



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

KRÁTKODOBÉ PŘETĚŽOVÁNÍ KABELŮ V UPS APLIKACÍCH

SHORT TIME OVERLOAD OF CABLES IN UPS APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Toman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Dominik Toman

ID: 240813

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Krátkodobé přetěžování kabelů v UPS aplikacích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s požadavky na dimenzování vodičů v instalaci zdrojů nepřerušovaného napájení.
2. Teoreticky rozeberte chování vodičů při krátkodobých proudových přetíženích a možné následky.
3. Vytvořte tepelný model vodiče dle zadání.
4. Proveďte měření oteplení konkrétního vodiče v daném uspořádání. Výsledky porovnejte s modelem a normou stanovenými výpočty.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ČSN EN 60228 (347201) A Jádra izolovaných kabelů. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [2] ČSN 33 2000-5-54 ed. 3 (332000) A Elektrické instalace nízkého napětí. Část 5-54, Výběr a stavba elektrických zařízení - Uzemnění a ochranné vodiče = Low-voltage electrical installations. Part 5-54, Selection and erection of electrical equipment - Earthing arrangements and protective conductors. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [3] ČSN IEC 949 (347025) A Výpočet dovolených tepelných zkratových proudů, který bere v úvahu neadiabatický ohřev. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [4] KŘÍŽ, Michal. Dimenzování a jistění elektrických zařízení - tabulky a příklady. Páté - aktualizované vydání. Pardubice: IN-EL, 2019. Elektro. ISBN 978-80-87942-48-2.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

Vedoucí práce: Ing. David Šimek, Ph.D.

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá dimenzováním kabelů v instalaci, která je představena ve třetí kapitole práce. Těmito kabely teče poměrně velký stejnosměrný proud, který by mohl při použití kabelu s příliš malým průřezem způsobit nadměrné oteplení kabelu. Pro přiblížení funkce zkoumané instalace včetně porovnání baterií, které mohou být v instalaci, slouží první kapitola. Druhá kapitola ukazuje možná rizika použití kabelu s příliš malým průřezem, ve kterém může vzniknout příliš velké oteplení vlivem přetížení.

Dimenzování v této práci vychází z norem IEC 60364-5-52, IEC 60364-5-54, zatěžovacího cyklu, z nichž vyplývají velmi rozdílné průřezy. Výsledky průřezu podle normy IEC 60364-5-54 a zatěžovacího cyklu jsou menší a nabízí ekonomicky výhodnější možnosti, menší průřez ale představuje riziko z hlediska příliš velkého oteplení. Správnost použití kabelu vycházejícího z této normy je ověřena měřeními a tepelným modelem kabelu. Všechny nadimenzované průřezy vodičů jsou na konci třetí kapitoly prověřeny z hlediska dovoleného úbytku napětí.

Výsledky z tepelného modelu a z měření se z důvodu zjednodušujících předpokladů liší, ale zároveň potvrzují, že proud procházející kabelem s menším průřezem nezpůsobí takové oteplení, které by kabel mohlo poškodit.

KLÍČOVÁ SLOVA

dimenzování kabelů, měření oteplení, tepelný model, průřez vodiče, teplota

ABSTRACT

This bachelor's thesis is about dimensioning power cables in electrical installation which is described in the third chapter. If is used cable with small cross-section, relatively high direct current which is flowing through these cables could cause too high warming. Function of this electrical installation and comparison of batteries which should be possibly used, are described in the first chapter. Second chapter shows risk of using cable with small cross-section, which could be overheated due to current overloading.

Cables are designing in accordance with IEC 60364-5-52, IEC 60364-5-54 and duty cycle. Cross section values calculated according to all methods are very different. Cross section calculated in accordance to IEC 60364-5-54 and duty cycle are smaller then cross-section values calculated in accordance to IEC 60364-5-52. Cable with smaller cross section is cheaper, but it is possible that smaller cross section could cause bigger warming. This thesis also contains thermal model and warming measurement, both methods are for verification that cable with smaller cross-section could be used. Third chapter also contains calculations of voltage drops on all calculated cross-sections.

Values from thermal model and warming measurement are different but they are both confirming that the cable with smaller cross section could be used.

KEYWORDS

cables dimensioning, warming measurement, thermal model, cross section of conductor, temperature

TOMAN, Dominik. *Krátkodobé přetěžování kabelů v UPS aplikacích*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159081>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce David Šimek.

Prohlášení autora o původnosti díla

| | |
|---------------------------------|--|
| Jméno a příjmení autora: | Dominik Toman |
| VUT ID autora: | 240813 |
| Typ práce: | Bakalářská práce |
| Akademický rok: | 2023/24 |
| Téma závěrečné práce: | Krátkodobé přetěžování kabelů v UPS aplikacích |

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Davidovi Šimkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat odbornému konzultantovi panu Ing. Luďkovi Pravdovi, za cenné rady zejména při řešení praktických výpočtů.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 11 |
| Cíle práce | 12 |
| 1 Zdroje nepřerušovaného napájení (UPS) | 13 |
| 1.1 UPS systém s dvojí konverzí | 14 |
| 1.2 Pasivně pohotovostní systém | 14 |
| 1.3 Síťově interaktivní systém | 15 |
| 1.4 UPS systém s jedním usměrněním proudu | 16 |
| 2 Krátkodobé proudové přetížení vodičů | 17 |
| 2.1 Tepelné ztráty v kabelech | 17 |
| 2.1.1 Přestup tepla v kabelech | 18 |
| 2.2 Poškození kabelů vlivem přetížení | 19 |
| 2.3 Ochrana proti nadproudům | 19 |
| 2.3.1 Pojistky | 19 |
| 2.3.2 Jističe | 20 |
| 2.3.3 Nadproudová relé | 20 |
| 3 Dimenzování kabelu | 22 |
| 3.1 Zadání modelového příkladu | 22 |
| 3.2 Dimenzování podle IEC 60364-5-52 | 23 |
| 3.2.1 Dimenzování společně uložených dotýkajících se kabelů | 25 |
| 3.2.2 Dimenzování společně uložených nedotýkajících se kabelů | 26 |
| 3.3 Dimenzování podle zatěžovacího cyklu | 27 |
| 3.4 Dimenzování podle Jouleova integrálu | 29 |
| 3.4.1 Teoretické průběhy oteplení kabelu podle Jouleova integrálu | 31 |
| 3.5 Porovnání vypočtených průřezů | 33 |
| 3.6 Dimenzování kabelů podle úbytku napětí | 34 |
| 4 Tepelný model kabelu | 38 |
| 4.1 Přehled proměnných pro tepelný model kabelu | 39 |
| 4.2 Výsledky z tepelného modelu kabelu | 43 |
| 5 Měření | 44 |
| 5.1 Rozbor měření | 44 |
| 5.1.1 Měření více kabelů uložených vedle sebe | 45 |
| 5.1.2 Měření jednoho kabelu | 46 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 5.1.3 | Měření degradace izolace | 46 |
| 5.1.4 | Schéma zapojení | 47 |
| 5.2 | Postup měření | 47 |
| 5.3 | Vyhodnocení měření | 48 |
| 5.3.1 | Vyhodnocení měření nedotékajících se kabelů | 49 |
| 5.3.2 | Vyhodnocení měření dotékajících se kabelů | 50 |
| 5.3.3 | Vyhodnocení měření jednoho kabelu | 50 |
| 5.4 | Porovnání změřených výsledků s teoretickými výsledky | 53 |
| | Závěr | 55 |
| | Literatura | 56 |
| | Seznam symbolů a zkratk | 59 |

Seznam obrázků

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Schéma zapojení UPS systému s výstupním napětím a frekvencí nezávislých na síti, upraveno z [6] | 14 |
| 1.2 | Schéma zapojení UPS systému s výstupním napětím a frekvencí závislých na síti, upraveno z [6] | 15 |
| 1.3 | Schéma zapojení UPS systému s výstupním napětím nezávislém na síti, upraveno z [6] | 16 |
| 1.4 | Schéma UPS systému s jedním usměrněním proudu, upraveno z [7] | 16 |
| 3.1 | Schéma zapojení rozvodu | 22 |
| 3.2 | Průběh korekčního faktoru podle zatěžovacího cyklu pro průřez $S = 120 \text{ mm}^2$ | 28 |
| 3.3 | Průběh oteplení vodivého jádra kabelu $S = 120 \text{ mm}^2$ v závislosti na času podle Jouelova integrálu | 32 |
| 3.4 | Průběh oteplení vodivého jádra kabelu $S = 120 \text{ mm}^2$ v závislosti na proudu podle Jouelova integrálu | 33 |
| 4.1 | Tepelný model kabelu v programu simulink | 39 |
| 4.2 | Průběh oteplení jádra kabelu na času podle tepelného modelu, doba zatížení 300s | 43 |
| 5.1 | Zapojení nedotékajících se kabelů | 45 |
| 5.2 | Zapojení dotékajících se kabelů | 46 |
| 5.3 | Schéma zapojení měření | 47 |
| 5.4 | Průběh oteplení nedotékajících se kabelů | 49 |
| 5.5 | Průběh oteplení dotékajících se kabelů | 50 |
| 5.6 | Průběh oteplení jednoho kabelu | 51 |
| 5.7 | Průběh oteplení podle měření, tepelný model a Jouelova integrálu, čas zatížení 300 s | 53 |
| 5.8 | Průběh oteplení podle měření a tepelného modelu, čas zatížení 1500 s | 54 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Metody uložení kabelů, převzato z [19] | 23 |
| 3.2 | Korekční faktor podle teploty okolí, převzato z [19] | 24 |
| 3.3 | Korekční faktory pro více obvodů nebo vícežilových kabelů, převzato z [19] | 24 |
| 3.4 | Maximální dovolené zatížení nominálních průřezů, uložení F, maximální teplota vodiče při zatížení 90 °C, teplota okolí 30 °C, horizontálně položené kabely, převzato z [19] | 25 |
| 3.5 | Maximální dovolené zatížení nominálních průřezů, uložení G, maximální teplota vodiče při zatížení 90 °C, teplota okolí 30 °C, horizontálně položené kabely, převzato z [19] | 26 |
| 3.6 | Korekční faktory podle různé doby zatížení, převzato z [21] | 27 |
| 3.7 | Určení materiálových konstant, převzato z [22] | 30 |
| 3.8 | Porovnání všech vypočtených průřezů | 34 |
| 3.9 | Přehled vypočtených úbytků napětí pro různé kabely | 37 |
| 4.1 | Součinitele přestupu tepla pro záření a konvekci, převzato z [27] | 40 |
| 4.2 | Přehled konstantních hodnot implementovaných do tepelného modelu | 42 |
| 5.1 | Přehled počátečních a konečných teplot při měření po 300 sekundách | 49 |
| 5.2 | Použité přístroje při měření | 52 |
| 5.3 | Přehled okolních podmínek při měření | 52 |
| 5.4 | Porovnání naměřených a teoretických výsledků po 5 minutách zatížení | 53 |

Úvod

Kabely v elektrických instalacích se skládají z vodiče, jímž protéká elektrický proud, a z izolace, jenž slouží k oddělení vodiče od okolního prostředí, k ochraně vodiče před poškozením a před dotykem člověka, jiných živých tvorů a jiných vodivých částí. Aby byl v daných podmínkách použit správný kabel, je nutné provést jeho dimenzování. Kabely se mohou dimenzovat z hlediska spousty aspektů, který mohou ovlivnit chování celého elektrického obvodu, ve kterém je daný kabel obsažen. Kabely se mohou dimenzovat z hlediska proudu, kterým budou zatíženy, úbytku napětí, dynamických účinků zkratových proudů a další. Při dimenzování z hlediska proudové zatížitelnosti je nutné vybrat vodič s takovým průřezem, u kterého je zaručeno, že teplota kabelu nepřesáhne dovolenou mez při různých provozních stavech. Průřez vodiče hraje důležitou roli i z hlediska úbytku napětí, který nesmí překročit dovolenou mez.

Při dimenzování kabelů z hlediska teploty je nutné znát velikost proudu, který kabelem poteče a také dobu, po kterou bude kabel proudem zatížen. Protékaný proud způsobí nárůst teploty vodiče i teploty izolace. Příliš vysoká teplota může způsobit zhoršení mechanických vlastností vodiče a také degradaci izolace. Z tohoto důvodu je nutné zvolit dostatečně velký průřez vodiče, při kterém nedojde k oteplení na takovou hodnotu, že by mohlo dojít k poškození kabelu. Nesleduje se pouze teplota, kterou kabel dosáhne při běžném zatížení, ale i teplota, kterou kabel dosáhne při průchodu zkratového proudu nebo při proudovém přetížení.

Kabely popsanými v této práci bude protékat proud pouze jedenkrát za měsíc po dobu pěti minut, protože slouží jako propojení mezi baterií a měničem v UPS aplikaci, tento kabel tedy není nepřetržitě zatěžován. Pro dimenzování kabelů se nabízí využití více než jednoho výpočtu. V této práci jsou popsány tři způsoby výpočtu vyhovujícího průřezu kabelu, výpočty vychází z norem nebo z předpokladů výrobců kabelů. Výsledky všech výpočtů vedou ke zvolení rozdílných průřezů vodiče. Jelikož kabely v této aplikaci nebudou zatěžovány příliš dlouho, nabízí se možnost využití menšího průřezu za účelem šetření místem v rozvodu a šetření nákladů. Při využití menšího z vypočtených průřezů se objevuje riziko spojené s tím, že se kabel ohřeje na teplotu, jenž překračuje stanovenou mez, tím by mohlo dojít k poškození kabelu a následným poruchám instalace.

Není tedy jasné, jestli kabel s menším průřezem bude pro danou instalaci vyhovující. Na otázku, jaký kabel tedy použít se pokusí odpovědět tato práce, kde se správné použití bude zkoumat nejen podle výpočtů, ale i podle měření a podle teplotního modelu vycházejícího z diferenciální rovnice pro oteplení vodiče v důsledku průchodu elektrického proudu elektrickým odporem vodiče.

Cíle práce

Cílem práce je návrh kabelu, jenž dobíjí baterie použité v UPS aplikaci, tedy jako záložní zdroj elektrické energie. Porovnání výpočtů průřezu vodiče vycházející z normy IEC 60364-5-52 (pro trvalé zatížení kabelů), s výpočtem průřezu vodiče podle normy IEC 60364-5-54, tento výpočet je také známý jako Jouleův integrál a výpočtem podle zatěžovacího cyklu. Výpočty průřezů podle těchto metod jsou v tomto konkrétním případě rozdílné. Správnost použití průřezu vypočteného podle Jouleova integrálu bude ověřena měřením. Za účelem ověření správnosti výpočtů slouží tepelný model kabelu vytvořený v programu SIMULINK.

1 Zdroje nepřerušovaného napájení (UPS)

Zdroj nepřerušovaného napájení (UPS) je kombinace měničů, přepínačů a zařízení pro akumulaci elektrické energie (baterie), tvořící systém pro nepřetržité napájení stejnosměrným proudem při výpadku střídavého napájení [1]. Norma IEC 60240-3 udává 3 základní typy UPS systémů:

- Double conversion system (systém s dvojitou konverzí)
- Stand by system (pasivně pohotovostní systém)
- Line-interactive system (síťově interaktivní systém)

Zdroje nepřerušovaného napájení mají při výpadku napájení udržet napětí a frekvenci v mezích, které jsou stanoveny pro konkrétní zátěž, kterou tyto zdroje napájejí při výpadku elektrické energie. Zdroje nepřerušovaného napájení jsou tvořeny bateriemi a výkonovou elektronikou, v případě těchto zdrojů se jedná o použití střídače a usměrňovače, které mohou být případně použity jako jeden výkonový prvek, jenž se nazývá obousměrný měnič [2].

V UPS aplikacích je možné použít více typů baterií, nejvíce rozšířené jsou olovené baterie. Méně se používají i nikl-kadmiové a lithno-iontové baterie [3].

Olovené baterie jsou v UPS systémech velmi spolehlivé a disponují malou vnitřní impedancí. Zároveň představují možnost s nejnižšími pořizovacími náklady. Jejich hlavní nevýhodou je, že mají oproti ostatním bateriím velkou hmotnost, tudíž se používají především v aplikacích s velkým výkonem, kde hmotnost baterií nemusí být rozhodujícím faktorem při návrhu UPS systému [4].

Nikl-kadmiové baterie se používají zejména v aplikacích, kde jsou velké okolní teploty. Tyto baterie jsou schopny pracovat v okolních teplotách od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jejich nevýhodou oproti oloveným bateriím je vyšší cena [4].

Lithno-iontové baterie jsou v dnešní době velmi rozšířené zejména ve spotřební elektronice a automobilovém průmyslu. Oproti ostatním dvěma typům baterií jsou menší a lehčí a potřebují kratší dobu na to, aby se nabily. Výhodou lithno-iontových baterií je především dlouhá životnost a velký počet nabíjecích cyklů. Jejich hlavní nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady, ty ovšem mohou být kompenzovány dlouhou životností baterie [4].

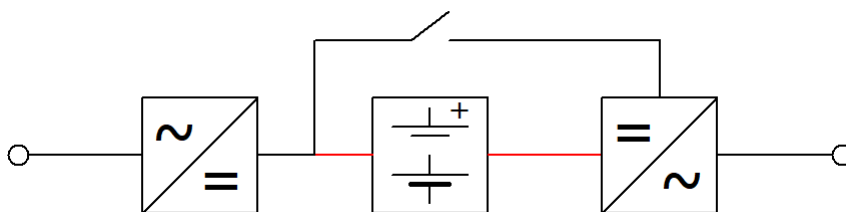
Výběr typu zdroje nepřerušovaného napájení závisí na několika faktorech, to mohou být: velikost zátěže, místo použití v instalaci nebo použití zařízení, které je chráněno [5]. Zdroje nepřerušovaného napájení lze vybrat i s ohledem závislosti výstupní frekvence a napětí na síti.

1.1 UPS systém s dvojí konverzí

Obvykle se systém nazývá i jako „Double conversion system“. Napájecí napětí systému je nejdříve pomocí usměrňovače usměrněno ze střídavého (AC) na stejnosměrné (DC), které slouží k nabíjení baterií. Stejnosměrné napětí (DC) se poté střídačem mění na střídavé (AC). Pokud selže střídavé napájení, usměrňovač se odpojí z obvodu a baterie napájejí zařízení připojené k UPS, jakmile dojde k obnovení napájení, usměrňovač je připojen a začíná nabíjet baterie. Tento systém zajišťuje zvýšenou ochranu proti možné snížené kvalitě napájecího napětí [5].

Tvar sinusového průběhu na výstupu z UPS je daný dvojitou konverzí usměrňovačů a střídačů. Nekvalitní průběh vstupního napětí je upraven na ideální sinusovku díky konverzi v usměrňovači a střídači, proto systém chrání kritická zatížení, kde dochází k poruchám napájení, včetně zkraslení napájení vlivem harmonických složek. Kvalita energie z tohoto systému je značně lepší než u ostatních systémů [5].

Výstupní napětí a frekvence tohoto systému jsou nezávislé na síti v režimu, kdy tento zdroj napájí zátěž, i v režimu, kdy je síť neporušena a baterie tohoto systému není zdrojem elektrické energie pro zátěž na výstupu z tohoto systému [2].



Obr. 1.1: Schéma zapojení UPS systému s výstupním napětím a frekvencí nezávislých na síti, upraveno z [6]

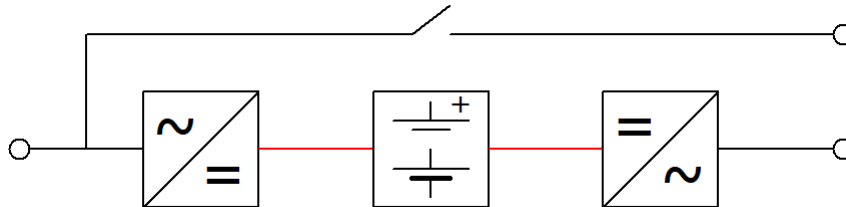
Kabely v Obr.(1.1), jenž jsou označeny červenou barvou je možné přetěžovat.

1.2 Pasivně pohotovostní systém

Častý název pro tento systém je i „Stand by system“. Jedná se o nákladově nejvýhodnější systém, který je schopen zajistit napájení z baterie dostatečně rychle, aby přečkal krátké výpadky. Systém dobře chrání proti špičkám, ale nezajišťuje perfektní dodání energie při poklesech napětí. Systém je nejlépe využit při napájení zařízení s výkonem pod 1500 VA. Využití tedy najde v malých kancelářích nebo při napájení počítačů užívaných v domácnostech [5].

Pokud napájecí napětí překročí dovolenou mez nebo dojde k výpadku napájení, je z baterie napájen střídač, který přemění stejnosměrné napětí z baterie na střídavé a napájí obvod za UPS [6].

V režimu, kdy je zátěž napájena z tohoto systému, jsou výstupní napětí a frekvence nezávislé na síti. Pokud je síť neporušena (UPS systém nenapájí zátěž), je výstup z tohoto zdroje síťové napětí a síťová frekvence [2].



Obr. 1.2: Schéma zapojení UPS systému s výstupním napětím a frekvencí závislých na síti, upraveno z [6]

V bezporuchovém stavu se střídavý proud odebíraný ze sítě rozděljuje na dvě části, jedna část proudu je neusměrněna a napájí zařízení, které jsou zapojeny za UPS. Druhá část střídavého síťového proudu je usměrňovačem usměrněna na proud stejnosměrný a nabíjí baterii. Při poruše napájení je stejnosměrný proud z baterie přeměněn ve střídači na proud střídavý a napájí zařízení připojené za UPS [6].

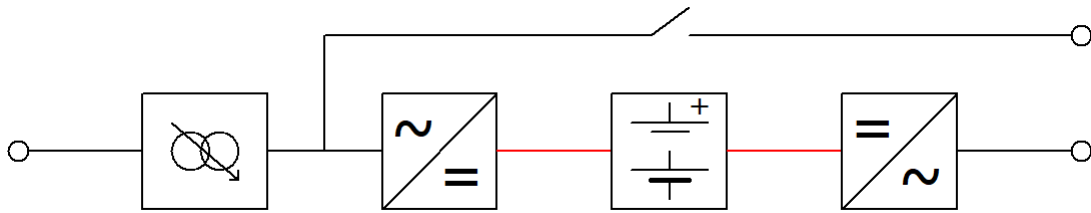
Kabely v Obr.(1.2), jenž jsou označeny červenou barvou je možné přetěžovat.

1.3 Síťově interaktivní systém

Tento systém bývá označen i jako „Line-interactive system“. Tato technologie je efektivní zejména v aplikacích, kde jsou krátkodobé výpadky vzácné, ale kolísání výkonu je běžné. Systémy podporují velké kolísání napětí, než přepnou na napájení z baterie. To je výhoda těchto UPS zdrojů, poněvadž čím větší škálu napětí je UPS systém schopen akceptovat, tím větší ochranu UPS systém zajišťuje [5].

Zapojení tohoto systému se liší od pasivně pohotovostnímu systému pouze zapojením autotransformátoru, díky kterému je možné navýšit napětí při poklesech. Systém dokáže pracovat s napětím, jenž se může lišit i o 20 % své nominální hodnoty, při větších rozdílech je obvod za UPS napájen z baterie [6].

V režimu, kdy je zátěž napájena z tohoto zdroje, jsou výstupní napětí a frekvence nezávislé na síti. V režimu, kdy na síti není porucha (zátěž není napájena z UPS) je díky transformátoru výstupní napětí nezávislé na síti, výstupní frekvence v tomto režimu je závislá na frekvenci sítě [2].



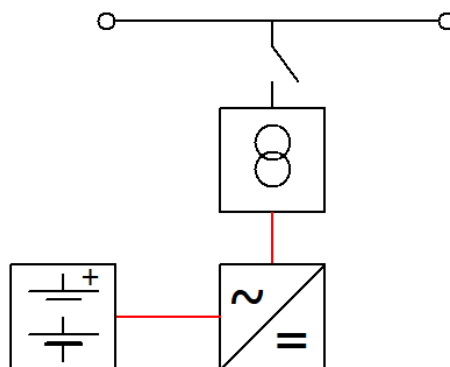
Obr. 1.3: Schéma zapojení UPS systému s výstupním napětím nezávislém na síti, upraveno z [6]

Kabely v Obr.(1.3), jenž jsou označeny červenou barvou je možné přetěžovat. V tomto schématu je i vidno, že systém je díky transformátoru galvanicky oddělen od sítě.

1.4 UPS systém s jedním usměrněním proudu

Kromě 3 základních typů UPS, které udává norma IEC 62040-3, existuje i „Single conversion system“, jehož baterie je napájena z kabelu, který je dimenzován v následující kapitole.

Tento systém je vhodný jako záloha v náročných průmyslových aplikacích, kde by výpadky energie mohly způsobit velké hospodářské škody. Systém má výhody při napájení rozběhových proudů, jenž se vyskytují při rozběhu motorů nebo zapínání transformátorů, ty mohou mít několikanásobně větší hodnotu než nominální proudy. Tyto proudy mohou zapříčinit i snížení napětí [7].



Obr. 1.4: Schéma UPS systému s jedním usměrněním proudu, upraveno z [7]

Transformátor není nutnou součástí tohoto systému. Ve schématu Obr.(1.4) slouží jako přiblížení zapojení instalace, kterou se tato práce zabývá Obr.(3.1).

Kabely vyznačené červenou barvou v Obr.(1.4) je možné přetěžovat.

2 Krátkodobé proudové přetížení vodičů

Při průchodu elektrického proudu vodičem dochází k proudění elektronů, které se sráží s částicemi materiálu vodiče. Při těchto srážkách dochází k tomu, že proudící elektrony předají část své kinetické energie stacionárním částicím vodiče. Při předání kinetické energie dochází k vytvoření tepelné energie, která ohřívá vodič, izolaci a přestupuje do okolí [8].

2.1 Tepelné ztráty v kabelech

Elektrický proud při průchodu kabelem vytváří podle rovnice (2.1) tepelné ztráty, které ohřívají vodič. Vzniklé teplo lze vyjádřit podle Jouleova zákona (2.2)[9].

$$P = R \cdot I^2 \quad (2.1)$$

kde

P jsou tepelné ztráty (W)

R je odpor kabelu (Ω)

I je proud protékající kabelem (A)

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t \quad (2.2)$$

kde

Q je vzniklé teplo ve vodiči (J)

t je doba zatížení proudem I (s)

Tyto rovnice platí pro ustálený stav, v případě nárůstu oteplení platí tato diferenciální rovnice, jež je převzata z [10]:

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta\Theta dt + cV d(\Delta\Theta) \quad (2.3)$$

kde

α_0 je součinitel přestupu tepla ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

A je povrch úseku vodiče, který se ochlazuje (m^2)

$\Delta\Theta$ je okamžité oteplení povrchu vodiče proti okolí (K)

c je měrná objemová tepelná kapacita (materiálová konstanta) ($\text{J}/\text{m}^3\text{K}$)

V je objem úseku, který u vodiče sledujeme (m^3)

$d(\Delta\Theta)$ je zvýšené oteplení daného úseku vodiče (-), tento člen můžeme psát i jako

$d(\Theta)$, jelikož první derivace oteplení podle času $d(\Delta\Theta)$ se rovná první derivaci teploty podle času.

První část tepla $\alpha_0 A \Delta\Theta dt$ je ochlazováním povrchu odváděna do okolí. Druhá část tepla $cVd(\Delta\Theta)$ zůstává ve vodiči a zvyšuje jeho teplotu [10].

2.1.1 Přestup tepla v kabelech

Přestup tepla v kabelech se uplatňuje třemi způsoby: kondukce, konvekce a radiace. Kondukce se uplatňuje při přestupu tepla z vodivého jádra do izolace. Konvekce a radiace popisují sdílení tepla mezi povrchem izolace a vnějším prostředím [11].

Přestup tepla kondukcí

Tento přenos se nazývá i jako přenos vedením. Přenos se uskutečňuje především v látkách, jenž mají pevné skupenství. Teplo se zde přenáší pohybem vnitřních částic, které se srážejí. Při srážkách molekul dochází k výměně jejich kinetické energie. Částice v teplejší části tělesa mají větší kinetickou energii, než částice nacházející se v chladnější části tělesa. Při výměně kinetických energií dochází k ochlazení teplejších částí tělesa, naopak dochází k oteplení studenější části tělesa [12].

Přestup tepla konvekcí

Jedná se o přenos prouděním tekutiny (kapalině, plynu). Při tomto přenosu dochází k proudění teplejších částí tekutiny do míst chladnějších. Proudění vzniká teplotními rozdíly v tekutině (přirozené proudění), proudění tekutiny může vzniknout i v důsledku vnějších sil (čerpadlo, ventilátor) [12].

Přestup tepla radiací

Přestup tepla radiací neboli sáláním je zapříčiněn elektromagnetickým zářením, které vyzařuje takové těleso, jehož teplota je vyšší než 0 K (absolutní nula). Tělesa záření přijímají, vysílají a pohlcují. Podle toho jakou část záření těleso přijme, vyšle nebo odrazí jsou definovány pojmy pohltivost (poměr energie pohlcené tělesem a celkové dopadené energie na těleso), odrazivost (poměr energie odražené od tělesa s celkové dopadené energie na těleso) a propustnost (poměr energie pohlcené tělesem a celkové dopadené energie na těleso) [12].

2.2 Poškození kabelů vlivem přetížení

Při zatížení kabelu proudem větším, než je nominální proud kabelu, může po určité době dojít k nárůstu teploty vodivého jádra nad maximální povolenou teplotu, jenž se odvíjí podle materiálu izolace kabelu a je předepsána normou, případně výrobcem kabelu. Jouelovo teplo, které je vytvářeno ve vodiči přestupuje do izolace, jejíž vnitřní struktura může být zničena z důvodu přehřátí izolace, které může nastat při přetížení kabelů. Nadměrné přehřátí izolace má za následek její rychlejší stárnutí a znehodnocení. V důsledku nadměrného proudového přetížení se může izolace vlivem vysokých teplot tavit, což může vést k následným zkratům, případně i k požáru, jelikož po roztavení izolace mohou některé části vodiče zůstat nechráněné [13].

Pokud je příliš velká teplota ve vodiči, dochází i k rekrystalizaci materiálu vodiče, což má za následek zhoršení mechanických vlastností materiálu vodiče [14]. Pokud by teplota dosáhla až na vyšší stovky stupňů Celsia, může dojít k roztavení vodivého materiálu vodiče, což by vedlo k přerušení obvodu.

Jelikož se odpor vodiče zvyšuje s rostoucí teplotou, v průběhu přetěžování dochází k vytváření stále více tepla. Při zvyšování elektrického odporu se zároveň ztěžuje proud elektronů, při vyšším odporu roste i úbytek napětí na kabelu a přenos elektrické energie kabelem je tedy méně efektivní [15].

Je tedy nutné zajistit, aby kabely byly přetěžovány pouze po takovou dobu, po které nedojde ke zničení kabelu, což zajišťují ochranné přístroje, které musí přerušit obvod dříve, než by mohlo dojít k poškození kabelů nebo spotřebičů.

2.3 Ochrana proti nadproudům

Pro ochranu obvodu proti proudovému přetížení se nejčastěji používají jističe, pojistky nebo nadproudová relé. Tyto přístroje mají za úkol rozepnout obvod dříve, než přetížení způsobí takové přehřátí kabelu, jenž by jej mohlo poškodit. Tyto přístroje navíc dokáží chránit obvod i proti velkým zkratovým proudům, které mohou způsobit velmi rychlý nárůst teploty kabelu nad dovolenou hodnotu.

2.3.1 Pojistky

Hlavní výhodou pojistek je schopnost rychlého vypnutí velkých zkratových proudů. Nevýhodou je horší ochrana při takových nadproudech, které nedosahují velkých hodnot. Pro různé chráněné obvody se mohou používat různé pojistky, zejména se odlišují podle vypínacích časů. Pojistky s krátkým vypínacím časem se využívají pro ochranu nadproudů vzniklých ve světelných obvodech nebo na vedení. Pojistky s delším vypínacím časem se používají pro ochranu zařízení nebo strojů, kde mohou

vzniknout velké zapínací proudy, které se po rozběhu zařízení nebo stroje ustálí, pojistka tak nerozepne obvod v bezporuchovém stavu při zapínání [16].

V pojistce má vodič oproti vedení zeslabený průřez. Při průchodu nadproudu se obvod zahřívá více, než v bezporuchovém stavu, nejvíce se však zahřívá vodič s nejmenším průřezem, tedy vodič v pojistce. Z důvodu zahřátí zeslabeného vodiče dojde k tomu, že se tento vodič přetaví, tím se přeruší obvod. Pojistky jsou dimenzovány tak, aby se zeslabený vodič přetavil dříve, než zvýšený proud způsobí škody v obvodu [16].

2.3.2 Jističe

Hlavní rozdíl jističe oproti pojistce je ten, že jistič lze používat opakovaně, není tedy nutné jej po vypnutí obvodu v důsledku poruchy vyměnit. Jističe mají lepší citlivost na malé nadproudy než pojistky, ale pojistky jsou rychlejší při vypínání zkratových proudů. U některých jističů lze nastavit, jaké proudy mají při přetížení a zkratech vypínat [16].

U jističů se pro vybavení obvodu z důvodu přetížení využívají tepelné spouště. Základním principem funkce tepelné spouště je princip dvojkovu, neboli bimetalu. Základem bimetalu jsou dva plošně pevně spojené kovové materiály, kdy každý z kovových materiálů má odlišnou tepelnou roztažnost. Jednotlivé kovy se při zahřívání odlišně roztahují. Bimetalový pásek je ve studeném stavu do tvaru písmene U. Při zahřátí dojde k prohnutí bimetalu na stranu toho kovu, jenž má menší tepelnou roztažnost. Jakmile se bimetal po zahřátí dostatečně prohne, zapůsobí na pružinu a dojde k rozepnutí kontaktů [17].

Funkci vypínání zkratových zastává v jističi elektrodynamická spoušť, kterou tvoří cívka, jenž má jádro z feromagnetického materiálu. Proud tekoucí touto cívkou vytváří magnetické pole, jehož silové účinky jsou v běžném provozu malé. Při průchodu zkratového proudu, který má mnohonásobně větší hodnotu, dochází k vytvoření magnetického pole s mnohem většími silovými účinky. Magnetické pole má při průchodu zkratového proudu dostatečně velkou sílu na to, aby přitáhl kotvu spouště, což má za následek uvolnění západky a odepnutí kontaktů jističe pomocí pružiny a tím i rozepnutí obvodu. Součástí jističů jsou i zhášecí komory, jejichž funkcí je zhášení elektrického oblouku, který vznikne mezi kontakty po jejich rozpojení [18].

2.3.3 Nadproudová relé

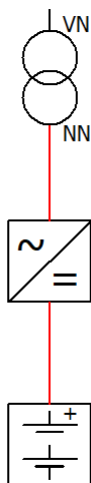
Nejčastěji se nadproudová relé používají ve spolupráci se stykačem, který nadproudy vypíná. Nadproudová relé mají pouze pomocné kontakty, které dokáží pouze spínat proudy o malých hodnotách. Nemají kontakty pomocí kterých je možné dosáhnout vypínání samotného proudu [16].

Mechanismus stykače pro vypnutí obvodu lze provést jako pneumatický, vačkový nebo elektromagnetický. Stykače pro stejnosměrné obvody jsou vždy vybaveny vyfukovací cívkou, která je využívána pro vytvoření magnetického pole. Magnetické pole cívky interaguje s magnetickým polem elektrického oblouku, který ve stykači vzniká při vypínání obvodu. Cívka musí mít vinutí navinuto tak, aby na elektrický oblouk působili elektrodynamické síly, které oblouk vtáhnou do zhasací komory, kde elektrický oblouk zhasne [17].

3 Dimenzování kabelu

3.1 Zadání modelového příkladu

Tento modelový příklad vychází ze schématu na Obr.(3.1). Dimenzovaný kabel je na hladině stejnosměrného napětí.



Obr. 3.1: Schéma zapojení rozvodu

Ze schématu zapojení je vidno, že střídavý proud z transformátoru je usměrněn na stejnosměrný, tento stejnosměrný proud má velikost 602 A a nabíjí baterie v UPS systému. Nabíjení baterií v této aplikaci probíhá po dobu 5 minut. Kabel, kterým se tato práce zaobírá napájí baterie v UPS systému stejnosměrným proudem, tento kabel je ve schématu zapojení Obr.(3.1) označen červenou barvou. Celkově je napájeno 8 stojanů s bateriemi DC proudem a všechny kabely jsou umístěny na společném žlabu, celkově je tedy ve žlabu 16 kabelů. Součástí dimenzování je i porovnání výsledků pro kabely uložené v perforovaném a drátěném žlabu.

Cílem dimenzování je vybrat pro zkoumanou instalaci co nejmenší průřez kabelu, který bude zatěžován, nejedná se ale o trvalé zatížení, ale o zatížení po dobu 5 minut. Jedním z předpokladů důležitých pro dimenzování je teplota okolí, která je uvažována jako $\Theta_{okolí} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Délka kabelu se uvažuje od 6 do 10 m, v této práci se bude zkoumat délka 8 m.

Baterie mají nejnižší stejnosměrné napětí 547,8 V, na toto napětí se následně bude hodnotit úbytek napětí na kabelu.

3.2 Dimenzování podle IEC 60364-5-52

Dimenzování podle této normy zohledňuje spoustu faktorů, které mohou ovlivnit průřez kabelu, který bude použit pro danou aplikaci použit. Konkrétně se zohledňují tyto faktory: způsob uložení kabelu, teplota okolí, počet zatížených kabelů vedle sebe.

Norma IEC 60364-5-52 udává několik typů uložení kabelů v instalaci jak pro jednožilové tak i vícežilové kabely. Typy uložení nesou označení A-G, případně mohou být doplněny číslicemi 1 a 2, které popisují zda se jedná o jednožilové či vícežilové kabely. Podle typů uložení a průřezu vodiče se určuje proud, který kabel kontinuálně zatěžuje.

Tab. 3.1: Metody uložení kabelů, převzato z [19]

| Označení | Způsob uložení kabelu |
|----------|--|
| A | Kabely uložené v tepelně izolované stěně |
| B | Kabely uložené v trubce se vzdáleností od dřevěné nebo zděné stěny menší, než 0,3 násobek průměru trubky |
| C | Kabely uložené u dřevěné nebo zděné stěny se vzdáleností menší, než 0,3 násobek průměru kabelu, kabely uložené na neperforovaném žlabu horizontálně i vertikálně |
| D | Kabely uložené v zemi |
| E, F | dotýkající se kabely uložené na perforovaném nebo drátěném žlabu horizontálně i vertikálně |
| G | Nedotýkající se kabely uložené na perforovaném nebo drátěném žlabu horizontálně i vertikálně |

Z Tab(3.1) lze vidět, že perforované nebo drátěné žlaby, jenž jsou položeny vertikálně i horizontálně a kabely v těchto žlabech se vzájemně dotýkají, náleží podle této normy označení E nebo F, kde je metoda E použita pro vícežilové kabely a metoda F pro jednožilové kabely. V této práci se uvažují jednožilové kabely, tudíž se uvažuje metoda F.

Pro kabely, jenž se vzájemně nedotýkají a mají mezi sebou rozestup alespoň o délce průměru jednoho kabelu, norma IEC 60364-5-52 [19] definuje jako uložení G.

Tato norma zavádí pro dimenzování kabelů korekční faktory (KF), které zohledňují podmínky, ve kterých se daná instalace nachází. Pomocí korekčních faktorů je proud tekoucí obvodem ponížěn nebo přidán tak, aby co nejvíce odpovídal průřezu, který bude použit.

Tab. 3.2: Korekční faktor podle teploty okolí, převzato z [19]

| Teplota okolí (°C) | Izolace kabelu | |
|--------------------|----------------|------------|
| | PVC | XLPE a EPR |
| 10 | 1,22 | 1,15 |
| 15 | 1,17 | 1,12 |
| 20 | 1,12 | 1,08 |
| 25 | 1,06 | 1,04 |
| 30 | 1,00 | 1,00 |
| 35 | 0,94 | 0,96 |
| 40 | 0,87 | 0,91 |
| 45 | 0,79 | 0,87 |
| 50 | 0,71 | 0,82 |

Korekční faktory v Tab.(3.2) zohledňují vliv teploty okolí a izolace kabelu. Z této tabulky je patrné, že čím vyšší bude teplota okolí, tím menší bude korekční faktor. Čím menší bude korekční faktor, tím menší bude proud, který může kabelem téct.

Tabulka platí pouze pro kabely položené ve vzduchu, nikoliv v zemi. V této práci se počítá s kabelem s izolací XLPE (zesíťený polyetylén), maximální dovolená teplota při zatížení je pro tuto izolaci $\Theta_f = 90$ °C.

Tab. 3.3: Korekční faktory pro více obvodů nebo vícežilových kabelů, převzato z [19]

| Uložení kabelů | Počet obvodů nebo vícežilových kabelů | | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 6 | 8 | 9 | 12 | 16 | 20 |
| Perforovaný žlab (E nebo F) | 1,00 | 0,88 | 0,82 | 0,73 | 0,72 | 0,72 | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| Drátěný žlab (E nebo F) | 1,00 | 0,87 | 0,82 | 0,79 | 0,78 | 0,78 | 0,78 | 0,78 | 0,78 |

Podle Tab.(3.3) lze určit korekční faktor pro různé typy žlabů. Počet kabelů ve žlabu je 16. Čím více kabelů bude vedle sebe zatíženo, tím menší bude korekční faktor. Přepočítané proudové zatížení klesá se zvyšujícím se počtem zatížených kabelů. Zatížené vodiče v kabelech vytváří teplo, které přestupuje do okolí, čím více vodičů tedy bude zatížených, tím více tepla ovlivňuje ostatní kabely. Pro 8 a více zatížených kabelů se již faktor nemění, protože se předpokládá, že teplo vytvořené krajními vodiči již při takovém počtu kabelů neovlivní kabely uprostřed.

3.2.1 Dimenzování společně uložených dotýkajících se kabelů

Tato kapitola se věnuje dimenzování kabelů, za předpokladu, že se kabely uložené ve společném žlabu vzájemně dotýkají. Celkem se ve žlabu nachází 16 kabelů, jimiž protéká proud $I = 602$ A. Teplota okolí je pro tento případ uvažována jako $\Theta_{okolí} = 30$ °C.

Dimenzování kabelů uložených v perforovaném žlabu

Tab. 3.4: Maximální dovolené zatížení nominálních průřezů, uložení F, maximální teplota vodiče při zatížení 90 °C, teplota okolí 30 °C, horizontálně položené kabely, převzato z [19]

| Nominální průřez (mm ²) | Jmenovitý proud (A) |
|-------------------------------------|---------------------|
| 120 | 437 |
| 150 | 504 |
| 185 | 575 |
| 240 | 679 |
| 300 | 783 |
| 400 | 940 |
| 500 | 1083 |

Korekční faktor podle teploty okolí bude $KF_1 = 1,00$ a korekční faktor podle počtu zatížených vodičů bude $KF_2 = 0,72$. Přepočítání proudu tekoucího kabelem pomocí korekčních faktorů se provede následovně:

$$I_{NK} = \frac{I}{KF_1 \cdot KF_2 \dots KF_i} \quad (3.1)$$

kde

I_{NK} je přepočítaný proud pro danou aplikaci, podle kterého je nutné vybrat průřez vodiče (A)

I je proud protékající kabelem (A)

KF_1 je korekční faktor podle teploty okolí (-)

KF_2 je korekční faktor podle počtu zatížených vodičů (-)

$$I_{NK} = \frac{602}{1,00 \cdot 0,72}$$

$$I_{NK} = 836,11 \text{ A}$$

Podle Tab.(3.4) je nutné pro tuto instalaci zvolit kabel o průřezu $S = 400$ mm².

Dimenzování kabelů uložených v drátěném žlabu

Pro tento způsob instalace se oproti předchozímu způsobu změní pouze korekční faktor podle počtu zatížených vodičů na $KF_2 = 0,78$. Přepočítaný jmenovitý proud pak bude:

$$I_{NK} = \frac{I}{KF_1 \cdot KF_2}$$

$$I_{NK} = \frac{602}{1,00 \cdot 0,78}$$

$$I_{NK} = 771,8 \text{ A}$$

Podle Tab.(3.4) je v tomto případě nutné použít kabel s průřezem $S = 300 \text{ mm}^2$.

Je nutné podotknout, že tento výpočet se provádí pro trvalé zatížení kabelu.

3.2.2 Dimenzování společně uložených nedotýkajících se kabelů

Nedotýkající se kabely jsou (způsob uložení G) platí, že mezi sebou mají rozstup alespoň o délce odpovídající průměru jednoho položeného kabelu [19].

Pro tuto metodu uložení nejsou definované korekční faktory pro použití jiných žlabů.

Tab. 3.5: Maximální dovolené zatížení nominálních průřezů, uložení G, maximální teplota vodiče při zatížení 90 °C, teplota okolí 30 °C, horizontálně položené kabely, převzato z [19]

| Nominální průřez (mm^2) | Jmenovitý proud (A) |
|------------------------------------|---------------------|
| 120 | 500 |
| 150 | 577 |
| 185 | 661 |
| 240 | 781 |
| 300 | 902 |
| 400 | 1085 |
| 500 | 1253 |

Pro tento způsob instalace je nutné podle Tab.(3.5) vybrat kabel o průřezu $S = 185 \text{ mm}^2$. Pro tento způsob uložení se nezavádějí korekční faktory které by zohledňovaly působení sousedících kabelů, tudíž může být použit pouze korekční faktor podle teploty okolí KF_1 , jenž je vybrán z Tab.(3.2).

$$I_{NK} = \frac{I}{KF_1}$$

$$I_{NK} = \frac{602}{1,00}$$

$$I_{NK} = 602 \text{ A}$$

Podle Tab.(3.5) je nutné pro tuto instalaci použít kabel o průřezu $S = 185 \text{ mm}^2$.

3.3 Dimenzování podle zatěžovacího cyklu

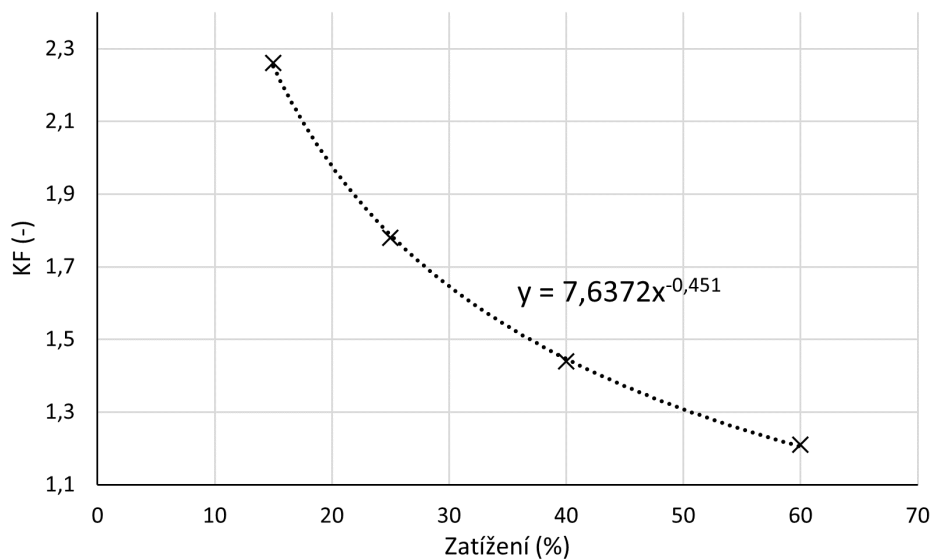
Toto dimenzování se provádí pro takové kabely, jenž nejsou trvale zatíženy, ale jsou zatíženy pouze po určitou část vyjádřenou v procentech z nominální doby. Nominální doba je v tomto případě 10 minut. Pro různé doby zatížení jsou definovány korekční faktory, díky kterým lze vypočítat takové zatížení, které kabel vydrží bez poškození. Jelikož je nominální doba 10 minut a zkoumaná instalace má být zatížena po dobu 5 minut, korekční faktor pak bude odpovídat 50% zatížení.

Norma IEC 60034-1 definuje zatížení, které je v instalaci zkoumané v této práci, jako zatížení S2 - krátkodobé zatížení. Jedná se o konstantní zatížení po určitý čas, po který se může kabel ohřát na maximální dovolenou teplotu, po ukončení zatěžování kabelu pak následuje doba, kdy je kabel nezatížen a ochlazen na teplotu okolí [20].

Tab. 3.6: Korekční faktory podle různé doby zatížení, převzato z [21]

| Nominální průřez (mm^2) | Zatížení (%) | | | |
|------------------------------------|--------------|------|------|------|
| | 60 | 40 | 25 | 15 |
| 95 | 1,20 | 1,42 | 1,74 | 2,21 |
| 120 | 1,21 | 1,44 | 1,78 | 2,26 |
| 150 | 1,22 | 1,46 | 1,81 | 2,30 |
| 185 | 1,23 | 1,48 | 1,82 | 2,32 |
| 240 | 1,23 | 1,49 | 1,85 | 2,36 |

Tato tabulka platí pro jednoho výrobce kabelů, neobsahuje tedy obecně platné koeficienty. Jelikož z Tab.(3.6) nelze přímo určit hodnotu korekčního faktoru pro zatížení 50 %, byl zobrazen průběh korekčního faktoru v závislosti na zatížení Obr.(3.2). V tomto průběhu byla zobrazena i rovnice (3.2), ze které je možné vypočítat hodnotu korekčního faktoru pro 50 % zatížení.



Obr. 3.2: Průběh korekčního faktoru podle zatěžovacího cyklu pro průřez $S = 120 \text{ mm}^2$

Rovnici z Obr.(3.2) lze přepsat následovně

$$KF_3 = 7,6372x^{-0,451} \quad (3.2)$$

kde

KF_3 je hodnota korekčního faktoru podle doby zatížení

x je procentní doba zatížení

$$KF_3 = 7,6372 \cdot 50^{-0,451}$$

$$KF_3 = 1,308$$

Dimenzování pro dotýkající se kabely v perforovaném žlabu

Korekční faktory KF_1 a KF_2 jsou pro tento výpočet převzaty z (3.2.1), výsledný proud pro tuto instalaci podle této metody pak bude:

$$I_{NK} = \frac{I_{NK}}{KF_1 \cdot KF_2 \cdot KF_3}$$

$$I_{NK} = \frac{602}{1,00 \cdot 0,72 \cdot 1,308}$$

$$I_{NK} = 639,23 \text{ A}$$

Podle Tab.(3.4) takto uložený kabel musí mít průřez alespoň 185 mm^2 .

Dimenzování pro dotýkající se kabely v drátěném žlabu

Korekční faktory KF_1 a KF_2 jsou pro tento výpočet převzaty z (3.2.1), výsledný proud pro tuto instalaci podle této metody pak bude:

$$I_{NK} = \frac{I_{NK}}{KF_1 \cdot KF_2 \cdot KF_3}$$
$$I_{NK} = \frac{602}{1,00 \cdot 0,78 \cdot 1,308}$$
$$I_{NK} = 590,06 \text{ A}$$

Podle Tab.(3.4) takto uložený kabel musí mít průřez alespoň 185 mm².

Dimenzování pro nedotýkající se kabely

Korekční faktory KF_1 a KF_2 jsou pro tento výpočet převzaty z (3.2.2), výsledný proud pro tuto instalaci podle této metody pak bude:

$$I_{NK} = \frac{I_{NK}}{KF_1 \cdot KF_3}$$
$$I_{NK} = \frac{602}{1,00 \cdot 1,308}$$
$$I_{NK} = 460,25 \text{ A}$$

Podle Tab.(3.5) takto uložený kabel musí mít průřez alespoň 120 mm².

3.4 Dimenzování podle Jouleova integrálu

Norma IEC 60364-5-54-ed.3, se zabývá dimenzováním ochranných vodičů, kde se za čas t dosazuje taková doba, po kterou obvodem poteče zkratový proud, tedy doba než ochranný prvek vypne obvod. Za proud I se dosazuje zkratový proud tekoucí vodičem. Podle [22] by tato doba neměla být delší než 5 sekund. Uvažuje se, že za tuto krátkou dobu neproběhne výměna tepla s okolím tak, aby ovlivnila dimenzování zkoumaného kabelu, proto výpočet uvažuje pouze adiabatické oteplování vodiče, tedy že všechno vzniklé teplo zůstane ve vodiči a nebude přestupovat do okolí. Toto dimenzování kabelu pro aplikaci, kterou se zabývá tato práce může být nepřesné, jelikož zkoumaný kabel bude zatížen po delší čas a vytvořené teplo ve vodiči tohoto kabelu přestupuje do okolí a může tak ovlivnit průběh teploty.

Výběr správného průřezu vodiče lze podle IEC 60364-5-54-ed.3 zvolit ze vzorce (3.3).

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k} \quad (3.3)$$

kde

S je průřez v mm^2

I je efektivní hodnota předpokládaného proudu, který protéká vodičem (A)

k je součinitel, který závisí na materiálu vodiče, izolaci a na jeho ostatních částech.

t je čas zatížení vodiče (s)

Výpočet podle součinitele k podle přílohy A v normě IEC 60364-5-54-ed.3 [22]:

$$k = \sqrt{\frac{Q_c(\beta + 20)}{\rho_{20}} \ln \frac{\beta + \Theta_f}{\beta + \Theta_i}} \quad (3.4)$$

kde

Q_c je objemová tepelná kapacita materiálu vodiče při 20°C [$\text{J}/\text{K} \cdot \text{mm}^3$]

β je reciproká hodnota teplotního součinitele rezistivity při 0°C pro vodič ($^\circ\text{C}$)

ρ_{20} je elektrická rezistivita materiálu vodiče při 20°C (Ωmm)

Θ_i je počáteční teplota vodiče ($^\circ\text{C}$)

Θ_f je konečná teplota vodiče ($^\circ\text{C}$)

Hodnoty dosazované do tohoto výpočtu jsou vybírány z tabulek v normě IEC 60364-5-54.

Tab. 3.7: Určení materiálových konstant, převzato z [22]

| Materiál | β ($^\circ\text{C}$) | Q_c ($\text{J}/^\circ\text{C} \cdot \text{mm}^3$) | ρ_{20} ($\Omega \cdot \text{mm}$) |
|----------|------------------------------|---|--|
| Měď | 234,5 | 3,45e-3 | 17,241e-6 |
| Hliník | 228 | 2,5e-3 | 28,264e-6 |

Po dosazení materiálových konstant do vztahu (3.4), za předpokladu, že počáteční teplota bude 30°C a výsledná teplota bude 90°C , vyjde:

$$k = \sqrt{\frac{3,45 \cdot 10^{-3}(234,5 + 20)}{17,241 \cdot 10^{-6}} \ln \frac{234,5 + 90}{234,5 + 30}}$$
$$k = 102,03$$

Dosazením součinitele k do vztahu pro výpočet průřezu (3.3) vyjde výsledný průřez:

$$S = \frac{\sqrt{60^2 \cdot 300}}{102,03}$$
$$S = 102,2 \text{ mm}^2$$

Nejbližší vyšší normovaný průřez pro tento výpočet je 120 mm^2 . U tohoto výpočtu se považuje počáteční teplota $\Theta_i = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, tedy teplota okolí a předpokládá se, že konečná teplota vodiče nepřesáhne maximální předpokládanou povolenou teplotu $\Theta_i = 90 \text{ }^\circ\text{C}$. Předpokládaná doba zatížení kabelu je $t = 300 \text{ s}$, což je doba, po kterou bude námi počítaný kabel nabíjet baterie v UPS.

3.4.1 Teoretické průběhy oteplení kabelu podle Jouleova integrálu

Upravením rovnice pro výpočet součinitele k (3.4) lze odvodit vztah pro výpočet maximální teploty kabelu Θ_f :

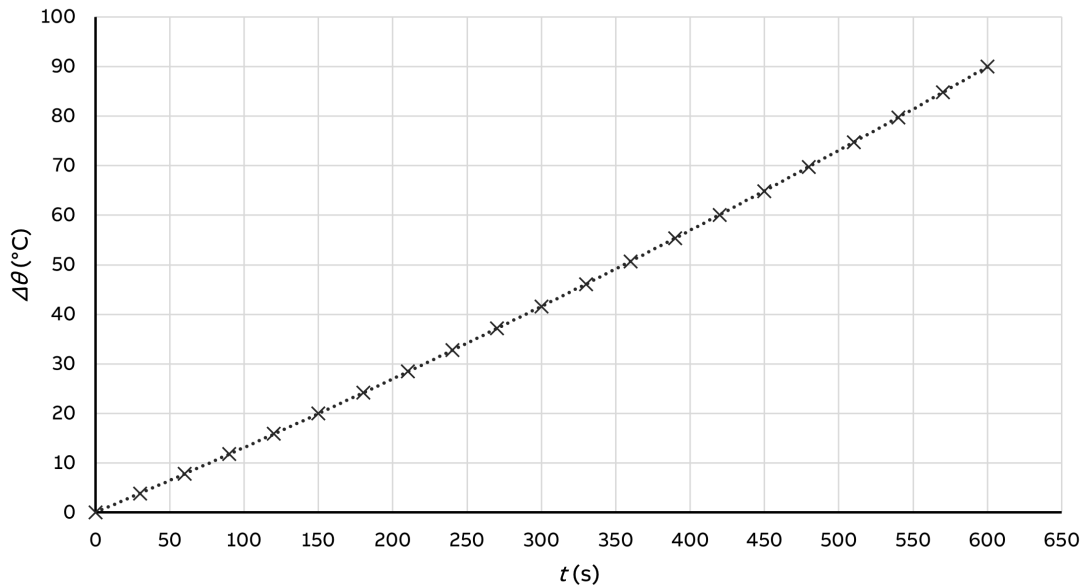
$$\Theta_f = (\beta + \Theta_i) \cdot e^{k^2 \cdot \frac{\rho_{20}}{Q_e \cdot (\beta + 20)}} - \beta \quad (3.5)$$

kde

součinitel k je vyjádřen ze vztahu pro výpočet průřezu (3.3):

$$k = \frac{I \cdot \sqrt{t}}{S} \quad (3.6)$$

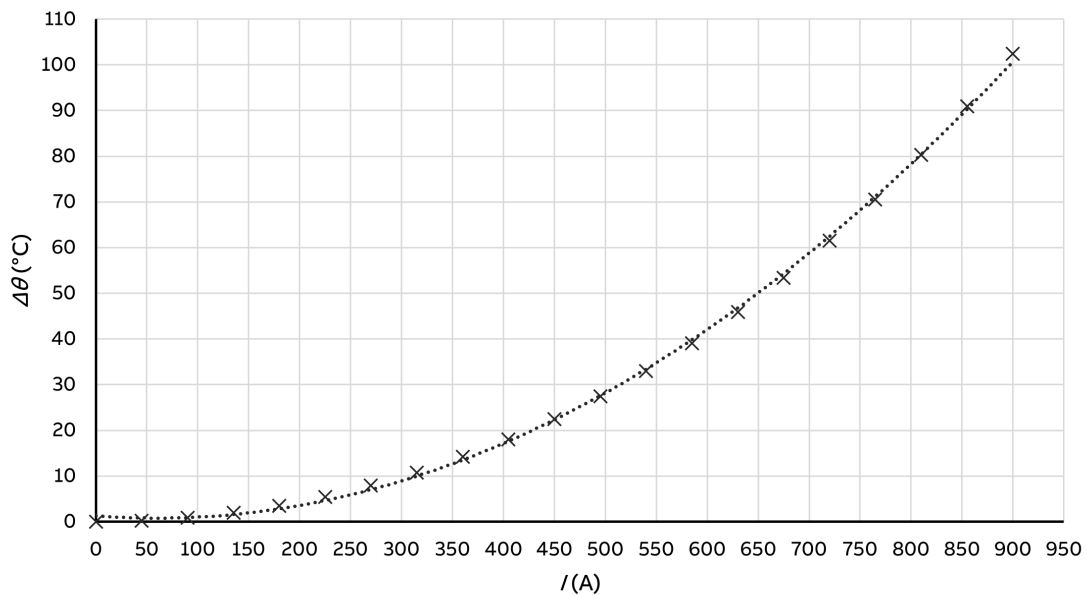
Bude-li použit vypočtený průřez $S = 120 \text{ mm}^2$, proud $I = 602 \text{ A}$, počáteční teplota $\Theta_i = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ a materiálové konstanty by zůstaly stejné, závislost oteplení kabelu na času by vypadala následovně:



Obr. 3.3: Průběh oteplení vodivého jádra kabelu $S = 120 \text{ mm}^2$ v závislosti na čase podle Jouelova integrálu

Z průběhu na Obr.(3.3) lze vidět, že se vodič za dobu 300 s oteplí zhruba o 41 °C. Pokud by byla uvažována teplota okolí (počáteční teplota vodiče) 30 °C, je patrné, že vodič by po čase 300 s neoteplil nad 90 °C, což je maximální dovolená teplota při zatížení pro kabely s izolací ze zesíťovaného polyetylénu (XLPE). Aby při teplotě okolí 30 °C vodič přesáhl teplotu 90 °C, musel by vodič být oteplen o 60 °C, což podle Obr.(3.3) zkoumaný vodič dosáhne po době zatížení přes 400 s. Podle tohoto průběhu tedy vodič po dobu 5 minut maximální dovolenou teplotu nepřesáhne.

Za předpokladu, že bude opět použit vypočtený průřez $S = 120 \text{ mm}^2$, čas bude $t = 300 \text{ s}$, počáteční teplota $\Theta_i = 30 \text{ °C}$ a materiálové konstanty by zůstaly stejné, závislost maximální teploty vodiče na proudu by vypadala následovně:



Obr. 3.4: Průběh oteplení vodivého jádra kabelu $S = 120 \text{ mm}^2$ v závislosti na proudu podle Jouelova integrálu

Z Obr.(3.4) lze vidět, že pro tento kabel způsobí nárůst tepla o 10 °C a více proud o hodnotě větší, než 300 A , menší proudy takový nárůst tepla nezpůsobí. Zkoumaný proud (600 A) podle tohoto grafu způsobí za dobu 300 s oteplení zhruba 41 °C , což odpovídá závislosti oteplení na čase zobrazené v Obr.(3.3). Dále je možné podle tohoto průběhu určit, že pro vytvoření teploty vodiče větší než 90 °C je nutné kabel zatížit proudem 700 A po dobu 300 s (při uvažování počáteční teploty kabelu 30 °C).

3.5 Porovnání vypočtených průřezů

Z Tab.(3.8) lze vidět, že největší průřez byl vypočten podle IEC 60364-5-54 pro společně uložené dotýkající se kabely v perforovaném žlabu. Průřez kabelu $S = 120 \text{ mm}^2$ lze použít podle zatěžovacího cyklu pro společně uložené nedotýkající se kabely a podle Jouelova integrálu, tento průřez je zároveň nejmenší ze všech vypočtených průřezů, tudíž se jedná o ekonomicky nejvýhodnější možnost.

Tab. 3.8: Porovnání všech vypočtených průřezů

| Metoda | Vypočtený průřez (mm ²) |
|---|-------------------------------------|
| IEC 60364-5-52: Společně uložené dotýkající se kabely, v perforovaném žlabu | 400 |
| IEC 60364-5-52: Společně uložené dotýkající se kabely, v drátěném žlabu | 300 |
| IEC 60364-5-52: Společně uložené nedotýkající se kabely | 185 |
| Zatěžovací cyklus: Společně uložené dotýkající se kabely, v perforovaném žlabu | 185 |
| Zatěžovací cyklus: Společně uložené dotýkající se kabely, v drátěném žlabu | 185 |
| Zatěžovací cyklus: Společně uložené nedotýkající se kabely | 120 |
| Jouelův integrál: Jeden kabel | 120 |

3.6 Dimenzování kabelů podle úbytku napětí

Dimenzování podle úbytku napětí se provádí z toho důvodu, aby byl zajištěn co nejmenší pokles napětí na výstupu kabelu neboli na vstupu do zátěže. Maximální dovolený úbytek napětí se u spotřebičů udává jako 5 % z jmenovité hodnoty napětí[14].

Pro výpočet úbytku napětí je nejdříve nutné vypočítat odpor vodiče, to se provede podle vztahu z [14]:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (3.7)$$

kde

ρ je rezistivita měděného vodiče (mm^2/m), hodnota vybrána z [23]

l je délka vodiče (m)

S je průřez vodiče (mm^2)

Úbytek napětí je pro stejnosměrný rozvod podle [23] dán vztahem:

$$\Delta U = 2 \cdot R \cdot I \quad (3.8)$$

kde

R je odpor vodiče (Ω)

I je proud protékající vodičem (A)

Odpor je v tomto vztahu vynásoben dvojkou z důvodu stejnosměrného rozvodu, kde proud protéká dvěma vodiči.

Procentní úbytek napětí je pak dán vztahem:

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 \quad (3.9)$$

kde

U je jmenovité napětí (V)

Odpor vodiče a úbytek napětí bude spočítán pro všechny vodiče s různými průřezy, které byly v této práci nadimenzované.

Kabely s průřezem jádra 400 mm²

Odpor vodiče pro kabel o průřezu $S = 400 \text{ mm}^2$, jenž vyšel pro dotýkající se kabely v perforovaném žlabu (3.2.1):

$$R = \frac{0,0178 \cdot 8}{400}$$

$$R = 0,356 \text{ m}\Omega$$

Výsledný úbytek napětí tedy bude:

$$\Delta U = 2 \cdot 0,356 \cdot 10^{-3} \cdot 602$$

$$\Delta U = 0,429 \text{ V}$$

Procentní úbytek napětí pak bude:

$$\Delta u_{\%} = \frac{0,429}{547,8} \cdot 100$$
$$\Delta u_{\%} = 0,0783\%$$

Kabely s průřezem jádra 300 mmsq

Odpor vodiče pro kabel o průřezu $S = 300 \text{ mm}^2$, jenž vyšel pro dotýkající se kabely v drátěném žlabu (3.2.1):

$$R = \frac{0,0178 \cdot 8}{300}$$
$$R = 0,475 \text{ m}\Omega$$

Výsledný úbytek napětí tedy bude:

$$\Delta U = 2 \cdot 0,475 \cdot 10^{-3} \cdot 602$$
$$\Delta U = 0,572 \text{ V}$$

Procentní úbytek napětí pak bude:

$$\Delta u_{\%} = \frac{0,572}{547,8} \cdot 100$$
$$\Delta u_{\%} = 0,104\%$$

Kabely s průřezem jádra 185 mmsq

Odpor vodiče pro kabel o průřezu $S = 185 \text{ mm}^2$, jenž vyšel pro nedotýkající se kabely (3.2.2) a pro dotýkající se kabely dimenzované podle zatěžovacího cyklu (3.3):

$$R = \frac{0,0178 \cdot 8}{185}$$
$$R = 0,770 \text{ m}\Omega$$

Výsledný úbytek napětí tedy bude:

$$\Delta U = 2 \cdot 0,770 \cdot 10^{-3} \cdot 602$$
$$\Delta U = 0,927 \text{ V}$$

Procentní úbytek napětí pak bude:

$$\Delta u_{\%} = \frac{0,927}{547,8} \cdot 100$$
$$\Delta u_{\%} = 0,169\%$$

Kabely s průřezem jádra 120 mm²

Odpor vodiče pro kabel o průřezu $S = 120 \text{ mm}^2$, jenž vyšel pro nedotýkající se kabely dimenzované podle zatěžovacího cyklu (3.3) a pro kabely dimenzované podle Jouelova integrálu (3.4):

$$R = \frac{0,0178 \cdot 8}{120}$$
$$R = 1,187 \text{ m}\Omega$$

Výsledný úbytek napětí tedy bude:

$$\Delta U = 2 \cdot 1,187 \cdot 10^{-3} \cdot 602$$
$$\Delta U = 1,429 \text{ V}$$

Procentní úbytek napětí pak bude:

$$\Delta u_{\%} = \frac{1,429}{547,8} \cdot 100$$
$$\Delta u_{\%} = 0,261 \%$$

Tab. 3.9: Přehled vypočtených úbytků napětí pro různé kabely

| Průřez kabelu (mm ²) | Úbytek napětí (V) | Procentní úbytek napětí (%) |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 400 | 0,429 | 0,0783 |
| 300 | 0,572 | 0,104 |
| 185 | 0,927 | 0,169 |
| 120 | 1,429 | 0,261 |

Z Tab.(3.9) lze vidět, že pro žádný kabel úbytek napětí nepřesáhl 1% z jmenovitého napětí, lze tedy říct, že všechny kabely z hlediska úbytku napětí zkoumané instalaci vyhovují. Malý úbytek napětí je zapříčiněn i díky malé délce kabelů (8 m), větší délka kabelů by způsobila zvětšení odporu a tím i zvětšení úbytku napětí. Z tabulky lze vidět, že čím větší je průřez kabelu, tím menší je úbytek napětí na kabelu, to je způsobeno tím, že odpor vodiče klesá s rostoucím průřezem.

4 Tepelný model kabelu

Tepelný model v této práci slouží jako kontrola při měření a k tomu, aby mohla být vyhodnocena teplota kabelu podle zatížení. Z vyhodnocené teploty kabelu se analyzuje, zda je možné použití konkrétního kabelu v aplikaci, kterou se tato práce zabývá.

Tepelný model vychází z diferenciální rovnice popisující Jouelovy ztráty (2.3) v daném úseku vodiče, kde lze pro každý časový okamžik dt vyjádřit derivací rovnice Jouelova zákona pro teplo (2.2) podle času t . Jouelovy ztráty se pak rovnají [10]:

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta \Theta dt + cV d(\Delta \Theta)$$

Upravením rovnice (2.3) lze získat vztah pro výpočet teploty vodiče:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{1}{cV} (RI^2 - \alpha_0 A \Delta \Theta) \quad (4.1)$$

Jelikož je odpor proměnný s teplotou, je nutné vypočítat jeho závislost na teplotě:

$$R_x = R_{20} (1 + \alpha \cdot (\theta_x - 20)) \quad (4.2)$$

kde

R_{20} je hodnota elektrického odporu při 20 °C (Ω)

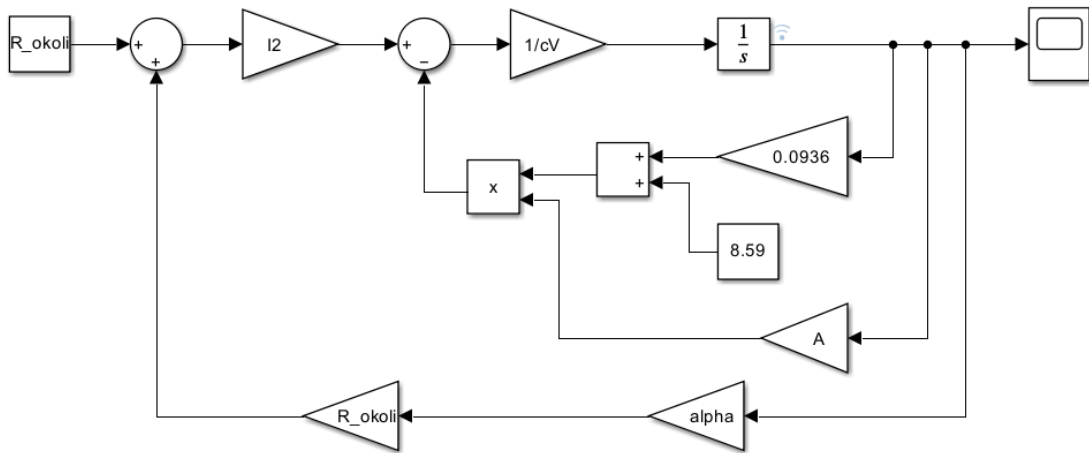
α je teplotní součinitel odporu (K^{-1}), hodnota je převzata z [25]

θ_x je teplota, pro kterou je elektrický odpor počítán

Odpor vodiče při 20 °C lze vypočítat ze vztahu (3.7)

$$R_{20} = \frac{\rho \cdot l}{S}$$
$$R_{20} = \frac{17,241 \cdot 10^{-6} \cdot 2,8}{120}$$
$$R_{20} = 0,4153 \text{ m}\Omega$$

Teplný model kabelu vytvořený v programu SIMULINK podle rovnic (4.1) a (4.2):



Obr. 4.1: Tepelný model kabelu v programu simulink

Výstupem z tepelného modelu je teoretický průběh oteplení podle vztahu (2.3).

4.1 Přehled proměnných pro tepelný model kabelu

Jako zdroj proudu je použit blok „Gain“, jelikož se jedná o napájení stejnosměrným proudem, tedy konstantní průběh proudu. Tento blok je označen jako $I2$ a je v něm obsažena druhá mocnina proudu 602 A, mocnina tedy odpovídá hodnotě $I2 = 602^2 = 362404$ A.

Odpor vodiče při teplotě 23,8 °C (teplota okolí při měření v kapitole 5) je v bloku „Gain“ a vychází ze vztahu (3.7). Aby byla simulace co nejpřesnější, je potřeba podle vztahu (4.2) přepočítat na správnou teplotu okolí (23,8 °C), tedy stejnou teplotu okolí, která byla při měření v kapitole 5. Výpočet je následovný:

$$R_{okolí} = 0,4153 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 3,92 \cdot 10^{-3} \cdot (23,8 - 20))$$

$$R_{okolí} = 0,4215 \text{ m}\Omega$$

Blok „Gain“ o hodnotě $1/cV$ označuje převrácenou hodnotu součinu měrné objemové tepelné kapacity a objemu vodiče:

$$cV = c \cdot V \quad (4.3)$$

kde

c je objemová tepelná kapacita mědi (J/kgK), hodnota je vybrána podle [24]

V je objem vodiče (m^3), který lze vypočítat jako součin průřezu a délky vodiče

$$cV = c \cdot S \cdot l \quad (4.4)$$

$$cV = 3,5 \cdot 10^6 \cdot 120 \cdot 10^{-6} \cdot 2,8$$

$$cV = 1176$$

$$\frac{1}{cV} = \frac{1}{1176}$$

$$\frac{1}{cV} = 8,5034 \cdot 10^{-4}$$

Povrch úseku vodiče, který se ochlazuje je interpretován v bloku „Gain“, pro tento výpočet je nutné použít průměr kabelu včetně izolace, jenž je podle [26] $d = 19,5$ mm. Výpočet povrchu tak bude:

$$A = \pi \cdot d \cdot l \quad (4.5)$$

$$A = \pi \cdot 19,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,8$$

$$A = 0,1715 \text{ m}^2$$

Teplotní součinitel odporu (α) je interpretován v bloku „Gain“. Hodnota teplotního součinitele odporu odpovídá měděnému vodiči.

Součinitel přestupu tepla (α_0) je implementován v bloku „Gain“. Pro výpočet jeho hodnoty je nutné znát složku přestupu tepla zářením a konvenkcí:

Tab. 4.1: Součinitele přestupu tepla pro záření a konvenkci, převzato z [27]

| Součinitel přestupu tepla zářením | Podmínky | Součinitel přestupu tepla konvenkcí | Podmínky |
|-----------------------------------|--|-------------------------------------|----------------------|
| $\alpha_z = 6+0,037\Theta_p$ | $E_z = 0,9; T_0 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ | $\alpha_k = 4,3+0,55\Theta_p$ | Válec průměr 5 cm |
| $\alpha_z = 6,3+0,038\Theta_p$ | $E_z = 0,9; T_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ | $\alpha_k = 6+0,09\Theta_p$ | Válec průměr 1 cm |

Hodnota součinitele přestupu tepla (α_0), jenž je v bloku „Gain“, je vybrána s ohledem na přestup tepla mezi pevnou látkou a neproudícím vzduchem jako $9 \text{ W/m}^2\text{K}$. Hodnota součinitele přestupu tepla je teplotně závislá, tudíž není během zahřívání konstantní. Vzhledem k náročnosti výpočtu tohoto součinitele se jeho hodnota uvažuje jako konstantní a zanáší do tepelného modelu chybu.

Jelikož se jako průměr kabelu uvažuje 1,95 cm, je nutné provést lineární aproximaci součinitele přestupu tepla konvenkcí:

První složka:

$$q_k = \frac{q_{5cm} - q_{1cm}}{5 - 1} \cdot 0,95 + q_{1cm} \quad (4.6)$$

$$q_k = \frac{4,3 - 6}{4} \cdot 0,95 + 6$$

$$q_k = 5,59625$$

Druhá složka:

$$k_k = \frac{k_{5cm} - k_{1cm}}{5 - 1} \cdot 0,95 + k_{1cm} \quad (4.7)$$

$$k_k = \frac{0,055 - 0,09}{4} \cdot 0,95 + 0,09$$

$$k_k = 0,0817$$

Výsledný vztah pro součinitel přestupu tepla konvenkcí pak bude:

$$\alpha_k = q_k + k_k \Theta_p \quad (4.8)$$

$$\alpha_k = 5,59625 + 0,0817\Theta_p$$

Nyní lze podle [27] spočítat výsledný součinitel přestupu tepla jako součet součinitele přestupu tepla zářením a konvenkcí. Jelikož nelze přesně určit, jakou má izolace, ze které přestupuje teplo do okolí emisivitu E_z , a teplota okolí je menší, než udává Tab.(4.1) je koeficient přestupu tepla zářením (α_z) zvolen tak, aby se průběh z tepelného modelu nejlépe přiblížil změřenému průběhu na Obr.(5.6). Pro tento výpočet je uvažován součinitel přestupu tepla zářením jako $\alpha_z = 2,99375 + 0,0119\Theta_p$, výsledný součinitel přestupu tepla pak je:

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_z \quad (4.9)$$

$$\alpha_0 = (5,59625 + 0,0817\Theta_p) + (2,99375 + 0,0119\Theta_p)$$

kde

Θ_p je rozdíl teploty jádra a izolace kabelu

Výsledný součinitel přestupu tepla se pak dá přepsat následovně:

$$\alpha_0 = 5,59625 + 2,99375 + (0,0817 + 0,0119) \cdot \Delta\Theta$$

$$\alpha_0 = 8,59 + 0,0936 \cdot \Delta\Theta$$

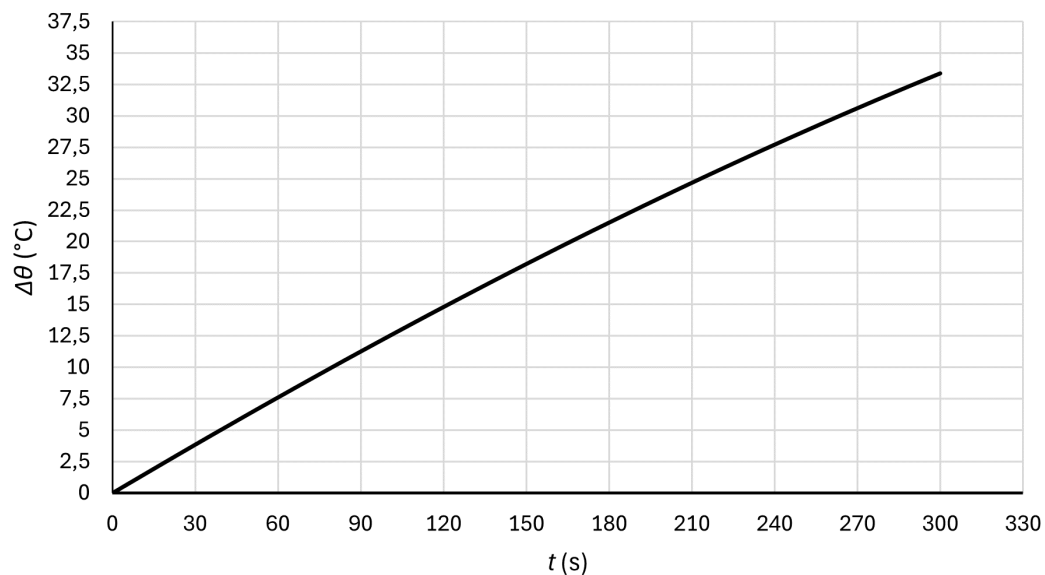
Pro tepelný model se uvažuje teplota okolí ($\Theta_0 = 23,8 \text{ }^\circ\text{C}$), délka ($l = 280 \text{ cm}$) a průřez ($S = 120 \text{ mm}^2$) vodiče, tedy stejné hodnoty jako v kapitole 5 při měření. To je z důvodu, aby bylo možné porovnat správnost měření a tepelného modelu.

Tab. 4.2: Přehled konstantních hodnot implementovaných do tepelného modelu

| Název veličiny | Označení | Hodnota |
|--|-------------|----------------------------------|
| Druhá mocnina proudu protékajícího kabelem | I | 362404 A |
| Odpor vodiče při teplotě okolí | $R_{okolí}$ | $0,4215 \cdot 10^{-3} \Omega$ |
| Měrná objemová kapacita vodiče | c | $3,5 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ |
| Objem vodiče | V | $3,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ |
| Ochlazovaný povrch kabelu | A | $0,1715 \text{ m}^2$ |
| Teplotní součinitel odporu | α | $0,00392 \text{ K}^{-1}$ |

Měrná objemová kapacita (c) je v modelu uvažována jako konstanta. V realitě je tato veličina závislé na teplotě, tudíž výsledný průběh modelu nebo totožný s realitou.

4.2 Výsledky z tepelného modelu kabelu



Obr. 4.2: Průběh oteplení jádra kabelu na času podle tepelného modelu, doba zatížení 300s

Podle průběhu v Obr.(4.2) lze zkoumaný kabel v dané instalaci použít, jelikož oteplení po čase $t = 300$ s zde dosahuje hodnoty $\Delta\Theta = 30$ °C. Kdyby byla uvažována teplota okolí jako $\Theta_{okoli} = 30$ °C, tak by se vodič ohřál na teplotu $\Theta = 60$ °C, což nepřekračuje maximální dovolenou teplotu vodiče okolo nějž je izolace ze zesíťového polyetylénu (XLPE).

5 Měření

5.1 Rozbor měření

V instalaci, jež je zkoumána v této práci je uloženo více kabelů ve žlabu vedle sebe. Tyto kabely slouží k propojení baterií v UPS systému, kde jimi protéká stejnosměrný proud o velikosti 602 A po dobu 5 minut. Celkem jsou takto zapojeny 4 baterie, z důvodu stejnosměrného proudu je nutné do baterií připojit kladný i záporný pól, tudíž je ve žlabu uloženo celkem 8 zatížených kabelů.

Každá z metod dimenzování kabelu v této práci zanáší do výpočtu průřezu vodiče pro zkoumanou aplikaci nepřesnost. Pro ověření, zda je možné nadimenzované kabely použít bylo provedeno měření.

Pro měření byly použity měděné kabely s průřezem jádra $S = 120 \text{ mm}^2$ a izolací XLPE. Měření oteplení se provádí za účelem ověření, zda kabel při daném zatížení nepřekročí maximální dovolenou teplotu, jež udává norma IEC 60364-5-54. Pro měření teplot jsou využity termočlánky, jež jsou připojeny na ústřednu pro zápis hodnot z termočlánků. Ústředna zapisuje hodnoty teploty každou sekundu, a lze k ní připojit více termočlánků.

Termočlánky byly použity pro měření teploty na povrchu izolace, kde byly přilepeny izolační páskou tak, aby pevně držely na určeném místě, a aby měřily teplotu izolace a neměřily okolní teplotu. Pro měření okolní teploty byl použit termočlánek, jež byl umístěn mimo měřené kabely.

Součástí experimentu bylo i měření teploty měděného jádra kabelu. Pro správné měření této teploty bylo nutné umístit termočlánek pod izolaci kabelu, to se provedlo nařízením izolace a následným vytvořením mezery mezi izolací a jádrem, do této mezery se pak vložil termočlánek. Díru v izolaci bylo nutné zaizolovat izolační páskou, aby izolace neztratila své izolační vlastnosti a měření neztratilo na přesnosti napodobení reálné instalace.

Při měření všech kabelů vedle sebe bylo použito celkem 8 termočlánků. Aby se zabránilo ovlivňování hodnot byly pro zápis hodnot z termočlánků použity 2 ústředny, do každé z nich byly připojeny 4 termočlánky (2 termočlánky měřící teplotu na povrchu izolace kabelu a 2 termočlánky měřící teplotu vodiče).

Pro ovládání zdroje stejnosměrného proudu je použito dálkové ovládání zdroje, které je ke zdroji připojeno. Na dálkovém ovládání zdroje lze nastavit proud ze zdroje, dále se zde nachází přepínač s režimy „blok“ a „chod“. Režim blok zajišťuje, že ze zdroje nepoteče žádný proud, režim chod způsobí, že ze zdroje proud poteče. Na zdroji byla nejdříve v režimu „blok“ nastavena hodnota požadovaného proudu (602 A), teprve poté byl zdroj přepnut do režimu „chod“. Díky tomu se nejvíce

omezila doba, ve které by kabely tekly menší proud, z důvodu nastavování požadované hodnoty.

5.1.1 Měření více kabelů uložených vedle sebe

Při tomto měření je použit pouze jeden zdroj, kabely jsou zapojeny sériově a smotány do smyček tak, aby vedle sebe leželo celkem 8 zatížených kabelů. Kabely byly uloženy na vzduchu, což má simulovat uložení kabelů v drátěném žlabu, tomuto uložení odpovídá podle Tab.(3.1) označení E, F nebo G. Metody E a F označují takové uložení kabelů vedle sebe, když se kabely mezi sebou dotýkají. Metoda G označuje kabely vedle sebe, mezi nimiž je rozstup o délce průměru jednoho kabelu.

Na obrázcích (5.1) a (5.2) lze vidět uložení kabelů položených vedle sebe. Rozmezí patra žebříku, na kterém jsou položeny činí 110 cm, kabely tedy mezi sebou působí zhruba v délce 150 cm, kde mezi sebou nemají příliš velký rozstup.

Nedotékající se kabely

Pro tuto instalaci se nezavádějí korekční faktory, lze tedy předpokládat, že nedotékající se kabely na sebe nebudou mít příliš velký vliv z hlediska oteplení. Tuto skutečnost lze ověřit s měřením dotékajících se kabelů a s měřením jednoho kabelu.



Obr. 5.1: Zapojení nedotékajících se kabelů

Dotékající se kabely

Měřené stanoviště zůstalo bez změny, jediná úprava byla spojení kabelů k sobě pomocí pásek, které takto kabely držely po celou dobu měření. Jelikož při tomto

měření byly použity kabely s jedním jádrem, tomuto způsobu instalace náleží podle IEC 60364-5-52 označení F. Podle Tab.(3.3) je korekční faktor pro tento způsob zapojení $KF = 0,72$. Lze tedy předpokládat, že proud protékající těmito kabely způsobí větší oteplení, jelikož kromě teploty okolí si kabely vyměňují teplotu mezi sebou. Takové oteplení by způsobil proud, který by byl podle vztahu (3.1) o hodnotě skutečného proudu vynásobeným převrácenou hodnotou korekčního faktoru (pokud bude teplota okolí uvažována jako 30 °C).



Obr. 5.2: Zapojení dotékajících se kabelů

5.1.2 Měření jednoho kabelu

Pro toto měření byl použit jeden kabel o délce 2,8 m. Pro měření teploty kabelu byly použity 2 termočlánky, jeden měřil teplotu měděného jádra, druhý měřil teplotu na povrchu izolace. Tento kabel byl zatížen po dobu delší, než 5 minut. Měření probíhalo do té doby, než teplota jádra dosáhla maximální dovolené teploty při zatížení. Jeden konec kabelu byl připojen na kladný pól proudového zdroje, druhý konec byl připojen na záporný pól proudového zdroje.

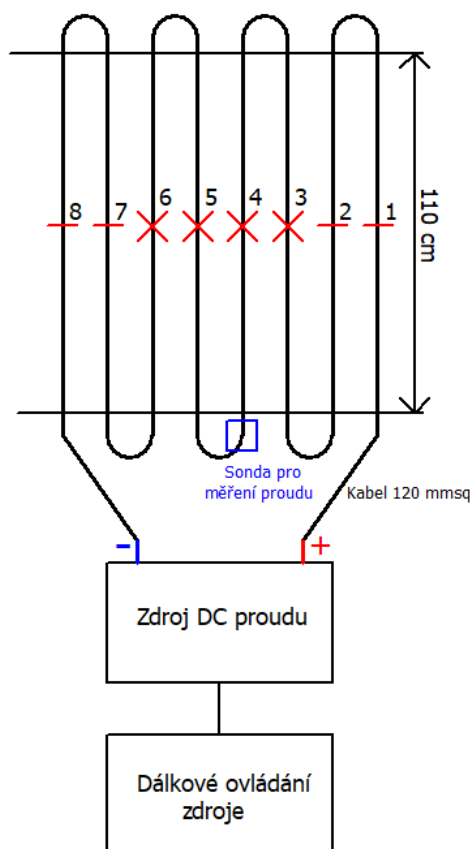
5.1.3 Měření degradace izolace

Měření degradace izolace bylo uskutečněno pro jeden kabel, který byl zatížen po takovou dobu, kdy jádro dosáhlo maximální dovolené teploty. Kabel byl před a po měření připojen na tester elektrické bezpečnosti, po připojení byl měřen svodový proud.

Pro ozkoušení degradace izolace byl před i po měření změřen izolační odpor kabelu. Měření izolačního odporu se rozumí testování schopnosti izolace nezpůsobit

průnik napětí na takové části, kde může vzniknout dotyk, jenž by mohl vést k úrazu. Měřením izolačního odporu se zároveň zkouší schopnost izolace zabránit nepožadovanému toku proudu mezi izolovaným zařízením a jinými částmi, což by mohlo vést k poruše. Tímto měřením je tedy dosaženo ověření bezpečnosti i funkčnosti [28]. Izolační odpor byl měřen proti hliníkové podložce, na které byl kabel položen.

5.1.4 Schéma zapojení



Obr. 5.3: Schéma zapojení měření

Červené křížky označují ve schématu termočlánky, které jsou uloženy pod izolací kabelu a měří teplotu v jádře kabelu. Červené čárky označují termočlánky, které jsou uloženy na povrchu izolace.

5.2 Postup měření

1. Připojení kabelů do série a položení kabelů do dřevěných štaflí (pro simulaci uložení v drátěném žlabu) tak, aby kabely vytvořily smyčky a na úseku dlouhém 110 cm bylo vedle sebe 8 kabelů. Jeden konec kabelu je nutné provléct

- do proudové sondy, následně připojení sondy do ústředny pro zápis hodnot z termočlánků a proudové sondy.
2. Umístění termočlánků na povrch izolace pro měření teploty izolace. Naříznutí izolace a vložení termočlánků pod naříznutou část. Všechny termočlánky a díry v izolaci bylo třeba přelepit izolační páskou.
 3. Připojení termočlánků do ústředny pro zápis teplot z termočlánků a proudové sondy.
 4. Připojení začátku a konce spojených kabelů ke zdroji stejnosměrného proudu.
 5. Připojení zdroje do třífázové sítě 230/400 V.
 6. Zapnutí režimu „chod“ na dálkovém ovládní zdroje stejnosměrného proudu.
 7. Nastavení výstupního proudu na dálkovém ovládní proudového zdroje na hodnotu 602 A.
 8. Zapnutí režimu „blok“ na dálkovém ovládní zdroje stejnosměrného proudu, aby se kabel neohříval před začátkem měření jeho teploty.
 9. Zapnutí ústředny pro zápis teplot z termočlánků a proudové sondy.
 10. Přepnutí proudového zdroje do režimu „chod“.
 11. Po uběhnutí 5 minut přepnutí zdroje do režimu „blok“, aby bylo zamezeno průchodu proudu.

5.3 Vyhodnocení měření

Během všech měření byl pomocí sondy měřen proud protékající měřenými kabely. Podle této sondy byl proud po většinu času o velikosti 602 A, což je požadovaná hodnota. Během měření docházelo k drobným výkyvům proudu na hodnoty 601 a 603 A. Podle sondy se tedy proud během měření nezměnil o více než 1 A.

Při všech měření byla zaznamenána teplota okolí $\Theta_{okolí} = 23,8 \text{ } ^\circ\text{C}$. Termočlánky pod izolací a na izolaci měřily teplotu, pro výpočet oteplení byl použit tento vztah:

$$\Delta\Theta = \Theta_{kabel} - \Theta_{počáteční} \quad (5.1)$$

kde

Θ_{kabel} je změřená hodnota teploty pro určitý bod kabelu ve $^\circ\text{C}$

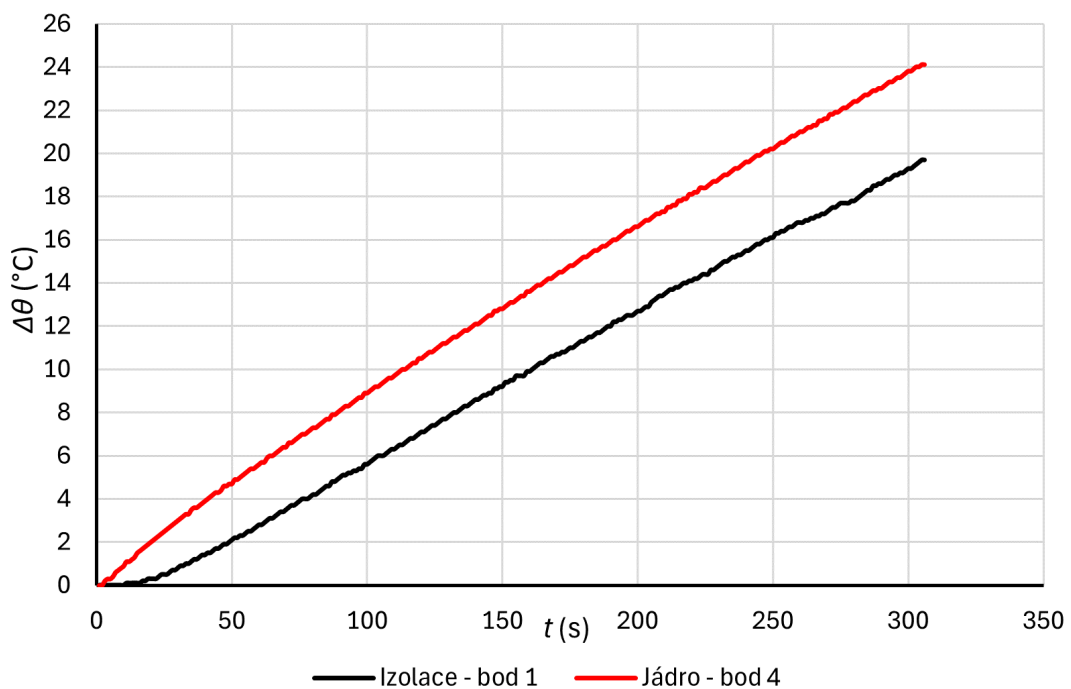
$\Theta_{počáteční}$ je počáteční teplota kabelu, neboli teplota okolí ve $^\circ\text{C}$

Jelikož byly kabely před začátkem měření zatíženy z důvodu předchozího měření, počáteční teplota tedy vždy nebyla stejná jako teplota okolí. Počáteční a konečné teploty kabelů jsou změřeny termočlánky. Změřené počáteční a konečné teploty jsou uvedeny v tabulce níže:

Tab. 5.1: Přehled počátečních a konečných teplot při měření po 300 sekundách

| Měření | Teplota jádra (°C) | | Teplota izolace (°C) | |
|---------------------------|--------------------|---------|----------------------|---------|
| | Počáteční | Konečná | Počáteční | Konečná |
| 1. Dotékající se kabely | 25,4 | 51,6 | 24,7 | 47,1 |
| 2. Nedotékající se kabely | 26,3 | 50,4 | 25,5 | 45,2 |
| 3. Jeden samostatný kabel | 22,5 | 45,8 | 24,6 | 43,1 |

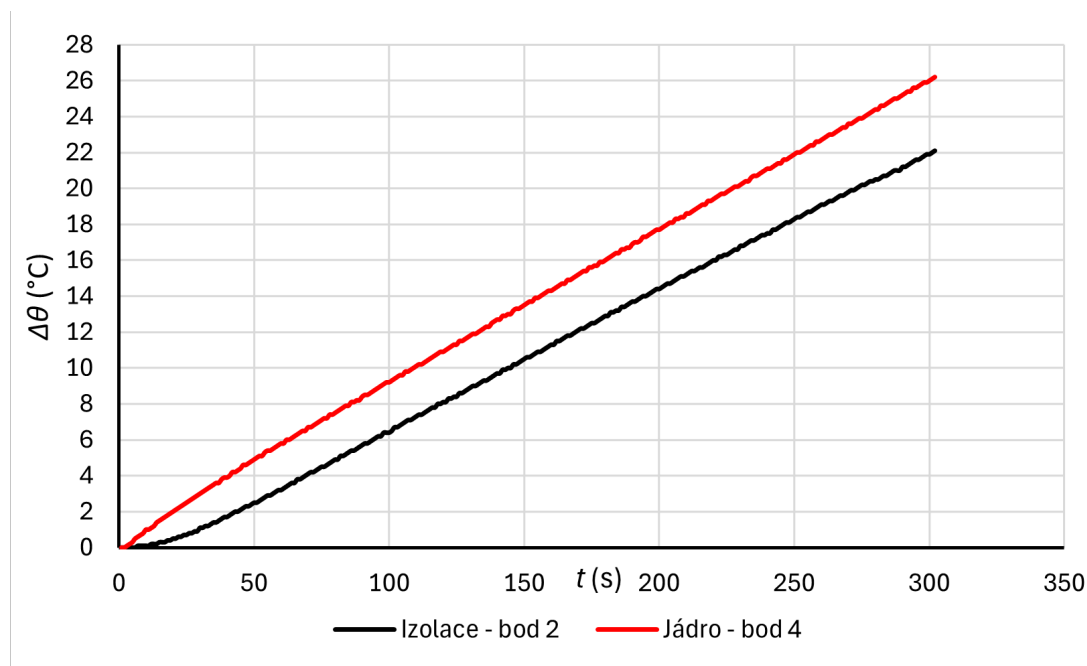
5.3.1 Vyhodnocení měření nedotékajících se kabelů



Obr. 5.4: Průběh oteplení nedotékajících se kabelů

Z tohoto průběhu je patrné, že oteplení po čase zatížení 300 s dosáhlo na hodnotu zhruba 24 °C.

5.3.2 Vyhodnocení měření dotékajících se kabelů



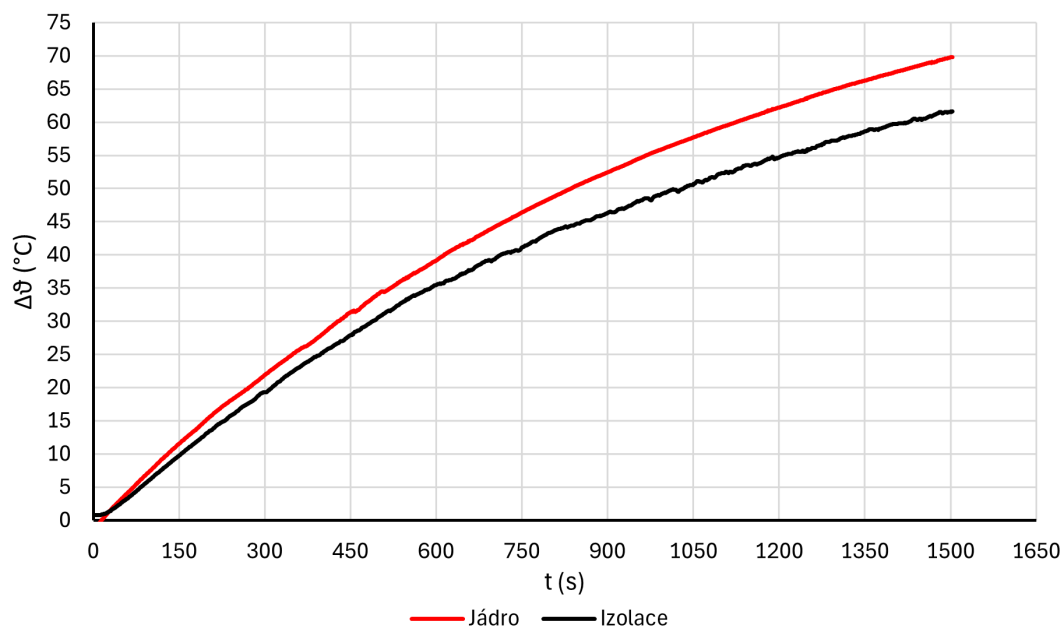
Obr. 5.5: Průběh oteplení dotékajících se kabelů

Z tohoto průběhu je patrné, že oteplení po čase zatížení 300 s dosáhlo na hodnotu zhruba 26 °C. Oproti průběhu oteplení nedotékajících se kabelů Obr.(5.1) je zde oteplení větší o 2 °C, což je způsobeno tím, že dotékající se kabely mají mezi sebou lepší přesun tepla, než když musí teplo sdílet přes vzduchovou mezeru. Část tepla vytvořena v jednotlivých kabelech tedy více ohřála sousedící kabely.

5.3.3 Vyhodnocení měření jednoho kabelu

Toto měření bylo provedeno po nejdelší dobu. Z toho důvodu je průběh na Obr.(5.6) exponenciální. Všechny ostatní změřené průběhy byly měřeny po kratší čas, tudíž se změřené hodnoty nacházejí na lineární části této exponenciály. Při měření byla uvažována teplota okolí 23,8 °C, tudíž lze z Obr.(5.6) určit, že teploty 90 °C (maximální dovolená teplota vodiče) dosáhl kabel po 1500 s. Po tomto čase dosáhla teplota izolace na teplotu zhruba 84 °C.

Z Obr.(5.6) je dále patrné, že po 300 s měl tento kabel oteplení o zhruba 22 °C, což je méně než při měření nedotékajících se a dotékajících se kabelů ve skupině. Při zatížení pouze jednoho kabelu došlo k výměně tepla pouze mezi kabelem a okolím (vzduchem), zatímco při měření kabelů ve skupině docházelo k výměně tepla mezi kabely, více zatížených kabelů si tedy předávalo teplo mezi sebou a vzájemně se ohřívaly.



Obr. 5.6: Průběh oteplení jednoho kabelu

Vyhodnocení měření degradace izolace

Měřený kabel byl nejdříve ozkoušen před zatížením, kdy byl připojen na tester výdržného napětí. Kabel byl pod výdržným napětím o hodnotě 6 kV a pomocí testeru byl měřen svodový proud mezi izolací kabelu a hliníkovou deskou, na které byl kabel položen. Svodový proud dosahoval hodnot v řádech desítek μA , což značí vyhovující izolaci.

Po zatížení, kdy vodič kabelu dosáhl maximální dovolené teploty ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$) byl znovu stejným způsobem změřen svodový proud. I po zatížení se hodnota svodového proudu nezměnila, což značí, že izolace kabelu po krátkodobém přetížení nebyla nijak poničena.

Součástí vyhodnocení degradace izolace bylo i měření izolačního odporu ohmmetrem ILKO GIGATESTPro. Měření bylo opět provedeno před a po zatížení kabelu. Ohmmetr měřil izolační odpor proti hliníkové desce, na které byl kabel položen. Změřený odpor dosahoval před i po zatížení kabelu hodnot $10\text{ G}\Omega$, což byl zároveň maximální odpor, jenž byl ohmmetr schopen změřit. Z tohoto měření lze také vyvodit závěr, že izolace byla před i po zatížení kabelu na maximální dovolenou teplotu ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$) neponičena.

Tab. 5.2: Použité přístroje při měření

| Název | Výrobce | Typ |
|--|-----------|--------------------|
| Dálkové ovládání zdroje | NES | SDO 28A1K IP54 |
| Stejnoseměrný zdroj proudu | NES | SZ 2500 15/400.2 |
| Sonda pro měření proudu | LEM | IT 700-S Ultrastab |
| Ústředna pro zápis hodnot z termočlánků a proudové sondy | ALMEMO | 5690-2 |
| Modul pro měření stejnosměrného napětí | AHLBORN | Almemo ZA 9900-AB3 |
| Tester výdržného napětí | GW INSTEK | GPT-9902A |
| Ohmmetr | ILKO | GIGATESTPro |
| Teploměr-vlhkoměr-barometr | COMET | D4130 |

Tab. 5.3: Přehled okolních podmínek při měření

| | |
|-------------------|-----------|
| Teplota okolí | 23,8 °C |
| Atmosferický tlak | 980,2 hPa |
| Relativní vlhkost | 39,0 % RH |

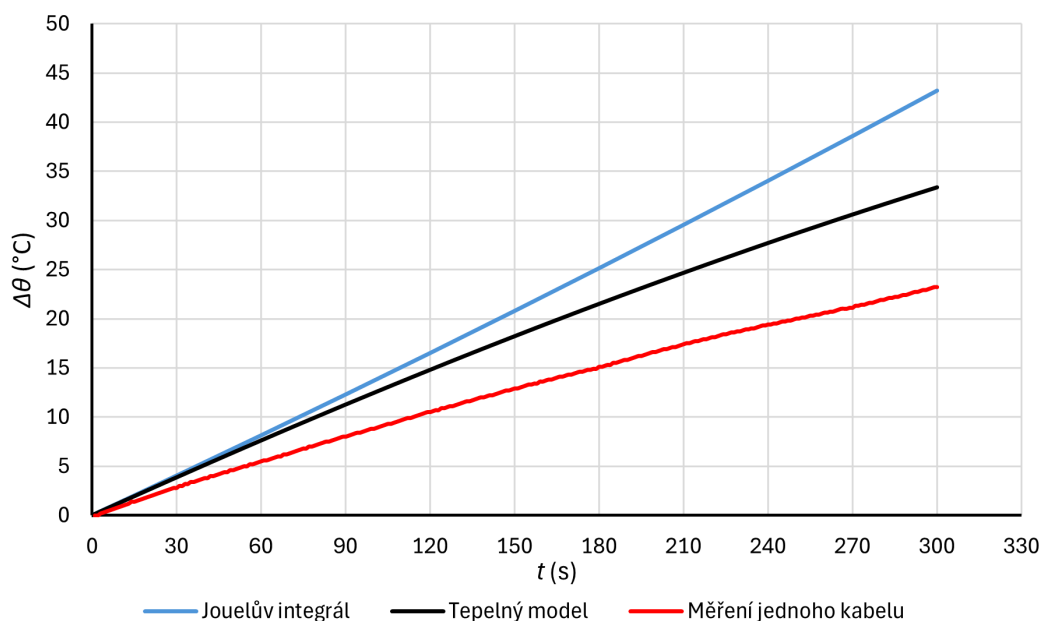
Měření okolních podmínek bylo provedeno pomocí přístroje COMET D4130.

5.4 Porovnání změřených výsledků s teoretickými výsledky

Tab. 5.4: Porovnání naměřených a teoretických výsledků po 5 minutách zatížení

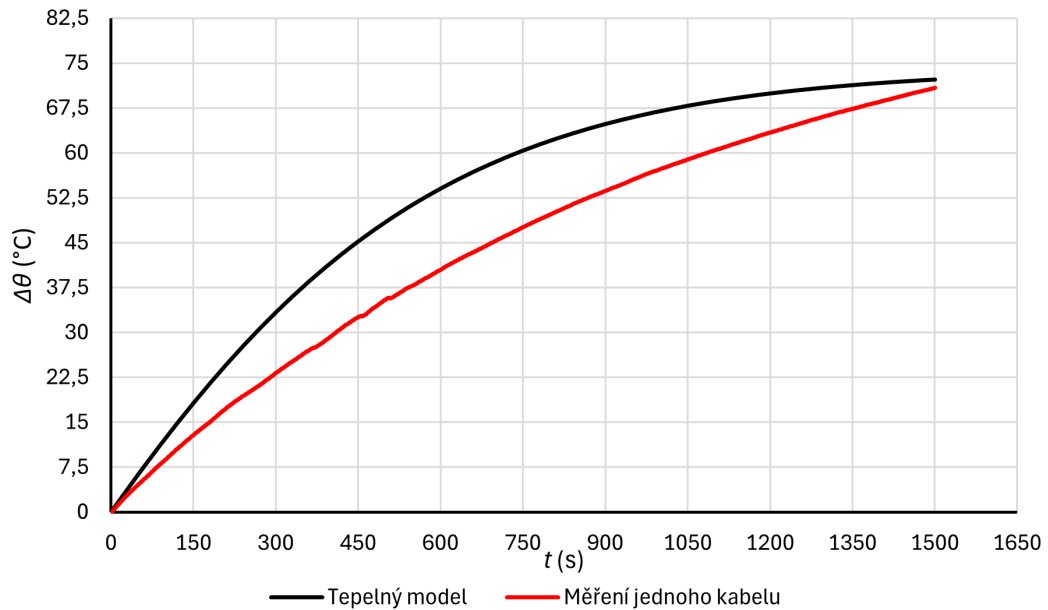
| Metoda | Zkoumaný průřez (mm ²) | Oteplení (°C) |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------|
| Měření nedotýkajících se kabelů | 120 | 24,1 |
| Měření dotýkajících se kabelů | 120 | 26,7 |
| Měření jednoho kabelu | 120 | 23,2 |
| Tepelný model (jeden kabel) | 120 | 33,3 |
| Jouelův integrál (jeden kabel) | 120 | 43,2 |

Pro nedotýkající se a dotýkající se kabely jsou uvedeny rozsahy průřezů, jelikož se tyto metody ověřovaly nejdříve bez uvážení krátkodobého zatížení a poté s uvážením krátkodobého zatížení.



Obr. 5.7: Průběh oteplení podle měření, tepelný model a Jouelova integrálu, čas zatížení 300 s

Z Tab.(5.4) lze vidět, že průběh oteplení z tepelného modelu a měření se v čase $t = 300$ s liší o 10 °C. Průběh podle Jouelova integrálu se od měření ve stejném čase liší o 20 °C, od tepelného modelu zhruba o 10 °C. U průběhu podle Jouelova integrálu je to způsobeno tím, že se u této metody počítá s adiabatickým oteplováním, to znamená, že všechno vzniklé teplo zůstává ve vodiči a nepřestupuje do okolí.



Obr. 5.8: Průběh oteplení podle měření a tepelného modelu, čas zatížení 1500 s

Rozdíl mezi tepelným modelem může být způsoben vícero faktory, například tím, že tepelný model počítá s konstantní objemovou tepelnou kapacitou, která se mění s teplotou. Rozdíl může být způsoben i nepřesností při měření pomocí termočlánků, které mohly měřit menší teplotu vlivem jejich špatného upevnění pod izolací. Dále v modelu není uváženo přestup tepla přes izolaci, při měření se v kratších časech může jádro ochlazovat vlivem přestupu tepla do izolace. Tepelný model nepočítá s tepelnou kapacitou izolace, která při měření snižuje teplotu vodiče.

Podle všech metod lze z Tab.(5.4) pro danou instalaci, která bude zatížena po dobu 300 sekund, zvolit kabel u průřezu $S = 120 \text{ mm}^2$. Nejvyšší oteplení zaznamenané podle všech metod je $\Delta\Theta = 43 \text{ °C}$. Při uvážení teploty okolí $\Theta_{okolí} = 30 \text{ °C}$ bude maximální zaznamenaná teplota po pěti minutách zatížení $\Theta = 73 \text{ °C}$, což nepřesahuje maximální dovolenou teplotu pro kabely s izolací ze zesíťovaného polyetylénu, která udává jako $\Theta = 90 \text{ °C}$.

Závěr

Pro kabely dimenzované podle normy IEC 60364-5-52 vycházel průřez vodiče $S = 185 \text{ mm}^2$ za předpokladu, že se více kabelů uložených v jednom žlabu nebudou dotýkat. Pokud by se kabely dotýkaly, bylo by nutné použít vodiče s průřezem $S = 300$ nebo 400 mm^2 , závislosti na tom, jaký žlab, na kterém by kabely ležely, by byl použit. Tyto výpočty jsou udávány pro trvalé zatížení, tudíž se do těchto výpočtů implementuje dimenzování podle zatěžovacího cyklu.

Při implementaci dimenzování podle zatěžovacího cyklu do těchto výpočtů, vycházejí menší průřezy, které představují ekonomicky výhodnější možnost. Podle této metody lze pro dotýkající se kabely použít průřez vodiče $S = 185 \text{ mm}^2$. Pokud by se kabely nedotýkaly, lze podle této metody použít průřez $S = 120 \text{ mm}^2$.

Podle dimenzování vycházejícího z Jouelova integrálu (norma IEC 60364-5-54) lze použít kabel s průřezem vodiče $S = 120 \text{ mm}^2$. Podle této metody lze zobrazit průběh oteplení kabelu Obr.(3.3). Z tohoto průběhu lze vidět, že pro sledovanou dobu zatížení (300 s) se kabel oteplí o $40 \text{ }^\circ\text{C}$, pokud by k tomu byla uvažována teplota okolí $30 \text{ }^\circ\text{C}$, lze podle tohoto průběhu nadimenzovaný kabel použít.

Z hlediska dovoleného úbytku napětí vyhovují všechny nadimenzované kabely. Jelikož se v uvažované aplikaci nejedná o dlouhé kabely, odpor vodičů není tak velký a úbytky napětí jsou v dostačujících mezích.

Tepelný model kabelu zanáší některá zjednodušení, kvůli kterým není průběh oteplení totožný s realitou. Výsledky z tepelného modelu ale ukazují, že kabel s průřezem $S = 120 \text{ mm}^2$ z hlediska oteplení vyhovuje, jelikož se po 5 minutách zatížení neohřeje nad maximální dovolenou teplotu.

Měření ukázalo rozdíly oteplení pro samostatný kabel a pro skupinu kabelů. Pokud se kabely ve skupině mezi sebou dotýkaly, byla jejich teplota po 5 minutách zatížení asi o $2 \text{ }^\circ\text{C}$ větší, než když se kabely ve skupině mezi sebou nedotýkaly. Měření jednoho kabelu ukázalo, že jádro kabelu se na maximální dovolenou teplotu ohřálo až po čase 1500 s. Po ohřátí kabelu byla ozkoušena i izolace, toto zkoušení potvrdilo, že izolace se vlivem krátkodobého vystavení maximální dovolené teploty nepoškodila.

Dimenzování podle zatěžovacího cyklu pro nedotýkající se kabely, dimenzování podle Jouelova integrálu, tepelný model a měření potvrdili, že ekonomicky nejvýhodnější kabel spočítaný v této práci (kabel s průřezem vodiče $S = 120 \text{ mm}^2$), lze pro zkoumanou instalaci použít, jelikož jeho oteplení po 5 minutovém zatížení nepřesáhne maximální dovolenou hodnotu.

Literatura

- [1] ČSN EN 62040-5-3 (369066). *Zdroje nepřerušovaného napětí (UPS) - Část 5-3: UPS se stejnosměrným výstupem - Provozní a zkušební požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [2] ŽÁČEK, Jaroslav. Zdroje nepřerušovaného napájení - UPS. *ELEKTRO* [online]. FCC PUBLIC, 2001, **1991**(10/2001) [cit. 2024-05-15]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/zdroje-nepreperusovaneho-napajeni-ups--15062>
- [3] *The Main Characteristics of UPS Battery Systems* [online]. ABB, 2017 [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/4273d7e6a4134cb3afc4bcfa288e2356/UPS%20Battery%20Systems_EN.pdf
- [4] *What are the Different Types of UPS Batteries* [online]. In: HCI ENERGY. 2022 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.hcienergy.com/blog/what-are-the-different-types-of-ups-batteries>
- [5] *What Are the Different Types of UPS Systems* [online]. In: . [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://www.vertiv.com/en-emea/about/news-and-insights/articles/educational-articles/what-are-the-different-types-of-ups-systems/>
- [6] *Uninterruptible Power Supply (UPS) Explained* [online]. [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/when-to-use-an-uninterruptible-power-supply>
- [7] *PCS100 UPS - Single conversion UPS for large industrial power protection* [online]. 1-2 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/6766e38977855e84c1257d5b0080e2e3/2UCD401189-P_a%20PCS100%20UPS-.pdf
- [8] KUBÍN, Vít. *Numerická analýza chlazení elektrického zařízení*. Plzeň, 2020, 77 s. Diplomová. Západočeská univerzita v Plzni.
- [9] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [10] TRUBÁK, Vojtěch. *Zvyšování jmenovité hodnoty proudu spínacích přístrojů s tepelnou vypínací spouští*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016, 53 s. Bakalářská. Vedoucí práce Lukáš Dostál.

- [11] ENESCU, Diana, Pietro COLELLA a Angela RUSSO. Thermal Assessment of Power Cables and Impacts on Cable Current Rating: An Overview. *Energies* [online]. MDPI, 13 October 2020n. 1., **2020**(13(20), 5319), 3 [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/20/5319>
- [12] LÁZNÍČKOVÁ, Ilona. *Technická mechanika: Mechanika poddajných těles: Termomechanika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 140 s.
- [13] JIA, Yizhuo, Pengrui MAN, Xinyao GUO a Liang DENG. Effects of Overload on Thermal Decomposition Kinetics of Cross-Linked Polyethylene Copper Wires. *Polymers* [online]. 2023, (15(19)1 3954), 11 [cit. 2024-05-14]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/19/3954>
- [14] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015.
- [15] CHERNIKHOVSKA, Vita. The impact of different temperatures on the performance of wire and cable. In: NNC. *Nassau National Cable* [online]. November 24, 2021, [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://shorturl.at/Xgqss>
- [16] VRÁNA, Václav a Václav KOLÁŘ. *Dimenzování a jištění elektrických vedení*. 2004. Katedra obecné elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - TU Ostrava.
- [17] HELŠTÝN, David, Petr KAČOR a Zdeněk HYTKA. *Elektrické přístroje spínací ochranné a jistící*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2003. ISBN 80-248-0315-1.
- [18] OTÝPKA, Jan a Pavel SVOBODA. *Spínací a jistící přístroje*. 2014. Katedra elektrotechniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava.
- [19] IEC 60364-5-52. *Low-voltage electrical installations - Part 5-52: Selection and erection of electrical equipment - Wiring systems*. Edition 3.0. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2009.
- [20] IEC 60034-1. *Rotating electrical machines - Part:1 Rating and performance*. Edition 14.0. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2022.

- [21] PRYSMIAN. *Industry Cables: Special cables for industrial applications: General catalogue* [online]. 2016, 163 s. [cit. 2024-05-14]. Dostupné z: https://de.prysmian.com/sites/default/files/Industry%20Cables_General%20Catalogue_Prysmian%20Group%202016_LR.pdf
- [22] IEC 60364-5-54. *Low-voltage electrical installations - Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment - Earthing arrangements and protective conductors*. Edition 3.0. Geneva, Switzerland: IEC Central Office, 2011.
- [23] VYLEGALA, Pavel. *ELEKTROTECHNIKA*. Střední škola elektrotechnická, Ostrava, Na Jízdárně 30, p.o., 2006.
- [24] Materials Thermal Properties Database. In: THERMTEST INSTRUMENTS. *Thermtest* [online]. [cit. 2024-05-28]. Dostupné z: <https://thermtest.com/thermal-resources/materials-database>
- [25] Teplotní závislost odporu kovových vodičů. *ELEKTRO* [online]. FCC PUBLIC, 2008, **1991**(1/2008) [cit. 2024-05-17]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/teplotni-zavislost-odporu-kovovych-vodicu--11677>
- KRATINA, Jakub. *Hustota materiálů a látek* [online]. (2013) [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hustota-materialu-a-latek>
- [26] SCANKAB CABLES. TOXFREE® N2XH-Flex - 0,6/1 kV. SCANKAB CABLES. *Scankab.com* [online]. Nedatováno [cit. 2024-01-13]. Dostupné z: <https://scankab.com/cables/installation-cables/low-voltage-cables-copper/installation-cables-halogen-free/toxfree-n2xh-flex-0-61-kv>
- [27] HAVELKA, Otto, Dalibor SVOBODA a Zdeněk VÁVRA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. Brno: VUT, 1985, 188 s.
- [28] KUPÝ, Leoš. Měření elektrických spotřebičů při revizích. *ELEKTRO* [online]. FCC PUBLIC, 2004, **1991**(02/2004) [cit. 2024-05-17]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/mereni-elektrickyh-spotrebicu-pri-revizich-3--14212>

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|-------------|--|
| UPS | zdroj nepřerušovaného napájení – Uninterruptible Power System |
| AC | střídavý proud – Alternating Current |
| DC | stejnoseměrný proud – Direct Current |
| PVC | polyvinylchlorid |
| XLPE | zesítěný polyetylén |
| EPR | etylenpropylenový syntetický kaučuk |
| mmsq | milimetr čtvereční |
| <i>t</i> | čas |
| <i>I</i> | elektrický proud |
| I_N | jmenovitý proud pro určitý průřez |
| I_{NK} | elektrický proud přepočítaný podle korekčních faktorů |
| I_{NK1} | elektrický proud přepočítaný podle doby zatížení |
| <i>S</i> | průřez vodiče |
| S_F | průřez vodiče vypočtený pro metodu uložení F |
| S_G | průřez vodiče vypočtený pro metodu uložení G |
| KF_1 | korekční faktor podle teploty okolí |
| KF_2 | korekční faktor podle počtu zatížených vodičů |
| KF_3 | korekční faktor podle doby zatížení |
| <i>a</i> | první exponent pro výpočet maximálního dovoleného zatížení |
| <i>b</i> | druhý koeficient pro výpočet maximálního dovoleného zatížení |
| <i>m</i> | první exponent pro výpočet maximálního dovoleného zatížení |
| <i>n</i> | druhý exponent pro výpočet maximálního dovoleného zatížení |
| <i>k</i> | součinitel závislý na materiálových konstantách kabelu a teplotě okolí |
| ΔU | úbytek napětí |

| | |
|-----------------|--|
| $\Delta u_{\%}$ | procentní úbytek napětí |
| Θ_i | počáteční teplota vodiče |
| Θ_f | maximální dovolená teplota při zatížení |
| Q_c | objemová tepelná kapacita vodiče při 20 °C |
| β | reciproká hodnota teplotního součinitele rezistivity při 0 °C |
| ρ_{20} | elektrická rezistivita materiálu vodiče při 20 °C |
| P | tepelné ztráty |
| R | odpor vodiče |
| R_{20} | odpor vodiče pro teplotu 20 °C |
| R_x | odpor vodiče pro určitou teplotu |
| $R_{okolí}$ | odpor vodiče při teplotě okolí |
| Q | jouelovy ztráty |
| α | teplotní součinitel odporu |
| α_0 | součinitel přestupu tepla v kabelu |
| α_z | součinitel přestupu tepla zářením |
| α_k | součinitel přestupu tepla konvenkcí |
| θ_p | oteplení vodiče vůči izolace |
| θ_p | oteplení vodiče vůči izolace |
| q_{1cm} | reálné číslo q lineární funkce součinitele přestupu tepla konvenkcí pro válec o průměru 1 cm |
| q_{5cm} | reálné číslo q lineární funkce součinitele přestupu tepla konvenkcí pro válec o průměru 5 cm |
| q_k | reálné číslo q lineární funkce součinitele přestupu tepla konvenkcí pro válec o průměru k |
| k_{1cm} | reálné číslo k lineární funkce součinitele přestupu tepla zářením pro válec o průměru 1 cm |

| | |
|----------------------|--|
| k_{5cm} | reálné číslo k lineární funkce součinitele přestupu tepla zářením pro válec o průměru 5 cm |
| k_k | reálné číslo k lineární funkce součinitele přestupu tepla zářením pro válec o průměru k |
| A | sledovaný povrch vodiče |
| $\Delta\Theta$ | okamžité oteplení povrchu vodiče proti okolí |
| $\Delta\Theta_{max}$ | maximální oteplení povrchu vodiče proti okolí |
| c | měrná objemová tepelná kapacita |
| c_0 | měrná tepelná kapacita |
| V | objem sledovaného úseku vodiče |
| Θ | okamžitá teplota |
| Θ_x | okamžitá teplota vztažená na odpor |
| l | delká vodiče |
| ρ | hustota mědi |
| Θ_0 | teplota okolí |
| d | průměr kabelu včetně izolace |
| E_z | emisivita materiálu |