



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VÝPOČET PROFILOVÝCH VODIČŮ PRO PŘÍPOJNICE V ROZVODNÝCH ZAŘÍZENÍCH

CALCULATION OF THE PROFILE BUSBAR CONDUCTORS IN DISTRIBUTION EQUIPMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Veselý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Novotný

BRNO 2016



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Tomáš Veselý

ID: 161649

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet profilových vodičů pro přípojnice v rozvodných zařízeních

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teoretický postup při dimenzování profilových vodičů.
2. Tepelné účinky zkratového proudu.
3. Dynamické účinky zkratového proudu.
4. Vytvoření skriptu v programu Excel pro výpočet obdélníkových přípojníc.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Jan Novotný

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

VESELÝ, T. *Výpočet profilových vodičů pro přípojnice v rozvodných zařízeních*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 41s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Novotný.

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

.....

ABSTRAKT

Dimenzování přípojnicového systému na tepelné i dynamické účinky zkratového proudu je z hlediska bezpečnosti i ekonomické hospodárnosti velmi důležité. Bakalářská práce je zaměřena na kontrolu těchto účinků na přípojnice. Teoretický rozbor se zabývá výpočtem charakteristických hodnot zkratového proudu. Dále je v práci zpracován princip dimenzování profilových vodičů pro přípojnice. Hlavní část práce tvoří dimenzování na účinky zkratového proudu. V rámci praktické části práce byl vytvořen výpočtový program v prostředí MS Excel, který se zabývá návrhem přípojnic, odolných na účinky zkratového proudu. Program také umožňuje kontrolu přípojnic známého rozměru na tepelné a dynamické účinky.

KLÍČOVÁ SLOVA: přípojnice; účinky zkratového proudu; zkratová odolnost; minimální průřez vodiče; ohybové namáhání;

ABSTRACT

Proportioning of busbar system for thermal and dynamic effects of short circuit current in terms of safety and economic efficiency is very important. Bachelor thesis is focused on inspection of these effects on busbars. Theoretical analysis deals with the calculation of characteristic values of short circuit current. The study also processed the principle dimensioning of the profile wires for busbars. The main part consists of designing the effects of short circuit current. In the practical part of the work was created calculation program in MS Excel, which deals with the design of the bus, resistant to the effects of short circuit current. The program also allows you to check the busbar-known dimension to the thermal and dynamic effects.

KEY WORDS: busbar; the effects of short-circuit current; short-circuit resistance; the minimum conductor size; bending stress;

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
1 ÚVOD	10
2 CÍLE PRÁCE	11
3 ELEKTRICKÁ ROZVODNÁ ZAŘÍZENÍ.....	12
3.1 VNITŘNÍ ROZVODNY	12
3.1.1 KOBKOVÉ ROZVODNY.....	12
3.1.2 SKŘÍŇOVÉ ROZVÁDĚČE.....	12
3.1.3 ZAPOUZDŘENÉ ROZVODNY	12
3.2 VENKOVNÍ ROZVODNY.....	12
3.3 PŘÍPOJNICE	12
4 ZKRAT A ZKRATOVÝ PROUD.....	14
4.1 ZDROJE ZKRATOVÉHO PROUDU	14
4.2 STEJNOSMĚRNÁ SLOŽKA ZKRATOVÉHO PROUDU	14
4.3 ELEKTRICKY VZDÁLENÝ ZKRAT.....	14
4.4 ELEKTRICKY BLÍZKÝ ZKRAT	15
4.5 NÁRAZOVÝ ZKRATOVÝ PROUD	15
4.6 EKVIVALENTNÍ OTEPLOVACÍ PROUD.....	15
5 DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ	17
5.1 ZÁSADY DIMENZOVÁNÍ.....	17
5.1.1 DIMENZOVÁNÍ PODLE PROVOZNÍ TEPLoty	17
5.1.2 DIMENZOVÁNÍ PODLE MAXIMÁLNÍHO ÚBYTKU NAPĚTÍ	18
5.1.3 DIMENZOVÁNÍ S OHLEDEM NA HOSPODÁRNOST	19
5.1.4 DIMENZOVÁNÍ S OHLEDEM NA MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ.....	20
5.1.5 DIMENZOVÁNÍ NA TEPELNÉ ÚČINKY ZKRATOVÝCH PROUDŮ	20
5.1.6 DIMENZOVÁNÍ NA DYNAMICKÉ ÚČINKY ZKRATOVÝCH PROUDŮ	22
6 KOMENTÁŘ K ZADÁVÁNÍ HODNOT DO VYTVOŘENÉHO PROGRAMU	29
7 SYSTEMATICKÝ POSTUP VÝPOČTU	31
7.1 SCHÉMA PRŮBĚHU VÝPOČTU	31
7.2 VLASTNÍ VÝPOČET	34
7.2.1 URČENÍ NÁRAZOVÉHO A EKVIVALENTNÍHO OTEPLOVACÍHO ZKRATOVÉHO PROUDU	34
7.2.2 VÝPOČET REFERENČNÍHO PROUDU I_{REF}	34
7.2.3 URČENÍ ROZMĚRU PŘÍPOJNIC.....	35
7.2.4 KONTROLA NA TEPELNÉ ÚČINKY ZKRATOVÉHO PROUDU	35
7.2.5 KONTROLA NA DYNAMICKÉ ÚČINKY ZKRATOVÉHO PROUDU.....	35
8 PŘÍKLAD VÝPOČTU V PROGRAMU EXCEL	36
8.1 ZADÁNÍ PŘÍKLADU	36

8.2 ZADANÉ HODNOTY	36
8.3 CHARAKTERISTIKA SOUSTAVY A PŘÍPOJNIC	37
8.4 VÝPOČET	38
8.5 KONTROLA PODMÍNEK A VLASTNOSTI NAVRŽENÉ PŘÍPOJNICE	39
9 ZÁVĚR.....	40
POUŽITÁ LITERATURA	41

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – Elektricky vzdálený zkrat [4]</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2 – Elektricky blízký zkrat [4]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3 – Součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu m [4]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 4 – Součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu n [4]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 5 – Rozměry svisle uložených dvojitých přípojníc s vyznačením působících sil [13]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 6 – Rozměry vodorovně uložených dvojitých přípojníc s vyznačením působících sil [13]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 7 – Určení koeficientu k_{1s} [13].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 8 – Určení napětí $R_{p0,2}$ z tahové zkoušky [7]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 9 – Součinitel plasticity průřezu vodiče [7]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10 – Vliv opětovného zapnutí na ohybové namáhání [7]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11 – Součinitel respektující typ upevnění vodiče a počet podpěr [7]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 12 – Návrh přípojníc - Vstupní hodnoty</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 13 – Návrh přípojníc - Zadání hodnot</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 14 – Návrh přípojníc - Výběr z možností</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 15 – Návrh přípojníc - Kontrola podmínek a výpis přípojníc.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 16 – Vývojové schéma pro návrh jednoduché přípojnice</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 17 – Vývojové schéma pro návrh dvojitě přípojnice.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 18 – Vývojové schéma pro kontrolu přípojníc</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 19 – Vstupní hodnoty zadávané do vytvořeného skriptu.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 20 – Vybírané možnosti pro výpočet přípojníc</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 21 – Výpočet hlavního namáhání přípojníc</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 22 – Výpočet dílčího namáhání přípojníc</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 23 – Kontrola podmínek a parametry navržené přípojnice</i>	<i>39</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Materiálové konstanty [13]</i>	21
<i>Tab. 2 – Nejmenší vzdušné vzdálenosti živých částí v rozvodných zařízeních [13]</i>	23
<i>Tab. 3 – Normalizovaná řada zkratových odolností [13]</i>	34
<i>Tab. 4 – Přepočítávací součinitele pro okolní teploty vzduchu odlišné od referenční teploty [13]</i>	34

1 ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá výpočtem profilových vodičů pro přípojnice. Výpočet se zaměřuje především na kontrolu tepelných a dynamických účinků zkratového proudu. Při poruše prochází vodiči zkratový proud, který je několikanásobně větší, než jmenovitý proud. Přípojnice nesmí takovýto proud poškodit, nebo změnit jejich vlastnosti. Proto se přípojnice navrhují s takovou zkratovou odolností, aby těmto účinkům odolaly po nezbytně nutnou dobu. Kontrola na tepelné účinky znamená stanovení minimálního průřezu vodiče, který dokáže akumulovat energii, která vznikne průchodem zkratového proudu po dobu působení proudu (v praxi se jedná o dobu od vzniku zkratu po okamžik vybavení ochrany). Kontrola na dynamické působení zkratového proudu spočívá v omezení působení elektrodynamických sil, které na vodiče při průchodu proudu působí.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je návrh a výpočet rozměrů profilových vodičů pro přípojnice v rozvodných zařízeních s ohledem na jmenovité zatížení, tepelné a dynamické účinky zkratového proudu. V bakalářské práci je zpracován teoretický postup při dimenzování profilových přípojníc. Je probrána problematika výpočtu charakteristických hodnot zkratového proudu i jmenovitého zatížení. Je popsán návrh pásových přípojníc s ohledem na maximální úbytek napětí, hospodárnost, maximální hodnotu provozního napětí a mechanické namáhání. Podrobně je vysvětlen postup výpočtu tepelných a dynamických účinků zkratového proudu a následná kontrola těchto účinků na navržené přípojnice. Pro účely této práce byl vytvořen skript v programu Excel, který čeká na zadání vstupních hodnot uživatelem a navrhne rozměry profilových vodičů, které odolají zkratovým účinkům. Na výběr je několik variant různě zadaných vstupních hodnot, které je potřeba znát pro návrh přípojníc. Program také umožňuje kontrolu na odolání účinkům již známých přípojníc.

3 ELEKTRICKÁ ROZVODNÁ ZAŘÍZENÍ

Slouží k rozdělování elektrické energie a rozvádění energie do částí elektrizační soustavy. Základními parametry rozvodných zařízení jsou jmenovité napětí, které určuje minimální vzdušné vzdálenosti a zkratová odolnost. Základními částmi rozvodných zařízení jsou přípojnice[1].

3.1 Vnitřní rozvodny

Vnitřní rozvodny se dělí na kobkové rozvodny, skříňové rozvodny a zapouzdřené rozvodny[1].

3.1.1 Kobkové rozvodny

Kobkové rozvodny mají vodiče uložené volně na vzduchu. Tento typ je velmi rozšířený. Mají vysokou spolehlivost, jsou přehledné, přenášejí velké výkony a mají výbornou zkratovou odolnost. Nevýhodou jsou velké stavební nároky na prostor a malá ochrana před nebezpečným dotekovým napětím. Používají se především jako uzlové rozvodny [1].

3.1.2 Skříňové rozváděče

Přípojnice u skříňových rozvodů prochází jednotlivými skříňkami, které jsou umístěny na společném rámu. Jedná se o stavebnicový model typizovaných prvků, který je velmi variabilní. Mají menší rozměry než kobkové rozvodny a také mají větší bezpečnost díky krytu před nebezpečným dotykem. Také mají vysokou odolnost vůči prachu a vlhkosti. Proto se používají především jako průmyslové rozvodny. Nevýhodou je menší zkratová odolnost, menší spolehlivost a náročnější provedení dvojitých přípojníc [1].

3.1.3 Zapouzdřené rozvodny

Jednotlivé části rozvodny (přípojnice, odpojovače, vypínače, uzemňovače) jsou uzavřené a od sebe oddělené. Celky jsou potom naplněny plynem SF₆. Materiálem pouzder je buď ocel nebo slitiny hliníku. Tohoto typu rozvodů se používá jen ve specifických aplikacích (vysoká prašnost, malé prostory), protože jsou ekonomicky velmi nákladné. Často jsou ale jediným možným řešením. Nevýhodou je tedy vyšší cena, tato technologie také požaduje velmi přesné technické postupy při výrobě a montáži, protože pracuje s plynem SF₆, který je škodlivý a porušuje ozonovou vrstvu[1][2].

3.2 Venkovní rozvodny

U tohoto typu rozvodů jsou všechny elektrické přístroje vystaveny klimatickým podmínkám na otevřeném prostoru. Musí spolehlivě pracovat při jakémkoliv počasí (déšť, sníh, námraza, bouře). U nás se takové rozvodny realizují především na napěťové hladině 110, 220 a 400 kV [1].

3.3 Přípojnice

Přípojnice rozvádí přivedenou elektrickou energii po celé rozvodně. Jsou to takové vodiče, které soustřeďují veškerý výkon přivedený přívodními odbočkami do rozvodny. Odtud je dále rozváděna elektrická energie vývodovými odbočkami ke spotřebiči.

Pro rozvodny nízkého a vysokého napětí se používá holých pásových vodičů s obdélníkovým průřezem. Pokud je požadována na této napěťové hladině velká zkratová odolnost, používají se

také trubkové nebo profilové vodiče. Uspořádání se volí tak, aby zabralo co nejméně místa a přitom byly odolné na dynamické účinky při zkratu.

Venkovní rozvodny velmi vysokého napětí nejčastěji používají jako přípojnice AlFe lana, popřípadě svazek paralelně spojených AlFe lan, zavěšené na izolátorech na stožárech. Zapouzdřené rozvodny vvn používají jako přípojnice pásové, profilové nebo trubkové vodiče uložené v izolovaných pouzdrech, naplněné plynem SF₆.

U venkovních rozvodů je výhodou cena (není potřeba stavět budovu), přehlednost přístrojů v odbočkách a jejich lepší chlazení. Na druhou stranu musí být od sebe jednotlivé přístroje dostatečně vzdáleny, aby se dodržela minimální vzdušná vzdálenost, která je ovlivněná také okolními klimatickými vlivy [1].

4 ZKRAT A ZKRATOVÝ PROUD

Podle normy ČSN EN 60909-0 znamená zkrat „náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi, vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule“ [3].

Pokud ke zkratu dojde, začne obvodem protékat zkratová proud, který je v blízkosti místa zkratu několikanásobně větší než provozní proud. V síti dochází také k poklesu napětí. V místě zkratu se často zapálí elektrický oblouk. Pokud není jednoduchá porucha včas odstraněna, může přejít na poruchu, která postihuje více fází. Například – jednofázový zkrat přejde na dvoufázový, dvoufázový zkrat může přejít na dvoufázový zemní, zkrat, který vznikne dotekem fází, přejde na obloukový zkrat, atd. Elektrizační soustavy jsou proto vybaveny elektrickými ochranami, které mimo jiné omezují účinky zkratových proudů. Působením ochrany dojde během zkratu k přerušení proudovodné dráhy a odpojení zdrojů proudu v místě zkratu [4].

4.1 Zdroje zkratového proudu

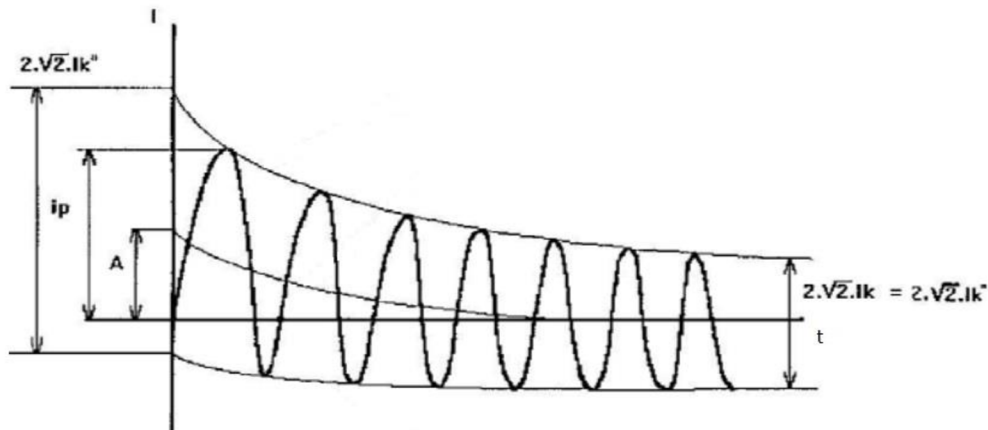
Jako zdroje zkratových proudů ve střídavých soustavách se považují synchronní stroje (turboalternátory, hydroalternátory, motory, synchronní kompenzátory), asynchronní stroje, síťové napaječe, polovodičové systémy (pokud mohou při zkratu dodávat zkratový proud) [4].

4.2 Stejnoseměrná složka zkratového proudu

Dojde-li v třífázovém elektrickém obvodu ke zkratu, vzniká zkratový proud, který je mimo jiné tvořený stejnosměrnou složkou. Její velikost je určena okamžikem vzniku zkratu a aktuálním průběhem střídavého napětí v místě zkratu, počáteční velikostí střídavého zkratového proudu a na proud procházejícím obvodem před zkratem. Stejnoseměrná složka odezní po době určené časovou konstantou τ_a . Tato konstanta, čili doba zániku stejnosměrné složky, se určena rezistencí R a reaktancí X zkratového obvodu [4].

4.3 Elektricky vzdálený zkrat

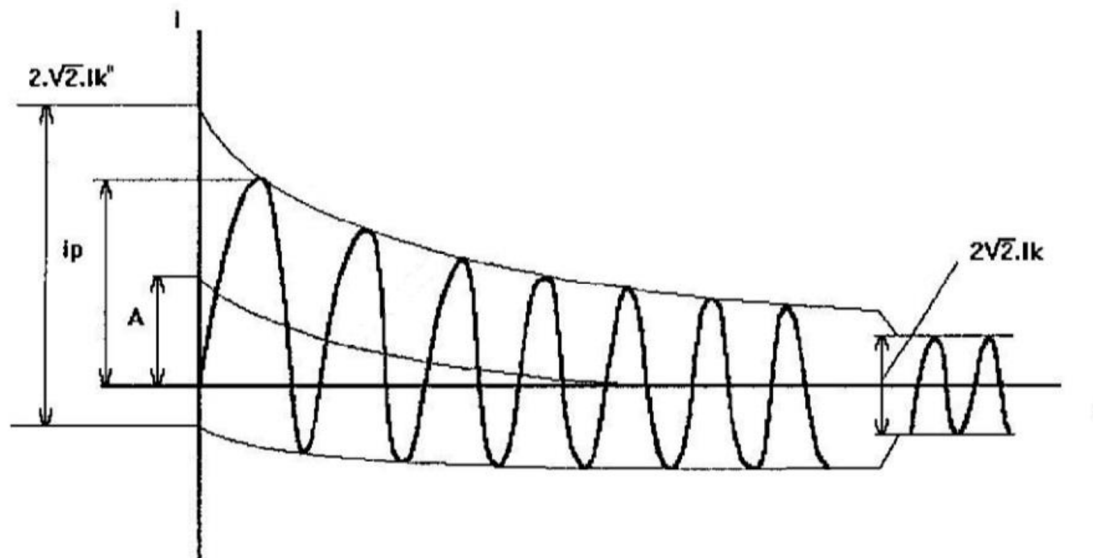
Pokud je efektivní hodnota souměrné střídavé složky zkratového proudu s časem neměnná, časový průběh zkratového proudu se blíží průběhu s ideálním napěťovým zdrojem a tento průběh zkratu nazýváme elektricky vzdálený zkrat. Takovýto případ nastane, pokud je místo zkratu vzdáleno od zdrojů zkratového proudu (synchronní stroje), nebo pokud je účast asynchronních motorů na počátečním zkratovém proudu maximálně 5% [4].



Obr. 1 – Elektricky vzdálený zkrat [4]

4.4 Elektricky blízký zkrat

Jestliže příspěvek asynchronních motorů je větší než 5%, nebo předpokládaný počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' je alespoň 2x větší než jmenovitý proud generátoru, považujeme tento zkrat za elektricky blízký [4].



Obr. 2 – Elektricky blízký zkrat [4]

4.5 Nárazový zkratový proud

Nárazový zkratový proud i_p je maximální možná hodnota zkratového proudu. Dosáhneme jí, pokud zkrat nastane v okamžiku, kdy vznikne největší stejnosměrná složka zkratového proudu. Maximální hodnotu tohoto proudu určujeme pro nejméně příznivý stav, a to během první půlplny průběhu zkratového proudu v čase 10ms (při frekvenci sítě 50 Hz).

Nárazový zkratový proud (dříve označovaný jako dynamický) je velmi důležitý při určování silových účinků, které zkratový proud způsobuje. Je odvozen z velikosti počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' za použití součinitele κ .

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (1)$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot 10^{-3} \frac{R}{X} \quad (2)$$

Součinitel κ je závislý na poměru R/X [4].

4.6 Ekvivalentní oteplovací proud

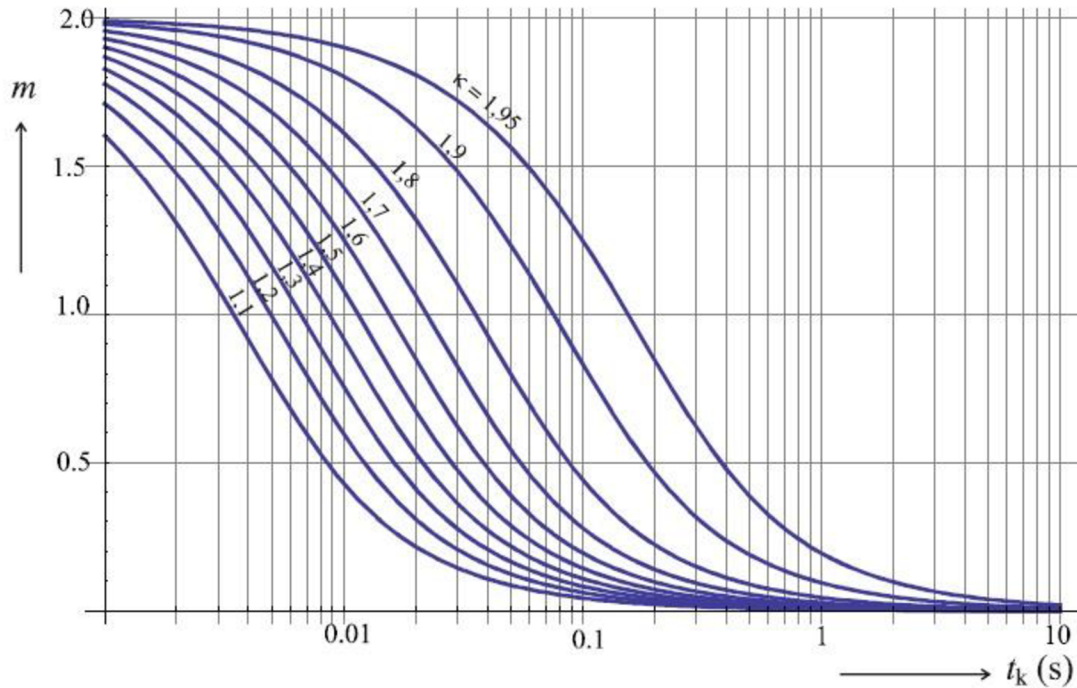
Ekvivalentní oteplovací proud I_{th} je dán energií tepla, která je vytvořena průchodem zkratového proudu $i(t)$ po dobu trvání zkratu t_k v elektrickém obvodu. Tuto energii určuje Jouleův integrál [4].

$$\int_0^{t_k} i_k^2(t) dt = I_{th}^2 \cdot t_k \quad (3)$$

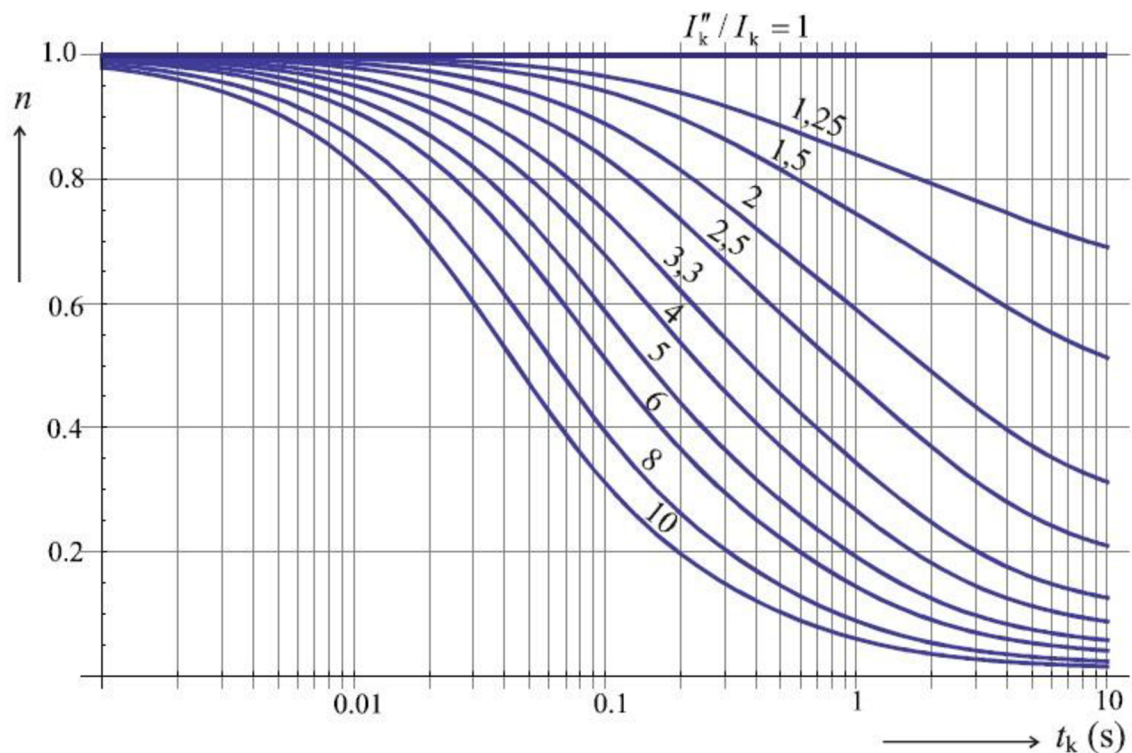
Pro výpočet oteplovacího proudu se v praxi používají součinitele m , n definované v [5]. Součinitel m odpovídá průběhu stejnosměrné složky zkratového proudu. Jak je zřejmé z Obr. 3 [4], určuje ho závislost na součiniteli nárazového zkratového proudu κ a době trvání zkratu t_k . Součinitel n odpovídá průběhu střídavé složky zkratového proudu. Jeho hodnoty lze vyčíst z Obr. 4 [4]. Je dán závislostí poměru I_k''/I_k a době trvání zkratu t_k [4].

Ekvivalentní oteplovací proud určíme ze vztahu:

$$I_{th} = I_k'' \cdot \sqrt{m + n} \quad (4)$$



Obr. 3 – Součinitel pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu m [4]



Obr. 4 – Součinitel pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu n [4]

5 DIMENZOVÁNÍ VODIČŮ

Elektrické vedení slouží k přenosu elektrické energie od zdroje elektrické energie ke spotřebiči. Toto zásobování je klíčové pro chod elektrických zařízení. Aby byla zaručena spolehlivost dodávky elektřiny, musí vedení odolat různým vlivům, ať už povětrnostním podmínkám, účinkům procházejícího proudu nebo ekonomické náročnosti provozu [6][7].

5.1 Zásady dimenzování

Zásady pro dimenzování elektrického vedení spočívají v určení průřezu vodiče tak, aby splňoval tyto zásadní provozní požadavky na:

- 1) nepřekročení maximální provozní teploty;
- 2) mechanickou pevnost;
- 3) dodržení maximálního dovoleného úbytku napětí na vodiči;
- 4) účinky zkratového proudu;
- 5) hospodárnost.

5.1.1 Dimenzování podle provozní teploty

Při průchodu elektrického proudu vodičem se uvolňuje teplo, které je dáno tepelným výkonem procházejícího proudu vodičem. Velikost tohoto výkonu je podle vztahu (5) úměrná druhé mocnině procházejícího proudu [6]:

$$P_j = R \cdot I^2, \quad (5)$$

kde P_j ... tepelný výkon,
 R ... elektrický odpor vodiče,
 I ... proud protékající vodičem.

Tento tepelný výkon nejvíce přispívá k oteplení vodiče a označujeme ho jako Jouleovy ztráty. Tyto ztráty vznikají průchodem střídavého elektrického proudu. V katalozích vodičů lze najít hodnoty elektrického odporu vztažené na referenční teplotu 20°C. Odpor kovů s rostoucí teplotou roste a je ovlivněn použitým materiálem. Okolní teplota bývá často odlišná od této teploty. Proto je potřeba přepočítat referenční hodnotu odporu na skutečný odpor, který je vztažen na reálnou teplotu okolí. Lze použít vzorec (6) udávaný zdrojem [8]:

$$R_T = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_T - T_{20})), \quad (6)$$

kde R_T ... odpor při skutečné teplotě,
 R_{20} ... odpor při teplotě 20°C,
 α ... teplotní součinitel odporu,
 T_T ... skutečná termodynamická teplota,
 T_{20} ... termodynamická teplota při 20 °C.

Teplotní součinitel odporu je $\alpha = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ pro měď a $\alpha = 3,77 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ pro hliník [9].

Přepočet z teploty celsiovy (°C) na termodynamickou teplotu (K) se vypočítá podle zdroje [10] jako:

$$T = t + 273,15. \quad (7)$$

Na vodič působí ještě další vlivy, které ovlivňují jeho výslednou teplotu. Mezi ně patří výkon dodaný Sluncem nebo výkon odvedený konvekcí a radiací [8].

Výkon dodaný Sluncem stejně jako Jouleovy ztráty přispívají k celkovému oteplení vodiče. Naopak odvedený výkon odvádí teplo do objemu vodiče nebo do okolí [8].

Konvekce

Při sdílení tepla prouděním (konvekcí) dochází k výměně tepla mezi vodičem a okolním vzduchem. Ten se ohřívá, zvětšuje svůj objem a tím i zmenšuje hustotu. Stává se tak lehčí než okolní studený vzduch a díky vztlaku stoupá vzhůru. Chladnější vzduch se dostane do kontaktu s vodičem a celý postup se opakuje. V atmosféře se uplatňuje také princip nuceného proudění, tzn. že je proud vzduchu vyvolán větrem a chlazení je účinnější [10].

Radiace

Teplo se mezi předmětem a jeho okolím přenáší sáláním, neboli tepelným zářením zprostředkovaným elektromagnetickými vlnami. Vyzářený výkon se podle literatury [10] určí jako:

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S(T_0^4 - T_T^4) \quad (8)$$

kde	P_r ...	výkon vyzářený radiací,
	σ ...	Stefanova-Boltzmannova konstanta,
	ε ...	koeficient emisivity tepelného záření,
	S ...	povrch vyzařovaného předmětu,
	T_0 ...	teplota vodiče,
	T_T ...	teplota okolí.

Hodnota Stefan-Boltzmannovy konstanty je $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Dle normy [11] se uvažuje koeficient emisivity pro vodiče $\varepsilon = 0,5$.

Vedení se dimenzuje na maximální provozní teplotu, při které je zaručena správná funkčnost a životnost izolace, která je na vysoké teploty velmi náchylná. Množství tepla vyvinuté v materiálu vodiče je v ustáleném stavu stejně velké jako množství tepla odevzdané do okolního prostředí. Nepřekročení této teploty je dosaženo, pokud je jmenovitý proud kabelu o daném průřezu vyšší, než dovolený zatěžovací proud přepočtený na referenční hodnotu teploty a respektující uložení.

5.1.2 Dimenzování podle maximálního úbytku napětí

Pokud vedením protéká proud, způsobuje na jeho impedanci \bar{Z} (odporu R a reaktanci X) úbytek napětí a tím i pokles napětí na svorkách spotřebičů. Tento pokles napětí může mít negativní dopad na provoz spotřebiče (např. moment motoru, vlastnosti světelných zdrojů, ...). Kvalitativním ukazatelem dodávky elektrické energie je poměr úbytku napětí na vedení a jmenovité hodnoty napětí na výstupních svorkách. Lze jej vypočítat jako [7]:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_f} \cdot 100, \quad (9)$$

kde Δu ... procentuální úbytek napětí,
 ΔU ... úbytek napětí na impedanci,
 U_f ... jmenovité napětí sítě.

V třífázových střídavých sítích se úbytek fázového napětí, při účinníku odběru vyšším nebo rovném 0,5, určí podle vztahu:

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos\phi + X \cdot I \cdot \sin\phi \quad (10)$$

kde ΔU ... úbytek napětí na impedanci,
 R ... elektrický odpor vedení,
 I ... proud tekoucí vedením,
 $\cos\phi$... účinník odběru,
 X ... reaktance vedení.

Pokud je účinník nižší, než 0,5, počítáme úbytek jako:

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos\phi + X \cdot I \cdot \sin\phi \cdot \frac{(R \cdot I \cdot \sin\phi - X \cdot I \cdot \cos\phi)^2}{2} \quad (11)$$

Jediným parametrem, jak snížit úbytek napětí (pokud neuvažujeme o napájení z paralelní větve, čímž by došlo ke snížení protékajícího proudu vedením) je změna odporu vodiče. Elektrický odpor je závislý na průřezu vodiče S , délce vedení l a rezistivitě materiálu ρ . Odpor lze vyjádřit vztahem:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (12)$$

5.1.3 Dimenzování s ohledem na hospodárnost

Navrhování elektrických vedení se musí v neposlední řadě řídit tím, aby celkové roční náklady na pořízení, údržbu a provoz byly v hospodárných mezích [7].

Hospodárný průřez se určí jako:

$$S = k \cdot I_z \cdot \sqrt{T}, \quad (13)$$

kde k ... koeficient uvedený v normě [12] v tab.1,
 I_z ... výpočtový proud,
 T ... doba plných ztrát.

Tato doba se vypočítá jako:

$$T = t \cdot \left(0,2 \cdot \frac{A}{P_p \cdot t} + 0,8 \cdot \frac{A^2}{P_p^2 \cdot t^2} \right), \quad (14)$$

kde t ... počet provozních hodin zařízení,
 A ... elektrická energie přenesená vedením za rok,
 P_p ... výpočtové zatížení.

Hospodárný průřez podle vztahu (13) se kontroluje, pokud doba plných ztrát (14) nepřesáhne 1000h/rok a doba životnosti bude alespoň 10 let [7].

5.1.4 Dimenzování s ohledem na mechanické namáhání

Vodiče a kabely pro silnoproudý rozvod musí odolat mechanickému namáhání při všech možných stavech provozu. Dimenzování na mechanické namáhání venkovních vodičů spočívá především v tom, aby bylo vyhověno nárokům na spolehlivost a bezpečnost majetku a osob, pohybujících se v blízkosti vedení, provádějící montáž anebo údržbu. U kabelů se jedná především o namáhání při pokládce anebo vtahování do kabelových kanálků [1][7].

5.1.5 Dimenzování na tepelné účinky zkratových proudů

Dimenzování vodičů spočívá také ve schopnosti odolání účinkům zkratových proudů, které jsou mnohdy několikanásobně větší, než jmenovité zátěžné proudy. Při průchodu zkratových proudů vodiči musíme kontrolovat jejich tepelné a silové účinky [1].

Působení tepla při průchodu zkratového proudu ovlivňuje všechny druhy a typy vedení. Je velmi ovlivněno velikostí procházejícího proudu, ale také dobou trvání zkratu. Tato doba je určena rychlostí vybavení zkratových ochran. Ve srovnání délky trvání zkratu a časové oteplovací konstanty můžeme tvrdit, že teplo, které se při průchodu zkratového proudu vyvine, se akumuluje pouze v materiálu vodiče a nestačí se odvést ani vyzářit do okolního prostředí. Při návrhu vedení uvažujeme, že se teplota jádra změní z provozní teploty ϑ_z na maximální teplotu vodiče při průchodu zkratu ϑ_k . Stane se tak za maximální dobu vypnutí zkratu t_k [1][7].

Za předpokladu, že při průchodu zkratového proudu nemají vliv tyto aspekty:

1. magnetické pole vlastního vodiče, ani blízkých vodičů (proudová hustota je v průřezu vodiče homogenní),
2. nelineární závislost elektrického odporu na teplotě,
3. změna měrného tepla při změně teploty,

platí, že se veškeré teplo vyvinuté průchodem proudu akumuluje ve vodiči [1][7].

Toto tvrzení lze zapsat pomocí rovnosti:

$$R(t)dt = c \cdot V d\vartheta. \quad (15)$$

Tento vztah lze dále upravit na:

$$\rho \cdot \frac{l}{S} \cdot i^2(t)dt = c \cdot S \cdot l d\vartheta, \quad (16)$$

$$i^2(t)dt = \frac{c \cdot S^2}{\rho(\vartheta)} d\vartheta, \quad (17)$$

kde c ... specifické teplo vodiče stanovené z Tab. 1 [13],

V ... objem vodiče,

S ... průřez jádra vodiče,

l ... délka vodiče,

ρ ... rezistivita vodiče.

		Cu	Al
Měrný odpor:	ρ_{20} ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	0,01786	0,02941
Fiktivní teplota:	ϑ_f ($^{\circ}\text{C}$)	234,5	228
Specifické teplo:	C_0 ($\text{J}/\text{cm}^3/^{\circ}\text{C}$)	3,5	2,417

Tab. 1 – Materiálové konstanty [13]

Rezistivita je funkcí teploty a její závislost lze vyjádřit jako:

$$\rho(\vartheta) = \rho_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot \vartheta). \quad (18)$$

kde α_0 ... teplotní součinitel odporu,

ρ_0 ... rezistivita vodiče při 0°C ,

$$\rho_0 = \frac{\rho_{20}}{1 + \alpha_0 \cdot 20}, \quad (19)$$

ρ_{20} ... rezistivita při teplotě 20°C .

Dosadíme-li (19) do rovnice (18), dostaneme:

$$\rho(\vartheta) = \frac{\rho_{20}}{1 + \alpha_0 \cdot 20} (1 + \alpha_0 \cdot \vartheta). \quad (20)$$

Do diferenciální rovnice dosadíme (20) a zintegrujeme:

$$\int_0^{t_k} i_k^2(t) dt = \frac{c \cdot S^2 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot 20)}{\rho_{20}} \cdot \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_k} \frac{1}{1 + \alpha_0 \cdot \vartheta} d\vartheta. \quad (21)$$

Meze integrálu na levé straně určuje doba zkratu t_k (s), na pravé straně nejvyšší dovolená teplota vodiče ϑ_z a nejvyšší dovolená teplota při zkratu ϑ_k [7].

Z normy [3] definujeme ekvivalentní oteplovací proud I_{th} jako:

$$\int_0^{t_k} i_k^2(t) dt = I_{th}^2 \cdot t_k, \quad (22)$$

kde I_{th}^2 ... ekvivalentní oteplovací proud (A),

t_k ... doba trvání zkratu (s).

Řešením (21) dostaneme:

$$I_{th}^2 \cdot t_k = \frac{c \cdot S^2 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot 20)}{\rho_{20}} \cdot \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_k} \frac{1}{1 + \alpha_0 \cdot \vartheta} d\vartheta, \quad (23)$$

$$I_{th}^2 \cdot t_k = \frac{c \cdot S^2 \cdot (20 + \frac{1}{\alpha_0})}{\rho_{20}} \cdot \int_{\vartheta_z}^{\vartheta_k} \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \vartheta} d\vartheta. \quad (24)$$

Integrací a následným dosazení mezi získáme:

$$I_{th}^2 \cdot t_k = \frac{c \cdot S^2 \cdot (20 + \frac{1}{\alpha_0})}{\rho_{20}} \ln \frac{\frac{1}{\alpha_0} + \vartheta_k}{\frac{1}{\alpha_0} + \vartheta_z}. \quad (25)$$

Do vztahu (25) zavedeme substituci: $\vartheta_f = \frac{1}{\alpha_0}$, kde ϑ_f je fiktivní teplota (Tab. 1).

$$I_{th}^2 \cdot t_v = \frac{c \cdot S^2 \cdot (20 + \vartheta_f)}{\rho_{20}} \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_z}. \quad (26)$$

Fiktivní teplota je převrácená hodnota teplotního součinitele odporu α_0 a je závislá na použitém materiálu.

Minimální průřez, který je potřebný k akumulování veškerého tepla, které se vyvine při průchodu zkratového proudu, aniž by byla překročena maximální dovolená teplota vodiče při zkratu, lze vyjádřit z (26) jako:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{t_k}}{\sqrt{\frac{c \cdot (20 + \vartheta_f)}{\rho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_z}}}. \quad (27)$$

5.1.6 Dimenzování na dynamické účinky zkratových proudů

Dva rovnoběžné vodiče, kterými protéká proud, na sebe působí silami a vytváří se kolem nich magnetické pole. V našem případě zavedeme předpoklad, že vodiči poteče stejný proud i . Intenzita magnetického pole ve vzdálenosti a se dá vyjádřit následovně [7]:

$$H = \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot a}, \quad (28)$$

kde H ... intenzita magnetického pole,

i ... okamžité hodnoty proudů protékající vodiči,

a ... osová vzdálenost vodičů.

Velikost magnetické indukce B , které působí na vodiče, vyjádříme jako:

$$B = \mu_0 \cdot H = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot a} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i}{a}. \quad (29)$$

Přitažlivé síly rovnoběžných vodičů jsou zapříčiněny magnetickou indukci B obou vodičů. Pokud dosadíme za magnetickou indukci (29), vypočítáme sílu tímto způsobem:

$$F = B \cdot l \cdot i = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i^2}{a} \cdot l, \quad (30)$$

kde F ... vzájemná přitažlivá síla,

l ... délka vodičů.

Při dimenzování vodičů je potřeba zajistit, aby pevnost vodičů odolala největší možné síle, která vznikne při maximální okamžité hodnotě proudu při trojfázovém zkratu. Tento proud je označován jako nárazový zkratový proud i_p . Vztah (30) platí pro nekonečně dlouhé, nehmotné vodiče. Při návrhu musíme respektovat tvar, velikost průřezu, prostorové uspořádání vodičů a fázový posuv proudů v jednotlivých fázích. Při dimenzování přípojnic vznikají dva druhy sil. První jsou síly mezi vodiči jednotlivých fází F_m , druhé jsou mezi dílčími vodiči v jedné fázi F_s . U jednoduchých přípojnic kontrola dílčí síly mezi vodiči odpadá, protože máme pouze jeden vodič. Ale u dvojitých přípojnic nesmíme na tuto sílu zapomínat.

Výsledný vztah pro maximální sílu mezi vodiči jednotlivých fází bude [7]:

$$F_m = 2 \cdot k \cdot \frac{i_p^2}{a_m} \cdot l \cdot 10^{-7}, \quad (31)$$

kde k ... koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posuv proudů v jednotlivých vodičích,
 a_m ... účinná vzdálenost mezi vodiči, která respektuje geometrický tvar a průřez vodiče.

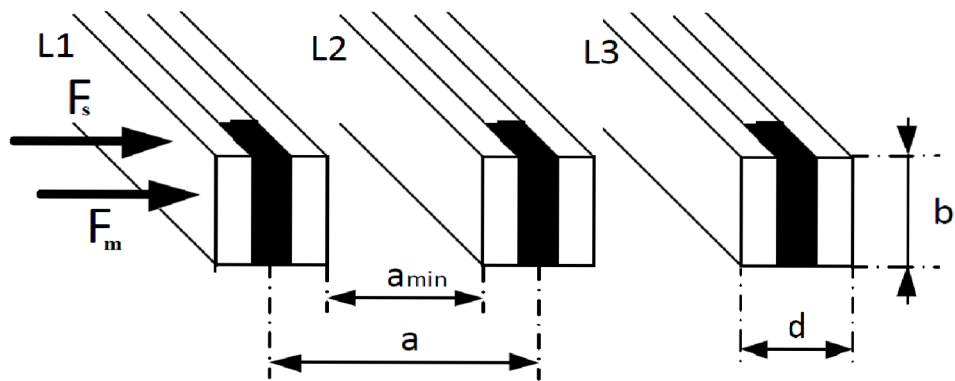
Koeficient k nabývá hodnoty $\frac{\sqrt{3}}{2}$ pro prostřední vodič trojfázové soustavy v rovinném uspořádání (tento koeficient je používán v této práci, protože se jedná o nejhorší možný stav v daném uložení). Pro krajní vodič trojfázové soustavy v rovinném uspořádání se $k = 0,81$ a pro vodiče trojfázové soustavy v uspořádání do rovnostranného trojúhelníku se používá hodnota 0,85. Pro výpočet síly mezi vodiči v jedné fázi se k uvažuje jako 1. Účinná vzdálenost mezi vodiči $a_m = a$ pro vodiče kruhového průřezu. Pro vodiče obdélníkového průřezu se $a_m = a/k_{1s}$, kde k_{1s} je součinitel pro výpočet účinné vzdálenosti, který se určuje podle normy [9] buď odečtením z Obr. 7 anebo výpočtem ze vzorce dle dané normy [9], a vzdálenost a je osová vzdálenost vodičů jednotlivých fází. Tu vypočítáme z minimální vzdušné vzdálenosti vodičů, kterou vyčteme z Tab. 2 [13], ke které připočteme dvojnásobek poloviny horizontálního rozměru přípojnice (d) [13].

$$a = a_{min} + 2 \cdot \frac{d}{2}, \quad (32)$$

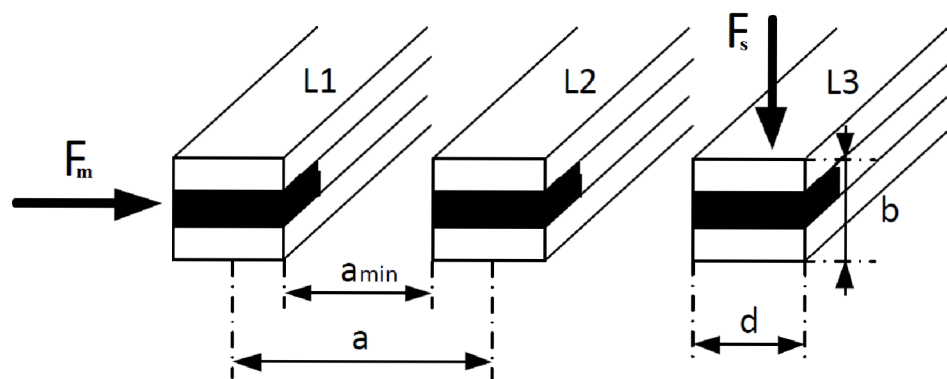
Nejvyšší napětí	[kV]	7,2	12	25	38,5	72,5	123	145	245	420
Minimální vzdálenost fází	[mm]	90	120	210	320	630	1100	1300	2100	2600

Tab. 2 – Nejmenší vzdušné vzdálenosti živých částí v rozvodných zařízeních [13]

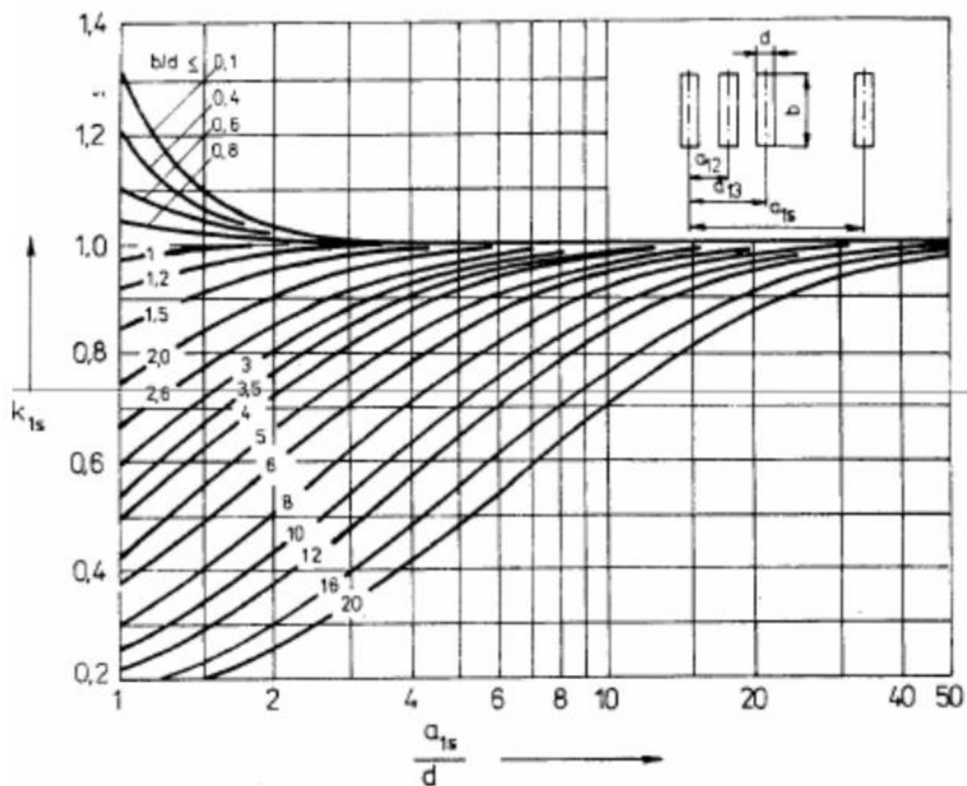
Poté pro určení koeficientu k_{1s} určíme poměr $\frac{a}{a}$ a $\frac{b}{a}$, kde b se uvažuje u vodorovných dvojitých přípojnic jako součet tloušťky obou dílčích přípojnic a tloušťky rozpěrky. Určování rozměrů pro výpočet k_{1s} je pro různé typy uložení zobrazen na Obr. 5 a 6.



Obr. 5 – Rozměry svisle uložených dvojtých přípojnic s vyznačením působících sil [13]



Obr. 6 – Rozměry vodorovně uložených dvojtých přípojnic s vyznačením působících sil [13]



Obr. 7 – Určení koeficientu k_{1s} [13]

Při výpočtu sil působící mezi dílčími vodiči uvažujeme, že proud tekoucí danou fází je rovnoměrně rozdělen do jednotlivých dílčích vodičů, čili proud $i_p = \frac{i_p}{n}$, kde n je počet dílčích vodičů. Poté je vztah pro výpočet síly mezi dílčími vodiči následující:

$$F_s = 2 \cdot \left(\frac{i_p}{n}\right)^2 \cdot \frac{l_s}{a_s} \cdot 10^{-7}, \quad (33)$$

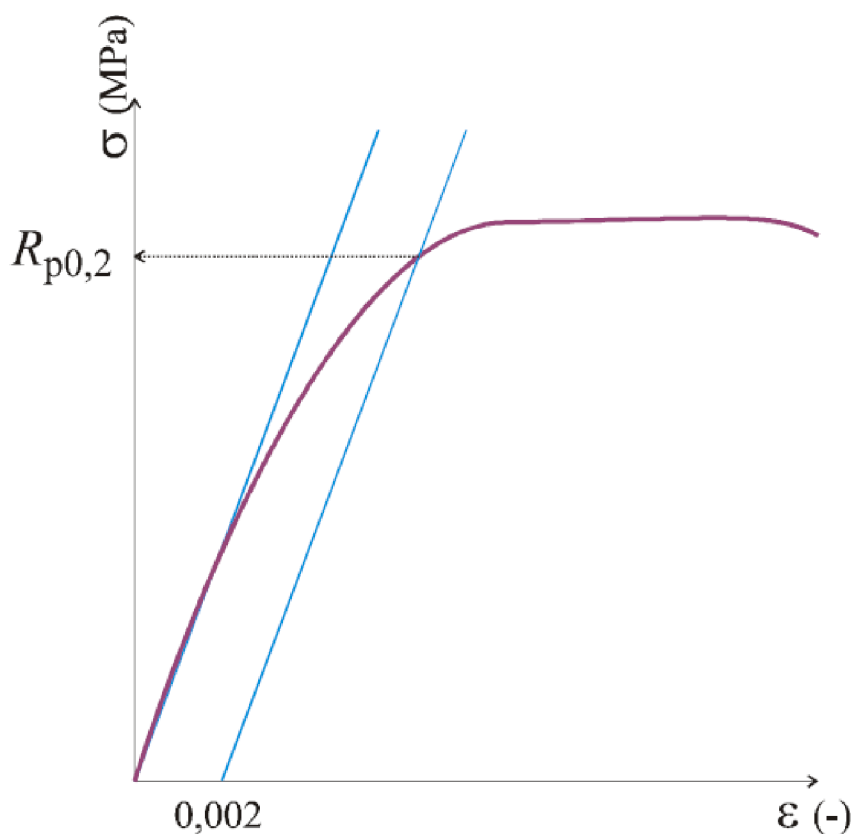
kde n ... počet dílčích vodičů v jedné fázi,

l_s ... vzdálenost rozpěrek, které se vkládají mezi dílčí vodiče, aby se zmenšila síla a tím také ohybové namáhání (pokud není mezi dílčími vodiči žádná rozpěrka, $l_s = l$),

a_s ... účinná vzdálenost mezi dílčími vodiči.

Opět platí, že $a_s = \frac{a}{k_{1s}}$. Minimální vzdálenost mezi dílčími vodiči se volí stejně velká, jako je rozměr d jednoho dílčího vodiče, tudíž $a = 2 \cdot d$. Pro určení k_{1s} dosazujeme do neznámých b i d rozměr b a d jedné dílčí přípojnice [13].

Při působení síly na pevně uložené vodiče dochází k ohybovému namáhání. Pro správné navržení musí být ohybové namáhání menší, než tahové namáhání, které způsobí nevratnou (plastickou) deformaci materiálu, ze kterého jsou přípojnice vyrobeny. U těchto materiálů je obtížné určit přesné rozmezí mezi dočasnou (elastickou) a trvalou (plastickou) deformací. Používá se smluvní mez v tahu $R_{p,0,2}$, zobrazená na Obr. 8 [7]. Podle literatury [7] napětí o takovéto velikosti způsobí plastickou deformaci o 0,2 %. $R_{p,0,2}$ je pro měď přibližně 100 MPa a pro hliník 45 MPa.



Obr. 8 – Určení napětí $R_{p,0,2}$ z tahové zkoušky [7]

Jestliže budou splněny následující podmínky, tak budou přípojnice správně nadimenzovány na působení dynamických sil vzniklých při průchodu zkratového proudu:

pro jednoduché přípojnice:

$$\sigma_m \leq q \cdot R_{p,0,2}, \quad (34)$$

pro složené přípojnice ze dvou a více dílčích vodičů:

$$\sigma_{tot} = \sigma_m + \sigma_s \leq q \cdot R_{p,0,2} \quad (35)$$

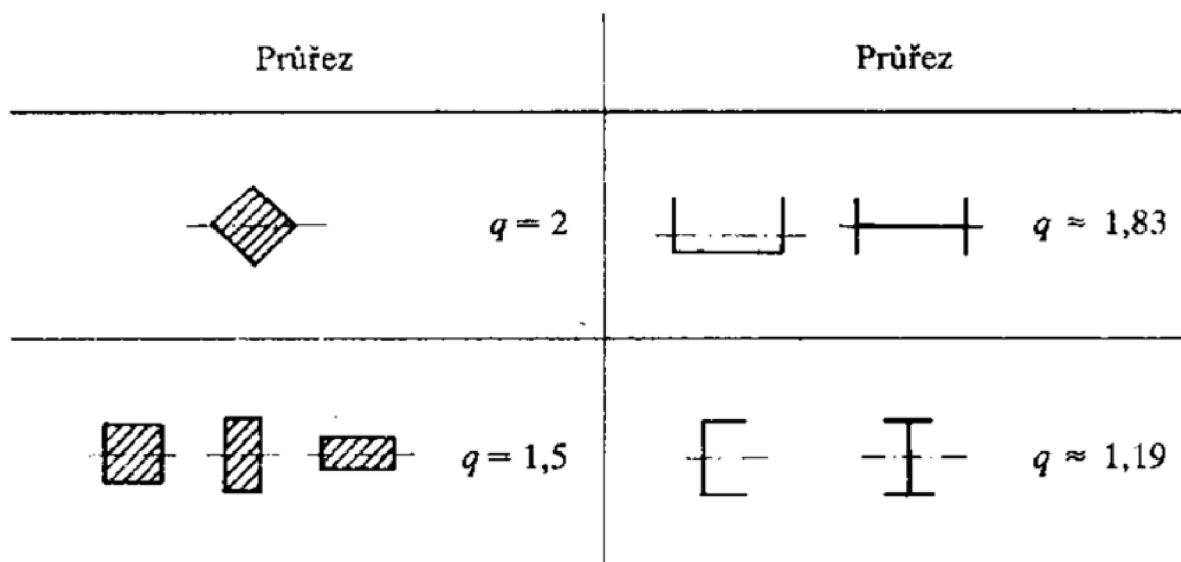
a současně:

$$\sigma_s \leq R_{p,0,2}, \quad (36)$$

kde σ_m ... ohybové namáhání hlavních vodičů,

σ_s ... ohybové namáhání dílčích vodičů,

q ... součinitel plasticity průřezu vodiče vyčtený z Obr. 9 [7].



Obr. 9 – Součinitel plasticity průřezu vodiče [7]

Pro výpočet ohybového namáhání σ_m platí:

$$\sigma_m = V_\sigma \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_m \cdot l}{8 \cdot Z_m}, \quad (37)$$

kde V_σ ... poměr dynamického a statického příspěvků namáhání hlavního vodiče získaný z Obr. 10 [7],

V_r ... poměr příspěvku úspěšného a neúspěšného opětovného zapnutí k dynamickému namáhání hlavního vodiče, který je uveden v Obr. 10 [7],

β ... součinitel respektující typ upevnění vodiče a počet podpěr, vyčtený z Obr. 11 [7],

l ... vzdálenost mezi podpěrkami,

Z_m ... průřezový modul hlavního vodiče.

Druh zkratu	Soustava			
	Bez trojfázového automatického opětovného zapínání	S trojfázovým automatickým opětovným zapínáním	S a bez trojfázového automatického opětovného zapínání	
	$V_{om} V_{rm} V_{os} V_{rs}$	$V_{om} V_{rm} V_{os} V_{rs}$	$V_F V_m$	
		První průchod proudů	Druhý průchod proudů	
Mezi dvěma vodiči	1,0	1,0	1,8	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <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> </div> <div style="width: 10%; text-align: center;">rozsah</div> <div style="width: 45%;"> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> </div> </div>
Trojfázový zkrat	1,0	1,0	1,8	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <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> </div> <div style="width: 10%; text-align: center;">rozsah</div> <div style="width: 45%;"> <p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> </div> </div>

Obr. 10 – Vliv opětovného zapnutí na ohybové namáhání [7]

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.

Obr. 11 – Součinitel respektující typ upevnění vodiče a počet podpěr [7]

Průřezový modul vypočítáme podle [14] jako:

$$Z_m = \frac{J}{\frac{d}{2}}, \quad (38)$$

kde $J \dots$ moment setrvačnosti, vyjádřený pro obdélníkový průřez jako $J = \frac{b \cdot d^3}{12}$,

$b, d \dots$ rozměry přípojníc

Výsledný vztah pro průřezový modul Z_m bude:

$$Z_m = \frac{1}{6} \cdot b \cdot d^2 \quad (39)$$

Pokud se jedná o výpočet průřezového modulu hlavního vodiče Z_m u dvojitých přípojníc, musíme výsledek vynásobit počtem dílčích přípojníc (dvěma).

V případě, že je hlavní vodič složen ze dvou a více dílčích vodičů, se určuje i ohybové namáhání dílčích vodičů σ_s , které je vyvolané silami, které působí na dílčí vodiče [7].

$$\sigma_s = V_{\sigma s} \cdot V_{rs} \cdot \frac{F_s \cdot l_s}{16 \cdot Z_s}, \quad (40)$$

kde $V_{\sigma s} \dots$ poměr dynamického a statického příspěvků namáhání dílčích vodičů (Obr. 11),

$V_{rs} \dots$ poměr příspěvků úspěšného a neúspěšného opětovného zapnutí k dynamickému namáhání dílčích vodičů (Obr. 11),

$l_s \dots$ vzdálenost mezi rozpěrkami nebo výztužnými vložkami,

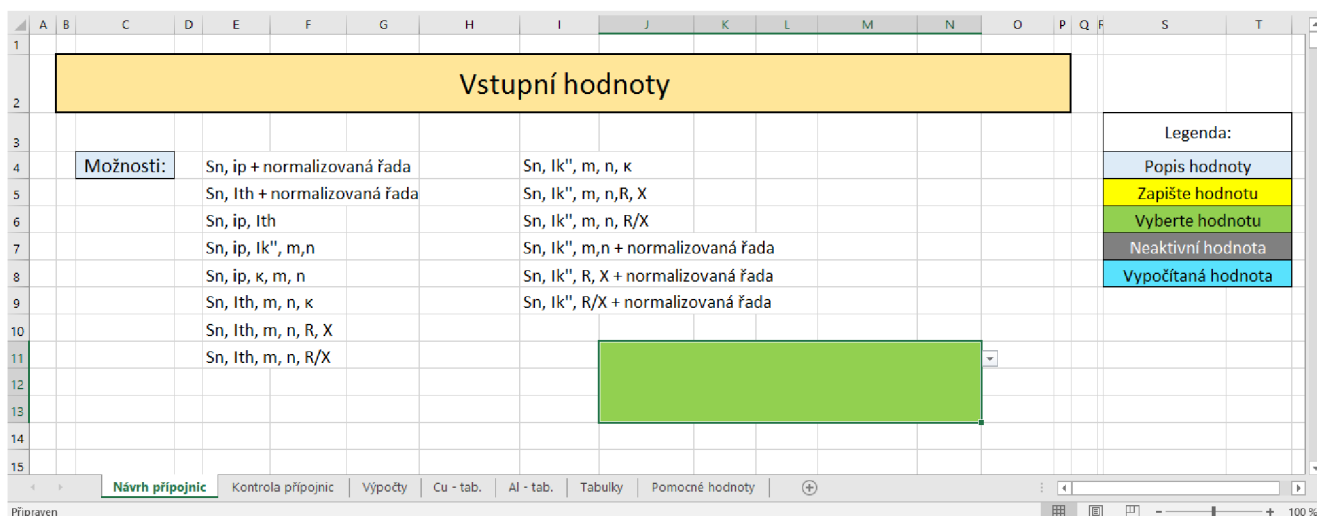
$Z_s \dots$ průřezový modul dílčího vodiče, vypočítaný podle (39) s rozměry dílčí přípojnice.

Vhodným vložením výztužných vložek lze docílit snížení dílčího ohybového namáhání při menších rozměrech přípojníc, čili při nižší pořizovací ceně [3].

6 KOMENTÁŘ K ZADÁVÁNÍ HODNOT DO VYTVOŘENÉHO PROGRAMU

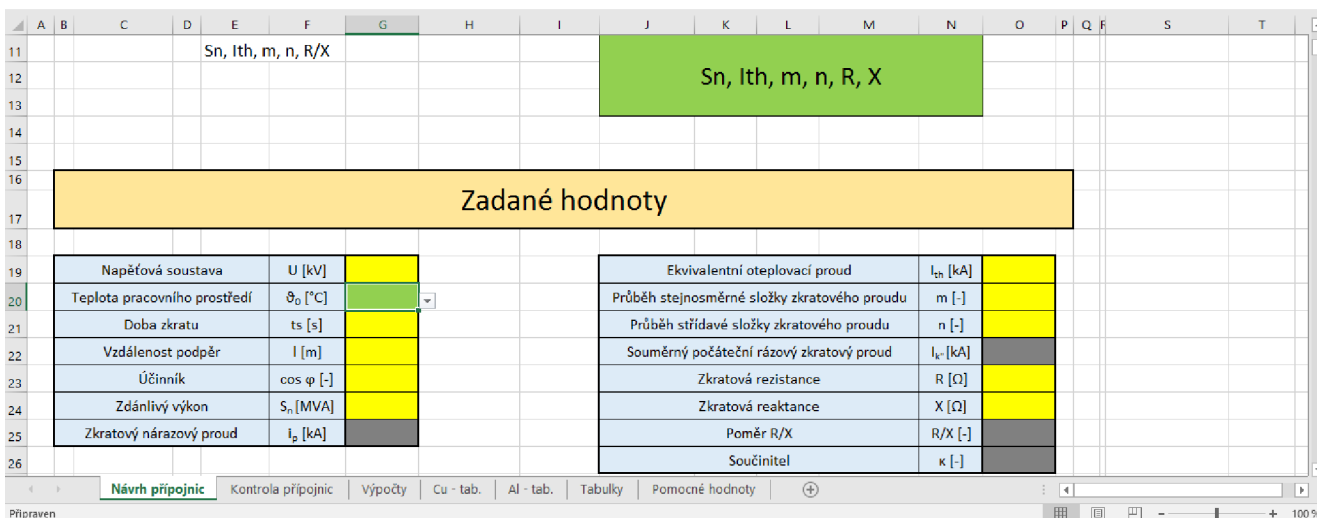
Po spuštění souboru „Výpočet profilových vodičů pro přípojnice.xlsx“ se otevře první list programu s názvem „Návrh přípojnic“. Na dolní liště excelovského prostředí lze vybrat druhou variantu výpočtu a to „Kontrola přípojnic“.

Zde se čeká na zadání vstupních hodnot uživatelem. V pravé části je legenda, podle které jsou barevně rozlišena pole, se kterými uživatel zachází. Nejprve v sekci „Vstupní hodnoty“ vybereme variantu vstupních hodnot. Klepnutím na zelené políčko se vpravo objeví šipka, která rozevře rolovací menu, ve kterém vybereme požadované vstupní hodnoty.



Obr. 12 – Návrh přípojnic - Vstupní hodnoty

S každou změnou se v sekci „Zadané hodnoty“ změní barva u vybraných kolonek. Do pole, které je označeno žlutou barvou, je potřeba zapsat danou hodnotu v jednotkách, které jsou v hranaté závorce. Výpočty budou prováděny na základě těchto hodnot. Teplota okolí (zelené políčko) se volí stejným způsobem, jako výběr vstupních hodnot. Šedá pole značí neaktivní kolonky. S hodnotami v šedých kolonkách nebude počítáno.



Obr. 13 – Návrh přípojnic - Zadání hodnot

Následně je potřeba vyplnit základní údaje o přípojnicích a soustavě. Tyto hodnoty se doplňují do oddílu „Výběr z možností“.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
27	Výběr z možností												
28													
29													
30	Materiál přípojnic												
31													
32	Typ a uložení přípojnic												
33													
34	Jaké je zatížení vodičů ?												
35													
36	Zahrnout do výpočtu účinník ?												
37													
38	Koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posuv												
39													
40	Typ nosníku a způsob uložení												
41													
42	Druh soustavy												
43													

Návrh přípojnic | Kontrola přípojnic | Výpočty | Cu - tab. | Al - tab. | Tabulky | Pomocné hodnoty

Připraven

Obr. 14 – Návrh přípojnic - Výběr z možností

Poté jsou vypsány podmínky, na které jsou přípojnice dimenzovány a nakonec jsou zobrazeny parametry přípojnic, které odolají účinkům zkratového proudu.

89	Kontrola podmínek											
90												
91	$S_{min} \leq S$											
92	\leq											
93												
94	$\sigma_{tot} < q \cdot R_p 0,2$											
95	\leq											
96												
97	$\sigma_s < R_p 0,2$											
98	\leq											
99												
100												
101	Navržená přípojnice											
102												
103	Materiál :											
104	Typ :											
105	Uložení :											
106	Rozměr :											
107	Počet rozpěrek :											
108												

Návrh přípojnic | Kontrola přípojnic | Výpočty | Cu - tab. | Al - tab. | Tabulky | Pomocné hodnoty

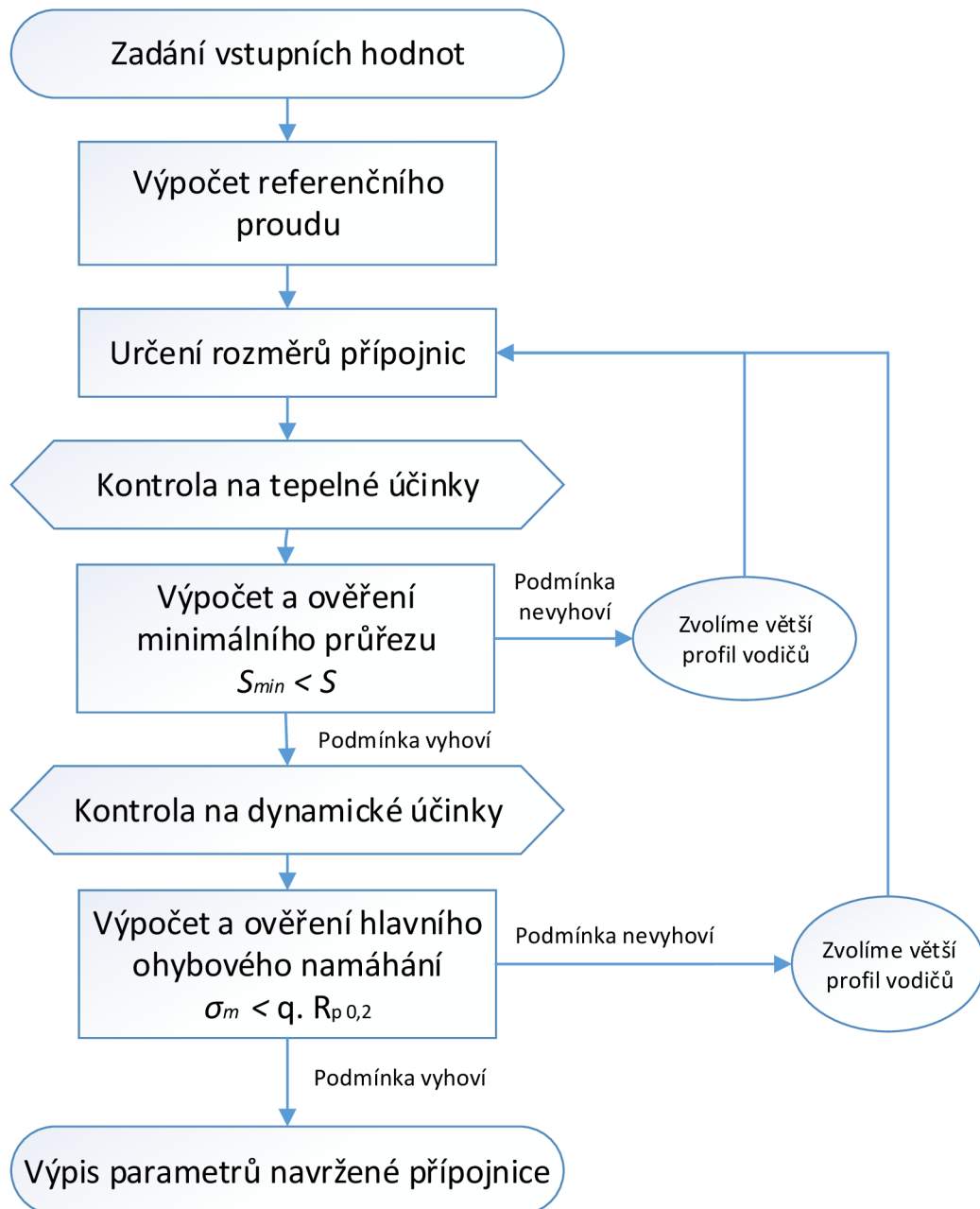
Obr. 15 – Návrh přípojnic - Kontrola podmínek a výpis přípojnic

7 SYSTEMATICKÝ POSTUP VÝPOČTU

7.1 Schéma průběhu výpočtu

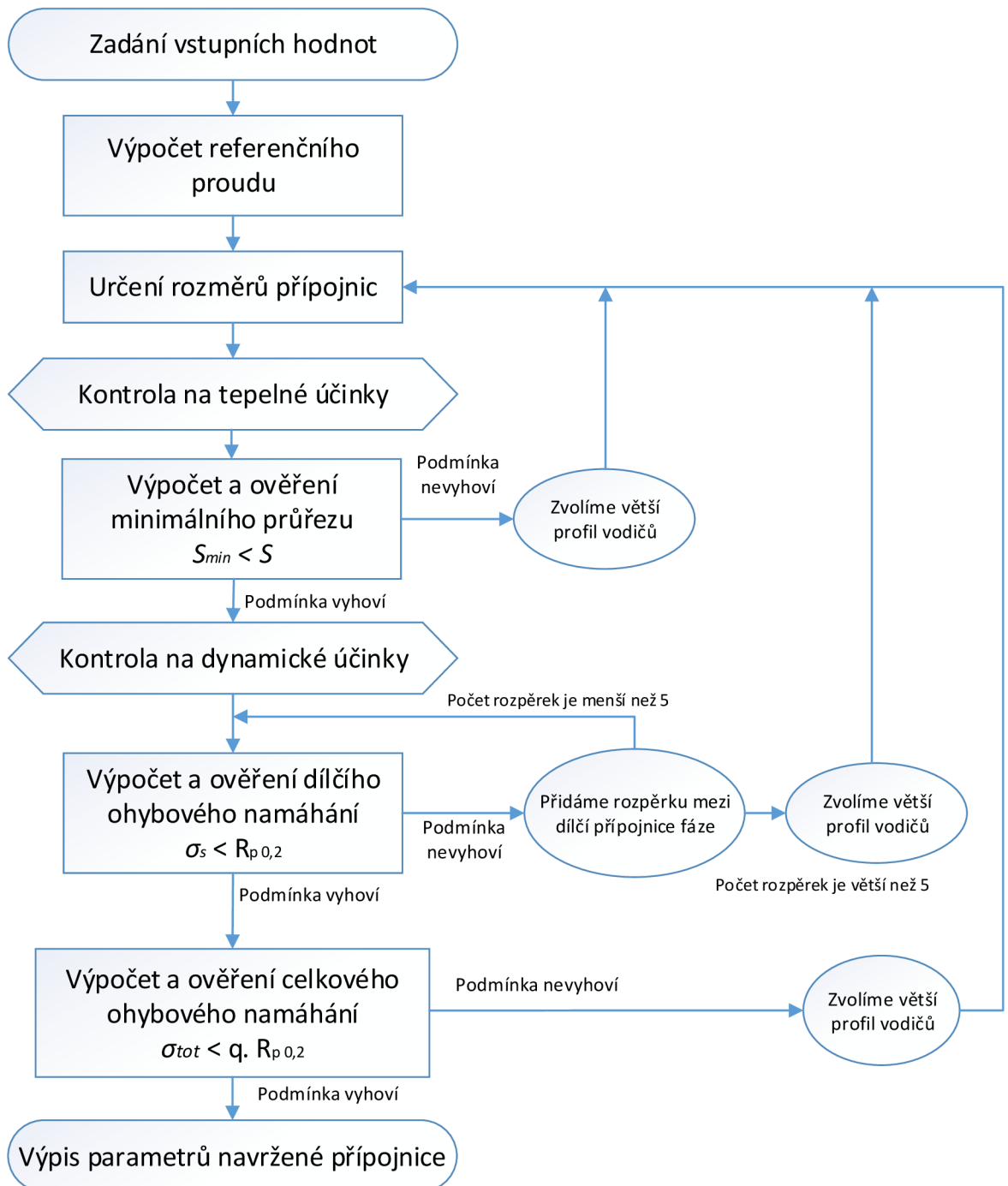
Po zadání vstupních hodnot a charakterování parametrů soustavy a přípojnic proběhne výpočet podle následujících schémat.

Schéma pro návrh jednoduchých přípojnic:



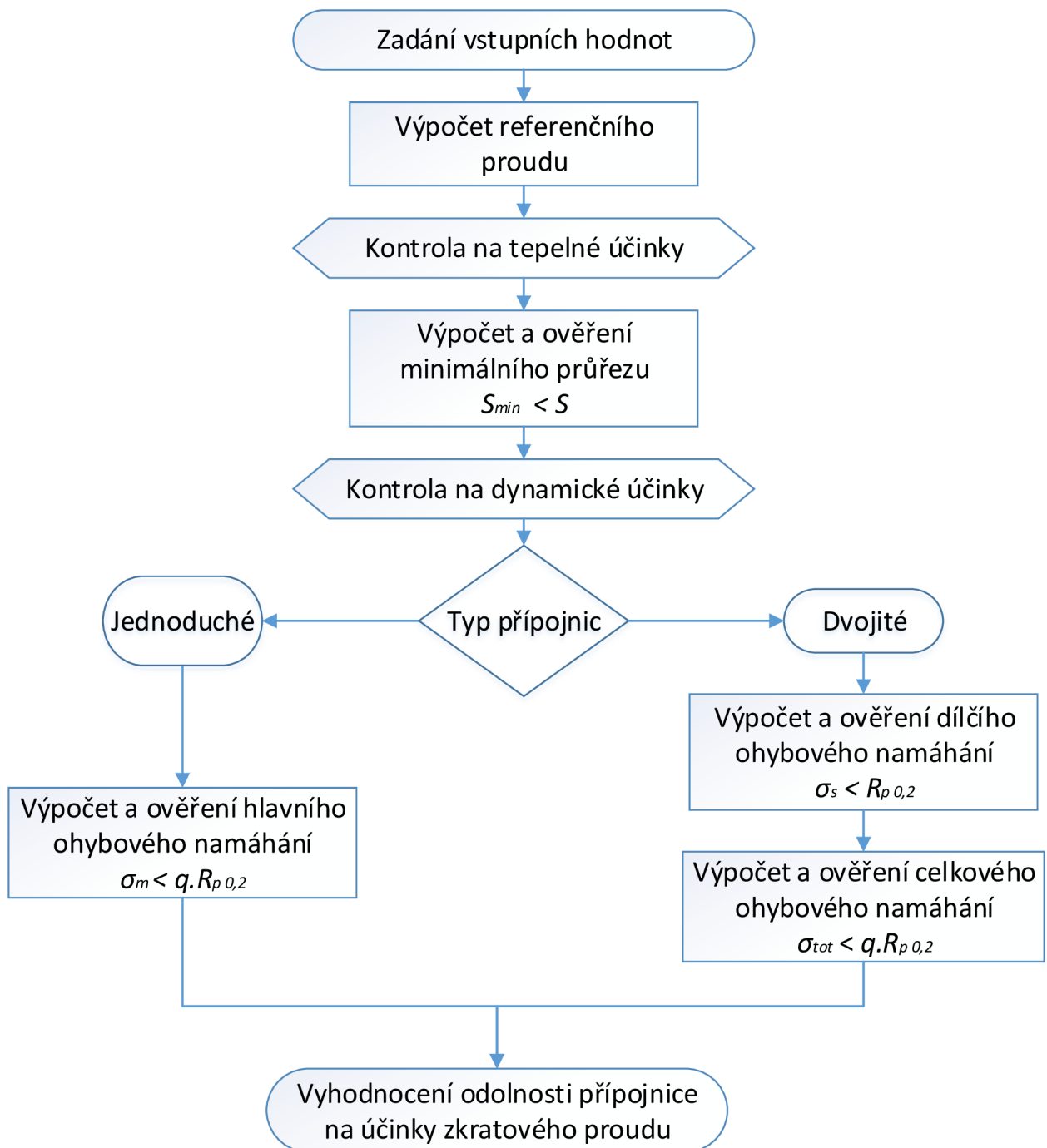
Obr. 16 – Vývojové schéma pro návrh jednoduché přípojnice

Schéma pro návrh dvojité přípojnice:



Obr. 17 – Vývojové schéma pro návrh dvojité přípojnice

Schéma pro kontrolu přípojnic:



Obr. 18 – Vývojové schéma pro kontrolu přípojnic

7.2 Vlastní výpočet

7.2.1 Určení nárazového a ekvivalentního oteplovacího zkratového proudu

Nejprve jsou z varianty vstupních hodnot přepočítány hodnoty I_{th} a i_p . Podle vybrané varianty jsou použity vztahy v kapitole 4 nebo je proveden přepočet na základě normalizované řady zkratových odolností, která je uvedena v Tab. 3 [13].

I_{vyp} [kA]	6,3	8	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63
I_k [kA]	6,3	8	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63
I_{dyn} [kA]	16	20	31,5	40	50	63	80	100	125	160

Tab. 3 – Normalizovaná řada zkratových odolností [13]

7.2.2 Výpočet referenčního proudu I_{ref}

Zátěžový proud I_z se stanoví ze zadaných hodnot pomocí vztahu

$$I_z = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}, \quad (40)$$

kde S_n ... zdánlivý výkon přenesený přes přípojnice

U ... napětí,

$\cos \varphi$... účinník.

Tento zátěžový proud je potřeba přepočítat na jmenovitý proud přípojnic při referenční teplotě okolního prostředí podle vztahu

$$I_{ref} = \frac{I_z}{k}, \quad (41)$$

kde k ... přepočítávací koeficient pro teplotu okolí určený z Tab. 4 [13], přičemž referenční hodnota teploty okolí je 30°C.

Nejvyšší dovolená provozní teplota jádra [°C]	Teplota prostředí [°C]									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
60	1,29	1,22	1,15	1,08	1	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41
65	1,25	1,2	1,13	1,07	1	0,93	0,85	0,76	0,65	0,53
70	1,22	1,17	1,12	1,06	1	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61
75	1,2	1,15	1,11	1,05	1	0,94	0,88	0,82	0,74	0,67
80	1,18	1,14	1,1	1,05	1	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71
85	1,17	1,13	1,09	1,04	1	0,95	0,9	0,85	0,8	0,74
90	1,15	1,12	1,08	1,04	1	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76
95	1,11	1,08	1,06	1,03	1	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85

Tab. 4 – Přepočítávací součinitelé pro okolní teploty vzduchu odlišné od referenční teploty [13]

7.2.3 Určení rozměru přípojnic

Poté jsou při respektování materiálu a typu uložení vodiče vybrány vhodné rozměry přípojnice, které jsou schopny přenést větší jmenovitý proud, než je referenční proud. Jsou použity přípojnice s nejbližším vyšším proudem, než je referenční proud. Tímto je zaručeno dodržení hospodárné holby přípojnice. Jednotlivé varianty rozměrů přípojnic jsou vypsány v literatuře [13] v Tabulce 5.10 a 5.12 [13].

7.2.4 Kontrola na tepelné účinky zkratového proudu

Stanovení minimálního průřezu popisuje kapitola 5.1.5. Při výpočtu je použit vztah (27), do kterého je dosazeno I_{th} a t_k ze zadání a ostatní hodnoty jsou použity z Tab. 1 podle vybraného materiálu přípojnice [13]. Pokud je minimální průřez větší než průřez navržených přípojnic, dojde ke kontrole přípojnic s vyšším jmenovitým proudem vodiče. Tento postup se opakuje, dokud není minimální průřez menší nebo stejný jako vypočítaný průřez z rozměrů profilových přípojnic.

7.2.5 Kontrola na dynamické účinky zkratového proudu

Postup výpočtu hlavního ohybového namáhání je totožný s teorií popsanou v bodě 5.1.6. Při výpočtu maximální síly působící mezi vodiči se účinná vzdálenost mezi vodiči vypočítá jako

$$a_m = \frac{a}{k_{1s}}. \quad (42)$$

Hodnota k_{1s} je ve výpočtech počítána podle vzorce, který je uveden v normě [5].

Hlavní ohybové namáhání, spočtené jako (37), je mimo jiné určeno koeficienty V_σ , V_r a β . Ty jsou odečteny z Obr. 10 a 11 [13].

Pokud jsou navrhovány jednoduché přípojnice a je splněna podmínka (34), navržené přípojnice vyhoví účinkům zkratových proudů. Pokud není splněna, zvětší se rozměry vodiče, aby předchozí podmínky zůstaly splněny. Tento postup se opakuje, dokud hlavní ohybové namáhání nesplní kritérium (34).

Jedná-li se o dvojité přípojnice, hlavní ohybové namáhání je spolu s dílčím ohybovým namáháním kontrolováno podle vztahu (34) a současně podle (36). Pokud nevyhoví dílčí namáhání, přidá se rozpěrka mezi dílčí vodiče jedné fáze. Počet rozpěrek je omezený z důvodu reálných rozměrů přípojnic a rozpěrek. Jestliže je hlavní namáhání příliš velké a nevyhoví podmínce, je potřeba změnit rozměry přípojnice. Poté, co jsou splněny podmínky (34) a (36), je provedena kontrola celkového namáhání podle (35). Pokud toto nevyhoví, je postupně navyšován počet rozpěrek. Pokud při maximálním počtu rozpěrek stále celkové namáhání nesplňuje požadovanou hodnotu, je potřeba zvětšit rozměry přípojnic a celý postup opakovat.

8 PŘÍKLAD VÝPOČTU V PROGRAMU EXCEL

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření skriptu pro návrh přípojníc, odolných na tepelné a dynamické účinky zkratového proudu. Dále byla zpracována problematika kontroly odolnosti na zkratový proud přípojnice o již známých rozměrech. Tento software byl zpracován v programu Excel od firmy Microsoft. Pro ukázkou je vypočítán příklad 2.4 ze sbírky úloh [13].

8.1 Zadání příkladu

Zadání ukázkového příkladu zní: „Navrhněte systém přípojníc pro rozváděč 12 kV. Jmenovitý výkon přípojníc je 43 MVA, požadovaná zkratová odolnost je dána dynamickým zkratovým proudem $I_{pn} = 40$ kA. Čas vypnutí ochranných prvků je 0,5 s. Systém přípojníc je veden přes osm polí rozvaděče a každé pole má rozměr $l = 0,8$ m. Předpokládaná nejvyšší teplota okolí rozvaděče je 30°C. Elektrická síť je bez opětovného zapnutí. Přípojnice jsou mechanicky nezatížené. Navrhněte dvojité měděné přípojnice vodorovně uložené.“ [13].

8.2 Zadané hodnoty

Podle zadání vybereme variantu vstupních hodnot „Sn, ip + (normalizovaná řada)“. Do aktivních kolonek doplníme údaje ze zadání příkladu:

Napěťová soustava:	12 kV
Teplota pracovního prostředí:	30 °C
Doba zkratu:	0,5 s
Vzdálenost podpěr:	0,8 m
Zdánlivý výkon:	43 MVA
Zkratový nárazový proud:	40 kA

Sn, lth, m, n, R/X			Sn, ip + (normalizovaná řada)	
Zadané hodnoty				
Napěťová soustava	U [kV]	12	Ekvivalentní oteplovací proud	I_{th} [kA]
Teplota pracovního prostředí	ϑ_0 [°C]	30	Průběh stejnosměrné složky zkratového proudu	m [-]
Doba zkratu	t_s [s]	0,5	Průběh střídavé složky zkratového proudu	n [-]
Vzdálenost podpěr	l [m]	0,8	Souměrný počáteční rázový zkratový proud	I_{kr} [kA]
Účinník	$\cos \varphi$ [-]	1	Zkratová rezistance	R [Ω]
Zdánlivý výkon	S_n [MVA]	43	Zkratová reaktance	X [Ω]
Zkratový nárazový proud	i_p [kA]	40	Poměr R/X	R/X [-]
			Součinitel	κ [-]

Obr. 19 – Vstupní hodnoty zadávané do vytvořeného skriptu

8.3 Charakteristika soustavy a přípojníc

Pro správný návrh přípojníc je potřeba znát několik údajů, např.: Požadovaný materiál přípojníc, uložení přípojníc, druh napájecí soustavy a další. Tyto specifikace jsou taktéž uvedeny v zadání příkladu.

Materiál přípojníc:	Měď
Typ a uložení přípojníc:	Dvojité přípojnice, vodorovně uložené
Zatížení vodičů:	Mechanicky nezatížené
Koeficient respektující uspořádání vodičů:	Prostřední vodič trojfázové soustavy
Typ nosníku, způsob uložení:	Čtyři a více prostých podpor ve stejné vzdálenosti
Druh soustavy:	Soustava bez opětovného automatického zapínání

Výběr z možností	
Materiál přípojníc	Měděné - Cu
Typ a uložení přípojníc	Dvojité přípojnice vodorovně uložené, nenatřené
Jaké je zatížení vodičů ?	Vodiče jsou mechanicky nezatížené
Zahrnout do výpočtu účinník ?	Ne
Koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posuv	Prostřední vodič trojfázové soustavy
Typ nosníku a způsob uložení	Čtyři a více prostých podpor ve stejné vzdálenosti
Druh soustavy	Soustava bez opětovného automatického zapínání

Obr. 20 – Vybrané možnosti pro výpočet přípojníc

8.4 Výpočet

Výpočet se provádí pro oba materiály přípojnic (měď, hliník). Podle toho, který z materiálů uživatel zvolí v sekci „Výběr z možností“, tak budou výpočty pro druhý materiál zašedlé. V tomto případě jsou navrhovány měděné přípojnice, takže sloupec pro hliníkové přípojnice je zašedlý.

Výpočet			
Materiál přípojnic		Cu	Al
Výpočet zátěžového proudu	I_z [A]	2068,84	2068,84
Výpočet zátěžového proudu na referenční hodnotu	I_{np} [A]	2068,84	2068,84
Rozměry přípojnice pro hlavní namáhání	b [mm]	10	10
	d [mm]	50	80
Výpočet průřezu	S [mm ²]	1000	1600
Stanovení ekvivalentního oteplovacího proudu	I_{sp} [kA]	16	16
Výpočet minimálního průřezu	S_{min} [mm ²]	89,11	107,94
Výpočet osové vzdálenosti fázových vodičů	a [mm]	170	200
Určení koeficientu K_{1s}	k_{1s} [-]	1,014	1,028
Výpočet účinné vzdálenosti mezi vodiči	a_m [mm]	167,60	194,54
Výpočet síly působící mezi vodiči	F_m [N]	1322,80	1322,80
Výpočet průřezového modulu hlavního vodiče	Z [m ³]	8,33E-06	2,13E-05
Výpočet ohybového namáhání tuhých vodičů	σ_m [MPa]	11,59	4,53

Obr. 21 – Výpočet hlavního namáhání přípojnic

Rozměry přípojnice pro dílčí namáhání	b_m [mm]	50	80
	d_m [mm]	10	10
Výpočet osové vzdálenosti dílčích vodičů	a [mm]	20	20
Výpočet účinné vzdálenosti mezi dílčími vodiči	a_s [mm]	31,19	31,19
Výpočet síly mezi dílčími vodiči	F_s [N]	1025,83	1025,83
Výpočet průřezového modulu dílčího vodiče	Z_s [m ³]	8,33333E-07	8,33333E-07
Počet podpěrek	- [-]	1	1
Vzdálenost podpěrek	l_s [m]	0,4	0,4
Výpočet dílčího namáhání vodičů	σ_s [MPa]	30,77	30,77
Celkové namáhání přípojnic	σ_{tot} [MPa]	42,36	35,30

Obr. 22 – Výpočet dílčího namáhání přípojnic

8.5 Kontrola podmínek a vlastnosti navržené přípojnice

V předposlední části se vypisují podmínky odolnosti na účinky zkratového proudu, podle kterých byla přípojnice navržena. Nakonec jsou parametry navržené přípojnice vypsány v tabulce.

Kontrola podmínek				
$S_{min} \leq S$				
89,11	≤	1000		
$\sigma_{tot} < q \cdot R_p 0,2$				
42,36	≤	150		
$\sigma_s < R_p 0,2$				
30,77	≤	100		
Navržená přípojnice				
Materiál :	Cu			
Typ :	Dvojté přípojnice, nenatřené			
Uložení :	Vodorovně uložené			
Rozměr :	x2	10	x	50
Počet rozpěrek :	1			

Obr. 23 – Kontrola podmínek a parametry navržené přípojnice

9 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala výpočtem profilových vodičů pro přípojnice v rozvodných zařízeních.

V první řadě jsou vysvětleny základní pojmy, které se týkají elektrických rozvodných zařízení. Tato kapitola popisuje typy rozveden a popisuje, kde se přípojnice používají a jak jsou realizovány v technické praxi.

Další kapitola se zabývá teorií zkratových proudů a výpočtů charakteristických hodnot zkratového proudu, které jsou vyžadovány pro návrh přípojnic. Jedná se o nárazový zkratový proud a ekvivalentní oteplovací proud.

Pátá kapitola popisuje základy dimenzování vodičů. Zabývá se hlavními pěti zásadami, na které je při návrhu přípojnic dbán důraz. Pro správný chod přípojnic je nejdůležitější, aby provozní teplota nepřekročila maximální provozní teplotu jádra a aby přípojnice odolaly tepelným a dynamickým účinkům zkratového proudu. V předposlední části kapitoly je teoreticky odvozený vztah pro výpočet minimálního průřezu, který odolá tepelným účinkům zkratového proudu. Nakonec kapitola důkladně pojednává o výpočtu hlavního a dílčího ohybového namáhání, které je vyhodnocováno v rámci kontroly na dynamické účinky zkratového proudu.

Po teoretickém rozboru problematiky byl vytvořen v prostředí MS Excel, který po zadání vstupních hodnot vyhodnotí tepelné a dynamické účinky zkratového proudu a na základě toho navrhne přípojnic, která těmto účinkům odolá. Tento program je schopný pracovat se čtrnácti variantami vstupních hodnot, lze navrhnout jednoduché i dvojité přípojnice, vodorovně či svisle uložené a to buď z mědi anebo hliníku. Prostředí se systematicky rozděleno a hodnoty jsou pro přehlednost barevně rozlišeny. V šesté kapitole je stručný manuál pro uživatele, který popisuje princip zadávání hodnot do výše uvedeného programu s ukázkou pracovního prostředí.

Následuje schématický postup jak návrhu přípojnic, tak i kontroly přípojnic. Poté je popsán vlastní výpočet, podle kterého jsou přípojnice počítány. V této kapitole se také nacházejí tabulky, ze kterých jsou načítány hodnoty potřebné k vlastnímu výpočtu.

V poslední kapitole je ukázka výpočtu příkladu 2.4 ze sbírky úloh [13] pomocí vytvořeného programu. Jedná se o dvojité měděné přípojnice, vodorovně uložené. Zátěžový proud přípojnicí je 2068,84 A. Výpočtem je navržena dvojitá přípojnice o rozměrech 10 x 50 mm. Jmenovitý proud této přípojnice je 2249 A. Průřez této přípojnice je 1000 mm². Aby tento vodič vyhověl kontrole na tepelné účinky zkratového proudu, musí mít minimální průřez 89,11 mm², což v tomto případě je splněno. Hlavní ohybové namáhání vyšlo 11,59 MPa a dílčí ohybové namáhání, při použití jedné rozpěrky mezi dílčími vodiči, vyšlo 30,77 MPa. Obě tyto hodnoty splňují podmínku pro odolnost na dynamické účinky zkratového proudu, protože dílčí ohybové namáhání je menší než 100 MPa a zároveň součet hlavního a dílčího ohybového namáhání je menší než 150 MPa. V poslední části programu jsou vypsány tyto podmínky v přehledné tabulce spolu se stěžejními parametry přípojnice.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] FENCL, František. *Elektrický rozvod a rozvodná zařízení*. Vyd. 4. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 198 s. ISBN 978-80-01-04351-6.
- [2] REIDL, Lukáš. *Plynem izolovaná zapouzdřená rozvodna v Chotějovicích* [online]. 2011 [cit. 2015-01-13]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/energie/plynem-izolovana-zapouzdrana-rozvodna-vchotejovicich>
- [3] ČSN 60865-1ed. 2 *Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část 1: Definice a výpočetní metody*.
- [4] VOKÁL, Josef. *Výpočty zkratů v technické praxi* [online]. 2012 [cit. 2016-01-12] Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Vok_%20zkratovy_%20prednaska_textFEL.pdf
- [5] ČSN 33 3022-1:2004, *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – Část 1: Součinitele pro výpočet zkratových proudů podle IEC 60909-0*
- [6] MLČÁK, Tomáš. *Dimenzování a jištění elektrických vedení* [online]. 2006 [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/15_dimenz_sylab_bc_06.pdf.
- [7] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení* [online]. 2015 [cit. 2015-12-04]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=58169>
- [8] ŠMÍD, Jakub. *Proudová zatížitelnost vodičů* [online]. 2015 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/proudova-zatizitelnost-vodicu/>
- [9] KOŠTÁL, Josef. *Teplotní závislost odporu kovových vodičů* [online]. 2008 [cit. 2015-12-09] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36489.pdf>
- [10] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000, s.330-576, [33] s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [11] ČSN EN 50 341. *Elektrická venkovní vedení s napětím nad AC 45 kV – Část 1: Všeobecné požadavky – Společné specifikace*.
- [12] ČSN 34 1610. *Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách*
- [13] NOVOTNÝ, Jan. *Rozvodná zařízení – sbírka příkladů* [online]. 2015 [cit. 2015-12-19] Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=58236>
- [14] PNE 33 3041. *Zkratové proudy – výpočet účinků – část 2: příklady výpočtů*. [cit. 2015-12-23] Dostupné z: <http://www.csres.cz/Upload/PNE%2033%203041ed2tisk.pdf>.