \cdot \frac{420^2}{400 \cdot 10^3} = \mathbf{17,640 \text{ m}\Omega} \quad (8.37)$$

Výpočet činného odporu transformátoru ( $R_T$ ) lze dopočítat pomocí ztrát nakrátko ( $P_k$ ) a jmenovitého proudu ( $I_n$ ).

$$R_T = \frac{P_k}{3 \cdot I_n^2} = \frac{3850}{3 \cdot 550^2} = \mathbf{4,242 \text{ m}\Omega} \quad (8.38)$$

Velikost induktivní reaktance transformátoru ( $X_T$ ) lze pak spočítat následovně:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{(17,64)^2 - (4,242)^2} = \mathbf{17,122 \text{ m}\Omega} \quad (8.39)$$

U vedení, lze při známosti složek R a X na kilometr vedení určit jejich reálné hodnoty. Vedení je zde tvořeno kabelem 1-YY 4x(1x120 mm<sup>2</sup>) o délce 3 m a kabelem AES 4x120 mm<sup>2</sup> o délce 24 m. U kabelu 1-YY se dopočítali složky R a X.

$$R_{V1km} = 0,078 \text{ }\Omega/\text{km}; X_{V1km} = 0,0788 \text{ }\Omega/\text{km}; l_1 = 3 \text{ m}$$

$$R_{V1} = R_{V1km} \cdot l_1 = 0,078 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = \mathbf{0,234 \text{ m}\Omega} \quad (8.40)$$

$$X_{V1} = X_{V1km} \cdot l_1 = 0,0788 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = \mathbf{0,236 \text{ m}\Omega} \quad (8.41)$$

Stejným způsobem bylo dopočítáno R a X i u vedení AES.

$$R_{V2km} = 0,258 \text{ }\Omega/\text{km}; X_{V2km} = 0,081 \text{ }\Omega/\text{km}; l_2 = 24 \text{ m}$$

$$R_{V2} = R_{V2km} \cdot l_2 = 0,258 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = \mathbf{6,192 \text{ m}\Omega} \quad (8.42)$$

$$X_{V2} = X_{V2km} \cdot l_2 = 0,081 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = \mathbf{1,944 \text{ m}\Omega} \quad (8.43)$$

Následně byl dopočítán poměr R a X v místě pracoviště.

$$\frac{R}{X} = \frac{R_T + R_{V1} + R_{V2}}{X_T + X_{V1} + X_{V2}} = \frac{4,242 + 0,234 + 6,192}{17,122 + 0,236 + 1,944} = \mathbf{0,553} \quad (8.44)$$

Při znalosti R/X lze dle vztahu (6.2) dopočítat maximální hodnotu normalizovaného výkonu ( $k_{Pmax}$ ).

$$k_{Pmax} = \frac{0,29}{(R/X)^{0,17}} = \frac{0,29}{(0,553)^{0,17}} = \mathbf{0,321} \quad (8.45)$$

Tyto vypočítané parametry byly dosazeny do rovnice (6.4), díky které byla vypočtena výsledná energie elektrického oblouku na pracovišti.

$$\begin{aligned}
 W_{LB} &= k_{Pmax} \cdot S_k'' \cdot t_k = \\
 &= \frac{0,29}{(0,553)^{0,17}} \cdot 8\,002\,075 \cdot 0,010 = \mathbf{25\,665\,J}
 \end{aligned}
 \tag{8.46}$$

Výsledná energie elektrického oblouku v místě pracoviště č.9 byla 25 665 J.

### 8.3.2 Výpočet ekvivalentní energie oblouku $W_{LBA}$

Ekvivalentní energie oblouku byla spočítána dle postupu uvedeného v kapitole 8.1.2.

$$W_{LBA1} = \mathbf{168\,000\,J} \tag{8.47}$$

$$W_{LBA2} = \mathbf{320\,000\,J} \tag{8.48}$$

### 8.3.3 Stanovení vhodné třídy tepelné ochrany

Pro stanovení vhodné třídy se postupovalo stejně jako v kapitole 8.1.3.

Při porovnání vypočtených energií byly získány následující nerovnice:

$$W_{LB} < W_{LBA1} \tag{8.49}$$

$$W_{LB} < W_{LBA2} \tag{8.50}$$

Z výše uvedených nerovnic platí, že při této konfiguraci je bezpečnost zaručena už při použití OOPP s třídou tepelné ochrany 1.

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala výběrem vhodné třídy tepelné ochrany osobních ochranných pracovních prostředků pro práci pod napětím v síti nízkého napětí, které mají ochránit pracovníka proti vysoké tepelné energii vyvolané elektrickým obloukem. Ke stanovení této třídy bylo potřeba vypočítat energii elektrického oblouku  $W_{LB}$  a ekvivalentní energii oblouku (ochrannou úroveň)  $W_{LBA}$ . Pro výpočet této energie a následné stanovení vhodné třídy tepelné ochrany bylo vybráno celkem deset reálných pracovišť (míst) distribuční sítě nízkého napětí, u kterých běžně probíhá práce pod napětím. Cílem této práce bylo zjistit, zdali je možné tento druh práce na konkrétních pracovištích provozovat a jaká třída tepelné ochrany je na tomto pracovišti dostatečná. K výpočtu bylo použito několik napájecích transformátorů s různými výkony k ověření více možností provozování daného pracoviště. Pro výpočet byl uvažován třífázový zkrat z důvodu dosažení nejhorších možných podmínek na pracovišti. K určení velikosti třífázového zkratového proudu v daném místě distribuční sítě byly použity modely reprezentující reálné zapojení sítě modelované v programu xSpider a Sichr.

Výpočet energie elektrického oblouku a následné stanovení třídy tepelné ochrany probíhalo dle postupů uvedených v [2]. Z dosažených výsledků lze určit, že práce pod napětím provozovaná na pracovišti v blízkosti napájecího transformátoru (pracoviště č.1), které je chráněno pouze kompaktním jističem je velice nebezpečná. Vlivem průchodu vysokých zkratových proudů (vyšší jednotky kA) po dlouhou dobu ( $\geq 1$  s) se na těchto pracovištích uvolní velká tepelná energie, proti které není dostatečnou tepelnou ochrannou ani třída 2. Naopak ideálními pracovišti jsou pracoviště, které jsou chráněny již vhodnou předřadnou pojistkou a jsou napájeny pouze z jedné strany (pracoviště č.2, č.4, č.6, č.8, č.9 a č.10). Díky této pojistce dochází k rychlému vybavení i při průchodu vysokých zkratových proudů. Na těchto pracovištích byla až na výjimky zaručena dostatečná ochrana už při použití třídy 1. Výjimku tvoří pracoviště č.4 a č.8, kde při použití transformátoru o výkonu 250 kVA došlo oproti použití transformátorů o výkonech 400 a 630 kVA k překročení ochranné úrovně třídy 1, v tomto případě je zaručena bezpečnost až při použití třídy 2. Použitím transformátorů s nižšími výkony dochází sice ke zmenšení zkratových proudů, ale také naopak k prodlužování doby odpojení od zdroje. Konkrétně u pracoviště č.4 došlo k odpojení od zdroje za 462 ms. Naopak při průchodu vyššího zkratového proudu (při použití TR a výkonu 630 kVA) došlo k odpojení už za 194 ms. Skoro dvojnásobná vypínací doba má za následek skoro dvojnásobnou velikost tepelné energie. U pracovišť napájených ze dvou stran (pracoviště č.3, č.5 a č.7) je to poněkud složitější. U těchto pracovišť k úplnému odpojení nedošlo ani za dobu jedné sekundy. Dlouhé působení elektrického oblouku mělo za následek vysokou tepelnou energii. Na těchto pracovištích nebyla buď zaručena dostatečná ochrana žádnou tepelnou třídou anebo použitím pouze třídy 2. V takovýchto případech by bylo pravděpodobně bezpečnější napájet dané místo, pokud to síť umožňuje, pouze z jedné strany.

## LITERATURA

- [1] ČSN EN 50110-1. *Obsluha a práce na elektrických zařízeních - Část 1: Obecné požadavky*. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [2] BGI/GUV-I 5188 E. *Thermal hazards from electric fault arc*. 1. Berlin: German Social Accident Insurance e.V (DGUV), 2012.
- [3] PNE 33 0000-6. *Obsluha a práce na elektrických zařízeních pro výrobu, přenos a distribuci elektrické energie*. 2. 2007.
- [4] ČSN EN 60903. *Práce pod napětím - Rukavice z izolačního materiálu*. 2. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004.
- [5] ČSN EN 61229. *Pevné ochranné kryty pro práce pod napětím v zařízeních střídavého proudu*. 1. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1997.
- [6] ČSN EN 61112. *Práce pod napětím - Elektricky izolační přikrývky*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [7] ČSN EN 61482-1-2. *Práce pod napětím - Oblečení chránící před tepelným účinkem elektrického oblouku - Část 1-2: Zkušební metody - Metoda 2: Stanovení třídy ochrany materiálu a oblečení použitím soustředěného a řízeného oblouku (zkouška v boxu)*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [8] ČSN EN 61477. *Práce pod napětím - Minimální požadavky pro využití nářadí, předmětů a zařízení*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [9] ČSN EN 60743. *Práce pod napětím - Terminologie pro nástroje, zařízení a vybavení*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [10] ČSN EN IEC 60900. *Práce pod napětím - Ruční nářadí používané do AC 1 000 V a DC 1 500 V*. 4. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [11] ČSN EN 50365. *Elektricky izolující přilby pro použití v instalacích nízkého napětí*. 1. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2002.

- [12] *Auboueix: EU DECLARATION OF CONFORMITY* [online].  
France: auboueix, 2019 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z:  
[http://auboueixservices.free.fr/declarations/Auboueix\\_ENG\\_EU\\_Declaration\\_of\\_Conformity\\_Idra2\\_helmet.pdf](http://auboueixservices.free.fr/declarations/Auboueix_ENG_EU_Declaration_of_Conformity_Idra2_helmet.pdf)
- [13] ČSN EN 61482-2. *Práce pod napětím - Ochranné oblečení proti tepelným účinkům elektrického oblouku - Část 2: Požadavky*. 1.  
Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky:

AC	Střídavý proud
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
NN	Nízké napětí
OOPP	Osobní ochranné pracovní prostředky
PPN	Práce pod napětím
TR	Transformátor
TS	Trafostanice
VN	Vysoké napětí
VUT	Vysoké učení technické v Brně
VVN	Velmi vysoké napětí

### Symboly:

$a$	Pracovní vzdálenost	(m)
$d$	Vzdálenost mezi dvěma elektrodami	(m)
$D_L$	Vzdálenost vnější hranice ochranného prostoru	(m)
$D_V$	Vzdálenost vnější hranice zóny přiblížení	(m)
$f$	Kmitočet	(Hz)
$I_i$	Nastavení zkratové spouště	(A)
$I_{kLB}$	Skutečný zkratový proud	(A)
$I_{kLB1.1}$	Skutečný zkratový proud tekoucí stranou č.1	(A)
$I_{kLB1.2}$	Skutečný zkratový proud tekoucí stranou č.2	(A)
$I_{kLB2}$	Skutečný zkratový proud tekoucí po dobu $t_{k2}$	(A)
$I_{k3}''$	Třífázový zkratový proud	(A)
$I_{k3}''_{1.1}$	Třífázový zkratový proud tekoucí stranou č.1	(A)
$I_{k3}''_{1.2}$	Třífázový zkratový proud tekoucí stranou č.2	(A)
$I_{k3}''_1$	Třífázový zkratový proud tekoucí po dobu $t_{k1}$	(A)
$I_{k3}''_2$	Třífázový zkratový proud tekoucí po dobu $t_{k2}$	(A)
$I_n$	Jmenovitý proud	(A)
$I_r$	Nastavení spouště na přetížení	(A)
$k_B$	Mezní proudový faktor	(-)
$k_P$	Normalizovaný výkon oblouku	(-)
$k_{Pmax}$	Maximální normalizovaný výkon oblouku	(-)
$k_{Pmaxk1}$	$k_{Pmax}$ při působení $I_{k3}''_1$	(-)
$k_{Pmaxk2}$	$k_{Pmax}$ při působení $I_{k3}''_2$	(-)
$k_T$	Součinitel přenosu	(-)
$l$	Délka	(m)
$P_0$	Ztráty naprázdno transformátoru	(W)

$P_k$	Ztráty nakrátko transformátoru	(W)
$R$	Činný odpor	( $\Omega$ )
$R_I$	Činný odpor, sousledná složka	( $\Omega$ )
$R_T$	Činný odpor transformátoru	( $\Omega$ )
$R_V$	Činný odpor vedení/kabelu	( $\Omega$ )
$S$	Zdánlivý výkon	(VA)
$S_k^{''}$	Třífázový zkratový výkon	(VA)
$S_k^{'' t_{k1}}$	Třífázový zkratový výkon po dobu $t_{k1}$	(VA)
$S_k^{'' t_{k2}}$	Třífázový zkratový výkon po dobu $t_{k2}$	(VA)
$t_k$	Doba vypnutí ochranného zařízení	(s)
$t_{k1}$	Doba odpojení jedné napájecí strany od zdroje	(s)
$t_{k2}$	Doba úplného odpojení od zdroje	(s)
$U_I$	Primární napětí transformátoru	(V)
$U_2$	Sekundární napětí transformátoru	(V)
$u_k$	Napětí nakrátko transformátoru	(%)
$U_n$	Jmenovité síťové napětí	(V)
$W_{LB}$	Energie elektrického oblouku	(J)
$W_{LBt_{k1}}$	Energie elektrického oblouku při působení $I_{k3}^{'' 1}$	(J)
$W_{LBt_{k2}}$	Energie elektrického oblouku při působení $I_{k3}^{'' 2}$	(J)
$W_{LBA}$	Ekvivalentní energie oblouku	(J)
$W_{LBA1}$	Ekvivalentní energie oblouku pro třídu 1	(J)
$W_{LBA2}$	Ekvivalentní energie oblouku pro třídu 2	(J)
$W_{LBP}$	Energie testovacího elektrického oblouku	(J)
$W_{LBP1}$	Energie testovacího elektrického oblouku třídy 1	(J)
$W_{LBP2}$	Energie testovacího elektrického oblouku třídy 2	(J)
$X$	Induktivní reaktance	( $\Omega$ )
$X_I$	Induktivní reaktance, sousledná složka	( $\Omega$ )
$X_T$	Induktivní reaktance transformátoru	( $\Omega$ )
$X_V$	Induktivní reaktance vedení/kabelu	( $\Omega$ )



# SEZNAM PŘÍLOH

<b>PŘÍLOHA A - REÁLNÉ ZAPOJENÍ JEDNOTLIVÝCH SÍTÍ PŘI POUŽITÍ TRANSFORMÁTORŮ O VÝKONECH 250 KVA .....</b>	<b>58</b>
--	-----------

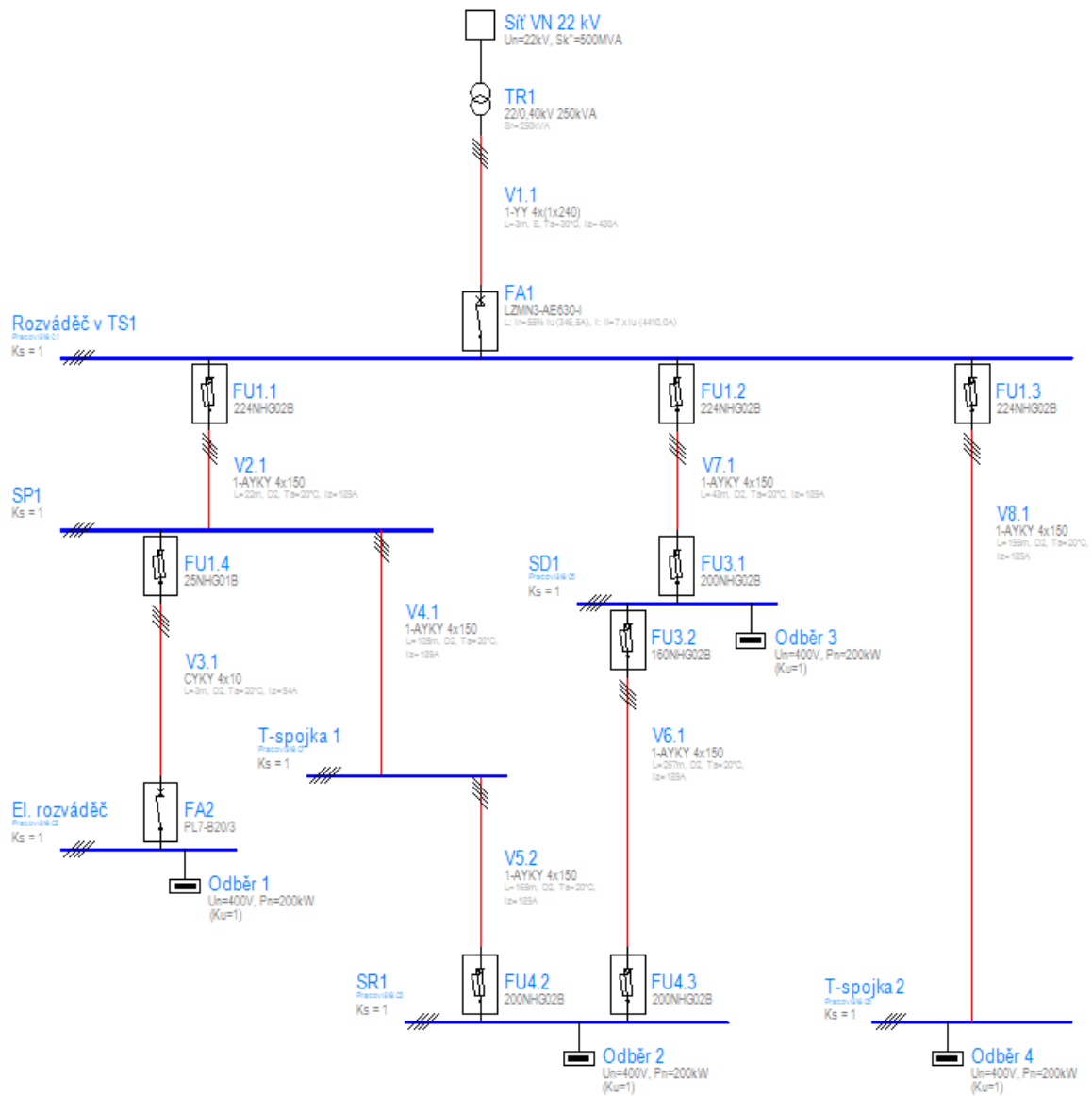
Níže uvedené přílohy jsou uloženy v elektronické podobě na přiloženém disku

<b>PŘÍLOHA B - MODELY JEDNOTLIVÝCH SÍTÍ.....</b>	<b>61</b>
--	-----------

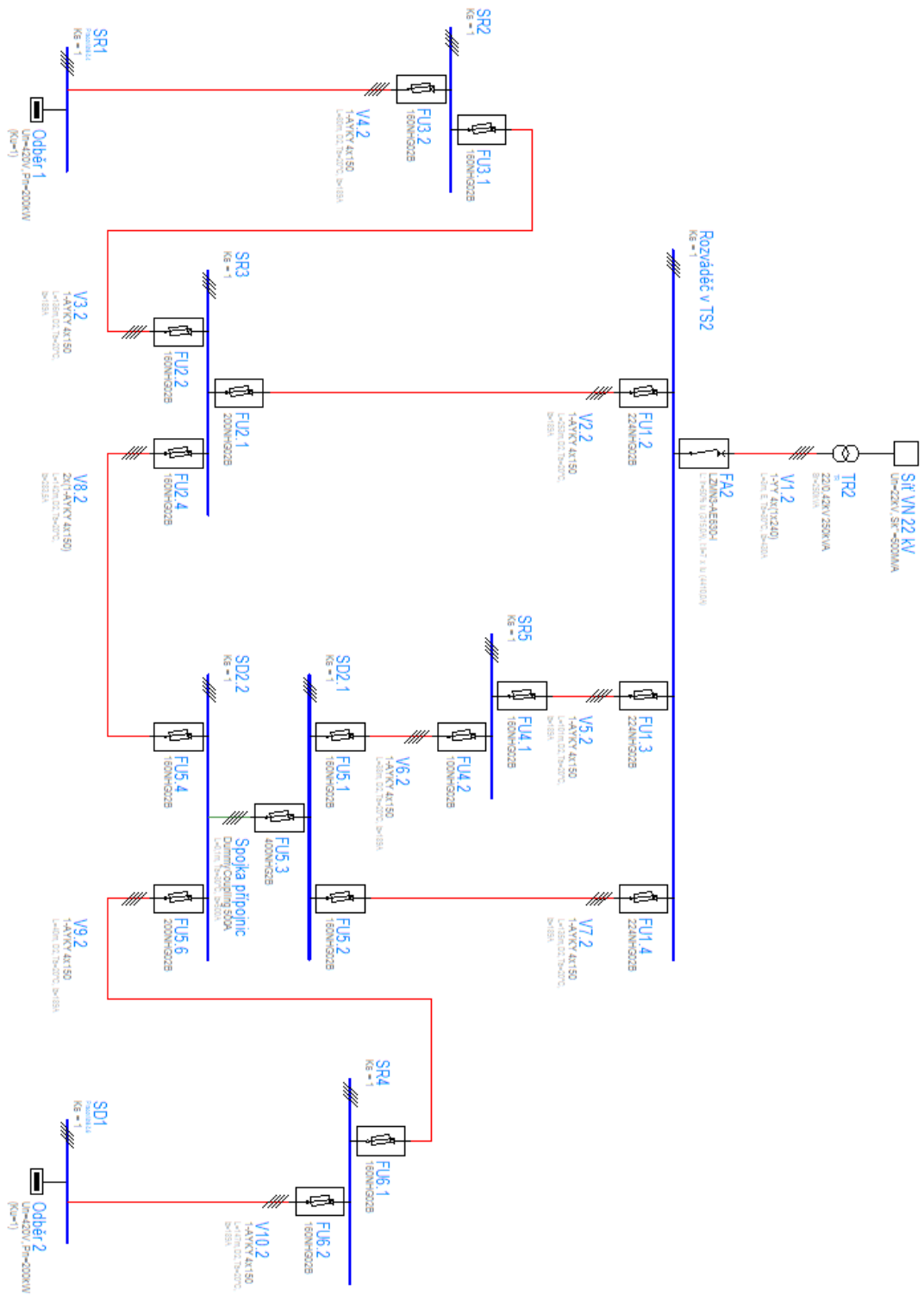
<b>PŘÍLOHA C - VÝSLEDNÉ HODNOTY PRO VŠECHNA PRACOVÍŠTĚ.....</b>	<b>62</b>
---	-----------

# Příloha A - Reálné zapojení jednotlivých sítí při použití transformátorů o výkonech 250 kVA

## A.1 Sít' č.1



## A.2 Sít' č.2



## A.3 Sít' č.3

