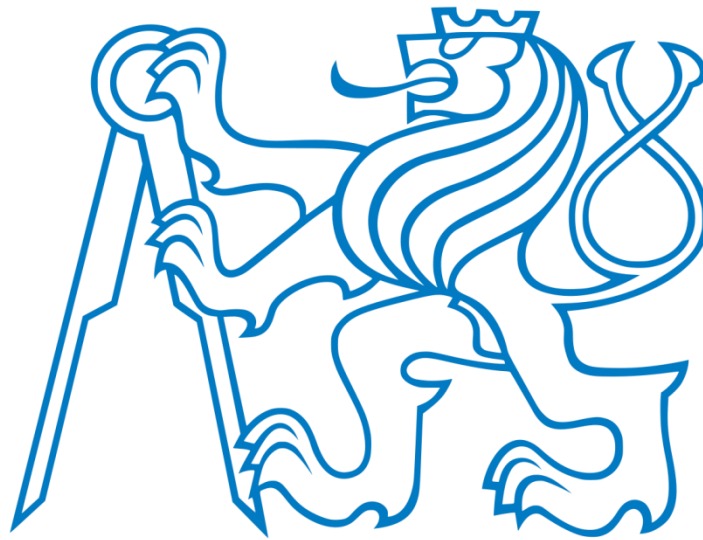


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Ověřování zkratové odolnosti rozvaděčů NN
Verification of short circuit withstand strength for
low voltage switchgears

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektroenergetika
Vedoucí práce: Ing. Šimon Szcotka

Jan Friedrich

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Friedrich** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **434797**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Ověřování zkratové odolnosti rozvaděčů NN

Název diplomové práce anglicky:

Verification of short circuit withstand strength for low voltage switchgears

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vznik zkratových proudů, rozbor jednotlivých složek, dynamické a tepelné účinky na elektrická zařízení
- 2) Ověření návrhu dle ČSN EN 61439-1,2, ověřování rozvaděčů na zkratovou odolnost
- 3) Technické provedení rozvaděčů nn s ohledem na zkratovou odolnost, rozvaděče ověřené původním výrobcem
- 4) Návrh programu umožňující ověřit zkratovou odolnost dle ČSN EN 61439-1,2 za pomoci srovnání s referenčním návrhem

Seznam doporučené literatury:

- [1] Norma ČSN EN 61439-1 ed. 2 Rozvaděče nízkého napětí - Část 1: Všeobecná ustanovení
- [2] Norma ČSN EN 61439-2 ed. 2 Rozvaděče nízkého napětí - Část 2: Výkonové rozvaděče
- [3] Norma ČSN EN 60865-1 ed. 2 Zkratové proudy - Výpočet účinků - Část 1: Definice a výpočetní metody
- [4] Norma ČSN EN 60909-0:2002 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách: Část 0: Výpočet proudů
- [5] Fejt, Z., Čermák, J.: Elektroenergetika. Skripta ČVUT, 1985
- [6] Trojánek, Z., Hájek, J., Kvasnica, P.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách. SNTL, 1987

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Šimon Szcotka, Eaton Elektrotechnika s.r.o

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **13.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

Ing. Šimon Szcotka
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(y)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne

.....

Jan Friedrich

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou ověřování zkratové odolnosti rozvaděčů nízkého napětí. Teoretická část pojednává o teorii zkratových proudů a o normativních požadavcích a postupech pro ověřování zkratové odolnosti. Praktickou část pak tvoří výpočetní aplikace provádějící toto ověření.

Abstract

This diploma thesis describes verification of short circuit withstand strength for low voltage switchgears. The theoretical part of the thesis deals with theory of short circuit currents, normative requirements and procedures which are using for verification of short circuit withstand strength. The practical part contains the application designed for this verification.

Obsah:

Seznam příloh.....	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	13
1. Úvod.....	15
2. Problematika zkratových proudů	17
2.1. Vznik zkratových proudů	17
2.2. Druhy zkratů	18
2.3. Obecné časové průběhy zkratových proudů.....	20
2.4. Složky zkratových proudů podle ČSN EN 60909-0.....	22
2.5. Výpočty složek zkratových proudů.....	23
2.5.1. Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''	23
2.5.2. Nárazový zkratový proud I_p	23
2.5.3. Stejnosečná složka zkratového proudu $I_{d.c}$	24
2.5.4. Ustálený zkratový proud I_k	24
3. Účinky zkratových proudů a jejich výpočty dle ČSN EN 60865-1 ed. 2	25
3.1. Tepelné účinky zkratových proudů na holé vodiče	25
3.1.1. Výpočet ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu	25
3.1.2. Určení oteplení vodičů	29
3.2. Dynamické účinky zkratových proudů.....	30
3.2.1. Výpočet elektromagnetických sil.....	31
3.2.2. Určení účinné vzdálenosti	33
3.2.3. Výpočet namáhání.....	35
3.2.4. Výpočet sil působících na podpěry	40
3.2.5. Zvláštní zohlednění kmitání vodiče	40
4. Ověřování návrhu rozvaděče dle souboru norem ČSN EN 61439	41

4.1.	Ověřování návrhu rozvaděče obecně	41
4.2.	Ověřování zkratové odolnosti	42
4.2.1.	Jmenovité hodnoty proudů definované ČSN EN 61439-1 ed 2.	42
4.2.2.	Zkratová ochrana a zkratová odolnost.....	43
4.2.3.	Všeobecné požadavky.....	44
4.2.4.	Ověřování srovnáním s ref. návrhem podle seznamu	45
4.2.5.	Ověřování zkouškou.....	46
4.2.1.	Ověřování srovnáním s ref. návrhem pomocí výpočtu.....	54
5.	Praktické provedení rozvaděčů NN.....	57
5.1.	Provedení rozvaděčů NN s ohledem na zkratovou odolnost.....	57
5.2.	Rozvaděčové systémy ověřené původním výrobcem.....	59
5.2.1.	Rozvaděčový systém Eaton xEnergy Main.....	60
5.2.2.	Konfigurace XP systému xEnergy Main nazkoušené dle ČSN EN 61439.....	61
6.	Výpočetní program E-VERIFIC	71
6.1.	Obecně o programu	71
6.2.	Návod k obsluze programu	72
6.3.	Praktické řešení programu.....	74
6.3.1.	Předvyplněné hodnoty pro ověřovanou strukturu	74
6.3.2.	Ošetření vstupů.....	76
6.4.	Příklad použití programu.....	77
7.	Závěr.....	81
8.	Použitá literatura a zdroje.....	83

Seznam příloh

1. Ukázky zdrojového kódu programu E-VERIFIC
2. Výpočetní program E-VERIFIC (soubor E-VERIFIC.exe)

Seznam obrázků

Obrázek 1- Schéma trojfázového zkratu	18
Obrázek 2 - Schéma dvoufázového zkratu	18
Obrázek 3 – Schéma dvoufázového zemního zkratu	19
Obrázek 4 - Schéma jednofázového zkratu	19
Obrázek 5 - Průběh symetrického zkratového proudu	20
Obrázek 6 - Vznik stejnosměrné složky a průběh nesouměrného zkratového proudu	21
Obrázek 7 - Průběh zkratového proudu elektricky vzdáleného zkratu	22
Obrázek 8 - Závislost součinitele κ na poměru R/X	24
Obrázek 9 – Součinitel m pro účinek stejnosměrné složky	27
Obrázek 10 – Součinitel n pro účinek střídavé složky	28
Obrázek 11 - Diagram pro určení teploty vodiče	29
Obrázek 12 - Diagram pro určení teploty vodiče (hliník a jeho slitiny)	30
Obrázek 13 - Fázové vodiče ve stejné osové vzdálenosti v rovině	32
Obrázek 14 - Součinitel k_{1s} pro výpočet účinné vzdálenosti	34
Obrázek 15 – Směr zatížení a osa ohybu	38
Obrázek 16 - Zkoušená struktura přípojnic	55
Obrázek 17 - Nezkoušená struktura přípojnic	56
Obrázek 18 - Úhlová konfigurace	56
Obrázek 19 – Rozvaděčové pole s přípojnicovým systémem	58
Obrázek 20 – Přípojnicový systém a jeho části	59
Obrázek 21 – Sestava rozvaděčů systému xEnergy Main	60
Obrázek 22 – Silová pole typu XP	61
Obrázek 23 – Náčrt konfigurace se dvěma jističi NZM3 630A	62
Obrázek 24 – Náčrt distribučních přípojnic konfigurace 2 x NZM3 630 A	63
Obrázek 25 – Náčrt konfigurace s jističem NZM4 1600 A	64

Obrázek 26 – Náskres distribučních přípojníc konfigurace s jističem NZM4 1600 A	65
Obrázek 27 – Náskres konfigurace s jističem IZMX16 1600 A	66
Obrázek 28 – Náskres distribučních přípojníc konfigurace s jističem IZMX16, 1600 A	67
Obrázek 29 – Náskres konfigurace s jističem IZMX40 2500 A.....	68
Obrázek 30 – Náskres distribučních přípojníc konfigurace s jističem IZMX40, 2500 A.....	69
Obrázek 31 – Vývojový diagram běhu programu	72
Obrázek 32 - Prvky hlavního okna.....	73
Obrázek 33 - Okno výsledků	74
Obrázek 34 - Hlavní okno s předvyplněnými hodnotami.....	76
Obrázek 35 - Zobrazení podmínek	77
Obrázek 36 - Příklad výpočtu	78
Obrázek 37 - Výsledky výpočtu	79

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Nejvyšší doporučené teploty vodičů při zkratu	30
Tabulka 2 - Účinná vzdálenost a_s mezi dílčími vodiči	34
Tabulka 3 - Max. možné hodnoty $V_{\sigma m}$, $V_{r m}$, $V_{\sigma s}$, $V_{r s}$	36
Tabulka 4 – Součinitelé α , β , γ	37
Tabulka 5 – Součinitel q	39
Tabulka 6 - Průřezový modul W_m hlavních vodičů s dvěma nebo více výstužnými vložkami mezi sousedními podpěrami.....	40
Tabulka 7 - Ověření zkratové odolnosti konstrukčními pravidly.....	45
Tabulka 8 - Měděné zkušební vodiče pro jmenovité proudy do 400 A	48
Tabulka 9 - Měděné zkušební vodiče pro proudy od 400 A do 4000 A	48
Tabulka 10 - Typy vodičů a požadavky na jejich instalaci.....	50
Tabulka 11 - Hodnoty účinníku podle velikosti zkratového proudu.....	51
Tabulka 12 – Parametry konfigurace se dvěma trojpólovými jističi NZM3 630 A.....	63
Tabulka 13 – parametry konfigurace s jedním jističem NZM4, 1600 A.....	65
Tabulka 14 – Parametry konfigurace s jedním jističem IZMX16, 1600 A	67
Tabulka 15 – Parametry konfigurace s jedním jističem IZMX40, 2500 A	69

1. Úvod

Tato práce se zabývá ověřením návrhu rozvaděčů NN¹ na zkratovou odolnost dle souboru norem ČSN EN 61439.

Nejprve je rozebrána obecná problematika zkratů, vznik zkratových proudů, jejich časové průběhy a složky. Dále je pak pozornost věnována dynamickým a tepelným účinkům zkratových proudů a jejich výpočtům, bez jejichž znalosti není možné provádět ověřování zkratové odolnosti rozvaděčů NN, kterému je věnována další kapitola.

V neposlední řadě jsou popsány čtyři nazkoušené rozvaděčové struktury systému Eaton xEnergy Main.

Hlavní částí práce je pak návrh programu E-VERIFIC. Aplikace bude sloužit k ověřování zkratové odolnosti nových návrhů rozvaděčů výpočtem na základě nazkoušených rozvaděčových struktur. Za splnění určitých podmínek se takto lze vyhnout fyzickému ověřování každého nově navrženého rozvaděče na zkušebně, které by bylo z ekonomického i praktického hlediska značně nevýhodné.

¹ Rozvaděčem NN se dle ČSN 61439-1 ed.2 rozumí kombinace jednoho nebo více spínacích přístrojů nn spolu s řídícími, měřícími, signalizačními, ochrannými, regulačními zařízeními a se všemi vnitřními elektrickými a mechanickými propoji a konstrukčními částmi.

2. Problematika zkratových proudů

Zde je pozornost zaměřena na teorii zkratů, zejména pak na jejich vznik, druhy a na časové průběhy zkratových proudů.

2.1. Vznik zkratových proudů

Zkrat lze považovat za obecně nejrozšířenější typ poruchy v elektrizační soustavě. Zkrat vzniká při vzájemném propojení fázových vodičů do krátka, nebo v soustavě s uzemněným uzlem při spojení fázového vodiče, resp. vodičů a země, resp. středního vodiče. V důsledku takovéto poruchy dochází ke vzniku zkratových proudů, které jsou nežádoucí.

Typické příčiny zkratu jsou následující:

- porucha izolačního systému vodičů, ke které může dojít v důsledku stárnutí izolačního materiálu nebo přepětí,
- přímé mechanické narušení izolačního stavu, způsobené vnějším zásahem (např. porušení izolace vodičů při stavebních pracích, deformace sběrnic nebo jejich propojení cizím vodivým předmětem – typicky upuštěný nástroj při práci v rozvaděči),
- špatné dimenzování vodičů a následné poškození izolace vlivem jejich oteplováním,
- porucha elektrického zařízení připojeného do obvodu.

Při vzniku zkratu se zmenšuje celková impedance zasažené části sítě a v důsledku toho se zvětšují proudy, což vede k poklesu napětí v místech v blízkosti zkratu, který může mít za následek narušení chodu ostatních zařízení.

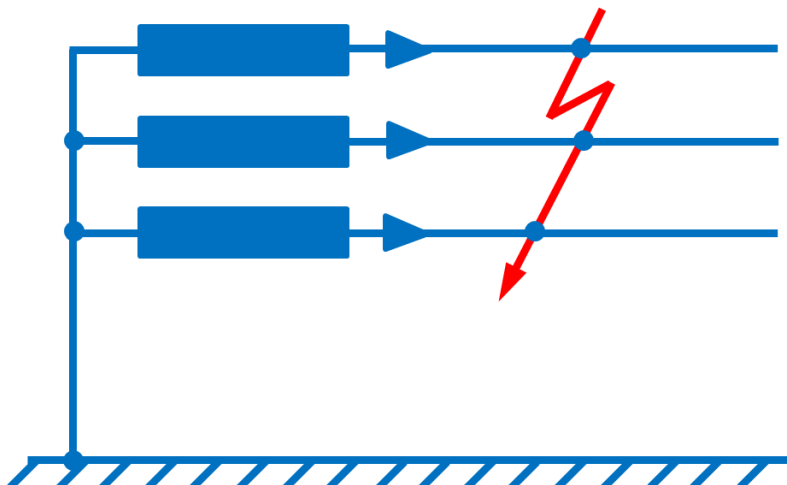
Pro minimalizaci účinků zkratových proudů je třeba zkratovaný prvek co nejrychleji odpojit od zdroje, k čemuž se používají jistící přístroje v podobě pojistek a jističů. I přes to, že reakce těchto ochranných zařízení je velmi rychlá a působení zkratových proudů je tak pouze krátkodobé, vzhledem k jejich velikosti, která mnohonásobně převyšuje jmenovité pracovní proudy, mohou být jejich účinky na elektrická zařízení fatální, neboť v důsledku působení zkratových proudů dochází k rychlému ohřevu vodičů a rovněž k jejich dynamickému namáhání magnetickými silami, kterými na sebe vodiče vzájemně působí. [5], [6]

2.2. Druhy zkratů

Vzhledem k počtu a typu zasažených vodičů rozlišujeme následující druhy zkratů:

Souměrné:

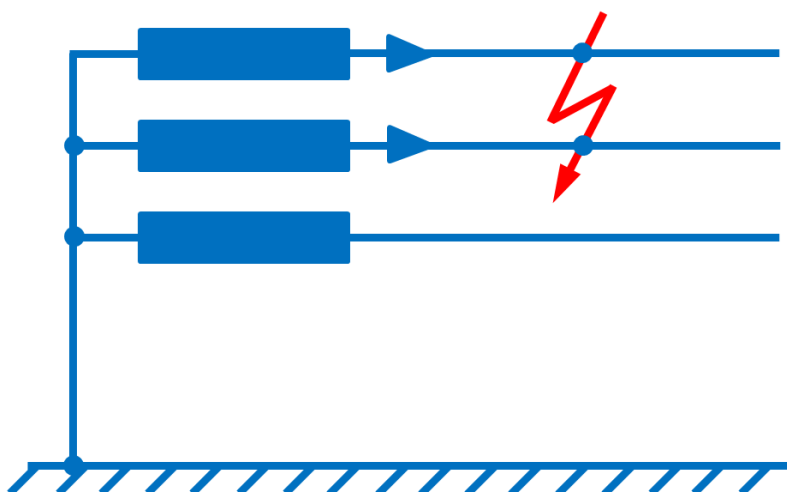
- **Trojfázový zkrat** – poruchou jsou zasaženy všechny tři fáze, viz obrázek 1.



Obrázek 1- Schéma trojfázového zkratu podle [7]

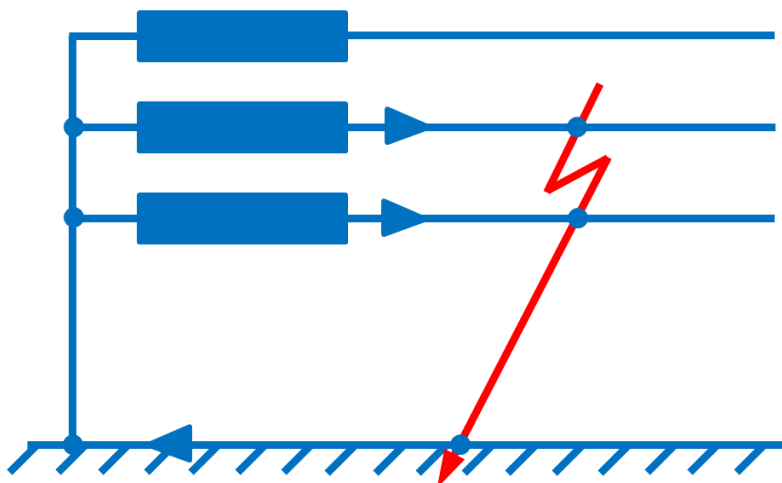
Nesouměrné:

- **Dvoufázový zkrat** – poruchou jsou zasaženy dvě fáze, které se vzájemně propojí, viz obrázek 2.



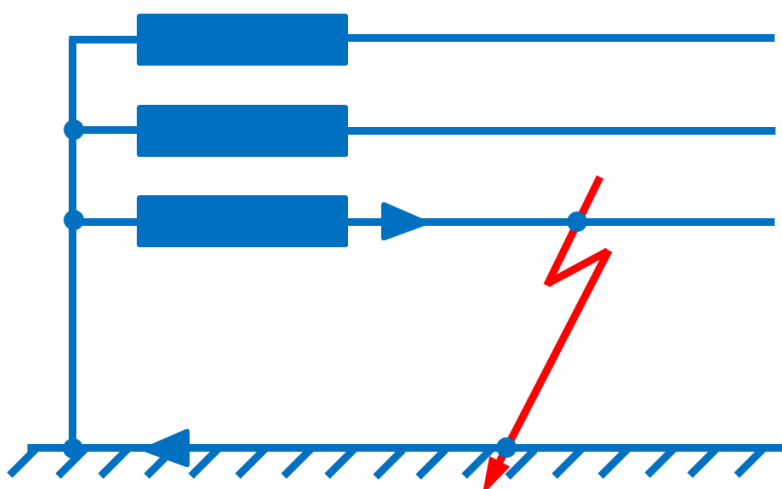
Obrázek 2 - Schéma dvoufázového zkratu podle [7]

- **Dvoufázový zemní zkrat** – při této poruše dojde k propojení dvou fází, které se navíc ještě spojí se zemí, viz obrázek 3.



Obrázek 3 – Schéma dvoufázového zemního zkratu podle [7]

- **Jednofázový zkrat** – porucha vzniká v důsledku spojení jedné fáze se zemí viz obrázek 4.



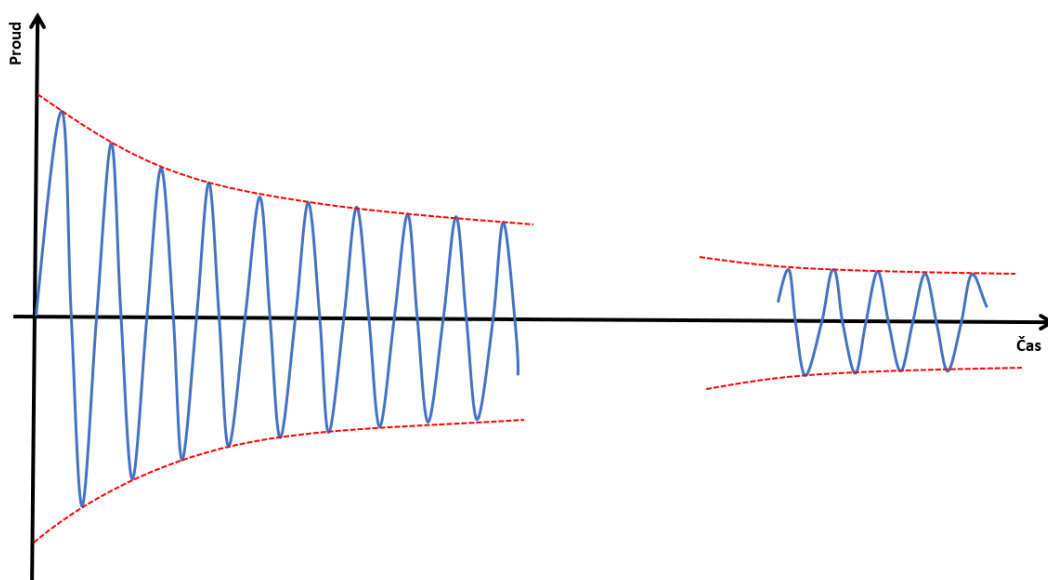
Obrázek 4 - Schéma jednofázového zkratu podle [7]

Z hlediska pravděpodobnosti dochází nejčastěji ke zkratu jednofázovému, nejméně často pak ke zkratu trojfázovému. Nutno ovšem uvést, že zkrat, který vznikne jako jednofázový či dvoufázový (resp. dvoufázový zemní), může snadno přejít v trojfázový zkrat vlivem působení elektrického oblouku, k čemuž nejčastěji dochází při poruchách na kabelových vedeních. [5]

2.3. Obecné časové průběhy zkratových proudů

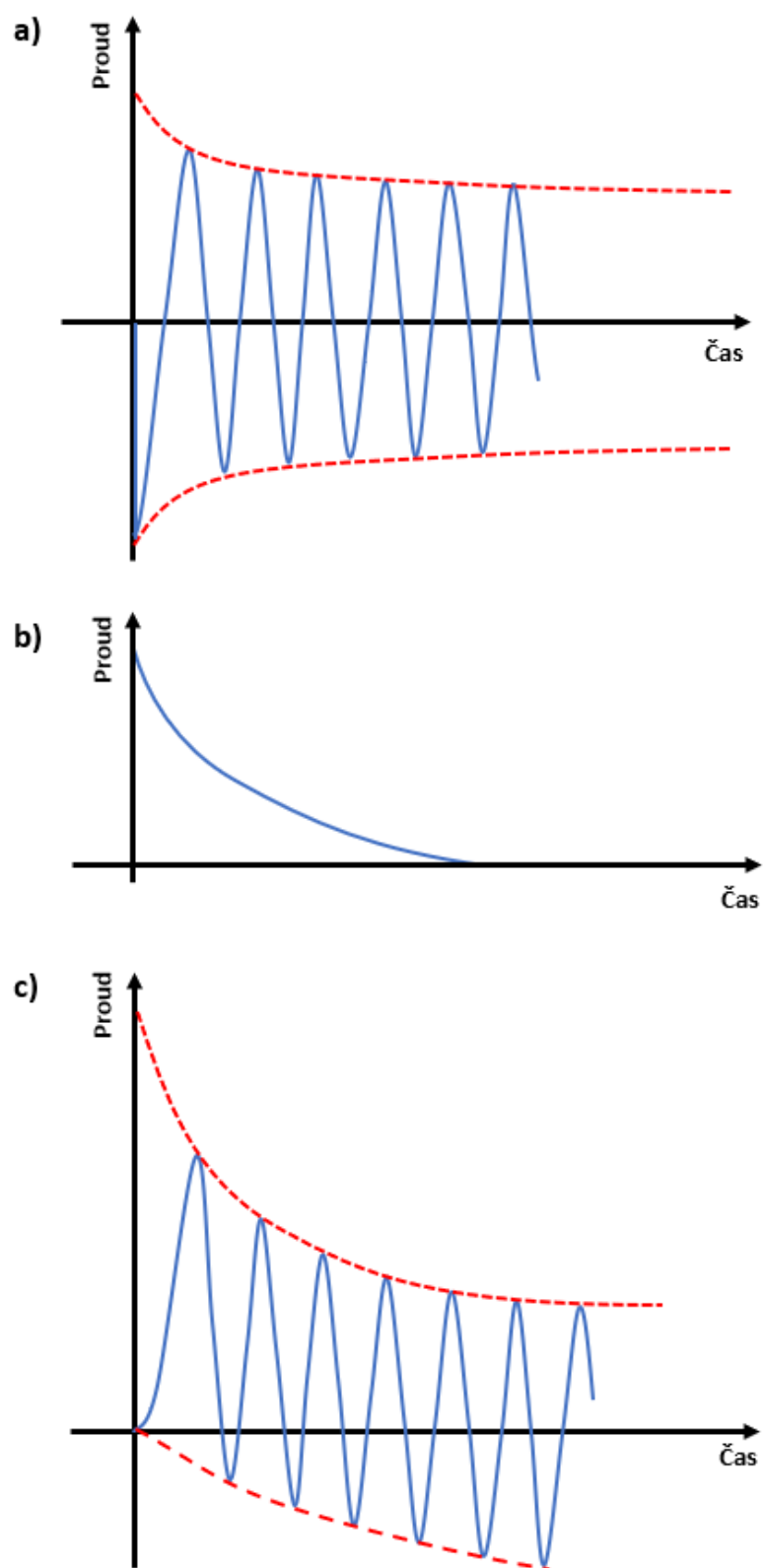
Průběh zkratového proudu je přechodný děj, u kterého lze sledovat jeho počátek, přechodnou část a ustálený stav.

Předpokládejme nyní, že před vznikem zkratu neprotékal vodiči žádný proud a obvod byl tedy ve stavu na prázdko. Dále zanedbáme činné odpory a zkratový proud bude tak omezen pouze reaktancemi, z čehož vyplývá, že bude induktivního charakteru a bude se tedy opožďovat za napětím o $\frac{\pi}{2}$. Na obrázku 5 je znázorněn jeden ze dvou možných mezních stavů, a sice stav, kdy ke zkratu došlo v momentě, kdy napětí prochází svým maximem, což znamená že zkratový proud začíná z nuly. Zkratový proud s takovýmto průběhem se nazývá **symetrický zkratový proud**. [5]



Obrázek 5 - Průběh symetrického zkratového proudu podle [5]

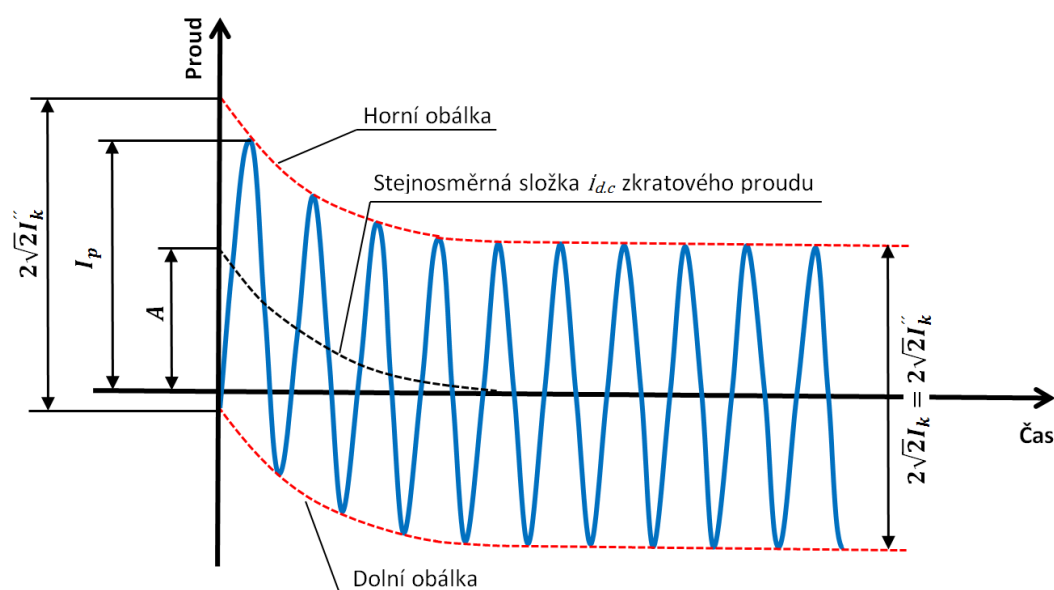
Druhým mezním případem je situace, za níž ke zkratu dojde v okamžiku, kdy napětí prochází nulou a proud, opožděný o $\frac{\pi}{2}$ by tedy měl začínat ze svého maxima. Okamžitá skoková změna proudu, tak jak je znázorněna na obrázku 6-a), však není z fyzikálního hlediska možná a proto se vytvoří stejnosměrná složka (obrázek 6-b)), jejíž počáteční velikost je taková, aby při součtu se střídavými složkami výsledný zkratový proud začínal z nulové hodnoty. Výsledkem superpozice je **nesymetrický zkratový proud**, jehož průběh ukazuje obrázek 6-c). [5]



Obrázek 6 - Vznik stejnosměrné složky a průběh nesouměrného zkratového proudu podle [5]

2.4. Složky zkratových proudů podle ČSN EN 60909-0

Dle normy ČSN EN 6090-0, která popisuje obecnou metodiku výpočtu zkratových proudů, se rozlišují dva typy průběhu zkratového proudu, a sice zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu² a zkratový proud elektricky blízkého zkratu³. Vzhledem k tomu, že tato práce se zabývá zkraty v rozvaděčích NN, bude pozornost věnována pouze zkratu elektricky vzdálenému. Obecný průběh proudu při tomto zkratu, tak jak je popsán v ČSN EN 60909-0, je znázorněn na obrázku 7.



Obrázek 7 - Průběh zkratového proudu elektricky vzdáleného zkratu podle [4]

Z obrázku je zřejmé, že se průběh zkratového proudu skládá z několika složek. Podle ČSN EN 60909-0 jsou tyto složky definovány takto:

- **Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''** , což je efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu při konstantní impedanci. [4]
- **Nárazový zkratový proud I_p** , což je maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu. [4]

² Elektricky vzdáleným zkratem je zkrat, při kterém se nemění velikost souměrné složky zkratového proudu.

³ Elektricky blízkým zkratem je zkrat v blízkosti synchronního stroje, resp. strojů, při kterém dochází ke změně velikosti souměrné složky (typicky na svorkách nebo v blízkosti generátoru).

- **Ustálený zkratový proud I_k** , což je efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu. [4]
- **Stejnoseměrná složka zkratového proudu $I_{d.c.}$** , což je střední hodnota dolní a horní obalové křivky průběhu zkratového proudu, klesající ze své počáteční hodnoty k nule. [4]

2.5. Výpočty složek zkratových proudů

Pro ověřování účinků zkratových proudů při elektricky vzdálených zkratech je rozhodující hodnota zkratového proudu při trojfázovém zkratu, která v takovém případě nabývá ze všech možných druhů zkratu nejvyšších hodnot. Proto je v této kapitole pozornost zaměřena pouze na elektricky vzdálené trojfázové zkraty.

2.5.1. Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

Obecný vztah pro výpočet I_k'' při trojfázovém zkratu je následující:

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \quad (1)$$

Výraz $\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$ představuje napětí ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu, kde napěťový součinitel c zohledňuje možné výkyvy napětí, které by na hladině NN neměly překročit 5 % a dle ČSN EN 60909-0 se tedy pro výpočet maximálních zkratových proudů zavádí $c = 1,05$. V případě potřeby předimenzování je samozřejmě možné napěťového součinitele příslušně zvětšit. Z_k je pak zkratová impedance. [4]

2.5.2. Nárazový zkratový proud I_p

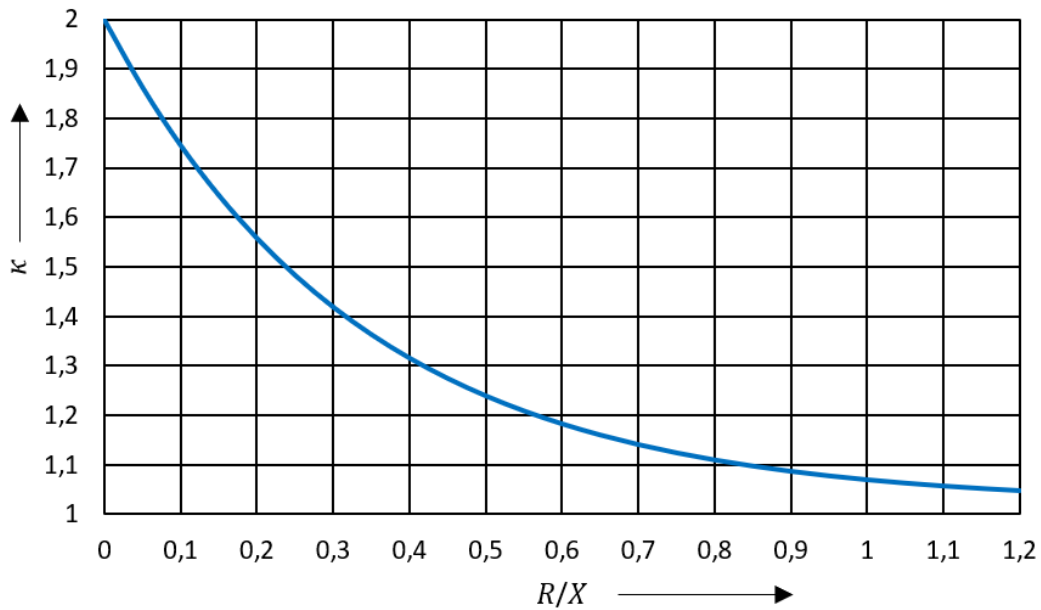
Pro výpočet nárazového zkratového proudu se předpokládá, že ke zkratu dojde při průchodu napětí nulou, a že hodnoty I_p zkratový proud dosáhne v první půlperiodě. Pak je nárazový zkratový proud definován jako:

$$i_p = \kappa\sqrt{2}I_k'' \quad (2)$$

Součinitel κ je dán poměrem R/X a vypočítá se podle následujícího vztahu:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (3)$$

Grafické znázornění závislosti součinitele κ na poměru R/X pro případné rychlé odečtení je na obrázku 8.



Obrázek 8 - Závislost součinitele κ na poměru R/X

2.5.3. Stejnoseměrná složka zkratového proudu $I_{d.c}$

Maximální stejnosměrná složky se určí následovně:

$$I_{d.c} = \sqrt{2} I_k'' e^{-2\pi f t R/X} \quad (4)$$

Kde:

- I_k'' ... počáteční souměrný trojfázový zkratový proud
- f ... jmenovitá frekvence
- t ... čas

2.5.4. Ustálený zkratový proud I_k

Pro elektricky vzdálené zkraty na NN se s dostatečnou přesností uvažuje:

$$I_k = I_k'' \quad (5)$$

3. Účinky zkratových proudů a jejich výpočty dle ČSN EN 60865-1 ed. 2

Tato kapitola rozebírá výpočetní metody a vztahy, které jsou třeba při posuzování vlivu zkratového proudu na rozvaděčovou konfiguraci.

3.1. Tepelné účinky zkratových proudů na holé vodiče

Při průchodu zkratového proudu vodičem dochází k jeho nežádoucímu oteplování. Tento proces zahrnuje několik nelineárních dějů a dalších faktorů, které se buďto zanedbají, anebo je třeba je aproximovat tak, aby bylo možné celý problém popsat matematicky. Z tohoto důvodu norma ČSN EN 60865-1 ed.2 pro výpočty zavádí následující zjednodušující předpoklady: [3]

- při výpočtech se zanedbává skinefekt⁴ a proximityefekt⁵;
- závislost odporu vodiče na teplotě je ve zkoumané oblasti lineární;
- měrná tepelná kapacita vodiče je konstantní;
- ohřev je adiabatický

Pokud dochází k působení zkratového proudu opakovaně a v krátkých časových intervalech, např. při rychlém opětovném zapínání, považujeme ohřev stále za adiabatický, neboť ochlazování v krátké době, kdy nepůsobí zkratový proud, má jen velmi malý význam. Pokud je ovšem prodleva mezi jednotlivými zapnutími delší, lze s ochlazováním v mezidobí počítat. [3]

3.1.1. Výpočet ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu

Podle ČSN EN 60909-0 je ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th} definován jako efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který však může obsahovat stejnosměrnou složku a mění se s čase. [4]

⁴ Skinefekt je vliv magnetického pole vlastního vodiče.

⁵ Proximityefekt je vliv magnetického pole blízkých rovnoběžných vodičů.

Norma ČSN EN 60865-1 ed. 2 stanoví, že se ekvivalentní zkratový proud počítá dle postupu uvedeného v normě IEC 60909-0, čemuž odpovídá český ekvivalent ČSN EN 60909-0. K výpočtu se použije efektivní hodnota zkratového proudu a součinitelů pro časově závislé tepelné účinky střídavých složek a stejnosměrné složky. [3]

Pro výpočet I_{th} je většinou rozhodující trojfázový souměrný zkrat, a i v případě jednofázové soustavy se stanovení ekv. oteplovacího proudu provádí jako v trojfázové soustavě. [3]

Pro výpočet I_{th} je třeba nejprve definovat Joulův integrál, který určuje tepelnou energii, vytvářenou ve vodiči průchodem zkratového proudu. V ČSN EN 60909-0 se Joulův integrál počítá pomocí součinitelů m a n . Součinitel m respektuje časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu a součinitel n respektuje časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu. Oba součinitelé jsou definovány složitými rovnicemi a pro ruční výpočty je možné jejich hodnotu odečíst z diagramů viz obrázky 9 a 10. [4]

Joulův integrál je tedy definován jako:

$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k''^2 (m + n) T_k = I_{th}^2 T_k \quad (6)$$

Ze vztahu (6) pak vyjádříme ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + n} \quad (7)$$

Pokud uvažujeme sérii r po sobě následujících zkratů, je třeba vztah (6) upravit do následující podoby:

$$\int i^2 dt = \sum_{i=1}^r I_{ki}''^2 (m_i + n_i) T_{ki} = I_{th}^2 T_k \quad (8)$$

Vztah pro ekvivalentní oteplovací proud bude mít potom podobu:

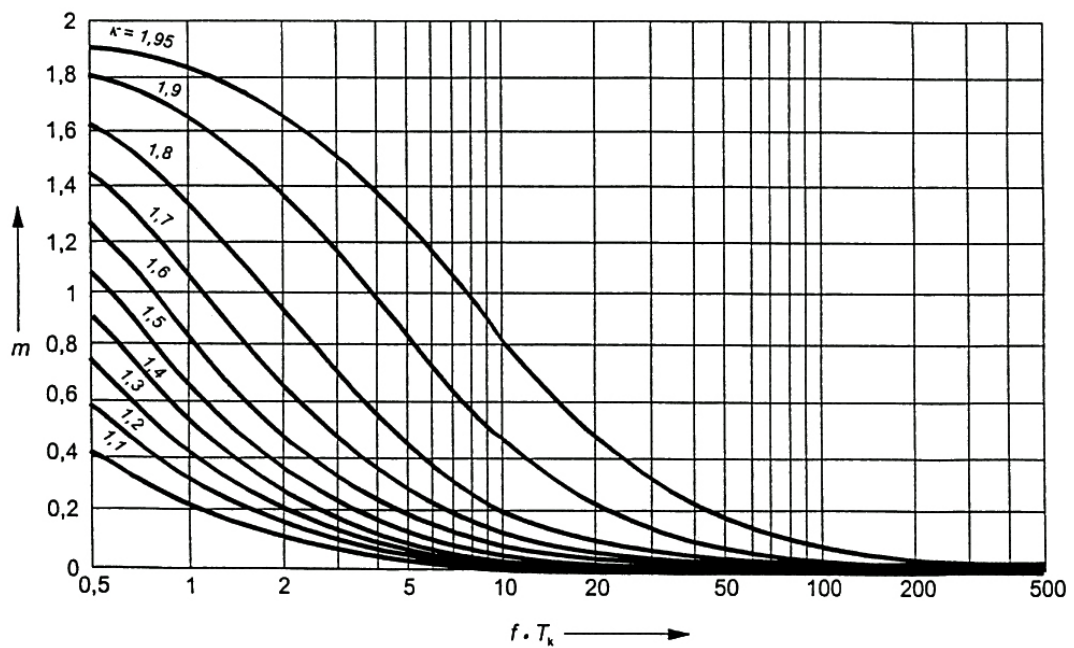
$$I_{th} = \sqrt{\frac{\int i^2 dt}{T_k}} \quad (9)$$

Pro T_k ve vztahu (9) platí:

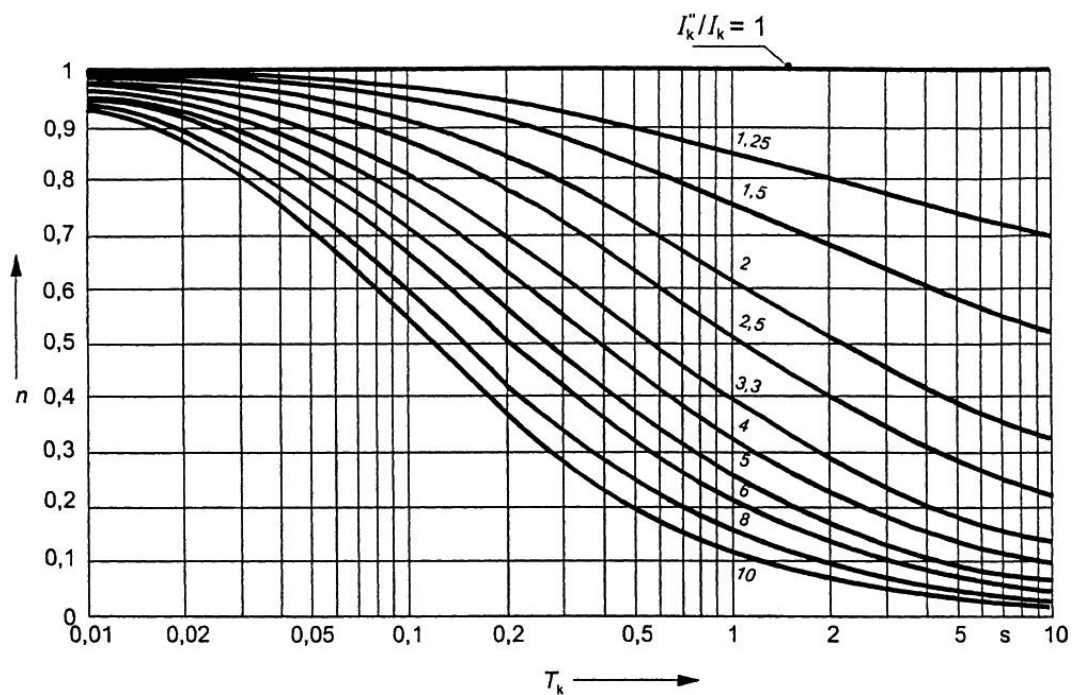
$$T_k = \sum_{i=1}^r T_{ki} \quad (10)$$

Kde:

- I''_{ki} ... počáteční souměrný trojfázový zkratový proud každého zkratu
- I_{th} ... ekvivalentní oteplovací zkratový proud
- m_i ... součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky
- n_i ... součinitel pro tepelné účinky střídavé složky
- T_{ki} ... doba trvání zkratového proudu každého zkratu
- T_k ... součet dob trvání pro všechny zkratové proudy



Obrázek 9 – Součinitel m pro účinek stejnosměrné složky převzato z [4]



Obrázek 10 – Součinitel n pro účinek střídavé složky převzato z [4]

Aby bylo možné určit součinitele m_i je třeba znát součin $f \cdot T_{ki}$ a dále součinitele κ , který je popsán v kapitole 2.5.2. K určení součinitele n_i se použije doba trvání zkratového proudu T_{ki} a podíl I_{ki}''/I_{ki} , kde I_{ki} je ustálený zkratový proud. [4]

V případě, kdy dojde k několika zkratům za sebou, určí se Joulův integrál jako součet dílčích Joulových integrálů pro jednotlivé zkraty podle vztahu (8). [4]

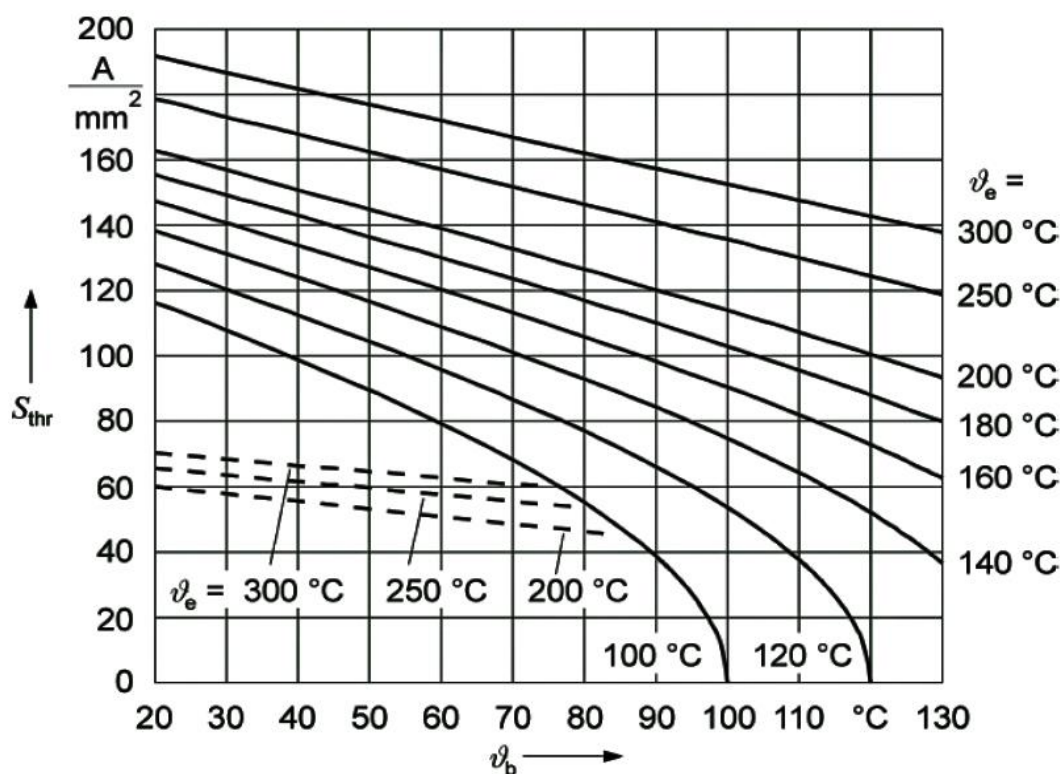
Pro elektricky vzdálené zkraty (zkraty na úrovni distribuční sítě), kterými se zabývá tato diplomová práce platí $I_{ki}''/I_{ki} \approx 1$. Pro výpočty v takových případech se tedy používá hodnota $n = 1$, viz diagram pro odečítání součinitele n na obrázku 10. Zároveň je v takových případech a pro zkraty trvající 0,5 s nebo déle dovoleno uvažovat s $m + n = 1$, z čehož pro $n = 1$ plyne, že $m = 0$. [4]

Zároveň je důležité poznamenat, že v případě, kdy je obvod chráněn jisticími přístroji (pojistky nebo jističe), omezujícími zkratový proud, může být hodnota Joulova integrálu nižší, než je hodnota vypočítána podle vztahu (6) resp. (8). Joulův integrál je tedy v takové situaci třeba určit z charakteristiky jisticího zařízení, omezujícího zkratový proud. [4]

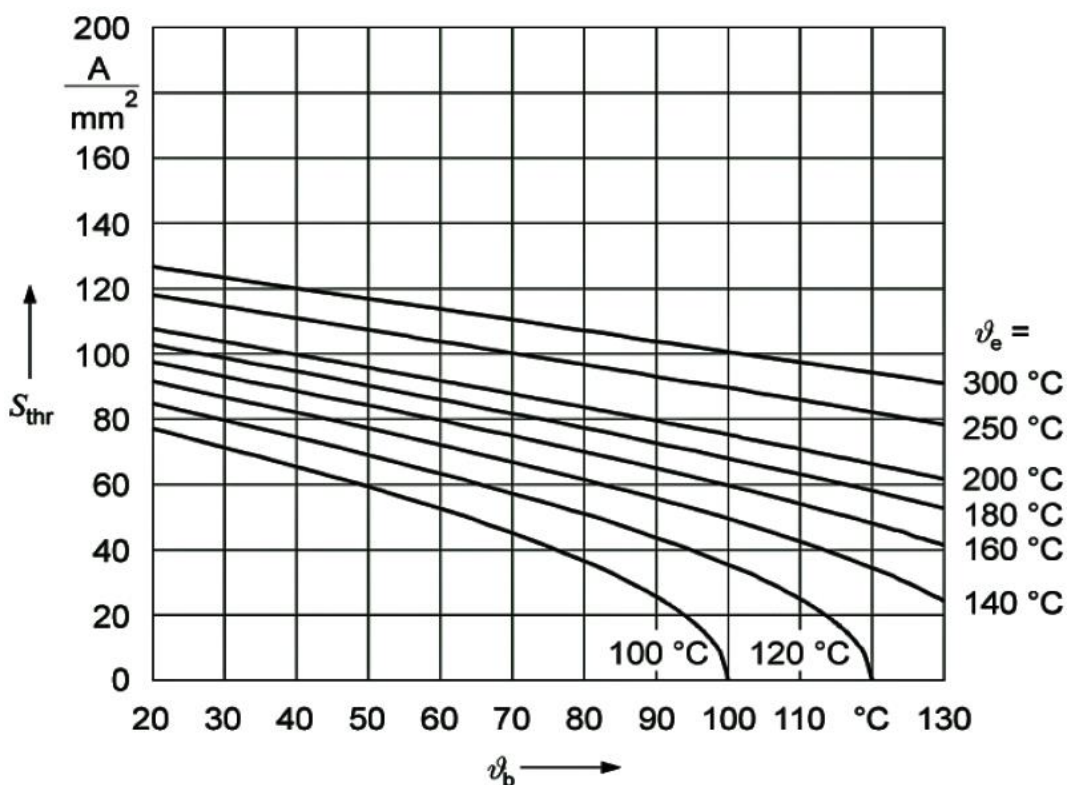
3.1.2. Určení oteplení vodičů

Oteplení vodiče v důsledku průchodu zkratového proudu je dáno jednak velikostí a dobou trvání ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu a potom také průřezem a materiálem vodiče. [3]

Z hustoty jmenovitého krátkodobého výdržného proudu (definice viz 4.2.1) můžeme pomocí grafů na obrázcích 11 a 12 určit oteplení pro vodiče z různých materiálů.



Obrázek 11 - Diagram pro určení teploty vodiče (plné čáry měď, čárkované čáry nízkolegovaná ocel) převzato z [3]



Obrázek 12 - Diagram pro určení teploty vodiče (hliník a jeho slitiny) převzato z [3]

V tabulce 1 jsou pro různé vodiče uvedeny nejvyšší teploty během zkratu, při jejichž dosažení může sice dojít ke snížení pevnosti materiálu, které je však zanedbatelné a neohroží provozní bezpečnost.

Tabulka 1 - Nejvyšší doporučené teploty vodičů při zkratu podle [3]

Typ vodiče	Doporučená nejvyšší teplota při zkratu
Holé vodiče, plné nebo lanové z mědi, hliníku nebo slitin hliníku	200 °C
Holé vodiče, plné nebo lanové z oceli	300 °C

3.2. Dynamické účinky zkratových proudů

Vzhledem k tomu, že diplomová práce je věnována zkratové odolnosti rozvaděčů a jejich přípojnicových systémů, je v této kapitole pozornost věnována pouze účinkům zkratových proudů na tuhé vodiče.

Uchycení tuhých vodičů může být provedeno:

- pevnými podpěrami;
- prostými podpěrami;
- kombinací obou předchozích.

Namáhání vodičů a podpěr při zkratu se bude lišit v závislosti na typu a počtu podpěr a také na poměru mezi vlastním kmitočtem mechanické soustavy a kmitočtem elektrické soustavy, kdy nejvíce nepříznivým stavem je stav rezonance, při kterém se namáhání zvětšuje. [3]

3.2.1. Výpočet elektromagnetických sil

Vrcholová síla při trojfázovém zkratu

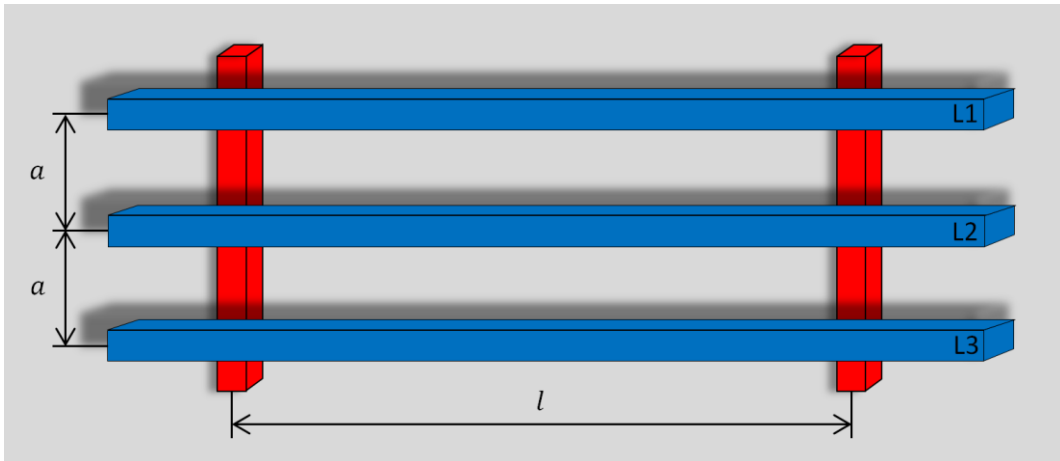
Pokud jsou hlavní vodiče⁶ uspořádány ve stejné osově vzdálenosti a v jedné rovině (například tak jako na obrázku 13), působí maximální síla při trojfázovém zkratu na prostřední fázový vodič a její velikost je dána vztahem:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0 \sqrt{3}}{2\pi} \frac{l}{2} i_p^2 \frac{1}{a_m} \quad (11)$$

Kde:

- i_p ... vrcholová hodnota zkratového proudu při trojfázovém zkratu (viz kapitola 2.5.2.);
- l ... maximální osová vzdálenost mezi sousedními podpěrami;
- a_m ... účinná vzdálenost mezi hlavními vodiči (výpočet viz 3.2.2.). [3]

⁶ Hlavním vodičem je vodič nebo soustava více dílčích vodičů tvořících jednu fázi.



Obrázek 13 - Fázové vodiče ve stejné osové vzdálenosti v rovině

Vrcholová síla při zkratu mezi dvěma hlavními vodiči

Jak již bylo předznamenáno na začátku části 2.5., pro dimenzování na hladině NN má rozhodující význam působení zkratového proudu při trojfázovém zkratu, nicméně pro úplnost uvádím i vztah pro výpočet elektromagnetické síly, působící na dva souběžné vodiče při dvoufázovém zkratu:

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_m} \quad (12)$$

Kde:

- i_{p2} ... vrcholová hodnota zkratového proudu při zkratu mezi dvěma vodiči (viz vztah (13));
- l ... maximální osová vzdálenost mezi sousedními podpěrami;
- a_m ... účinná vzdálenost mezi hlavními vodiči (výpočet viz 3.2.2).

Podle ČSN 60909-0 lze u elektricky vzdáleného zkratu uvažovat:

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_p \quad (13)$$

Dosazením i_{p2} ze (13) do vztahu (12) dostaneme:

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{3}{4} i_p^2 \frac{l}{a_m} \quad (14)$$

Z porovnání (11) a (14) je patrné, že platí $F_{m3} > F_{m2}$, a tudíž je zřejmé, že rozhodující význam pro dimenzování má skutečně trojfázový zkrat. [3]

Vrcholová síla mezi souběžnými dílčími vodiči

Při zkratu působí na vnější dílčí vodiče⁷ mezi dvěma spojovacími díly síla, jejíž maximální hodnota je daná vztahem:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n}\right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (15)$$

Kde:

- i_p ... vrcholová hodnota zkratového proudu;
- n ... počet dílčích vodičů;
- l_s ... maximální osová vzdálenost mezi sousedními propojovacími díly;
- a_s ... účinná vzdálenost mezi dílčími vodiči (výpočet viz 3.2.2). [3]

3.2.2. Určení účinné vzdálenosti

Geometrické uspořádání a tvar vodičů respektuje tzv. účinná vzdálenost. Její velikost pro souběžné hlavní vodiče s osovou vzdáleností a tvořené jedním vodičem obdélníkového průřezu nebo více dílčími vodiči obdélníkového průřezu se vypočítá jako:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (16)$$

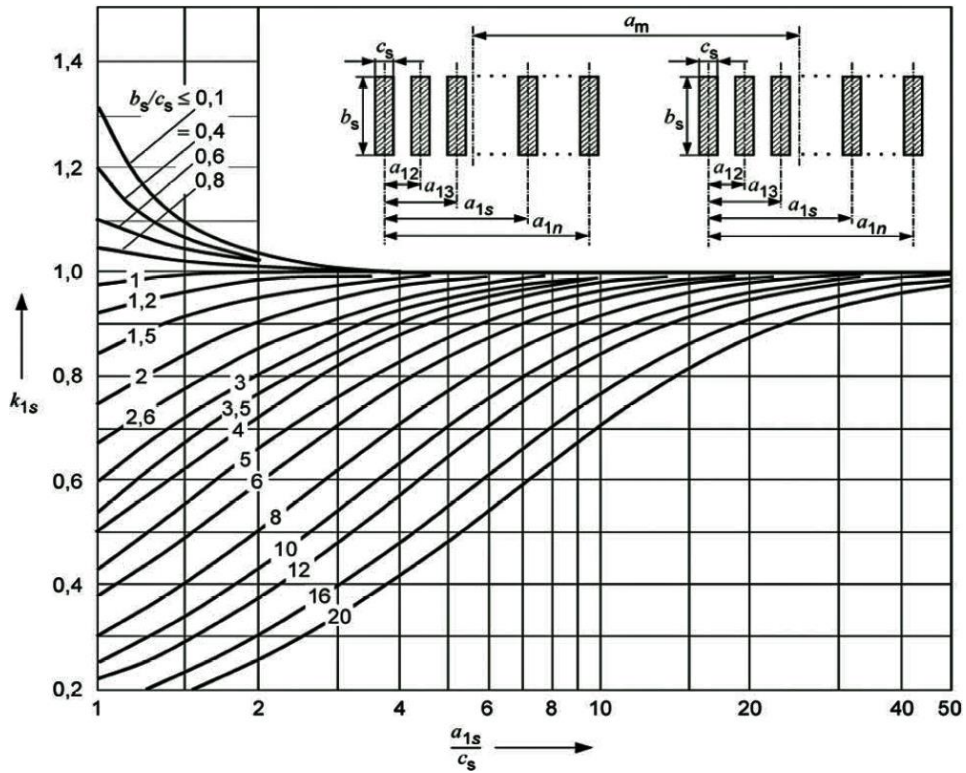
Součinitel k_{12} se určí z diagramu na obrázku 14 s tím, že se uvažuje $a_{1s} = a$, $b_s = b_m$, $c_s = c_m$, kde dolní index s označuje rozměr dílčího vodiče a index m rozměr hlavního vodiče.

Pro účinnou vzdálenost a_s mezi n souběžnými dílčími vodiči obdélníkového průřezu pak platí:

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (17)$$

Součinitelé k_{12} až k_{1n} je opět možno určit z diagramu na obrázku 14.

⁷ Dílčí vodič je součástí hlavního vodiče a přenáší část celkového proudu dané fáze.



Obrázek 14 - Součinitel k_{1s} pro výpočet účinné vzdálenosti ^{převzato z [3]}

Hodnoty a_s pro některá typická uspořádání je rovněž možno odečíst z tabulky 2.

Tabulka 2 - Účinná vzdálenost a_s mezi dílčími vodiči ^{převzato z [3]}

Obdélníkové průřezy	$c_s \backslash b_s$	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
			0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	–
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	–	0,013	0,015	0,018	0,022	–	–	–
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,005	–	–	–	–	–	–	–	–
	0,010	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,022	0,026	0,031
	0,005	–	0,014	0,015	0,018	0,020	–	–	–
	0,010	0,017	0,018	0,020	0,022	0,025	0,027	0,032	–

^a Všechny rozměry jsou uvedeny v metrech.

3.2.3. Výpočet namáhání

Namáhání

Pro výpočet namáhání se vychází z toho, že vodiče musejí být upevněny tak, aby osově síly a jejich účinky byly zanedbatelné, potom lze uvažovat pouze ohybový charakter působících sil. Ohybové namáhání způsobené silami mezi hlavními vodiči se tedy vypočítá následovně:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} \cdot V_{r m} \cdot \beta \frac{F_{m3} l}{8W_m} \quad (18)$$

Namáhání v ohybu v důsledku sil mezi dílčími vodiči se pak vypočítá jako:

$$\sigma_{s,d} = V_{\sigma s} \cdot V_{r s} \cdot \beta \frac{F_s l_s}{16W_s} \quad (19)$$

Kde:

- W_m ... průřezový modul hlavního vodiče;
- W_s ... průřezový modul dílčího vodiče;
- $V_{\sigma m}, V_{r m}, V_{\sigma s}, V_{r s}$... součinitelé respektující dynam. působení;
- β ... součinitel respektující typ a počet podpěr.


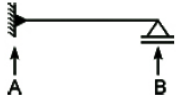

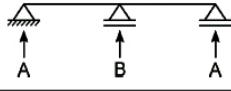
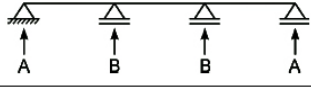
Maximální možné hodnoty součinitelů $V_{\sigma m}, V_{r m}, V_{\sigma s}, V_{r s}$ se určí z tabulky 3, součinitel β pro různá uspořádání podpěr se určí podle tabulky 4. [3]

V tabulce 3 jsou uvedeny i hodnoty pro případ s trojfázovým automatickým zapínáním, které s však v rozvaděčích NN nepoužívá a proto mu není věnována pozornost.

Tabulka 3 - Max. možné hodnoty $V_{\sigma m}$, V_{rm} , V_{os} , V_{rs} převzato z [3]

Druh zkratu	Soustava			
	Bez trojfázového automatického opětého zapínání	S trojfázovým automatickým opětým zapínáním		S a bez trojfázového automatického opětého zapínání
	$V_{\sigma m} V_{rm} V_{os} V_{rs}$	$V_{\sigma m} V_{rm} V_{os} V_{rs}$		$V_F V_{rm}$
		První průchod proudu	Druhý průchod proudu	
Mezi dvěma vodiči	1,0	1,0	1,8	<p>2,0 pro $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,5$</p> <p>$\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ pro $0,5 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$</p> <p>1,0 pro $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$</p> <p>rozsah</p> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p>
Trojfázový zkrat	1,0	1,0	1,8	<p>2,7 pro $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,37$</p> <p>$\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ pro $0,37 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$</p> <p>1,0 pro $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$</p> <p>rozsah</p> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p>

Tabulka 4 – Součinitelé α, β, γ převzato z [3]

Typ nosníku a způsob upevnění			α	β^*	γ
Nosník o jednom rozpětí	A a B: prosté podpory		A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: pevná podpora B: prosté podpory		A: 0,625 B: 0,375	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	A a B: pevné podpory		A: 0,5 B: 0,5	$\frac{8}{16} = 0,5$	3,56
Spojitý nosník s prostými podporami ve stejných vzdálenostech	Dvě rozpětí		A: 0,375 B: 1,25	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	Tři nebo více rozpětí		A: 0,4 B: 1,1	$\frac{8}{11} = 0,73$	3,56
* Účinky plasticity jsou zahrnuty.					

Průřezové moduly a součinitel q

Průřezový modul zohledňuje mechanickou odolnost vodiče při namáhání v ohybu a vypočte se takto:

$$W = \frac{J}{\frac{c}{2}} \quad (20)$$

Veličina J ve vztahu (20) je moment setrvačnosti, který se pro obdélníkový průřez počítá následovně:

$$J = \frac{b \cdot c^3}{12} \quad (21)$$

Dosazením (21) do (20) dostáváme výsledný vztah pro průřezový modul dílčího vodiče obdélníkového průřezu:

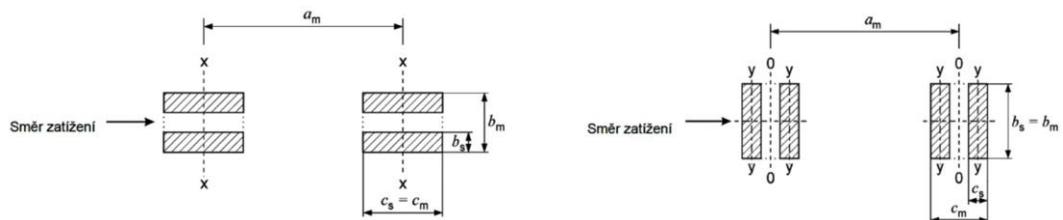
$$W_s = \frac{1}{6} \cdot b_s \cdot c_s^2 \quad (22)$$

Kde $b_s; c_s$ jsou rozměry dílčího vodiče podle obrázku 15. [8]

Při namáhání podél povrchu, tak jak je znázorněno na obrázku 15 vlevo, nezávisí průřezový modul W_m na počtu spojovacích dílů a vypočítá se jako součet průřezových modulů W_s (vzhledem k ose x-x) dílčích vodičů. Součinitel q má v takovém případě pro obdélníkové průřezy hodnotu 1,5 a pro průřezy tvaru U a I hodnotu 1,19. [3]

Pokud má namáhání charakter jako na obrázku 15 vpravo, tedy kolmo na povrch, a v rozpětí je použita jedna nebo žádná výstužná vložka⁸, vypočítá se průřezový modul W_m obdobně jako u předchozího případu a je tedy roven součtu průřezových modulů W_s (vzhledem k ose y-y) dílčích vodičů. Součinitel q má hodnotu 1,5 pro obdélníkové průřezy a pro průřezy tvaru U a I hodnotu 1,83. [3]

Pokud jsou v rozpětí použity dvě nebo více výstužných vložek, lze použít vyšší hodnoty průřezových modulů. Pro hlavní vodiče složené z dílčích vodičů obdélníkového průřezu je možno hodnotu průřezového modulu odečíst z tabulky 6. Pro vodiče s průřezy tvaru U a I se použije 50 % hodnoty průřezového modulu vztaženého k ose 0-0. Součinitel q má v tomto případě hodnotu 1,5 pro obdélníkové průřezy a pro průřezy tvaru U a I hodnotu 1,83. [3]



Obrázek 15 – Směr zatížení a osa ohybu převzato z [3]

Dovolené namáhání vodiče

Jednoduchý vodič se považuje za odolný vůči silovému namáhání při zkratu, pokud je splněno:

$$\sigma_{m,d} \leq q \cdot f_y \quad (23)$$

Kde f_y je namáhání odpovídající mezi kluzu, která je charakteristická pro každý materiál vodiče a součinitel q se určí jak je popsáno v předchozí části, případně pro různé průřezy podle tabulky 5.

⁸ Výstužná vložka je rozpěrka mezi tuhými vodiči snižující jejich mechanické namáhání.

V případě, že je hlavní vodič složen z několika dílčích vodičů, vypočítá se celkové namáhání takto:

$$\sigma_{\text{tot},d} = \sigma_{m,d} + \sigma_{s,d} \quad (24)$$

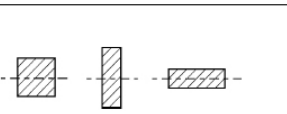
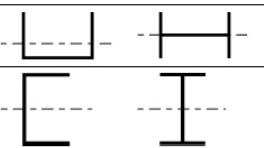

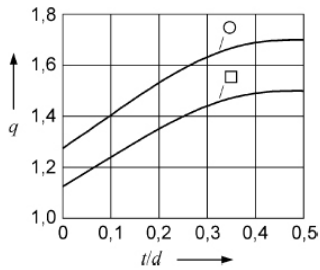
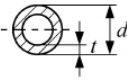
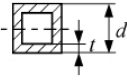
A vodič se potom považuje za odolný vůči působení sil při zkratu, pokud vyhoví podmínce:

$$\sigma_{\text{tot},d} \leq q \cdot f_y \quad (25)$$

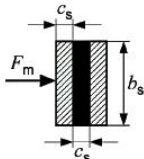
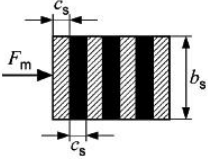
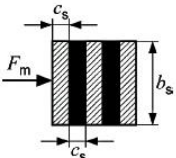
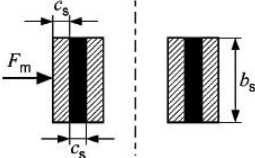
Aby se ověřilo, že při zkratu nedojde k přílišné změně vzdálenosti mezi dílčími vodiči, provede se ještě kontrola podle následující podmínky:

$$\sigma_{s,d} \leq f_y \quad (26)$$

Tabulka 5 – Součinitel q převzato z [3]

Průřez		Průřez	
	$q = 1,5$		$q = 1,83$ $q = 1,19$
	$q = 1,7$		
	$q = 1,7 \frac{1-(1-2t/d)^3}{1-(1-2t/d)^4}$		
	$q = 1,5 \frac{1-(1-2t/d)^3}{1-(1-2t/d)^4}$		
Součinitel q je vztažen k vyznačené ose průřezu. Síly jsou kolmé k této ose.			

Tabulka 6 - Průřezový modul W_m hlavních vodičů s dvěma nebo více výstužnými vložkami mezi sousedními podpěrami převzato z [3]

Obdélníkové průřezy	W_m	Obdélníkové průřezy	W_m
	$0,867 c_s^2 b_s$		$3,48 c_s^2 b_s$
	$1,98 c_s^2 b_s$		$1,73 c_s^2 b_s$
Výstužné vložky jsou černé.			

3.2.4. Výpočet sil působících na podpěry

Ekvivalentní statická síla $F_{r,d}$, působící na podpěry tuhých vodičů se vypočítá následovně:

$$F_{r,d} = V_F \cdot V_{rm} \cdot \alpha \cdot F_{m3} \quad (27)$$

Součinitelé V_F , V_{rm} se berou podle tabulky 3. Součinitel α respektující počet podpěr se určí z tabulky 4.

Síla vypočítaná podle vztahu (27) nesmí překročit výdržnou hodnotu udávanou výrobcem podpěr.

3.2.5. Zvláštní zohlednění kmitání vodiče

Dle ČSN EN 60865-1 ed. 2 je v závislosti na vlastním kmitočtu vodiče obecně přípustné použít nižší hodnoty součinitelů $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_F , V_{rm} , V_{rs} než jsou maximální hodnoty odečtené z tabulky 3, zároveň ovšem tato norma stanoví, že ve všech případech, kromě trojfázového automatického opětovného zapínání, se použijí hodnoty $V_{rm} = 1$ a $V_{rs} = 1$.

Dále pak dle ČSN EN 61439-1 ed. 2, Příloha P (Ověření zkratové odolnosti struktur přípojnic srovnáním se zkoušeným referenčním návrhem provedeným výpočtem) se vždy použijí hodnoty $V_{\sigma m} = V_{\sigma s} = V_F = 1$.

4. Ověřování návrhu rozvaděče dle souboru norem ČSN EN 61439

Tato kapitola je věnována postupům použitelným pro ověření návrhu nového rozvaděče, tak jak je stanoví soubor norem ČSN EN 61439, a to zejména postupům pro ověření zkratové odolnosti.

4.1. Ověřování návrhu rozvaděče obecně

Při ověřování návrhu se zjišťuje, zda návrh rozvaděče odpovídá normativním požadavkům dle souboru norem ČSN EN 61439.

U spínacích přístrojů nebo součástí vestavěných do rozvaděče, které jsou v souladu s čl. 8.5.3 normy ČSN EN 61439-1 a byly nainstalovány dle pokynů výrobce, které jsou nadřazeny ČSN, není požadováno ověření dle norem výrobků. Zkoušky na jednotlivých přístrojích ovšem nejsou alternativou k ověření návrhu rozvaděče dle ČSN EN 61439-1.

Ověření návrhu se musí provést za použití jedné nebo více metod, podle toho, co přichází v úvahu. Metody zahrnují následující:

- Ověřovací zkoušení
- Ověřování srovnáním se zkoušeným referenčním návrhem
- Vyhodnocení ověřování

Zkoušky se musejí provádět na rozvaděči který je nový a dosud nebyl v provozu. Při provádění zkoušek může dojít k ovlivnění funkčních charakteristik rozvaděče, a proto se takové zkoušky nesmějí provádět na rozvaděčích, které mají být uvedeny do provozu.

Pro rozvaděč, který je ověřen dle ČSN EN 61439-1, ed. 2 původním výrobcem⁹ (dále jen PV) ale vyroben či smontován jiným výrobcem¹⁰ (dále jen JV), není potřeba provádět opakované ověření návrhu, v případě, že jsou v plném rozsahu splněny pokyny

⁹ Původní výrobce (PV) je organizace, která zhotovila původní návrh rozvaděče a jeho ověření v souladu s příslušnou normou pro rozvaděče.

¹⁰ Výrobce (jiný než PV) je organizace přebírající odpovědnost za hotový rozvaděč.

a požadavky specifikované PV. Pokud JV začlení do rozvaděče vlastní úpravy, které nejsou zahrnuty v původním ověření návrhu PV, je JV považován za PV ve vztahu k těmto úpravám.

Pro každý návrh rozvaděče musí být ověřeno následující:

- Konstrukce:
 - Pevnost materiálů a částí
 - Stupeň ochrany skříní
 - Vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty
 - Ochrana před úrazem elektrickým proudem a integrita ochranných obvodů
 - Vestavění spínacích přístrojů a součástí
 - Vnitřní elektrické obvody a spoje
 - Svorky pro vnější vodiče

- Funkční charakteristiky:
 - Dielektrické vlastnosti
 - Oteplení
 - Zkratová odolnost
 - Elmag. kompatibilita
 - Mech. činnost

Popsání všech zkoušek je mimo rámec této práce, a pozornost bude dále věnována pouze ověření návrhu rozvaděče na zkratovou odolnost.

4.2. Ověřování zkratové odolnosti

4.2.1. Jmenovité hodnoty proudů definované ČSN EN 61439-1 ed 2.

Jmenovitý proud I_n

je hodnota proudu stanovená výrobcem rozvaděče, který může být veden, aniž by oteplení různých částí části rozvaděče překročilo stanovené meze za specifikovaných podmínek. [1]

Jmenovitý dynamický proud I_{pk}

je hodnota nárazového zkratového proudu, stanovená výrobcem rozvaděče, kterou je možné vydržet za specifikovaných podmínek. [1]

Tato hodnota tedy musí být vyšší nebo rovna hodnotě nárazového zkratového proudu I_p , tak jak je patrná na obrázku 7.

Jmenovitý krátkodobý výdržný proud I_{cw}

je efektivní hodnota krátkodobého proudu, stanovená výrobcem rozvaděče, který může procházet bez poškození za specifikovaných podmínek, definovaných pomocí proudu a času. [1]

Jedná se tedy vlastně o proud I_k'' který obvodem protéká po krátkou dobu danou dobou vypnutí jistícího přístroje.

Jmenovitý podmíněný zkratový proud I_{cc}

je hodnota předpokládaného zkratového proudu, stanovená výrobcem rozvaděče, kterou je zařízení jistící před zkratem schopné vydržet po celkovou dobu provozu (dobu vypnutí) za specifikovaných podmínek. [1]

Jmenovitá hodnota I_{cc} jistícího přístroje musí být tedy rovna nebo větší jmenovité hodnotě I_{cw} rozvaděče.

4.2.2. Zkratová ochrana a zkratová odolnost

Všechny rozvaděče, které mají být uvedeny do provozu, musejí vydržet dynamická a tepelná namáhání, která vznikají při působení zkratových proudů, jež nepřesahují jmenovité hodnoty. Zároveň musejí být proti zkratovým proudům chráněny pomocí jističů či pojistek, které musejí splňovat podmínky na zkratovou odolnost dle ČSN EN 61439-1, čl. 9.3.2., 9.3.3. Pokud je v přívodní jednotce¹¹ rozvaděče použito zařízení jistící před zkratem, musí výrobce rozvaděče uvést maximální přípustnou

¹¹ Přívodní jednotka je funkční část rozvaděče, kterou je do rozvaděče přiváděna elektrická energie.

hodnotu předpokládaného zkratového proudu na vstupu do rozvaděče, resp. do tohoto přístroje. Nesmí být překročeny příslušné jmenovité hodnoty jmenovitého dynamického proudu¹², jmenovitého krátkodobého výdržného proudu¹³ a jmenovitého podmíněného zkratového proudu rozvaděče¹⁴.

4.2.3. Všeobecné požadavky

Musí se ověřovat zkratová odolnost udávaná PV. Ověřování se může provádět srovnáním s referenčním návrhem za použití seznamu či výpočtu, anebo zkouškou.

Rozvaděče se jmenovitým krátkodobým výdržným proudem nebo jmenovitým podmíněným zkratovým proudem do 10 kA včetně nemusejí být ověřovány, zrovna tak se ověření na zkratovou odolnost nevyžaduje u rozvaděčů chráněných zařízeními pro omezení zkratového proudu, jejichž omezený zkratový proud¹⁵ nepřesahuje 17 kA a pro pomocné obvody¹⁶ rozvaděčů, připojených k transformátorům se jmenovitým výkonem do 10 kVA při minimálním napětí na sekundární straně 110 V, respektive 1,6 kVA pro sekundární napětí menší než 110 V a jejichž impedance nakrátko nepřesahuje 4 %.

¹² Jmenovitý dynamický proud I_{pk} musí být roven nebo vyšší než hodnoty, které jsou stanoveny pro vrcholovou hodnotu předpokládaného zkratového proudu soustavy, k níž má být obvod připojen.

¹³ Jmenovitý krátkodobý výdržný proud I_{cw} musí být roven nebo větší než ef. hodnota předpokládaného zkratového proudu napájecí soustavy.

¹⁴ Jmenovitý podmíněný zkratový proud rozvaděče I_{cc} musí být roven nebo větší než ef. hodnota předpokládaného zkratového proudu po dobu trvání omezenou zařízením jisticím před zkratem.

¹⁵ Omezený zkratový proud je vrcholová hodnota proudu, který obvodem protéká v případě zkratu, a jehož hodnota je omezena jisticím přístrojem.

¹⁶ Pomocné obvody jsou všechny vodivé části rozvaděče zařazené do obvodu (ne hlavního), určené pro ovládání, signalizaci, regulaci, měření atd.

4.2.4. Ověřování srovnáním s ref. návrhem podle seznamu

Ověřování je prováděno srovnáním rozvaděče s již zkoušeným návrhem za použití tabulky 7.

Tabulka 7 - Ověření zkratové odolnosti konstrukčními pravidly ^{převzato z [1]}

Pol. č.	Požadavky, které je třeba vzít v úvahu	ANO	NE
1	Je jmenovitá hodnota zkratové odolnosti každého obvodu ROZVÁDĚČE, který má být hodnocen, menší než jmenovitá hodnota zkratové odolnosti referenčního návrhu nebo rovná této hodnotě?		
2	Jsou rozměry průřezu přípojnic a spojů každého obvodu ROZVÁDĚČE, který má být hodnocen, větší než rozměry průřezu přípojnic a spojů u referenčního návrhu nebo rovné těmto rozměrům?		
3	Je osová vzdálenost mezi přípojnicemi a spoji každého obvodu ROZVÁDĚČE, který má být hodnocen, větší než vzdálenosti mezi přípojnicemi a spoji u referenčního návrhu nebo rovné těmto vzdálenostem?		
4	Mají podpěry přípojnic každého obvodu ROZVÁDĚČE, který má být hodnocen, stejný typ, tvar a materiál a je mezi nimi stejná nebo menší osová vzdálenost na délce přípojnice jako u referenčního návrhu? A má montážní konstrukce pro podpěry přípojnic stejné provedení a mechanickou pevnost?		
5	Jsou materiály a vlastnosti materiálů vodičů každého obvodu ROZVÁDĚČE, který má být hodnocen, stejné jako u referenčního návrhu?		
6	Jsou zařízení jistící před zkratem každého obvodu ROZVÁDĚČE, který má být hodnocen, ekvivalentní, to znamená stejné značky a série ^a se stejnými nebo lepšími omezovacími charakteristikami (I^2t , I_{pk}) založenými na údajích výrobce zařízení, a se stejným uspořádáním jako u referenčního návrhu?		
7	Je délka nechráněných živých vodičů podle 8.6.4 každého nechráněného obvodu ROZVÁDĚČE, který má být hodnocen, menší nebo stejná jako u referenčního návrhu?		
8	Pokud ROZVÁDĚČ, který má být hodnocen, zahrnuje skříň, zahrmoval referenční návrh skříň, když byl ověřován zkouškou?		
9	Je skříň ROZVÁDĚČE, který má být hodnocen, stejného provedení, typu, a má přinejmenším stejné rozměry skříň jako u referenčního návrhu?		
10	Mají prostory každého obvodu ROZVÁDĚČE, který má být hodnocen, stejné mechanické provedení a přinejmenším stejné rozměry jako u referenčního návrhu?		
„ANO“ týkající se všech požadavků – nepožaduje se žádné další ověřování.			
„NE“ týkající se kteréhokoliv požadavku – požaduje se další ověřování.			
^a Zařízení jistící před zkratem stejného výrobce, avšak jiné série mohou být považována za ekvivalentní, jestliže výrobce zařízení uvede, že pracovní charakteristiky jsou stejné nebo lepší ve všech relevantních ohledech jako u série použité pro ověřování, např. vypínací schopnost a omezovací charakteristiky (I^2t , I_{pk}), a kritické vzdálenosti.			

Pokud by kterýkoli prvek určený v tabulce výše neodpovídal příslušným požadavkům a byl označen jako „NE“, musí se přistoupit k ověřování srovnáním s referenčním návrhem pomocí výpočtu (ČSN EN 61439-1 ed. 2, čl. 10.11.4) nebo ověřování zkouškou (ČSN EN 61439-1 ed. 2, čl. 10.11.5).

4.2.5. Ověřování zkouškou

Uspořádání

Při ověřování zkouškou musí být rozvaděč nebo jeho části namontovány jako při běžném provozu. Pokud se rozvaděč skládá z více funkčních jednotek¹⁷ o stejné konstrukci, postačí, aby zkoušena byla pouze jedna tato jednotka. Totéž platí i pro přípojnice¹⁸ – stačí zkoušet pouze jednu konfiguraci přípojníc, pokud ostatní konfigurace přípojníc mají totožnou konstrukci.

Všeobecně o provádění zkoušky

Pokud jsou ve zkoušeném obvodu zařazeny pojistky, musí být použity vložky s maximální hodnotou proudu. Napájecí vodiče a spoje nakrátko použité při zkoušce musejí mít dostatečnou pevnost, aby odolali působení zkratových proudů a zároveň musí být jejich uspořádání takové, aby nezpůsobovalo žádné další namáhání zkoušeného rozvaděče. Zkušební obvod musí být připojen na vstupní svorky zkoušeného rozvaděče, pokud je rozvaděč trojfázový, musí být připojen trojfázově. Skříň a další části zařízení, které jsou při běžném provozu připojeny k ochrannému vodiči musejí být zapojeny následovně:

- U rozvaděčů vhodných pro používání v trojfázových čtyřvodičových sítích s uzemněným středem hvězdy k nulovému bodu napájení.
- U rozvaděčů, které jsou vhodné pro používání v trojvodičových i čtyřvodičových trojfázových sítích k fázovému vodiči, u nějž je nejmenší pravděpodobnost vzniku oblouku k zemi.

Zapojení dle bodů výše musí zahrnovat tavný prvek v podobě měděného drátu o průměru 0,8 mm a délce nejméně 50 mm pro zjišťování poruchového proudu. Poruchový proud v obvodu s tavným prvkem musí být $1500 \text{ A} \pm 10 \%$. Pokud je poruchový proud potřeba na tuto hodnotu omezit, použije se rezistor.

¹⁷ Funkční jednotka je část rozvaděče se všemi elektrickými a mechanickými prvky, včetně přístrojů, které se podílejí na splnění téže funkce.

¹⁸ Přípojnice je vodič s nízkou impedancí, sloužící k připojení dalších samostatných elektrických obvodů

Zkouška hlavních obvodů

Obecně

Zkoušení hlavních silových obvodů¹⁹ musí být prováděno s největším tepelným a dynamickým namáháním, vzniklým působením zkratových proudů, až do jmenovitých hodnot pro jednu nebo více následujících podmínek stanovených PV.

- Nezávisle na jisticím přístroji – rozvaděč musí být zkoušen jmenovitým dynamickým proudem a jmenovitým krátkodobým výdržným proudem po stanovenou dobu trvání.
- Závisle na jisticím přístroji umístěném v rozvaděči – rozvaděč musí být zkoušen přírodním předpokládaným zkratovým proudem po dobu, která je omezena přírodním jisticím přístrojem.
- Závisle na předřazeném jisticím přístroji – rozvaděč musí být zkoušen propuštěnou hodnotou zkratového proudu dovolenou předřazeným jisticím přístrojem

Pokud je na přívodu nebo vývodu rozvaděče jisticí prvek, omezující vrcholovou hodnotu anebo dobu působení zkratového proudu, zkouší se obvod tak, aby přístroj mohl působit a přerušit poruchový proud. V případě nastavitelné zkratové spouště přístroje je tato nastavena na maximální hodnoty stanovené výrobcem.

Zkoušení výstupních obvodů

Výstupní svorky výstupních obvodů jsou při zkoušce opatřeny šroubovým zkratovým spojem. Pro jističe se jmenovitým proudem do 630 A pak musí být součástí zkušebního obvodu vodič délky 0,75 m s průřezem voleným dle jmenovitého proudu, viz tabulky 8 a 9.

¹⁹ Hlavním obvodem jsou myšleny všechny vodivé části rozvaděče zařazené do obvodu určeného pro přenos elektrické energie.

Tabulka 8 - Měděné zkušební vodiče pro jmenovité proudy do 400 A převzato z [1]

Rozsah zkušebního proudu ¹⁾		Velikost vodiče ^{2), 3)}	
		mm ²	AWG/MCM
0	8	1,0	18
8	12	1,5	16
12	15	2,5	14
15	20	2,5	12
20	25	4,0	10
25	32	6,0	10
32	50	10	8
50	65	16	6
65	85	25	4
85	100	35	3
100	115	35	2
115	130	50	1
130	150	50	0
150	175	70	00
175	200	95	000
200	225	95	0000
225	250	120	250
250	275	150	300
275	300	185	350
300	350	185	400
350	400	240	500

¹⁾ Hodnota zkušebního proudu musí být větší, než je první hodnota v prvním sloupci, a menší než druhá hodnota v tomto sloupci nebo rovná druhé hodnotě v tomto sloupci.

²⁾ Kvůli usnadnění zkoušení a se souhlasem výrobce mohou být použity menší vodiče než ty, které jsou uvedeny pro stanovený zkušební proud.

³⁾ Může být použit kterýkoliv ze dvou vodičů stanovených pro daný rozsah zkušebního proudu.

Tabulka 9 - Měděné zkušební vodiče pro proudy od 400 A do 4000 A převzato z [1]

Rozsah jmenovitého proudu ^a	Zkušební vodiče			
	Kabely		Měděné přípojnice ^b	
	Počet	Průřez mm ²	Počet	Rozměry mm (š × h)
400 až 500	2	150	2	30 × 5
500 až 630	2	185	2	40 × 5
630 až 800	2	240	2	50 × 5
800 až 1 000			2	60 × 5
1 000 až 1 250			2	80 × 5
1 250 až 1 600			2	100 × 5
1 600 až 2 000			3	100 × 5
2 000 až 2 500			4	100 × 5
2 500 až 3 150			3	100 × 10
3 150 až 4 000			4	100 × 10

^a Hodnota jmenovitého proudu musí být větší než první hodnota a menší než druhá hodnota nebo rovná této hodnotě.

^b Předpokládá se, že přípojnice budou uspořádány s dlouhými čelními plochami (W) svislými. Uspořádání s dlouhými čelními plochami horizontálními může být použito, je-li specifikováno výrobcem. Přípojnice mohou být natřeny.

Spínací přístroj je pak sepnut a udržován v zapnuté poloze jako v obvyklém provozu. Zkušební napětí je přiloženo jednou, a to po dobu dostatečně dlouhou, aby došlo k vybavení přístroje jistícího před zkratem na vývodu, a bezpodmínečně minimálně po dobu trvání deseti period nebo v případě, kdy výstupní obvod není opatřen zařízením chránícím proti zkratu, je přikládáno zkušební napětí s amplitudou a dobou trvání stanovenou pro přípojnice PV.

Zkoušení přívodního obvodu a hl. přípojnic

Pokud rozvaděč obsahuje hlavní přípojnice²⁰, musí být zkoušena jejich zkratová odolnost a zároveň zkratová odolnost přívodního obvodu, který musí zahrnovat nejméně jeden spoj, kde mají být přípojnice rozšiřitelné. Místo zkratu musí být voleno tak, aby délka hlavní přípojnice zahrnuté do zkoušky byla $2\text{ m} \pm 0,4\text{ m}$. Pokud je rozvaděč navržen s přípojnicemi kratšími než 1,6 m a rozvaděč není určen k rozšíření, musí být zkoušena celá délka přípojnic, zkrat je tudíž proveden na konci přípojnic. Pokud je přípojnicová konfigurace složena z více polí s různými průřezy, osovými vzdálenostmi mezi přípojnicemi nebo s rozdílnými typy a počty podpěr, musí být zkouška provedena zvláště na každém poli, pokud jsou ale splněny podmínky výše, mohou být všechna pole zkoušena současně.

Zkoušení spojů k vývodním jednotkám

Jestliže rozvaděč obsahuje vodiče (resp. distribuční přípojnice²¹) mezi hlavní přípojnicí a vývodními funkčními jednotkami²², musí být na jednom obvodu každého typu provedena doplňující zkouška. Tato zkouška nemusí být provedena, pokud jsou vodiče umístěny tak, že zkrat mezi fázemi, případně mezi fází a zemí, je jen velmi málo pravděpodobný a pokud jejich délka nepřesahuje 3 m. Příklady vodičů a instalací, které splňují výše uvedené, jsou přehledně uspořádány v tabulce 10.

²⁰ Hlavní přípojnice je přípojnice, ke které se připojují distribuční přípojnice anebo přímo přívodní/vývodní jednotky.

²¹ Distribuční přípojnice je přípojnice uvnitř jednoho pole, připojená k hl. přípojnici a sloužící k napájení vývodních jednotek.

²² Vývodní jednotka slouží k napájení jednoho či více výstupních obvodů.

Zkrat pro tuto zkoušku je realizován šroubovými propoji co nejbližše svorkám vývodní jednotky. Velikost a doba působení zkratového proudu je při této zkoušce stejná jako pro hlavní přípojnice.

Tabulka 10 - Typy vodičů a požadavky na jejich instalaci převzato z [1]

Typ vodiče	Požadavky
Holé vodiče nebo jednožilové vodiče se základní izolací, např. kabely podle IEC 60227-3	Vzájemnému dotyku nebo dotyku vodivých částí je nutno zabránit, např. použitím rozpěrek
Jednožilové vodiče se základní izolací a maximální přípustnou pracovní teplotou vodičů nejméně 90 °C, např. kabely podle IEC 60245-3, nebo kabely s termoplastickou izolací (PVC) odolné proti teplotě podle IEC 60227-3	Vzájemný dotyk nebo dotyk vodivých částí je dovolen tam, kde nepůsobí žádný vnější tlak. Dotyku ostrých hran je nutno zabránit. Tyto vodiče mohou být zatěžovány pouze tak, aby nebyla překročena pracovní teplota, která je 80 % maximální přípustné pracovní teploty vodičů
Vodiče se základní izolací, např. kabely podle IEC 60227-3, které mají přídatnou sekundární izolaci, např. kabely jednotlivě opatřené smršťovacím povlakem nebo kabely jednotlivě uložené v plastových instalačních trubkách	Žádné doplňující požadavky
Vodiče izolované materiálem s velmi vysokou mechanickou pevností, např. s izolací ethylen-tetrafluorethylen (ETFE), nebo dvojité izolované vodiče se zesíleným vnějším pláštěm dimenzované pro používání do 3 kV, např. kabely podle IEC 60502	
Jednožilové nebo vícežilové opláštěné kabely, např. kabely podle IEC 60245-4 nebo IEC 60227-4	

Zkoušení nulového vodiče

Pokud je v rozvaděči nulový vodič, musí se provést zkouška prokazující jeho zkratovou odolnost vzhledem k nejbližšímu fázovému vodiči. Zkrat mezi fází a nulovým vodičem je proveden stejně jako při zkoušce přívodního obvodu a hlavních přípojnic viz část „Zkoušení přívodního obvodu a hl. přípojnic“.

Hodnota zkušebního proudu při trojfázové zkoušce musí dosahovat nejméně 60 % proudu v jedné fázi. Tato hodnota může být upravena na základě dohody PV a uživatele. Zkouška nemusí být provedena, pokud má být nulový vodič zkoušen na 60 % fázového proudu a pokud jsou splněny následující podmínky:

- Nulový vodič má stejný tvar a průřez jako fázové vodiče.
- Nulový vodič je upevněn stejným způsobem jako fázové vodiče.
- Body upevnění nulového vodiče jsou ve vzdálenosti stejné nebo menší než u fázových vodičů.
- Vzdálenost nulového vodiče od nejbližšího fázového vodiče je stejná nebo větší než vzdálenost mezi fázovými vodiči.
- Vzdálenost nulového vodiče od uzemněných částí není menší než u fázových vodičů.

Parametry zkratového proudu

Pro všechny jmenovité hodnoty zkratové odolnosti musí být ověřena odolnost proti dynamickým a tepelným namáháním. Pokud je použito ochranné zařízení, je hodnota proudu na jeho napájecí straně volena dle jmenovitého krátkodobého výdržného proudu, jmenovitého dynamického proudu, nebo určeného jmenovitého podmíněného zkratového proudu.

Hodnota přiřádaného zkušební napětí musí být rovna 1,05násobku jmenovitého provozního napětí, hodnota zkušební proudu se pak určuje z kalibračního oscilogramu, který je sejmuto při zkratovaných napájecích vodičích rozvaděče, kdy zkratový spoj se zanedbatelnou impedancí umístěn co nejbližší vstupu napájení do rozvaděče. Oscilogramem se prokáže, že existuje konstantní hodnota proudu, měřitelná po specifikovanou dobu trvání zkoušky. Hodnota tohoto kalibračního proudu se pak určuje jako průměr efektivních hodnot ve všech fázích a jeho velikost musí být rovna jmenovité hodnotě zkratového proudu rozvaděče s tolerancí 0 % až + 5 %. Zkoušky musejí být prováděny při jmenovitém kmitočtu rozvaděče s tolerancí ± 25 %. Hodnoty účinníku pro zkoušky uvedeny v tabulce 11 musejí být dodrženy s tolerancí 0,00 až -0,05.

Tabulka 11 - Hodnoty účinníku podle velikosti zkratového proudu ^{převzato z [1]}

Efektivní hodnota zkratového proudu kA	cos φ
$I \leq 5$	0,7
$5 < I \leq 10$	0,5
$10 < I \leq 20$	0,3
$20 < I \leq 50$	0,25
$50 < I$	0,2

Zkouška při jmenovitém podmíněném zkratovém proudu I_{cc}

Bez ohledu na umístění ochranných zařízení (v přívodním obvodu či kdekoli jinde), musí být zkušební napětí přiloženo po dobu dostatečně dlouhou, aby mohlo dojít k zapůsobení zařízení chránících před zkratem a v každém případě nejméně po dobu deseti period.

Zkouška se provádí napětím s hodnotou rovnou 1,05násobku jmenovitého pracovního napětí. Zkoušení s nižším napětím není přípustné. Zkouší se s předpokládanými zkratovými proudy, které musejí být na straně napájení rovny hodnotě jmenovitého podmíněného zkratového proudu.

Zkouška při jm. krátkodobém výdržném proudu a jm. dynam. proudu

Pro tuto zkoušku musí být ověřena odolnost proti dynamickým a tepelným namáháním předpokládaným jmenovitým krátkodobým výdržným proudem a jmenovitým dynamickým proudem. Proud se přikládá po specifikovanou dobu a jeho efektivní hodnota musí být po tuto dobu konstantní.

Možné modifikace parametrů při zkouškách

Pokud nastane případ, že vzhledem k dostupnému vybavení zkušebny není možné provést zkoušku při krátkodobém výdržném proudu nebo dynamickém proudu při požadované hodnotě napětí (1,05násobek provozního napětí), mohou být zkoušky přírodních obvodů a hlavních přípojnic, spojů k napájení vývodních jednotek a zkouška nulového vodiče provedeny při jakémkoli jiném vhodném napětí, pokud je k tomu udělen souhlas PV. Hodnota zkušebního proudu musí být dodržena a musí být tedy rovna krátkodobému výdržnému nebo dynamickému proudu. Skutečnost, že byla zkouška provedena s jiným napětím, musí být uvedena ve zkušebním protokolu. Jestliže během zkoušky dojde k okamžitému rozepnutí kontaktů některého ochranného zařízení, je zkouška neplatná a musí být provedena s maximálním pracovním napětím.

Dále je možné upravit dobu zkoušky, potom je ale třeba změnit i hodnotu zkušebního proudu, a to tak aby byla zachována rovnost $I^2t = konstanta$. Tato modifikace je možná za předpokladu, že bez souhlasu PV vrcholová hodnota proudu nepřesáhne hodnotu jmenovitého dynamického proudu a že efektivní hodnota krátkodobého proudu nebude nižší než jmenovitá hodnota alespoň v jedné fázi po dobu minimálně 0,1 s po zavedení proudu.

Zkoušky při dynamickém proudu a při krátkodobém výdržném proudu se mohou provádět odděleně, v takovém případě musí být doba, po kterou působí zkratový proud při zkoušce dynamickým proudem taková, aby hodnota I^2t nepřekročila hodnotu při zkoušce krátkodobým proudem. Tato doba ovšem nesmí být kratší než trvání tří period.

Výsledky, kterých se má při zkouškách dosáhnout

Je možné, že vlivem zkoušky dojde k deformaci přípojnic a ostatních vodičů, tato deformace je přípustná, pokud jsou stále dodrženy povrchové cesty²³ a vzdušné vzdálenosti²⁴, jak předepisuje ČSN EN 61439-1 ed. 2, čl. 8.3, resp. příloha F této normy.

Vlastnosti izolace musí zůstat nezměněny tak, aby stále splňovaly normativní požadavky. Rovněž nesmí dojít k destrukci (rozdělení na dva či více kusů) ani poškození (trhliny včetně povrchových) žádného izolátoru, podpěry přípojnic nebo úchyty kabelu. V případě pochybností o zachování izolačních vlastností rozvaděče musí být provedena doplňující zkouška při dvojnásobku jmenovitého pracovního napětí průmyslového kmitočtu 50 Hz, nejméně však s hodnotou 1000 V dle ČSN EN 61439-1 ed. 2, čl. 10.9.2.

V žádném případě nesmí dojít k oddělení vodičů od výstupních svorek ani k oddělení částí, sloužících k připojení vodičů. Deformace přípojnic či konstrukce rozvaděče narušující obvyklé používání a normální zasouvání či vysouvání odnímatelných částí je považována za poruchu.

Deformace skříně, vnitřních mezistěn, přepážek, anebo zábran je přípustná, pokud nesnižuje stupeň ochrany a pokud vzdušné a povrchové cesty nejsou zkráceny na nepřípustné hodnoty, viz ČSN EN 61439-1 ed. 2, čl. 8.3.

Po zkouškách, při nichž byla součástí zkoušeného obvodu i zařízení jistící před zkratem, musí být tato zařízení podrobena dielektrické zkouše dle ČSN EN 61439-1 ed. 2, čl. 10.9.2 hodnotou napětí pro stav „po zkoušce“, který je předepsaný v příslušné normě pro zařízení jistící před zkratem. Dielektrická zkouška se provádí takto:

- Mezi všemi živými částmi rozvaděče
- Mezi každým pólem a všemi ostatními póly připojenými k neživým částem rozvaděče

Dielektrická zkouška se provádí s vyměněnými pojistkovými vložkami a sepnutými spínacími přístroji, a pokud je použit tavný prvek popsany v části „Všeobecně o provádění zkoušky“, nesmí tento indikovat poruchový proud.

²³ Povrchová cesta je nejkratší vzdálenost mezi dvěma vodivými částmi po povrchu pevného izolantu

²⁴ Vzdušná vzdálenost je vzdálenost mezi dvěma vodivými částmi podél vlákna nataženého nejkratší cestou mezi těmito částmi

Zkoušení ochranného obvodu²⁵

Obecně

Zkouška se provádí pomocí jednofázového zkušebního zdroje. Zdroj se připojí k přívodní svorce jedné fáze a přívodní svorce pro ochranný vodič. Zkouška se pak provádí pro každou typickou vývodní jednotku. Zkrat se provádí šroubovým spojem mezi výstupní svorkou příslušné fáze a výstupní svorkou pro ochranný vodič. Každá výstupní jednotka, na které je prováděna zkouška musí být osazena stanoveným zařízením chránícím proti zkratu.

Konstrukce rozvaděče musí být při této zkoušce instalována tak, aby byla izolovaná od země. Hodnota zkušebního proudu v ochranném vodiči při zkoušce musí dosahovat nejméně 60 % proudu v jedné fázi. Tato hodnota může být upravena na základě dohody PV a uživatele. Zkušební napětí musí mít hodnotu 1,05násobku jmenovitého pracovního napětí²⁶.

Výsledky zkoušky

Spojitosť ochranného obvodu nesmí být v důsledku zkoušky narušena. To se ověří vizuální prohlídkou a případně měřením proudem, který má řádově velikost jmenovitého proudu příslušné vývodní jednotky. Deformace skříně, vnitřních mezistěn, přepážek, anebo zábran je přípustná, pokud nesnižuje stupeň ochrany a pokud vzdušné a povrchové cesty nejsou zkráceny na nepřípustné hodnoty, viz ČSN EN 61439-1 ed. 2, čl. 8.3.

4.2.1. Ověřování srovnáním s ref. návrhem pomocí výpočtu

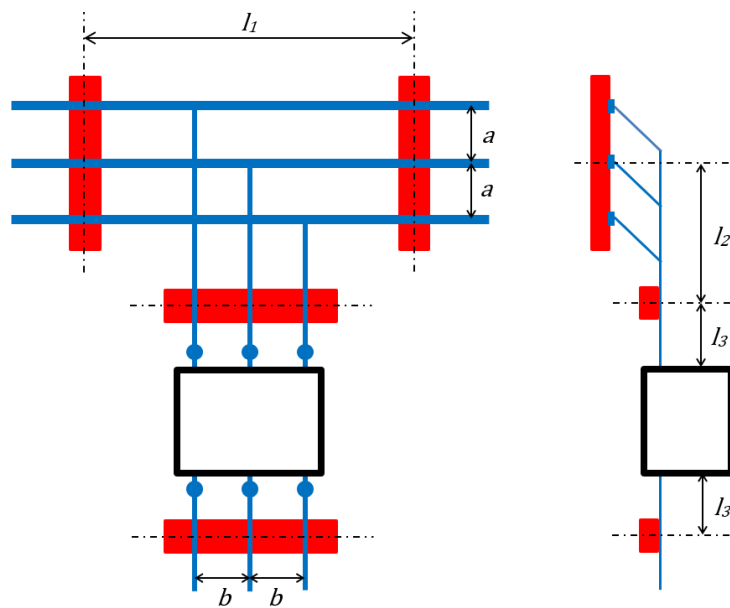
Hodnocení jmenovitého krátkodobého výdržného proudu rozvaděče a jeho obvodů výpočtem musí být provedeno srovnáním s rozvaděčem, který již prošel ověřením zkouškou. Ověření hlavních obvodů rozvaděče se musí provádět dle přílohy P normy ČSN EN 61439-1 ed. 2. a navíc musí rozvaděč splňovat body 6, 8, 9 a 10 uvedené

²⁵ Zkoušením ochranného obvodu je myšleno zkoušení ochranného vodiče nebo rámové konstrukce, pokud ochranný vodič není přítomen.

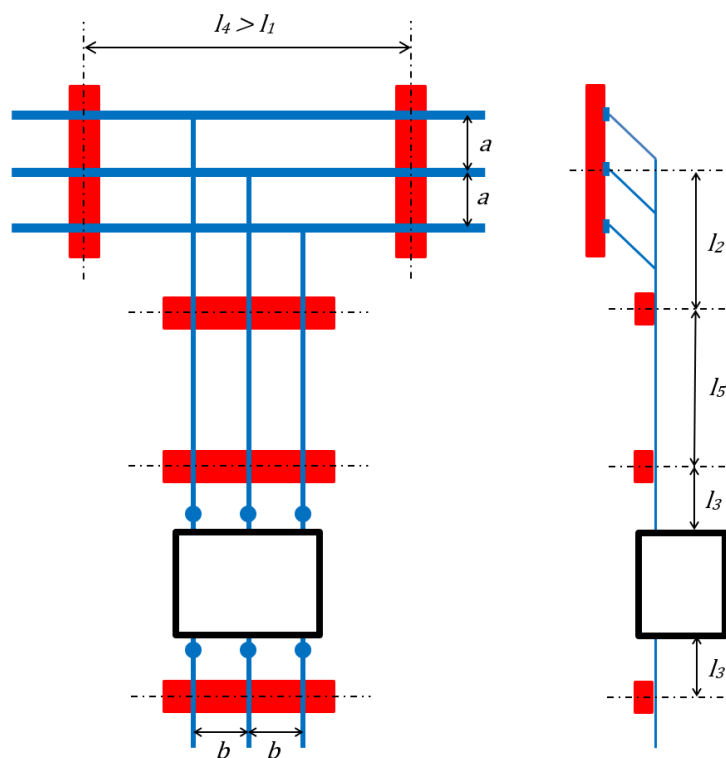
²⁶ Jedná se o hodnotu napětí jedné fáze proti zemi.

v tabulce 7. Postupy výpočtů podle IEC 60865-1 resp. ČSN EN 60865-1 ed.2. jsou pak definovány v kapitole 3.

Výpočty se provádějí jak pro již zkušební referenční návrh (příklad viz obrázek 16), tak pro návrh, který má být ověřen (příklad viz obrázek 17). Zkratová odolnost ověřovaného návrhu je pak považována za ověřenou, pokud výsledky ukáží, že ověřovaná konfigurace nemusí vydržet vyšší mechanická a tepelná namáhání než odzkoušená referenční konfigurace. Pokud rozvaděč neprojde hodnocením srovnání s ref. návrhem dle přílohy P normy ČSN EN 61439-1 ed. 2, musí být ověřen zkouškou.

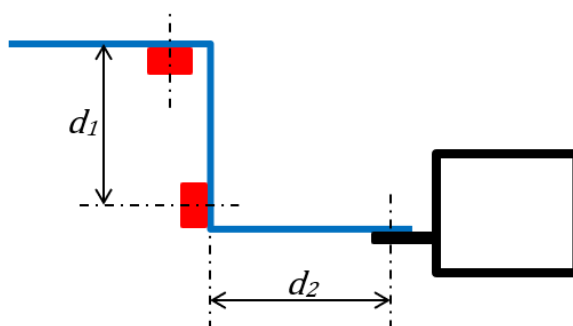


Obrázek 16 - Zkoušená struktura přípojnic podle [1]



Obrázek 17 - Nezkoušená struktura přípojníc podle [1]

Výpočty podle IEC 60865-1 resp. ČSN EN 60865-1 ed. 2, které jsou uvedeny v kapitole 3 je možno použít pouze pro přímé konfigurace přípojníc, pokud jsou však podpěry použity v rozích, je možné úhlové konfigurace považovat za soustavu přímých konfigurací, např. jako na obrázku 18.



Obrázek 18 - Úhlová konfigurace podle [1]

5. Praktické provedení rozvaděčů NN

Jak již napovídá nadpis, je v této kapitole pozornost věnována praktickému provedení rozvaděčů NN zejména z hlediska zkratové odolnosti a jsou popsány nejdůležitější části přípojnicových systémů, používaných v rozvaděčích NN.

Dále jsou pak popsány konfigurace rozvaděčového systému xEnergy Main firmy Eaton ověřené zkouškou dle ČSN EN 61439 na jejichž základě jsou prováděny ověřovací výpočty v programu E-VERIFIC, který je hlavním předmětem této diplomové práce.

5.1. Provedení rozvaděčů NN s ohledem na zkratovou odolnost

V rozvaděčových sestavách se bez ohledu na výrobce používají systémy hlavních a distribučních přípojníc a případně a vstupní / výstupní přípojnice. Nákres typického rozvaděčového pole s přípojnicovým systémem se dvěma výstupními jednotkami je vyobrazen na obrázku 19.

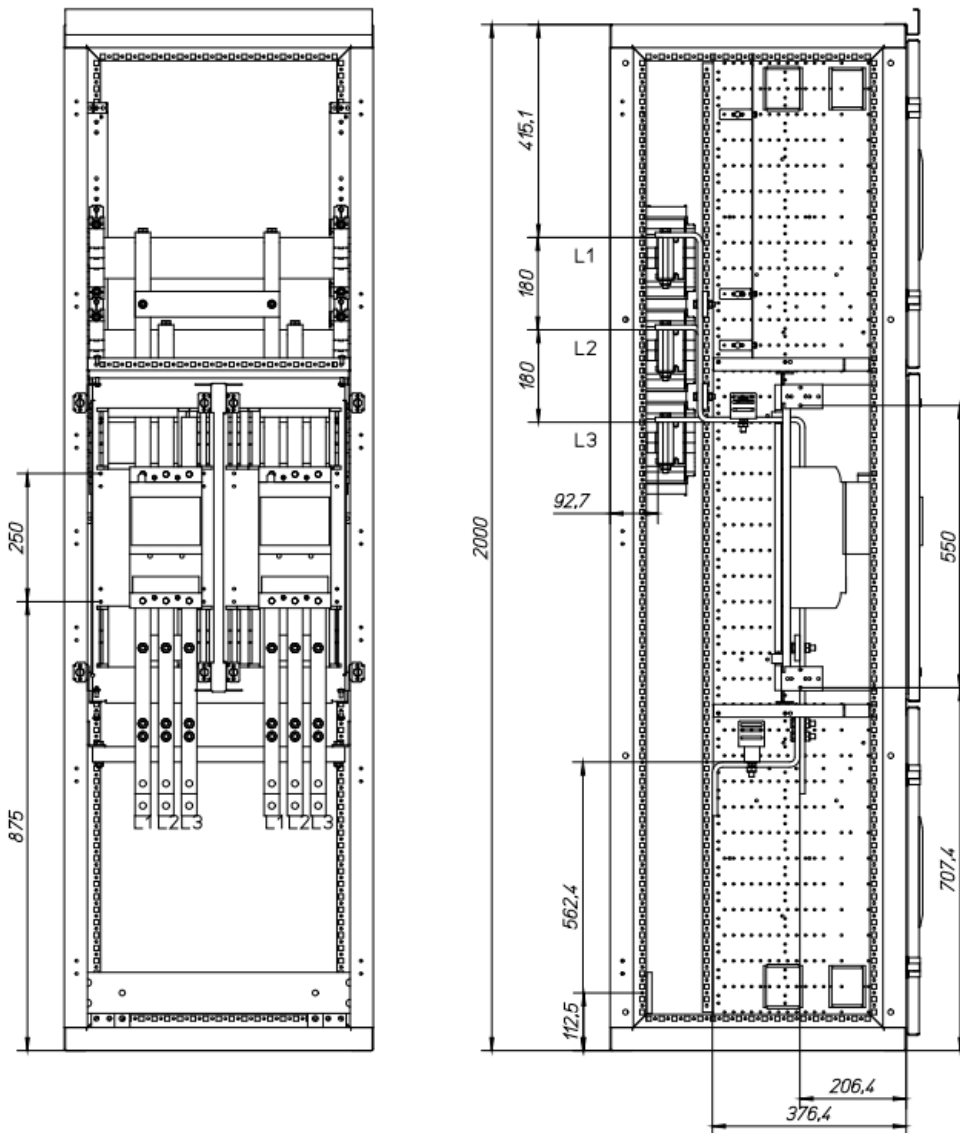
Hlavní přípojnice procházejí celým rozvaděčem a rozvádějí elektřinu ze vstupního pole do výstupních polí. Musejí být nadimenzovány jednak na jmenovitý provozní proud rozvaděče, který je zpravidla dán jmenovitou hodnotou proudu vstupního přístroje, a pak také na jmenovitý dynamický zkratový proud I_{pk} a jmenovitý krátkodobý výdržný proud I_{cw} .

Distribuční přípojnice jsou v podstatě odbočky z hlavních přípojníc k vývodním jednotkám. Jejich průřez se volí dle jmenovitého proudu jistícího přístroje osazeného v dané výstupní jednotce a rovněž musejí odolat působení jmenovitého dynamického zkratového proudu I_{pk} a jmenovitého krátkodobého výdržného proudu I_{cw} .

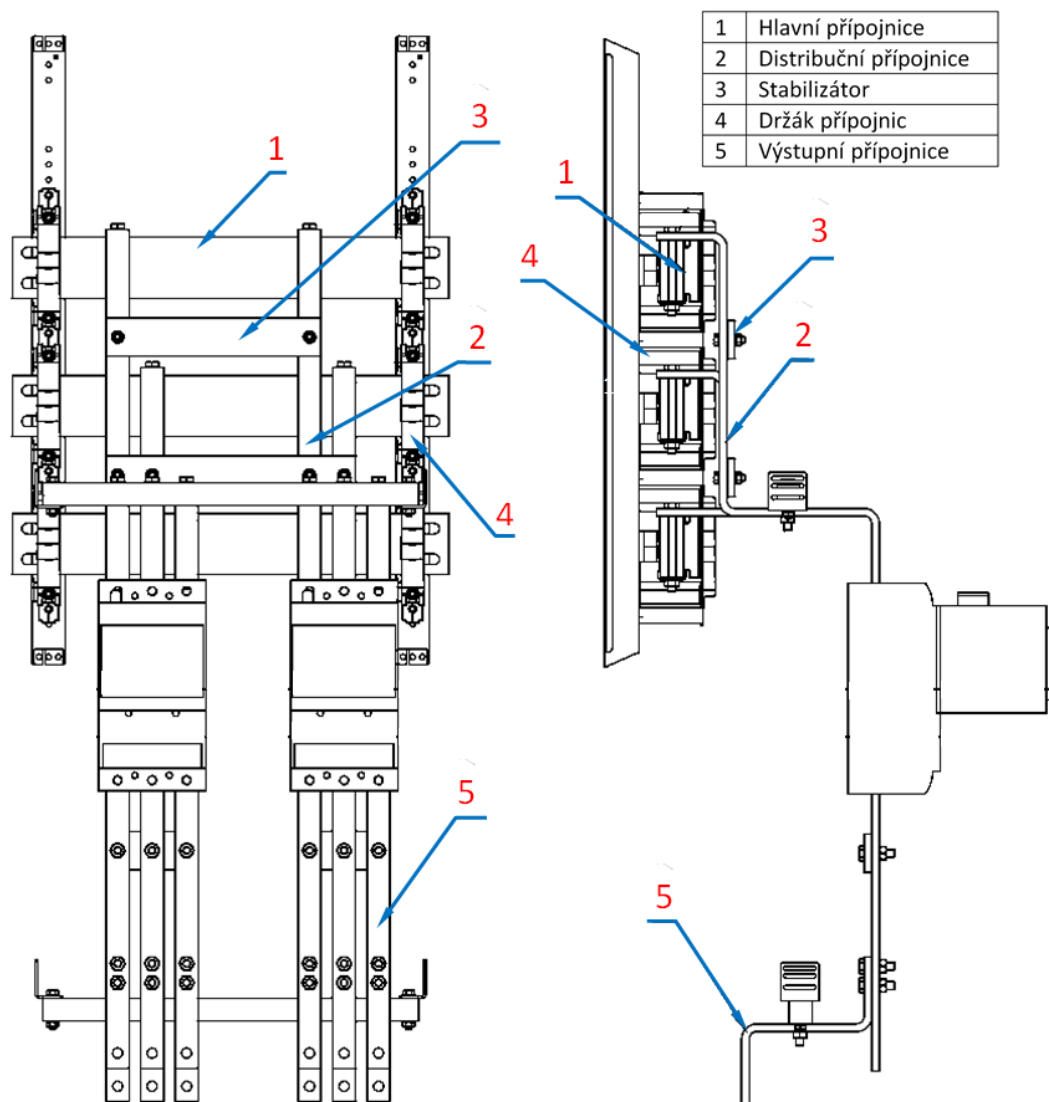
Vstupní přípojnice jsou přípojnice, napájené přívodním kabelem, na které je připojen vstupní přístroj (hlavní vypínač) rozvaděče. Výstupní přípojnice jsou přípojnice napájené z vývodní jednotky, na které je poté napojen příslušný obvod. Pro oboje platí stejné podmínky jako pro hlavní a distribuční přípojnice.

Přípojnice jsou uchyceny na držácích nebo podpěrách z izolačního materiálu, které zajišťují nevodivé oddělení od konstrukce rozvaděče a oddělení přípojníc mezi sebou navzájem. Držáky přípojníc musejí být navrženy tak, aby celý přípojnicový systém odolal dynamickým silám a tepelnému namáhání, které na přípojnice působí při průchodu

zkratového proudu. To znamená, že držáky musejí vykazovat dostatečnou mechanickou pevnost a teplotní odolnost přičemž vzdálenost mezi nimi musí být volena tak, aby nebylo překročeno maximální dovolené namáhání přípojníc. Zkratová odolnost celého systému se zvyšuje pomocí stabilizátorů, které nevodivě propojují jednotlivé přípojnice navzájem. Jednotlivé výše popsané části jsou patrné na obrázku 20.



Obrázek 19 – Rozvaděčové pole s přípojnicovým systémem převzato z [10]



Obrázek 20 – Přípojnicový systém a jeho části převzato z [10]

5.2. Rozvaděčové systémy ověřené původním výrobcem

Jak je již nastíněno v kapitole 4.1, při výrobě rozvaděče jiným výrobcem není třeba provádět ověření návrhu, pokud původní výrobce provedl ověření dle ČSN EN 61439-1, ed. 2, a pokud jiný výrobce dodrží veškeré pokyny a požadavky pro výrobu rozvaděče, které udává původní výrobce.

Z tohoto důvodu nechávají firmy, zabývající se výrobou a prodejem komponent pro výrobu rozvaděčových systémů nazkoušet některé typické konfigurace, které je buďto možno přímo aplikovat, nebo od kterých pak lze podle předepsaných pravidel odvozovat další varianty bez nutnosti jejich zkoušení.

Firma Eaton má nazkoušený rozvaděčový systém xEnergy Main, jehož zkoušené konfigurace jsou popsány dále.

5.2.1. Rozvaděčový systém Eaton xEnergy Main

Systém xEnergy Main je systém skříňových rozvaděčů NN se jmenovitým proudem do 7100 A, které mohou být použity jednak jako samostatné rozvaděče, ale také mohou být řazeny vedle sebe a tvořit velké rozvodny, jako například na obrázku 21.



Obrázek 21 – Sestava rozvaděčů systému xEnergy Main převzato z [9]

V závislosti na charakteru pracovního prostředí je možno volit rozvaděče v provedení s krytím IP31 nebo IP55. Skříňe jsou vyráběny s výškou 2000 mm a v šířkách čítajících 425, 600, 800, 850, 1000, 1100, 1200 nebo 1350 mm.

Systém xEnergy Main je možno provozovat v sítích typu TN-C, TN-C-S, TN-S, TT a IT. Rozvaděče jsou typově nazkoušené s trojpólovými a čtyřpólovými jisticími přístroji firmy Eaton v souladu se souborem norem ČSN EN 61439.

5.2.2. Konfigurace XP systému xEnergy Main nazkoušené dle ČSN EN 61439

Na základě dále uvedených rozvaděčových konfigurací je možno pomocí programu, který je součástí diplomové práce, ověřovat výpočtem zkratovou odolnost vlastních návrhů rozvaděčů podle ČSN EN 61439.

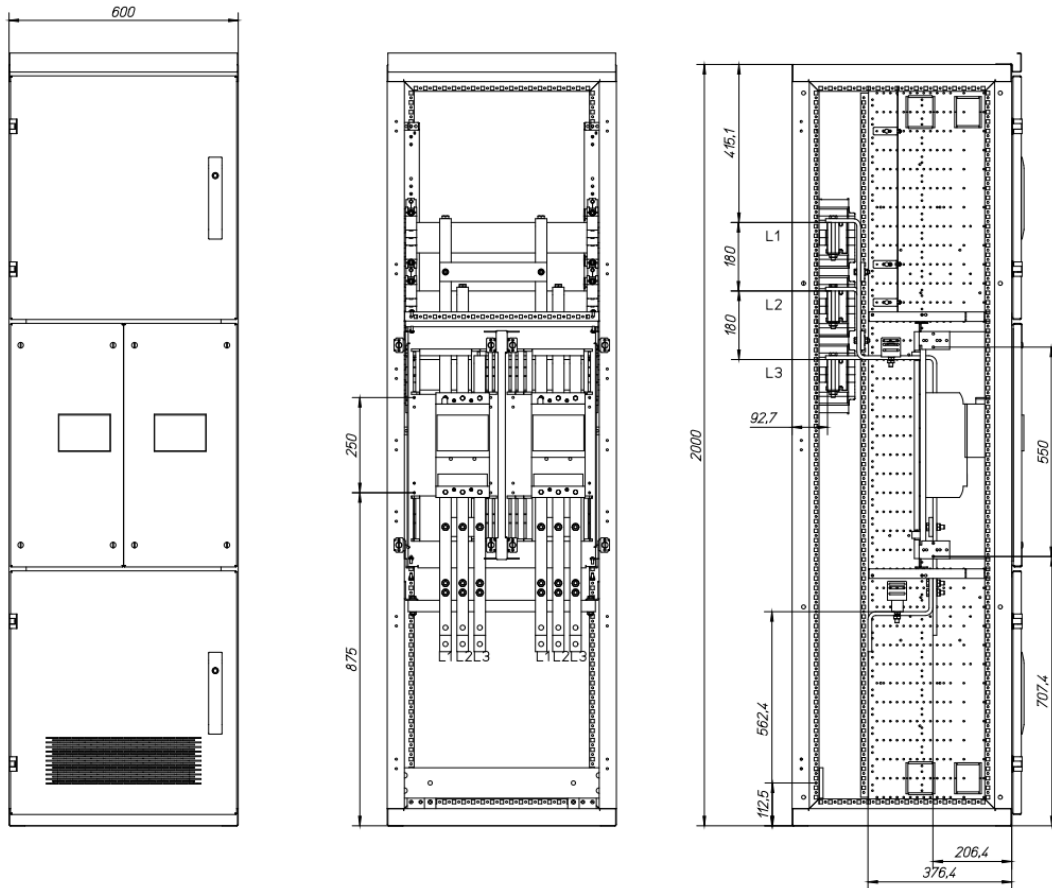
Popisované rozvaděče jsou provedeny jako varianta XP systému xEnergy Main. Varianta XP představuje vstupní nebo výstupní silová pole nazkoušená s trojpolovými nebo čtyřpolovými vzduchovými jističi série IZM 63, IZMX 16/40 a jističi NZM3/4 v pevném nebo výsuvném provedení s proudovým rozsahem od 630 A do 5000 A.



Obrázek 22 – Silová pole typu XP převzato z [9]

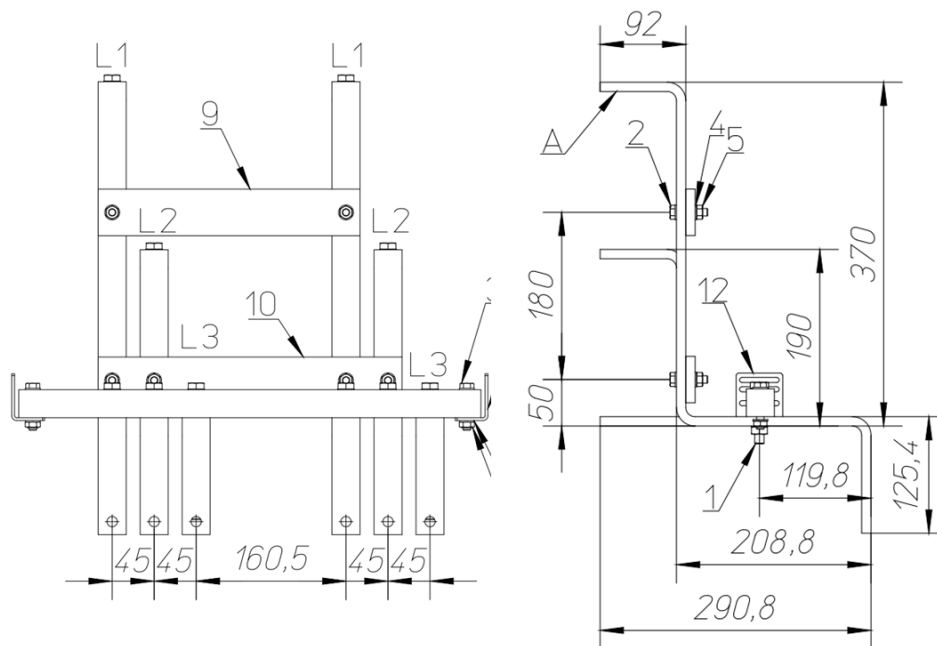
Konfigurace se dvěma trojpólovými jističi NZM3, 630 A

Tato konfigurace sestává z oceloplechové rozvaděčové skříně o rozměrech 2000 mm × 600 mm × 600 mm, přípojnicového systému a dvou výkonových jističů NZM3 o jmenovitém proudu $I_n = 630$ A, viz nákres.



Obrázek 23 – Nákres konfigurace se dvěma jističi NZM3 630A převzato z [10]

Rozměry distribučních přípojníc jsou zaneseny v nákresu na obrázku 24. Průřez distribuční přípojnice má rozměry 30 mm × 10 mm. Parametry potřebné pro ověření návrhu výpočtem jsou pak přehledně shrnuty v tabulce 12.



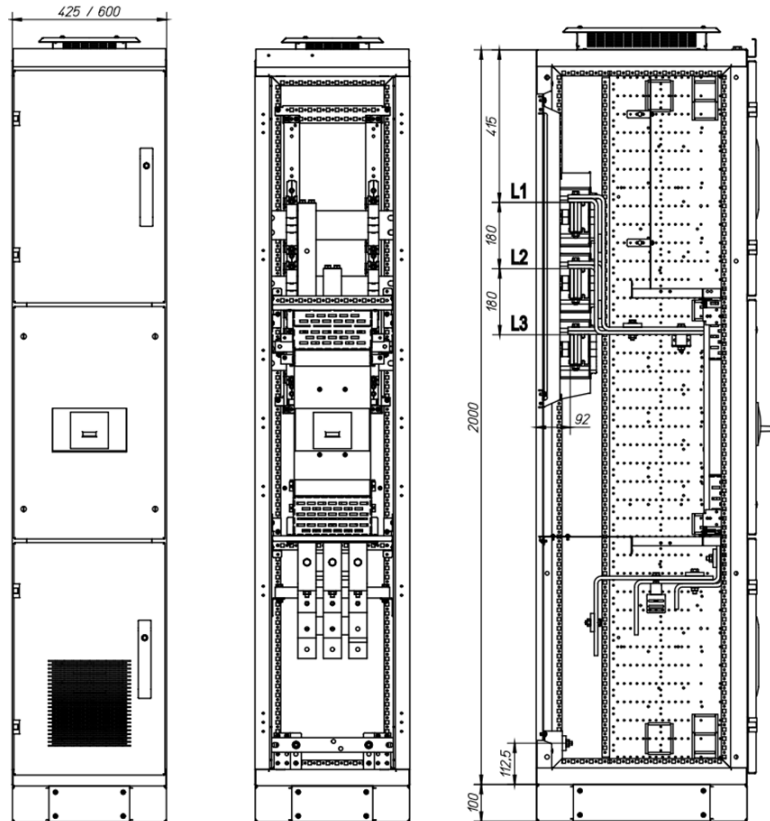
Obrázek 24 – Návrh distribučních přípojnic konfigurace 2 x NZM3 630 A převzato z [10]

Tabulka 12 – Parametry konfigurace se dvěma trojpólovými jističi NZM3 630 A

Parametr	Označení	Hodnota
Rozměry skříně	$v \times š \times h$	2000 mm × 600 mm × 600 mm
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud po dobu jedné sekundy	I_{CW}	35 kA
Celkový průřez fázové přípojnice	S	300 mm ²
Rozměr hl. vodiče kolmo ke směru působení síly	b_m	10 mm
Rozměr hl. vodiče ve směru působení síly	c_m	30 mm
Osová vzdálenost přípojnic	a	45 mm
Doba trvání zkratu	T_{kr}	1 s
Maximální vzdálenost mezi podpěrami	l	180 mm
Počet dílčích vodičů	n	1
Rozměr dílčího vodiče kolmo ke směru působení síly	b_s	-
Rozměr dílčího vodiče ve směru působení síly	c_s	-
Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči jedné fáze	a_{1s}	-
Maximální vzdálenost mezi dvěma spojovacími díly	l_s	-
Součinitel respektující typ a počet podpěr	β	0,73
Mez kluzu daná materiálem přípojnice	f_y	200 MPa
Součinitel pro výpočet síly na podpěru	α	1,1
Tvar průřezu přípojnice	-	obdélník

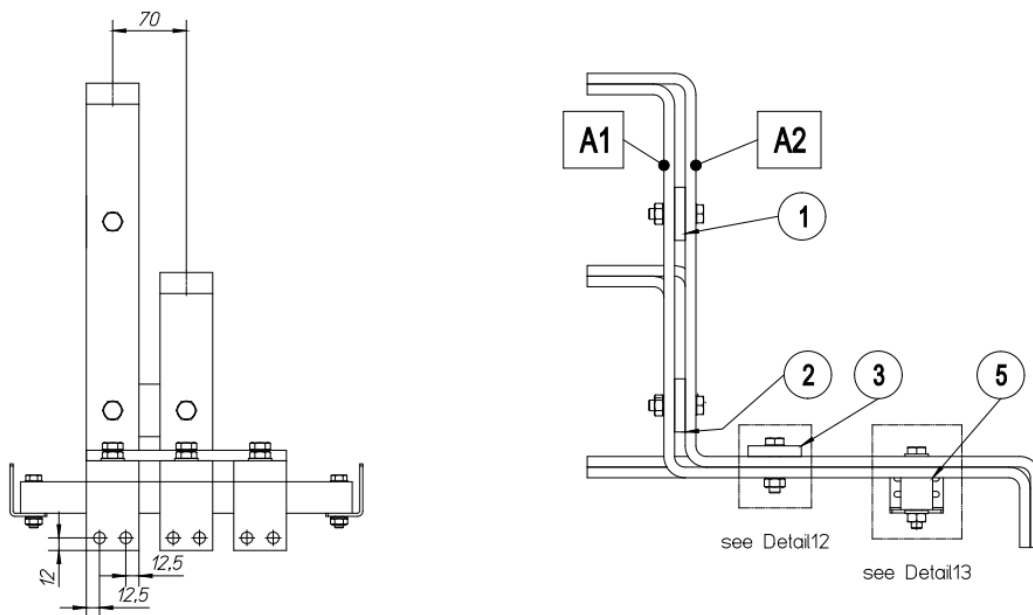
Konfigurace s jedním jističem NZM4, 1600 A

Tato konfigurace sestává z oceloplechové rozvaděčové skříně o rozměrech 2000 mm × 425 mm × 600 mm, přípojnicového systému a výkonového jističe NZM4 o jmenovitém proudu $I_n = 1600$ A, viz nákr.



Obrázek 25 – Nákr konfigurace s jističem NZM4 1600 A převzato z [11]

Nákr distribučních přípojnic je na obrázku 26. Přípojnice se skládají ze dvou dílčích vodičů. Celková střední délka přípojnice prostřední fáze v narovnaném stavu je 661 mm. Průřez distribuční přípojnice má rozměry 2 × 50 mm × 10 mm. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že k sobě dílčí vodiče přípojnice na celé délce prakticky přiléhají), což je zároveň nejméně příznivý případ - namáhání je největší. Parametry potřebné pro ověření návrhu výpočtem jsou pak přehledně shrnuty v tabulce 13.



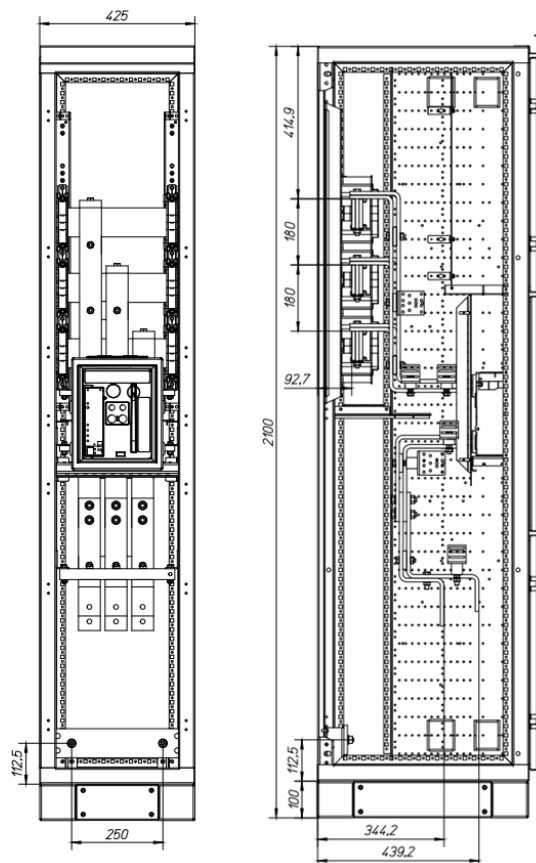
Obrázek 26 – Nákres distribučních přípojníc konfigurace s jističem NZM4 1600 A převzato z [11]

Tabulka 13 – parametry konfigurace s jedním jističem NZM4, 1600 A

Parametr	Označení	Hodnota
Rozměry skříňe	$v \times š \times h$	2000 mm × 425 mm × 600 mm
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud po dobu jedné sekundy	I_{cw}	50 kA
Celkový průřez fázové přípojnice	S	1000 mm ²
Rozměr hl. vodiče kolmo ke směru působení síly	b_m	20,01 mm
Rozměr hl. vodiče ve směru působení síly	c_m	50 mm
Osová vzdálenost přípojníc	a	70 mm
Doba trvání zkratu	T_{kr}	1 s
Maximální vzdálenost mezi podpěrami	l	305 mm
Počet dílčích vodičů	n	2
Rozměr dílčího vodiče kolmo ke směru působení síly	b_s	10 mm
Rozměr dílčího vodiče ve směru působení síly	c_s	50 mm
Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči jedné fáze	a_{1s}	10,01mm
Maximální vzdálenost mezi dvěma spojovacími díly	l_s	126
Součinitel respektující typ a počet podpěr	β	0,73
Mez kluzu daná materiálem přípojnice	f_y	200 MPa
Součinitel pro výpočet síly na podpěru	α	1,1
Tvar průřezu přípojnice	-	obdélník

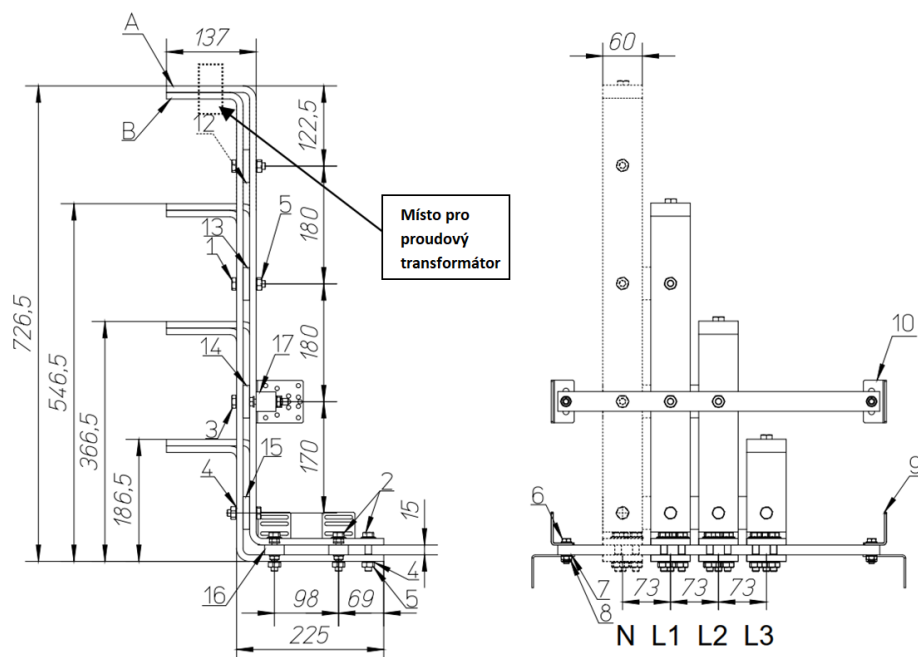
Konfigurace s jedním jističem IZMX16, 1600 A

Tato konfigurace sestává z oceloplechové rozvaděčové skříně o rozměrech 2000 mm × 425 mm × 600 mm, přípojnicového systému a vzduchového jističe IZMX16 o jmenovitém proudu $I_n = 1600$ A, viz nákres.



Obrázek 27 – Nákres konfigurace s jističem IZMX16 1600 A převzato z [12]

Nákres distribučních přípojnic je na obrázku 28 (výkres je pro čtyřpólovou variantu, počítáme však se trojpólovou – tedy bez N přípojnice). Přípojnice se skládají ze dvou dílčích vodičů. Průřez distribuční přípojnice má rozměry 2 × 60 mm × 10 mm. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že k sobě dílčí vodiče přípojnice na celé délce přiléhají, což je zároveň nejméně příznivý případ - namáhání je největší. Parametry potřebné pro ověření návrhu výpočtem jsou pak přehledně shrnuty v tabulce 14.



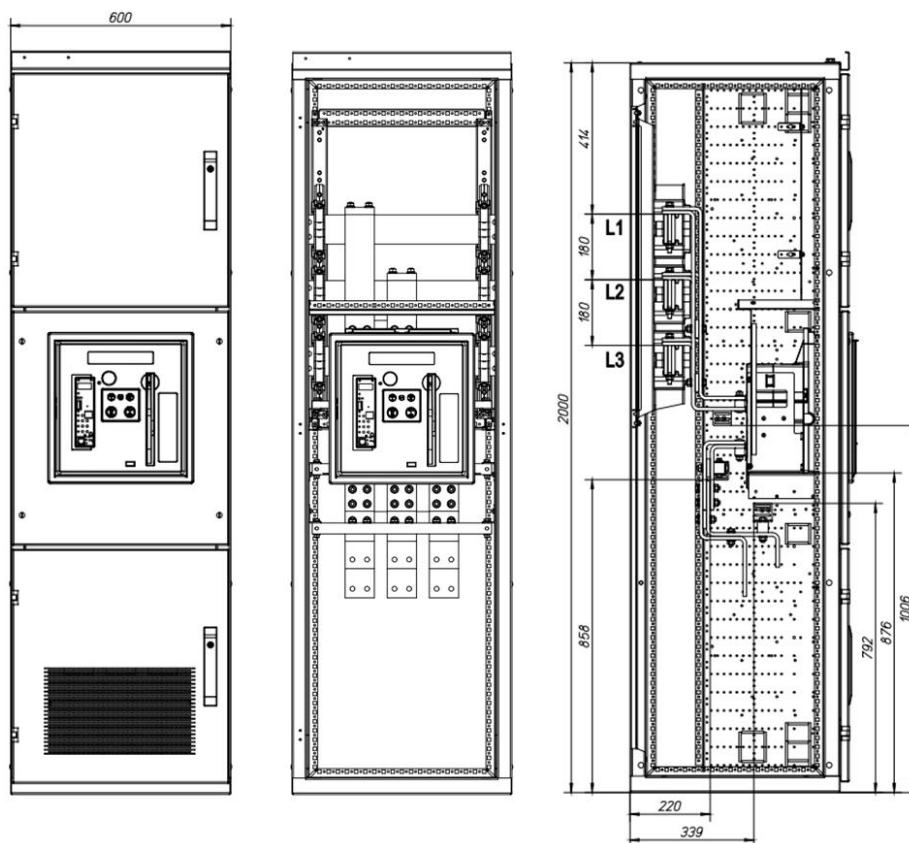
Obrázek 28 – Nákres distribučních přípojnic konfigurace s jističem IZMX16, 1600 A převzato z [12]

Tabulka 14 – Parametry konfigurace s jedním jističem IZMX16, 1600 A

Parametr	Označení	Hodnota
Rozměry skříňe	$v \times s \times h$	2000 mm × 425 mm × 600 mm
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud po dobu jedné sekundy	I_{cw}	42 kA
Celkový průřez fázové přípojnice	S	1200 mm ²
Rozměr hl. vodiče kolmo ke směru působení síly	b_m	20,01 mm
Rozměr hl. vodiče ve směru působení síly	c_m	60 mm
Osová vzdálenost přípojnic	a	73 mm
Doba trvání zkratu	T_{kr}	1
Maximální vzdálenost mezi podpěrami	l	286 mm
Počet dílčích vodičů	n	2
Rozměr dílčího vodiče kolmo ke směru působení síly	b_s	10 mm
Rozměr dílčího vodiče ve směru působení síly	c_s	60 mm
Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči jedné fáze	a_{1s}	10,01 mm
Maximální vzdálenost mezi dvěma spojovacími díly	l_s	180 mm
Součinitel respektující typ a počet podpěr	β	0,73
Mez kluzu daná materiálem přípojnice	f_y	200 MPa
Součinitel pro výpočet síly na podpěru	α	1,1
Tvar průřezu přípojnice	-	obdélník

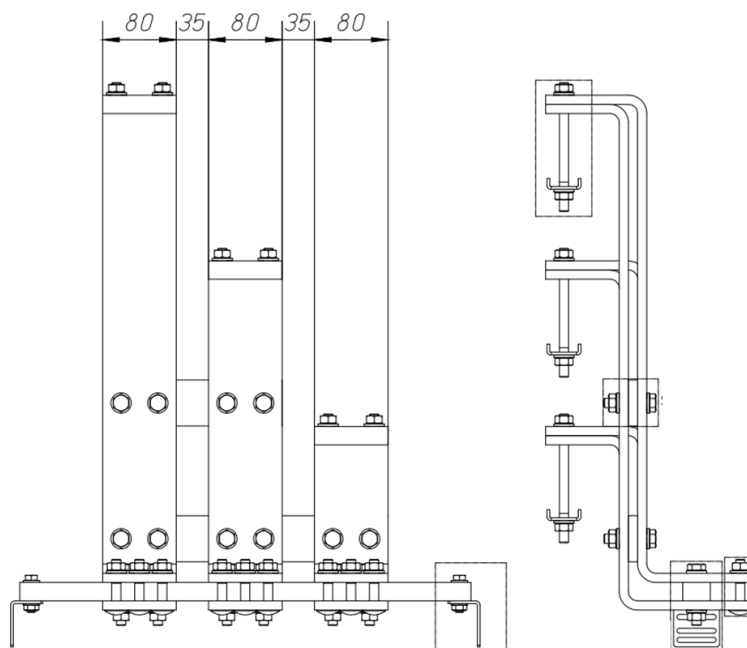
Konfigurace s jedním jističem IZMX40, 2500 A

Tato konfigurace sestává z oceloplechové rozvaděčové skříně o rozměrech 2000 mm × 600 mm × 600 mm, přípojnicového systému a vzduchového jističe IZMX40 o jmenovitém proudu $I_n = 2500$ A, viz nákres.



Obrázek 29 – Nákres konfigurace s jističem IZMX40 2500 A převzato z [13]

Nákres distribučních přípojníc je na obrázku 30. Přípojnice se skládají ze dvou dílčích vodičů. Průřez distribuční přípojnice má rozměry 2 × 80 × 10 mm. Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje, že k sobě dílčí vodiče přípojnice na celé délce přiléhají, což je zároveň nejméně příznivý případ – namáhání je největší. Parametry potřebné pro ověření návrhu výpočtem jsou pak přehledně shrnuty v tabulce 15.



Obrázek 30 – Nákres distribučních přípojnic konfigurace s jističem IZMX40, 2500 A převzato z [13]

Tabulka 15 – Parametry konfigurace s jedním jističem IZMX40, 2500 A

Parametr	Označení	Hodnota
Rozměry skříňe	$v \times š \times h$	2000 mm × 425 mm × 600 mm
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud po dobu jedné sekundy	I_{cw}	85 kA
Celkový průřez fázové přípojnice	S	1600 mm ²
Rozměr hl. vodiče kolmo ke směru působení síly	b_m	20,01 mm
Rozměr hl. vodiče ve směru působení síly	c_m	80 mm
Osová vzdálenost přípojnic	a	115 mm
Doba trvání zkratu	T_{kr}	1 s
Maximální vzdálenost mezi podpěrami	l	328 mm
Počet dílčích vodičů	n	2
Rozměr dílčího vodiče kolmo ke směru působení síly	b_s	10 mm
Rozměr dílčího vodiče ve směru působení síly	c_s	80 mm
Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči jedné fáze	a_{1s}	10,01 mm
Maximální vzdálenost mezi dvěma spojovacími díly	l_s	328 mm
Součinitel respektující typ a počet podpěr	β	0,73
Mez kluzu daná materiálem přípojnice	f_y	200 MPa
Součinitel pro výpočet síly na podpěru	α	1,1
Tvar průřezu přípojnice	-	obdélník

6. Výpočetní program E-VERIFIC

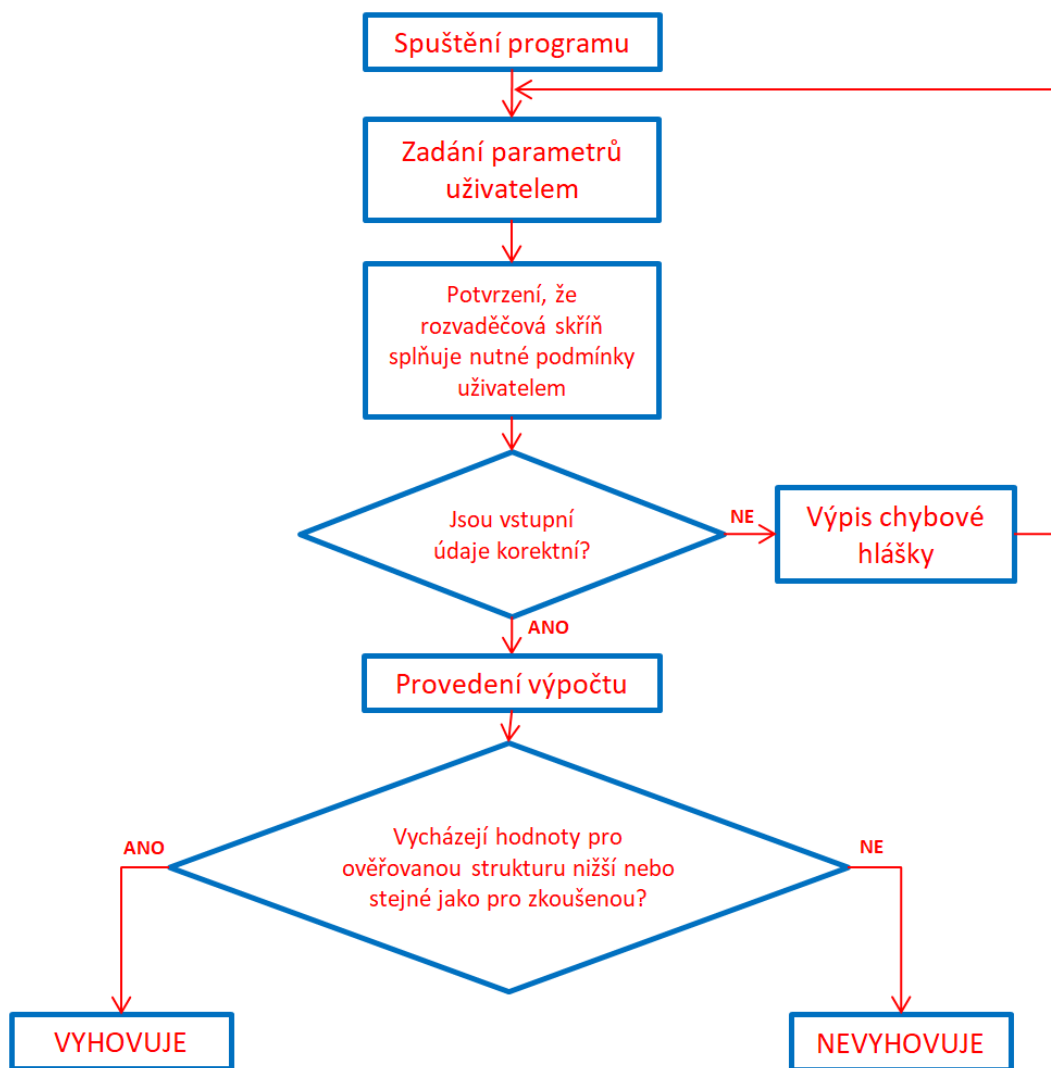
Šestá kapitola je věnována navrženému programu E-VERIFIC, který používá pro výpočty výše uvedené poznatky a který je hlavním výstupem této diplomové práce.

6.1. Obecně o programu

Program je napsán v programovacím jazyce Visual Basic za využití vývojového prostředí MS Visual Studio. Pro tvorbu grafického rozhraní byla použita technologie Windows Forms. Jedná se tedy o standardní aplikaci určenou pro operační systém Windows. Aplikace je tedy spustitelná na většině počítačů. Pro spuštění není nutná instalace. Zjednodušený vývojový diagram znázorňující její běh je zobrazen na obrázku 31. Ukázky zdrojového kódu tvoří přílohu diplomové práce.

Jedná se o program, který slouží k ověřování zkratové odolnosti rozvaděčů nízkého napětí s měděnými přípojnicovými systémy srovnáním s referenčním návrhem pomocí výpočtu v souladu s normou ČSN EN 61439-1 ed. 2 a automatizuje tak výpočetní postupy stanovené ČSN EN 60865-1 ed. 2, které by byli při manuálním počítání velmi zdouhavé.

V programu jsou implementovány 4 nazkoušené rozvaděčové struktury systému xEnergy Main, které jsou popsány v předchozí kapitole. Každá nazkoušená struktura je definována svými parametry potřebnými pro srovnávací výpočty, uživatel pak jen zadá tytéž parametry struktury, kterou potřebuje ověřit, program provede potřebné výpočty a zhodnotí, zda je navrhovaná struktura vyhovující či nikoli.



Obrázek 31 – Vývojový diagram běhu programu

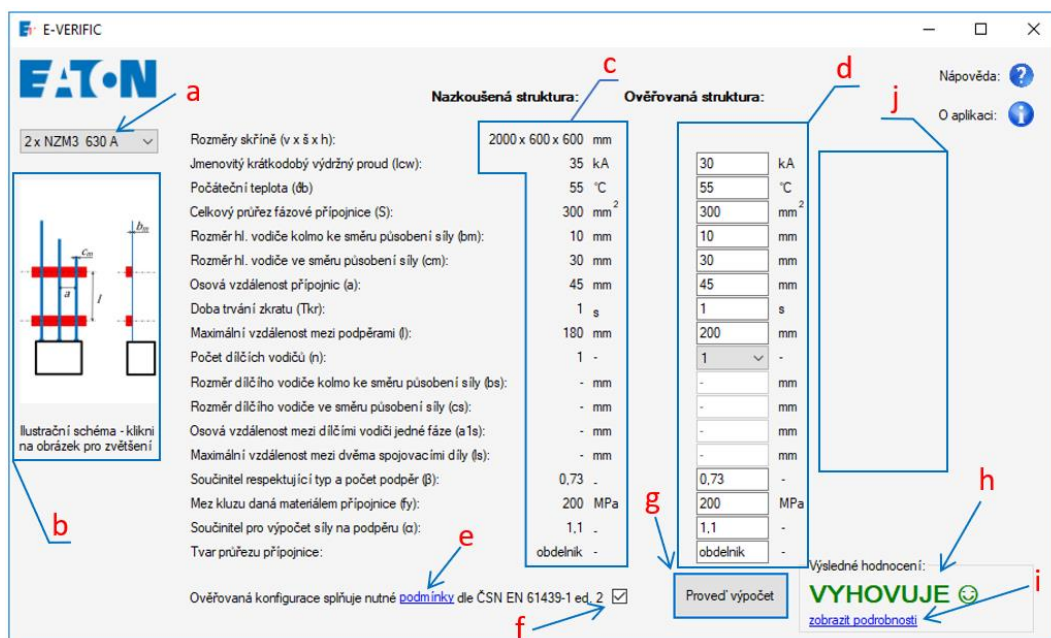
6.2. Návod k obsluze programu

Na obrázku 32 je výřez hlavního okna programu. Jednotlivé prvky okna jsou pro přehlednost dalšího popisu označeny písmeny a – j.

Postup zadávání:

- Nejprve z nabídky (a) vyberte nazkoušenou strukturu, podle které chcete provádět ověření. Parametry a informace o každé nazkoušené struktuře jsou v kapitole 5.2.2, případně podrobněji v příslušných katalogových listech.
- Na obrázku (b) se zobrazí schématický náčrt, kde jsou naznačeny zásadní rozměry potřebné pro výpočet. Obrázek je možné zvětšit kliknutím.

- V oblasti označené (c) se vyplší parametry zvolené nazkoušené struktury.
- Do políček v oblasti (d) uveďte parametry struktury, kterou chcete ověřit.
- Zaškrtnutím políčka (f) potvrzujete, že ověřovaná struktura splňuje nutné podmínky, tyto podmínky je možné zobrazit kliknutím na zvýrazněné slovo „podmínky“ (e).
- Poté je již možné kliknutím na tlačítko (g) provést výpočet.
- V rámečku (h) se poté objeví celkové hodnocení (VYHOVUJE/NEVYHOVUJE), kliknutím na „zobrazit podrobnosti“ (i) je potom možné otevřít okno s vyhodnocením jednotlivých rozhodujících parametrů.
- Pokud zadáte neplatné hodnoty, např. I_{CW} pro ověřovanou strukturu větší než pro nazkoušenou strukturu (norma v tomto případě ověření výpočtem nedovoluje), objeví se v oblasti (j) chybové hlášky upozorňující na konkrétní chybu.



Obrázek 32 - Prvky hlavního okna

Zhodnocení výsledků:

- Pokud po provedení výpočtu kliknete v hlavním okně na možnost „zobrazit podrobnosti“ (i), otevře se okno podrobných výsledků tak, jak je ukázáno na obrázku 33.
- V rámečku nadepsaném „Rozhodující faktory“ jsou pro nazkoušenou i ověřovanou strukturu uvedeny vypočtené veličiny, které jsou pro hodnocení zásadní.

- Mezi hodnotami pro jednotlivé struktury se vypíše znaménko \geq (vyhovuje) nebo $<$ (nevyhovuje).
- Pokud je alespoň jeden parametr zhodnocen jako nevyhovující, je celá ověřovaná struktura hodnocena jako nevyhovující (viz rámeček výsledné hodnocení).
- V rámečku s nadpisem „Doplňkové informace“ jsou pak pro úplnost uvedeny velikosti sil, působících na hlavní a dílčí vodiče. Velikosti těchto sil nejsou pro ověření rozhodující, ovšem na jejich základě se počítá namáhání vodičů, které již rozhodující je.

Nazkoušená struktura:		Ověřovaná struktura:	
Rozhodující faktory:			
Výsledná teplota vodičů (Tk):	33,2 °C	\geq	33,2 °C
Namáhání hlavních vodičů ($\sigma_{m,d}$):	54,65 MPa	$<$	93,98 MPa
Namáhání dílčích vodičů ($\sigma_{s,d}$):	7,4 MPa	\geq	7,38 MPa
Celkové namáhání ($\sigma_{tot,d}$):	62,06 MPa	$<$	101,36 MPa
Síla na podpěry (Frd):	18 kN	$<$	23,6 kN
Doplňkové informace:			
Síla na hlavní vodiče (Fm3):	16,36 kN		21,46 kN
Síla na dílčí vodiče (Fs):	5,37 kN		5,35 kN
Výsledné hodnocení:			
NEVYHOVUJE 😞			

Obrázek 33 - Okno výsledků

6.3. Praktické řešení programu

Program ověřuje pouze zkratovou odolnost distribučních přípojníc k vývodním jednotkám, ale nikoli odolnost hlavních přípojníc rozvaděče, neboť se počítá s tím, že hlavní přípojnice se použijí vždy stejné jako u ověřené varianty.

6.3.1. Předvyplněné hodnoty pro ověřovanou strukturu

Pokud spustíme program, otevře se hlavní okno. Lze si povšimnout, že některé hodnoty pro ověřovanou strukturu jsou již po zapnutí předepsané a nelze je měnit (viz červené šipky na obrázku 34). Dále je popsáno, proč tomu tak je.

Doba trvání zkratu T_{kr}

Doba trvání zkratu je defaultně nastavena na 1 s, neboť i zkoušené struktury byly namáhány zkratovým proudem po dobu 1 s. Dalším důvodem je to, že oteplení vodičů, které vznikne působením zkratového proudu v takto krátkém čase lze považovat za adiabatický děj, což zjednodušuje výpočet.

Součinitel respektující typ a počet podpěr β

Hodnota tohoto součinitele je podle tabulky 4 nastavena na 0,73 neboť uvažujeme, že v každém případě budou mít přípojnice minimálně tři rozpětí (uchycení k hlavním přípojnicím – podpěra – podpěra – uchycení do jistícího přístroje).

Mez kluzu daná materiálem přípojnice f_y

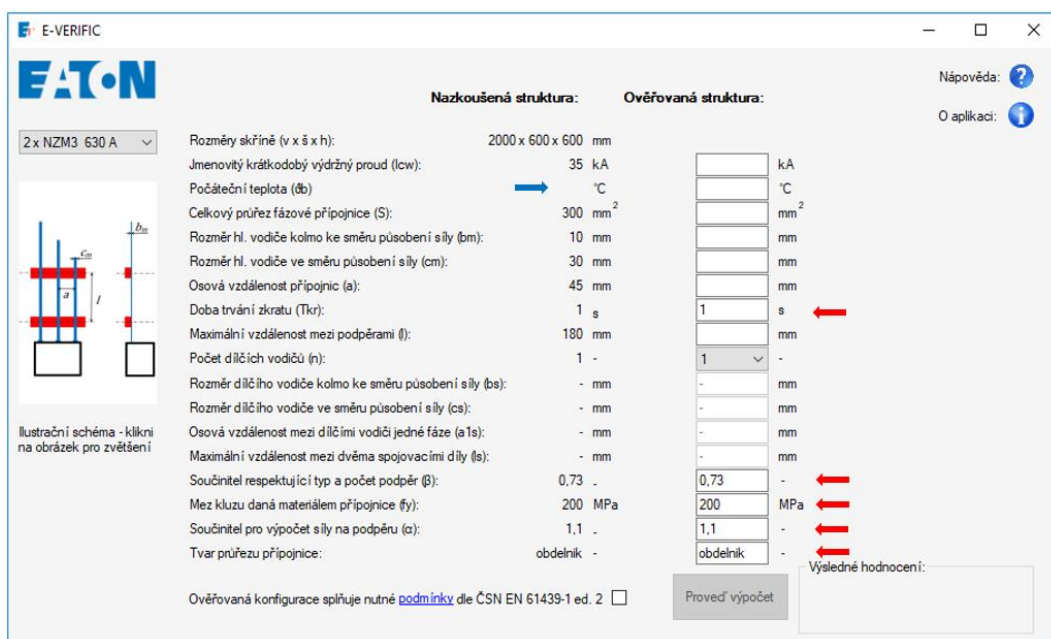
Mez kluzu má hodnotu 200 MPa, což je hodnota pro měď používanou pro výrobu přípojníc a vzhledem k tomu, že jiné materiály přípojníc se dnes v rozvaděčích NN vyskytují minimálně, není dovoleno tento parametr měnit.

Součinitel pro výpočet síly na podpěru α

Součinitel pro výpočet síly na podpěru je opět podle tabulky 4 volen s ohledem na to, že předpokládáme tři rozpětí na délce přípojníc. Další zjednodušení spočívá v tom, že se uvažuje pouze méně příznivá varianta a pro všechna podpěrná místa se počítá s hodnotou součinitele 1,1, což ve výsledku na pouhé porovnání zkoušené a nezkoušené varianty nemá vliv.

Tvar průřezu přípojnice

V této fázi programu je možné počítat pouze s průřezem přípojníc ve tvaru obdélníku, který je shodný s nazkoušenými variantami.



Obrázek 34 - Hlavní okno s předvyplněnými hodnotami

6.3.2. Ošetření vstupů

Aby nedošlo ke zbytečným chybám ve výpočtech, disponuje program několika opatřeními, která mají za úkol omezit chybné nebo nesmyslné zadání.

Počáteční teplota θ_b

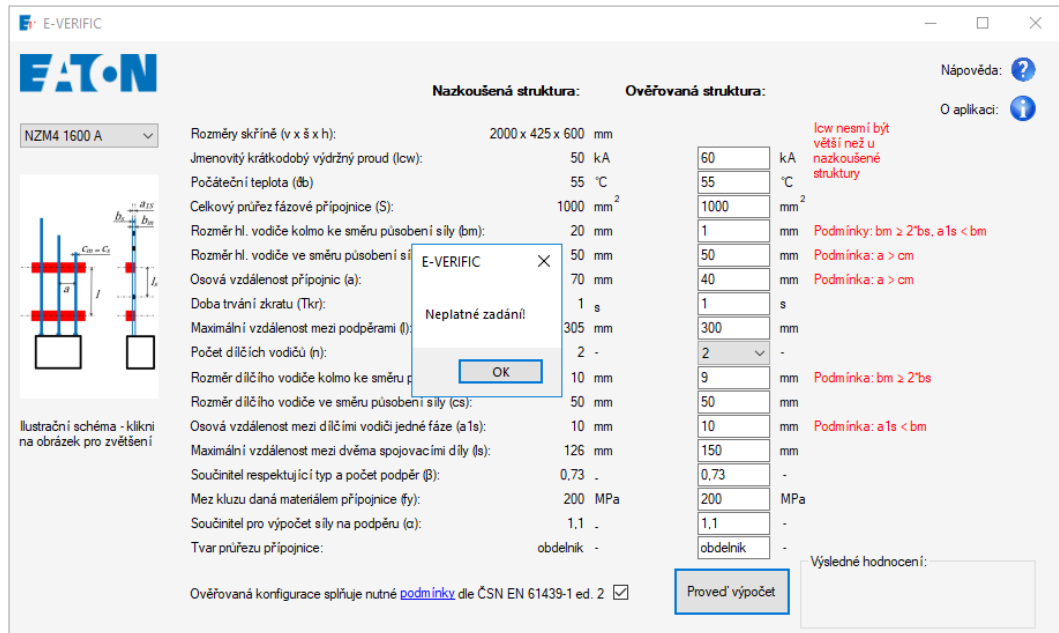
Počáteční teplota (modrá šipka na obrázku 34) pro výpočet zkoušené struktury se automaticky kopíruje z kolonky pro ověřovanou strukturu, takže nemůže dojít k tomu, aby ověřování bylo spočteno pro různé teploty.

Rozměry c_m a c_s

Pokud se ověřuje konfigurace s hlavními vodiči složenými ze dvou dílčích vodičů, musí vždy platit $c_m = c_s$, z tohoto důvodu jsou buňky pro zadávání tohoto parametru provázány a vždy, pokud se mění jeden z těchto parametrů, automaticky se mění i hodnota druhého.

Další podmínky

Další podmínky jsou ošetřeny výpisem chybové hlášky „Neplatné zadání!“ a zobrazením dané podmínky u příslušné kolonky, jak je patrné na obrázku 35.



Obrázek 35 - Zobrazení podmínek

Neplatné vstupy

V případě zadání neplatné hodnoty (např. jiný datový typ nebo vynechaná prázdná kolonka), vypíše program chybovou hlášku „Neplatné zadání!“ a dále nepokračuje ve výpočtu.

6.4. Příklad použití programu

Požadované parametry rozvaděče

- Typ: pole s jednou vývodní jednotkou
- Rozměry skříně: 2000 mm × 800 mm × 600 mm
- Jmenovitý proud: 800 A
- Pracovní teplota přípojníc: 55 °C
- Rázový zkratový proud v místě připojení: 25 kA

Řešení

Jmenovitý proud je 800 A, tudíž nelze použít jistič NZM3, zvolíme tedy pro ověření konfiguraci s jističem NZM4.

Konfiguraci by bylo možno použít tak, jak je nazkoušená, nicméně dvojité přípojnice o rozměrech průřezu (2 × 10 mm) × 50 mm by byly zbytečně předimenzované a jejich použití by bylo neekonomické. Skříň rozvaděče splňuje nutné podmínky, můžeme tedy zkusit ověřit, zda postačí použít pouze jednoduché přípojnice o rozměrech průřezu 10 mm × 50 mm, a stejné rozteči podpěr, viz obrázek 36.

E-VERIFIC

NZM4 1600 A

Nazkoušená struktura: 2000 x 425 x 600 mm

Ověřovaná struktura:

Jmenovitý krátkodobý výdržný proud (Icw):	50 kA	25	kA
Počáteční teplota (θb):	70 °C	70	°C
Celkový průřez fázové přípojnice (S):	1000 mm ²	500	mm ²
Rozměr hl. vodiče kolmo ke směru působení síly (bm):	20 mm	10	mm
Rozměr hl. vodiče ve směru působení síly (cm):	50 mm	50	mm
Osová vzdálenost přípojnic (a):	70 mm	70	mm
Doba trvání zkratu (Tkr):	1 s	1	s
Maximální vzdálenost mezi podpěrami (l):	305 mm	305	mm
Počet dílčích vodičů (n):	2 -	1	-
Rozměr dílčího vodiče kolmo ke směru působení síly (bs):	10 mm	-	mm
Rozměr dílčího vodiče ve směru působení síly (cs):	50 mm	-	mm
Osová vzdálenost mezi dílčími vodiči jedné fáze (a1s):	10 mm	-	mm
Maximální vzdálenost mezi dvěma spojovacími díly (ls):	126 mm	-	mm
Součinitel respektující typ a počet podpěr (β):	0,73 -	0,73	-
Mez kluzu daná materiálem přípojnice (fy):	200 MPa	200	MPa
Součinitel pro výpočet síly na podpěru (α):	1,1 -	1,1	-
Tvar průřezu přípojnice:	obdelník -	obdelník	-

Ilustrační schéma - klikni na obrázek pro zvětšení

Ověřovaná konfigurace splňuje nutné podmínky dle ČSN EN 61439-1 ed. 2

Proveď výpočet

Výsledné hodnocení: **VYHOVUJE**

[zobrazit podrobnosti](#)

Obrázek 36 - Příklad výpočtu

Vidíme, že návrh ověřením prošel, a takto navržený rozvaděč tedy splňuje požadavky na zkratovou odolnost a je možné ho zkonstruovat a za daných podmínek provozovat. Podrobné výsledky výpočtu jsou na obrázku 37.

E-VERIFIC - výsledky

Nazkoušená struktura:		Ověřovaná struktura:	
Rozhodující faktory:			
Výsledná teplota vodičů (Tk):	85,8 °C	≥	85,8 °C
Namáhání hlavních vodičů (σ m.d):	54,65 MPa	≥	27,79 MPa
Namáhání dílčích vodičů (σ s.d):	7,41 MPa		- MPa
Celkové namáhání (σ tot.d):	62,06 MPa		- MPa
Síla na podpěry (Frd):	18 kN	≥	4,58 kN
Doplňkové informace:			
Síla na hlavní vodiče (Fm3):	16,36 kN		4,16 kN
Síla na dílčí vodiče (Fs):	5,37 kN		- kN
Výsledné hodnocení:			
VYHOVUJE 😊			

Obrázek 37 - Výsledky výpočtu

7. Závěr

Během psaní této diplomové práce jsem se seznámil s normou ČSN EN 61439-1 ed. 2, a zejména s její částí, která je věnována zkratové odolnosti rozvaděčů a jejímu ověřování.

Abych se ale mohl začít prakticky věnovat ověřování zkratové odolnosti rozvaděčů srovnáním s referenčním návrhem pomocí výpočtu, bylo nejprve potřeba prostudovat obecnou teorii zkratových proudů a dále pak proniknout do problematiky výpočtů jejich účinků na rozvodná zařízení, která je rozebrána v normě ČSN EN 60865-1 Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část1: Definice a výpočetní metody. Zde jsem se věnoval účinkům na tuhé holé vodiče, kterými typicky jsou přípojnice v rozvaděčích NN.

Je zřejmé, že výpočty účinků zkratových proudů jsou poměrně složité a při pokusu o ruční počítání značně zdlouhavé, proto bylo hlavním cílem této diplomové práce vyvinout aplikaci, která bude výpočty provádět automaticky a rozhodne, zda ověřovaný návrh splňuje příslušné normativní požadavky a může být zkonstruován a uveden do provozu.

Aplikace prozatím obsahuje čtyři nazkoušené struktury, jejichž popis a parametry jsou rovněž zahrnuty v této práci, nicméně v budoucnu dozná aplikace dalšího rozšiřování, zdokonalování a zejména praktického využití.

V průběhu psaní této závěrečné práce jsem se detailně seznámil se specifickou problematikou ověřování zkratové odolnosti rozvaděčů NN a doufám a věřím, že takto nabyté znalosti a zkušenosti dobře upotřebím v dalším profesním životě.

8. Použitá literatura a zdroje

- [1] ÚNMZ. ČSN EN 61439-1 ed. 2 – *Rozváděče nízkého napětí – Část 1: Všeobecná ustanovení*. Květen 2012
- [2] ÚNMZ. ČSN EN 61439-2 ed. 2 – *Rozváděče nízkého napětí – Část 2: Výkonové rozváděče*. Květen 2012
- [3] ÚNMZ. ČSN EN 60865-1 ed. 2 – *Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část 1: Definice a výpočetní metody*. Srpen 2012
- [4] ÚNMZ. ČSN EN 60909-0 – *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách: Část 0: Výpočet proudů*. Květen 2002
- [5] FEJT, Zdeněk, Jaroslav ČERMÁK: *Elektroenergetika. Skripta ČVUT, 1985*
- [6] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [7] Zkrat v ES [online]. [cit. 10. 03. 2019]. Dostupné z:
http://www.powerwiki.cz/attach/EN2/EN2_pr06_zkrat.pdf
- [8] PNE 33 3041. Zkratové proudy – výpočet účinků – část 2: příklady výpočtů [online]. [cit. 26. 03. 2019] Dostupné z:
<http://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203041ed2tisk.pdf>.
- [9] Katalog firmy Eaton: *xEnergy Main – Design-verified Switchgear System*, 2018
- [10] Montážní návod firmy Eaton: *xEnergy BA-126*, 2012
- [11] Montážní návod firmy Eaton: *xEnergy BA-014*, 2016
- [12] Montážní návod firmy Eaton: *xEnergy BA-XP-BBB-IZMX16_1600A_IOC-OPPO-F-6_8-142*, 2015
- [13] Montážní návod firmy Eaton: *xEnergy BA-186*, 2016