



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

ANALÝZA OTEPLENÍ STYKAČE

CONTACTOR TEMPERATURE RISE ANALYSIS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Jaroš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Vít Jaroš

ID: 247679

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Analýza oteplení stykače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte problematiku oteplení stykačů včetně normativních požadavků.
2. Zaměřte se na vznik tepla v kontaktním styku stykačů s ohledem na požadavky kladené na kontaktní systém.
3. Vytvořte závislost velikosti stykového odporu na přitlačné síle v konkrétním kontaktním systému.
4. Proveďte měření oteplení za účelem porovnání vlastností dvou výrobků s kontakty z různých materiálů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje I. 3. vyd. Brno: VUT, 1982.
- [2] ČSN EN IEC 60947-4-1 ed. 4 (354101) A Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [3] ČSN EN 61095 ed. 2 (354151) A Elektromechanické stykače pro domácnost a podobné účely. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 28.5.2025

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 problematikou oteplení stykačů v důsledku průchodu elektrického proudu, se zaměřením na vznik tepla v kontaktním styku. Hlavním cílem práce je stanovení vlivu oteplení stykače při použití dvou různých kontaktních materiálů, AgNi a AgSnO₂. Práce zkoumá metody analýzy oteplení, zejména použití termoelektrických článků a termokamery, včetně jejich výhod a nevýhod. Zbytek práce se věnuje normativním požadavkům, praktickým oteplovacím zkouškám elektromagnetických stykačů a vyhodnocení vlivu materiálů kontaktů na oteplení stykače.

KLÍČOVÁ SLOVA

Oteplení elektromagnetického stykače; kontaktní systém; AgNi; AgSnO₂; stykový odpor; oteplovací zkouška; senzor teploty; termoelektrický článek

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the issue of the temperature rise of the contactor due to the passage of electric current, focusing on the heat generation in the contact. The main objective of the work is to determine the effect of contactor heating when using two different contact materials, AgNi and AgSnO₂. The project examines methods for analyzing the temperature rise in switching apparatus, emphasizing thermocouples and thermal cameras, along with their respective advantages and disadvantages. Additionally, the project will address normative requirements, practical temperature rise tests of electromagnetic contactors, and evaluation of the influence of contact materials on contactor heating.

KEYWORDS

Temperature rise of the electromagnetic contactor; contact system; AgNi; AgSnO₂; contact resistance; temperature rise test; thermal sensor; thermocouple

JAROŠ, Vít. *Analýza oteplení stykače*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2025. Vedoucí práce: Ing. David Šimek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Vít Jaroš
VUT ID autora: 247679
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Analýza oteplení stykače

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. Davidu Šimkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
Cíle práce	13
1 Tepelné účinky elektrického proudu	14
1.1 Elektrický odpor v závislosti na teplotě	14
1.2 Tepelné ztráty	14
1.3 Ustálené oteplení	15
2 Oteplení stykače	17
2.1 Vznik tepla v kontaktním styku	19
2.1.1 Úžinový odpor a odpor cizích vrstev	19
2.1.2 Materiály kontaktů a jejich chemické reakce	20
2.1.3 Závislost stykového odporu na přitlačné síle	22
2.1.4 Závislost stykového odporu na přitlačné síle v konkrétním kontaktním systému	23
3 Metody analýzy oteplení elektrických přístrojů	26
3.1 Kovové odporové senzory teploty	26
3.1.1 Konstrukce odporových kovových snímačů teploty	28
3.1.2 Platinové snímače teploty	28
3.1.3 Niklové snímače teploty	28
3.1.4 Měděné snímače teploty	28
3.2 Termoelektrické články	29
3.2.1 Seebeckův jev	29
3.2.2 Typy termoelektrických článků	30
3.2.3 Potlačení rušení	31
3.3 Termografie	31
3.3.1 Emisivita a její stanovení	32
3.3.2 Vzdálenost od měřeného objektu	32
4 Normativní požadavky oteplovacích zkoušek	33
4.1 Obecné požadavky	34
4.2 Teplota okolí	34
4.3 Měření oteplení částí	34
4.4 Oteplení hlavního obvodu	35
4.5 Vyhodnocení zkoušky	35

5	Oteplovací zkouška stykače LSD2503	37
5.1	Schéma zapojení	37
5.2	Průběh měření	38
5.3	Měřené body	39
5.4	Naměřené a vypočtené hodnoty	40
5.5	Vyhodnocení měření	43
6	Oteplovací zkouška instalačních stykačů	45
6.1	Schéma zapojení	46
6.2	Průběh měření	46
6.3	Měřené body	47
6.4	Naměřené a vypočtené hodnoty	48
6.5	Vyhodnocení měření	52
7	Zkouška oteplení kontaktů instalačních stykačů	55
7.1	Schéma zapojení	55
7.2	Průběh měření	56
7.3	Měřené body	57
7.4	Kontaktní systém	58
7.5	Naměřené a vypočtené hodnoty	61
7.6	Vyhodnocení měření	65
	Závěr	69
	Literatura	71
	Seznam symbolů a zkratk	75
	Seznam příloh	78

Seznam obrázků

1.1	Oteplovací a ochlazovací charakteristika	16
2.1	Konstrukce můstkového kontaktu	17
2.2	Stykové plošky elektrických kontaktů a zakřivení proudnic	20
2.3	Závislost stykového odporu na přitlačné síle mědi a stříbra	23
2.4	Kontakt - styk koule s rovinou	23
2.5	Stykový odpor v závislosti na přitlačné síle dvou materiálů kontaktů	25
3.1	Teplotní závislost odporových kovových snímačů	27
3.2	Terminologie měřicího řetězce termoelektrického článku	29
3.3	Charakteristiky vybraných termoelektrických článků	31
5.1	Schéma zapojení silové části stykače LSD2503	38
5.2	Rozmístění jednotlivých termočlánků na stykači LSD2503	40
5.3	Průběh oteplení svorek a boku stykače LSD2503	41
5.4	Snímek zapojení stykače LSD2503 provedený termokamerou	42
5.5	Snímek boku stykače LSD2503 provedený termokamerou	42
6.1	Schéma zapojení silové části instalačních stykačů	46
6.2	Rozmístění jednotlivých termočlánků na instalačních stykačích	48
6.3	Průběh oteplení instalačního stykače Sa1 (AgSnO ₂)	49
6.4	Průběh oteplení instalačního stykače Sa2 (AgNi)	50
6.5	Průběh oteplení cívek instalačních stykačů	50
6.6	Změna stykového odporu u jednoho kontaktu obou instalačních stykačů	51
6.7	Snímek instalačního stykače Sa1 (AgSnO ₂) provedený termokamerou	51
6.8	Snímek instalačního stykače Sa2 (AgNi) provedený termokamerou	51
7.1	Schéma silové části se sériovým zapojením instalačních stykačů	56
7.2	Rozmístění termočlánků při měření oteplení kontaktů	58
7.3	Zakryté kontakty stykače Sa1	58
7.4	Kontaktní systém instalačních stykačů	59
7.5	Detail kontaktu instalačního stykače Sa1 (AgSnO ₂)	60
7.6	Detail kontaktu instalačního stykače Sa2 (AgNi)	60
7.7	Detail stykového místa spodního kontaktu stykače Sa1 (AgSnO ₂)	60
7.8	Detail stykového místa spodního kontaktu stykače Sa2 (AgNi)	60
7.9	Pohled mikroskopem na spodní kontakt stykače Sa1 (AgSnO ₂)	61
7.10	Pohled mikroskopem na spodní kontakt stykače Sa2 (AgNi)	61
7.11	Průběh oteplení kontaktů instalačního stykače Sa1 (AgSnO ₂)	63
7.12	Průběh oteplení kontaktů instalačního stykače Sa2 (AgNi)	63
7.13	Průběh oteplení kontaktů zakrytého instalačního stykače Sa1	64
7.14	Termovizní snímek kontaktů instalačního stykače Sa1	64
7.15	Termovizní snímek kontaktů instalačního stykače Sa2	65

7.16	Termovizní snímek obou instalačních stykačů	65
7.17	Teoretický průběh oteplení kontaktu 3-4 instalačního stykače Sa1 . . .	67

Seznam tabulek

2.1	Hodnoty pro výpočet stykového odporu v závislosti na přítlačné síle . . .	24
5.1	Seznam přístrojů zkoušky stykače LSD2503	37
5.2	Popis měřených bodů stykače LSD2503	39
5.3	Maximální dosažené oteplení jednotlivých bodů stykače LSD2503 . . .	44
6.1	Seznam přístrojů zkoušky instalačních stykačů	46
6.2	Popis měřených bodů instalačních stykačů	47
6.3	Maximální dosažené oteplení jednotlivých bodů instalačních stykačů .	53
6.4	Maximální dosažené oteplení při korekci proudu stykače Sa2	54
7.1	Seznam přístrojů zkoušky oteplení kontaktů instalačních stykačů . . .	55
7.2	Popis měřených bodů při měření oteplení kontaktů instalačních stykačů	57
7.3	Měření úbytku napětí na kontaktech instalačních stykačů	62
7.4	Maximální dosažené oteplení měřených bodů instalačních stykačů . .	66

Úvod

Teplo představuje v mnoha oblastech elektrotechniky významný problém. Neustále se hledají způsoby, jak teplo účinně odvádět, případně minimalizovat jeho vliv na degradaci materiálů. Přebytek tepla může vést k poškození zařízení, v krajním případě může dokonce představovat riziko pro lidské zdraví a okolní prostředí. Proto je důležité splnit normativní požadavky a současně vyvíjet zařízení s co nejvyšší úrovní bezpečnosti, přičemž je nutné zohlednit i cenu výrobku.

Opačný případ může nastat v momentě, kdy teplota klesne pod určitou úroveň. Například provozní teplota elektromagnetického stykače LSD2503, použitého v této práci, se pohybuje v rozmezí -20 až $+60$ °C, zatímco u dvou instalačních stykačů je to -20 až $+50$ °C [1, s. 233; 2, s. 3]. Při extrémně nízkých teplotách může docházet ke změně provozních podmínek a zkrácení životnosti elektrických zařízení. Dalším problémem je kondenzace vody obsažené ve vzduchu při nízkých teplotách, která se může objevit v elektrických rozváděcích. To může ovlivnit izolační vlastnosti (vyšší pravděpodobnost vzniku zkratu), urychlit korozi kovových částí, podpořit oxidaci kontaktního systému a negativně ovlivnit elektroniku. [3; 4; 5, s. 179]

Při návrhu teplotní bilance může být teplo vytvářené elektrickými zařízeními využito pro vytápění těchto rozváděčů. Tím se zabrání kondenzaci vody bez nutnosti instalace topných těles, sníží se relativní vlhkost a dojde k oddálení rosného bodu. Odpadní teplo se tak účelně využije. [4]

V rámci splnění teplotních požadavků je klíčové zajistit, aby nebyly překročeny maximální povolené hodnoty oteplení jednotlivých částí zařízení, a aby zařízení spolehlivě fungovalo i při maximálním dosaženém oteplení [6, s. 78]. Práce se proto zaměřuje na praktické oteplovací zkoušky provedené na elektromagnetickém stykači pro spínání motorové zátěže a na dvou instalačních stykačích. Pozornost je věnována jak stanovení podmínek těchto zkoušek, tak následnému vyhodnocení jejich výsledků.

Hlavní částí elektromagnetických stykačů je kontaktní systém, který představuje podstatný zdroj tepla. Množství vytvořeného tepla závisí jednak na velikosti proudu procházejícího kontaktním stykem, ale také na hodnotě stykového odporu. Ten se skládá z úžinového odporu a odporu cizích vrstev. Stykový odpor, odolnost proti opálení elektrickým obloukem a tvorbě cizích vrstev se liší podle použitého kontaktního materiálu. [5, s. 173; 7, s. 120; 5, s. 179] Z tohoto důvodu budou provedeny oteplovací zkoušky na dvou typově stejných stykačích s rozdílným kontaktním materiálem, aby bylo možné porovnat jejich vliv na oteplení stykače.

Důležitá je i volba metody měření teploty. Ne každá metoda je vhodná pro konkrétní aplikaci. Nesprávné použití některých metod vede k nepřesným výsledkům, což může negativně ovlivnit spolehlivost analýzy. [8]

Cíle práce

1. Nastudovat problematiku oteplení elektromagnetických stykačů, které vzniká v důsledku průchodu elektrického proudu proudovodnými částmi. Zaměřit se na objasnění příčin oteplení a fyzikální podstatu tohoto jevu. Seznámit se s normativními požadavky konkrétních elektromagnetických stykačů, které stanovují pravidla a postupy provádění oteplovacích zkoušek a jejich vyhodnocení.
2. Analyzovat vznik tepla v kontaktním styku stykačů. Zaměřit se na požadavky kladené na kontaktní systém a vlastnosti materiálů používaných pro výrobu kontaktů. Zohlednit mechanické, elektrické a chemické faktory, které ovlivňují vznik ztrátového tepla.
3. Vytvořit teoretickou závislost velikosti stykového odporu na přítláčnou sílu v konkrétním kontaktním systému. Závislost sestavit pro různé kontaktní materiály s ohledem na jejich elektrické vlastnosti. Věnovat pozornost vlivu přítláčnou síly jako jednoho z klíčových parametrů ovlivňujících oteplení kontaktů a tím i celého stykače.
4. Provést měření oteplení stykačů v souladu s normativními požadavky. Zaměřit se na porovnání vlastností dvou výrobků, které používají různé kontaktní materiály. Výsledky měření použít jako podklad pro technické porovnání výrobků v kontextu reálného provozu.

1 Tepelné účinky elektrického proudu

Vodiče se průchodem elektrického proudu I (A) zahřívají. Je to dáno tím, že proud prochází vodičem určité délky l (m), elektrické rezistivity ρ (Ω m), a pro tyto rovnice musí být rovnoměrně rozložený v průřezu S (m^2), což dohromady dává elektrický odpor R (Ω) podle následujícího vztahu

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (1.1)$$

[5, s. 73]

1.1 Elektrický odpor v závislosti na teplotě

Elektrický odpor u kovových materiálů narůstá s rostoucí teplotou. Děje se tak proto, že se zvyšující teplotou se zvyšuje i elektrická rezistivita, která je jeho materiálová vlastnost, udávající hodnotu odporu na jeden metr vodiče. V praxi, kdy maximální hranice provozních teplot není příliš vysoká, můžeme říci, že se jedná o lineární závislost. Konkrétně lineární rovnici 1.2 lze u měděného materiálu použít, jestliže se teplota pohybuje v rozsahu od -50 °C do $+150$ °C. [5, s. 73; 8, s. 43]

Podle [5, s. 74] se výpočet odporu při různé teplotě vodiče θ (°C) provádí vzhledem k referenční (počáteční) teplotě θ_{rf} (°C), jí odpovídající rezistivitě ρ_{rf} a teplotnímu součiniteli odporu α_{rf} (K^{-1}). Teplotní součinitel odporu vyjadřuje, jaký bude relativní nárůst odporu, když se teplota zvýší o 1 K vůči referenční teplotě. Velikost oteplení Θ (K) je rozdíl mezi aktuální a referenční teplotou materiálu. Tabulková hodnota vztažená k mědi při teplotě 20 °C je pro rezistivitu $\rho_{20} = 18 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ a pro teplotní součinitel odporu $\alpha_{20} = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ [9]. Rovnice 1.1 se proto doplní o následující

$$R = \rho_{\text{rf}}(1 + \alpha_{\text{rf}}\Theta) \frac{l}{S}. \quad (1.2)$$

[5, s. 74]

1.2 Tepelné ztráty

Tento odpor společně s druhou mocninou protékajícího proudu způsobí tepelné ztráty dQ ve vodiči za každý moment času dt , kde tepelné ztráty mají jednotku joule Q (J) a čas je v sekundách t (s)

$$dQ = RI^2 dt. \quad (1.3)$$

[5, s. 69]

Tepelné neboli Jouleovy ztráty jsou zapříčiněny pohybem elektronů ve vodičích. Při tomto pohybu dochází ke srážkám těchto částic s atomy krystalické mřížky, což způsobí předání části kinetické energie ve formě zvýšení teploty látky. [10, s. 24]

Jedna část ztrát, vytvořená průchodem proudu, se odvede povrchem do okolí, a to $\alpha_0 A \Theta dt$. Součinitel přestupu tepla α_0 ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) udává, kolik tepla ve wattech se odvede plochou 1 m^2 při rozdílu teplot 1 K . Dále A (m^2) je ochlazovací povrch a Θ (K) je okamžité oteplení tělesa vzhledem k teplotě okolí. Druhá část tvoří ztráty, které se v materiálu uchovávají a zvyšují tak jeho teplotu. To popisuje vztah $cVd\theta$, kde objemová tepelná kapacita c ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$) určuje, kolik tepla v joulech je potřeba na ohřátí 1 m^3 materiálu o 1 K . V (m^3) je hodnota objemu materiálu vodiče a $d\theta$ udává teplotu, o kterou dojde k jejímu navýšení. Tyto dvě části dohromady dávají rovnici

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Theta dt + cV d\theta. \quad (1.4)$$

Vyřešením této diferenciální rovnice se získá okamžité oteplení

$$\Theta = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} (1 - e^{-\frac{\alpha_0 A t}{cV}}) = \Theta_\infty (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \quad (1.5)$$

[5, s. 69]

1.3 Ustálené oteplení

Časová konstanta τ (s) je čas, za který by se materiál ohřál na hodnotu ustáleného oteplení Θ_∞ , kdyby neprobíhalo ochlazování povrchem. To by nastalo v momentě, kdy $\alpha_0 = 0$, a tudíž by docházelo pouze ke zvyšování teploty uvnitř materiálu, podle

$$RI^2 dt = cV d\theta. \quad (1.6)$$

[5, s. 70]

Křivka závislosti oteplení materiálu na čase má podle rovnice 1.5 exponenciální průběh, který je znázorněn na obrázku 1.1. Průběh oteplení je takový, že se začátkem průchodu proudu obvodem nárůst oteplení klesá, až do hodnoty ustáleného oteplení. Po dosažení ustáleného oteplení je veškeré vytvořené teplo odváděno povrchem do okolí a teplota materiálu se nadále nezvyšuje. Jelikož je $d\theta$ nulová, rovnice získává tvar

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Theta dt. \quad (1.7)$$

[5, s. 70]

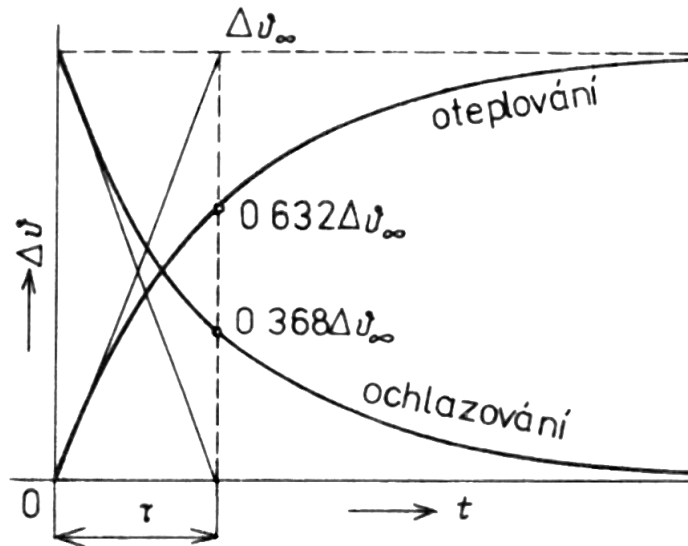
Čas, za který se dosáhne 99 % ustálené hodnoty, je 4,606násobek časové konstanty τ . Pro 99,99 % pak 6,909násobek. Dalo by se tedy říci, že ustáleného oteplení dosáhneme přibližně při pětinasobku časové konstanty τ . [8, s. 30]

Číslo 0,632 vychází z rovnice 1.5, neboť když $t = \tau$, tak rovnice získá tvar

$$\Theta = 0,632 \cdot \Theta_{\infty}. \quad (1.8)$$

To znamená, že při oteplování vodiče je jeho oteplení v čase τ rovno 63,2 % z hodnoty ustáleného oteplení Θ_{∞} . [5, s. 70]

Hodnota ustáleného oteplení je důležitá, protože se díky ní vyhodnocuje výsledek oteplovací zkoušky přístroje při zatížení jeho jmenovitým proudem. Zkouška a vyhodnocení se provádí podle příslušné normy. Teoretický průběh oteplení nebude úplně stejný jako naměřený, neboť rovnice jsou idealizované a nepočítá se v nich s tím, že α_0 a případně i c se s časem mírně mění. Také se nepočítá s vlivem ostatních okolních vodičů, které by svým magnetickým polem způsobovaly zhuštění proudu ve vodiči, což by mělo za následek vyšší zahřátí materiálu. [5, s. 70]

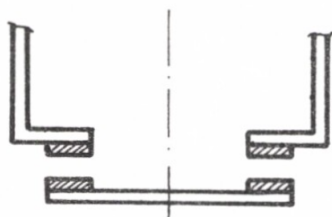


Obr. 1.1: Oteplovací a ochlazovací charakteristika [5, s. 70]

2 Oteplení stykače

Elektromagnetický stykač je elektrický přístroj, který umožňuje dálkové spínání velkých výkonů za pomoci malého ovládacího proudu. Je vhodný do aplikací, které vyžadují časté spínání. Existují další varianty ovládacího stykače, jako je pneumatický a vačkový systém. [5, s. 231] Tato práce se bude soustředit pouze na elektromagnetický pohon.

Elektromagnetický stykač má jen jednu klidovou polohu. Do té se dostává za pomoci pružin. Nejčastěji je klidová poloha v režimu rozepnutých kontaktů. Zapnutí je provedeno za pomoci cívky elektromagnetu, která sepne kontakty po přivedení napětí. Podle typu cívky může být napájena různými velikostmi a druhem napětí, tedy buď střídavým, nebo stejnosměrným, a to z pomocného zdroje nebo ze sítě společné se zátěží. Při přerušení napájení se kontakty vrátí do vypnuté polohy. Z důvodu co nejmenší potřebné síly na vrácení kontaktů do klidové polohy se používají především kontakty s čelním stykem. Tyto kontakty se využívají v nízkonapěťových stykačích v provedení můstkového kontaktu (viz obrázek 2.1), kde se spínají malé proudy při velké hustotě spínání. [5, s. 230 - 232; 5, s. 200]



Obr. 2.1: Konstrukce můstkového kontaktu [5, s. 199]

Pro ovládání stykače se používají různé kombinace pomocných obvodů. Ty společně s pomocnými kontakty zprostředkovávají ovládání stykačových kombinací, jejich vzájemné blokování a signalizaci. Spínání je pak zprostředkováno na povel obsluhy, reakci na řídicí program nebo zapůsobení samočinného nadproudového jističího relé. [5, s. 232; 7, s. 114]

Podle kategorie užití musí být stykač schopný spínat provozní proudy, které několikanásobně převyšují jmenovitou hodnotu proudu. Například kategorie užití AC-4, která je určena pro časté spínání indukčních motorů a jejich brzdění protiproudem, je podle normy zkoušena dvanácti násobkem jmenovitého pracovního proudu. Stykač ale není určený pro vypínání zkratových proudů. Není na to stavěn jejich kontaktní systém, tak ani zhášecí ústrojí. Je proto nutné předřadit jističí prvek, jako je jistič nebo pojistka. [10, s. 116; 7, s. 115]

Stykače jsou určeny pro časté spínání (například i 1200 sepnutí za hodinu). V dřívějších dobách, kdy se používaly slitinové kontaktní materiály, bylo dlouhodobé zapínání stykačů problematické kvůli jejich vyšší houževnatosti, vysokému stykovému odporu těchto materiálů a následnému vyššímu oteplení. V dnešní době se již používají kompozitní materiály, u kterých tento problém nemá takovou váhu, a v rámci dlouhodobého spínání se bere v potaz jen vlastní spotřeba cívky stykače. Vysoká hustota spínání klade velké nároky jak na kontaktní systém, tak na mechaniku přístroje. Výdrž kontaktů (elektrická životnost) odpovídá velikosti spínané zátěže, liší se podle kontaktního materiálu a je menší než mechanická trvanlivost stykače. Životnost je pak vyjádřena počtem sepnutí, které stykač zvládne až do svého poškození. [10, s. 116; 7, s. 114 - 115]

Oteplení stykače je způsobeno Jouleovými ztrátami, které vznikají hlavně v kontaktním styku, ale také ve vodičích uvnitř stykače. Jedná se o tepelnou rovnováhu mezi tepelnými ztrátami na odporech, součtem tepla odváděného z přístroje a tepla zvyšujícího jeho teplotu. To odpovídá tepelné rovnováze v rovnici 1.4 a pro ustálený proud platí rovnice okamžitého oteplení 1.5. Oteplení lze redukovat použitím stykače pro vyšší proudové zátěže, které tím pádem bude mít oteplení nižší. U přístrojů záleží na tom, jakou mají tepelnou kapacitu cV a jaké je jejich chlazení $\alpha_0 A$. Časová konstanta τ odpovídá rychlosti růstu oteplení podle

$$\tau = \frac{cV}{\alpha_0 A}. \quad (2.1)$$

Přístroje s větší tepelnou kapacitou a menším chlazením budou mít podle této rovnice vyšší hodnotu časové konstanty a jejich exponenciální průběh oteplení bude trvat delší dobu. [7, s. 120]

Další faktor, který může zvyšovat velikost odporu paralelně položených vodičů, kterými prochází střídavý proud, je jev blízkosti. Díky němu dochází k vytlačování proudu na jednu stranu průřezu vodičů, zvyšování proudové hustoty a tím ke snížení využitého průřezu vodičů, což zvyšuje jejich odpor a následně i tepelné ztráty. Jev blízkosti by proto mohl být znatelný u proudovodných drah, které leží v těsné blízkosti a prochází jimi velká hodnota proudu. Výpočet odporu lze proto doplnit o činitel blízkosti k_{bl} (1)

$$R = \rho_{rf}(1 + \alpha_{rf}\Theta) \frac{l}{S} k_{bl}. \quad (2.2)$$

[10, s. 29]

Cívky s feromagnetickým jádrem jsou dalším zdrojem tepelných ztrát ve stykačích. V případě napájení stejnosměrným proudem se projevují jen Jouleovy ztráty ve vinutí cívky. Feromagnetické jádro, které není stejnosměrným proudem zahříváno, cívka využívá pro předávání svého vnitřního tepla. Cívka je chlazena tedy nejen svým vnějším povrchem, ale teplo je také odváděno jejím jádrem a následně předáno okolí. Napájení střídavým proudem je doplněno o vířivé a hysterezní ztráty,

vznikající ve feromagnetickém jádře, které také způsobují oteplení. [11, s. 76; 11, s. 82]

Vznik tepla ve stykačích může být dále způsoben vytvořením elektrického oblouku při spínání. Teplota oblouku dosahuje vysokých hodnot, obvykle v rozmezí 3000 až 20000 °C. Vliv oblouku na oteplení přístroje závisí na době jeho hoření a četnosti spínání. Při správném návrhu stykače je doba hoření velmi krátká a nepředstavuje významný problém. V případě častého spínání však může být ochlazení nedostatečné a elektrický oblouk se tak stává značným zdrojem oteplení. [11, s. 35]

2.1 Vznik tepla v kontaktním styku

Elektrické kontakty jsou místa proudové dráhy spínacích přístrojů, sloužící k zapínání a vypínání přiřazeného obvodu. Vzhledem k jejich funkci se jedná o nejdůležitější část přístroje, a proto je na ně kladena spousta požadavků. Těmi může být malý stykový odpor, dobrá spínací schopnost, odolnost proti mechanickému opotřebení, svaření a opalování elektrickým obloukem. [5, s. 173]

Mezi dvěma kontakty, které jsou spojené přitlačnou silou F_k (N), vzniká stykový odpor R_s (Ω). Ten je složený z úžinového odporu R_u (Ω) a odporu cizích vrstev R_p (Ω) podle

$$R_s = R_u + R_p. \quad (2.3)$$

[5, s. 174]

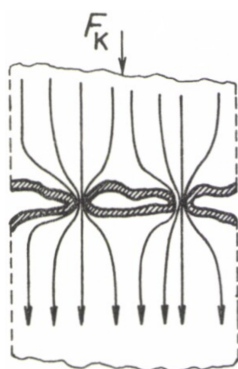
2.1.1 Úžinový odpor a odpor cizích vrstev

Úžinový odpor je způsobený tím, že mezi kontaktními materiály není dokonalý spoj. To znamená, že povrchy nejsou dokonale rovné a při jejich styku se nedotýkají v celé ploše, ale jen v náhodném určitém počtu mikroskopických (stykových) plošek. Ty způsobují zakřivení proudnic (prodloužení cesty proudu, viz obrázek 2.2) a snížení průřezu, kterým tento proud prochází. Velikost tohoto odporu je ovlivněna mechanickými vlastnostmi materiálu a také velikostí přitlačné síly. Do mechanických vlastností materiálu spadá tvar a materiál kontaktů. Ty určují velikost stykových plošek. Tvar kontaktů určuje, jestli jde o bodový (dotyk koule s rovinou), přímkový (dotyk válce s rovinou) nebo plošný styk (dotyk dvou rovných ploch). U kontaktních systémů se spíše využívají bodové a přímkové styky z toho důvodu, že přitlačná síla se soustředí na určitou stykovou plochu a dochází tak k lepšímu rozrušení cizích vrstev než u plošného styku. [5, s. 173; 5, s. 176; 10, s. 50]

Odpor cizích vrstev, který vzniká na povrchu kontaktů, může být způsoben nečistotami mechanického původu nebo oxidací zapříčiněnou chemickou reakcí. Cizí

vrstvy zvyšují hodnotu stykového odporu kontaktního spoje. Čím jsou vrstvy tlustší a přitlačná síla menší, tím je vliv odporu cizích vrstev zdatnější. Mechanickou cizí vrstvu způsobují především tuky. První vrstva tuků, které se říká epilamen, se pevně naváže na čistý povrch kontaktů. Na tuto tenkou vrstvu se postupně přidávají další tukové vrstvy společně s nečistotami, které už výrazně zvyšují hodnotu stykového odporu. Výhodou je, že tyto vrstvy se dají zvětšením přitlačné síly odstranit. U kontaktů, které mají přitlačné síly malé, dochází k elektrickému rozrušení těchto vrstev. To se projevuje tím, že při zvýšení napětí odpor nejdříve prudce naroste a následně dojde k jeho postupnému poklesu. [5, s. 174; 5, s. 178; 5, s. 180]

S rostoucí velikostí cizích vrstev roste stykový odpor, čímž se zvyšuje teplota. Kontakty však mají i tu vlastnost, že při dosažení teploty na mez měknutí dojde k deformaci materiálu, cizí vrstvy se rozruší, materiály se dokonaleji spojí, což skokově sníží stykový odpor a teplotu kontaktů. [5, s. 182]



Obr. 2.2: Stykové plošky elektrických kontaktů a zakřivení proudnic [5, s. 174]

2.1.2 Materiály kontaktů a jejich chemické reakce

Jak již bylo řečeno, kontaktní styk představuje z hlediska oteplení přístrojů značný problém, a to z důvodu jeho stykového odporu. Právě proto se i například v normách vyskytuje termín osmihodinový provoz. Ten předpokládá, že stykač nebude v kuse sepnut déle než osm hodin. V této době se neprojeví vliv chemických reakcí materiálu kontaktů a oteplení se ustálí. Při delším působení se však začnou projevovat chemické reakce, které zvyšují stykový odpor kontaktů, a tím i oteplení, které může mírně narůstat v řádech týdnů až měsíců, a následně způsobit poruchu. Příkladem může být chemická reakce u měděných kontaktů. Ta vzniká proto, že přitlačná síla působící na tyto kontakty, za přítomnosti kyslíku a vysoké teploty kontaktů, vytváří kysličnickové vrstvy mědi. Tyto vrstvy mají vysoký elektrický odpor a s jejich zvětšující se tloušťkou se zvyšuje i oteplení kontaktů. Měď dále reaguje také se sírou. Proto je nutné kontakty v určitých časových intervalech rozpojovat, aby vytvořený oblouk,

znovu dosednutí kontaktů, nebo jejich vzájemné tření tyto vrstvy odstranilo. Trvalý provoz je poté na menší hodnoty proudu. [7, s. 121; 5, s. 179]

Dalším materiálem používaným pro výrobu kontaktů je stříbro, které má tu výhodu, že při teplotách nad 180 °C se jeho oxidační vrstva změní zpět na výchozí prvky, což v provozu vede k samočištění kontaktů. Díky těmto vlastnostem a malému stykovému odporu je to hlavní materiál používaný na výrobu kontaktů. Stříbro se společně s niklem využívá na výrobu kontaktů, pro použití při nízkém napětí. Nikl slouží především k mechanickému zpevnění stříbra a zvýšení odolnosti kontaktů proti erozi, čímž se stávají mnohem odolnějšími při větším elektrickém zatížení. Výhodou niklu je jeho velká odolnost v prostředích, kde se nachází kyslík. Oxidace se u tohoto prvku vyskytuje až při teplotách vyšších než 500 °C a tato vytvořená vrstva brání vzniku dalších oxidačních vrstev. Problémem niklu je jeho odolnost vůči vodním parám, které se nacházejí v ovzduší. Ty způsobují vysoký nárůst oxidových vrstev, jako je oxid nikelnatý (NiO). Tyto vrstvy jsou mechanicky velice odolné a při spínání nedochází k jejich odstranění, což vede k zvyšování stykového odporu. [10, s. 47; 5, s. 179; 12]

Měď má tu nevýhodu, že kontakty z ní vyrobené, kterými prochází proud dlouhou dobu, mají tendenci se k sobě svařovat. Proto se na měděnou základnu přidělávají kontakty ze stříbra nebo jeho slitin, které jednak zamezí svaření a mají lepší odolnost. [13]

Každý z materiálů má své určité výhody a nevýhody. Proto se využívají více-
složkové materiály, které kombinují jejich vlastnosti. Ty se vyrábějí práškovou metalurgií. Jde o čisté kovy jako je Ag, Cu, Ni a další, v kombinaci s oxidy CdO, MgO, SnO₂ atd. V praktické části práce budou zkoušeny stykače s materiálem kontaktů AgNi a AgSnO₂, které se vyrábí právě práškovou metalurgií. [5, s. 198; 5, s. 179; 12]

Materiál AgSnO₂ se dá svými vlastnostmi přirovnat materiálu AgCdO, ale vykazuje vyšší stykový odpor, což vede k vyšším provozním teplotám. AgSnO₂ se využívá jako ekologická a šetrná náhrada za AgCdO. Materiál AgSnO₂ se používá v obvodech s velkými zapínacími proudy, které obsahují zářivkové, výbojkové a LED zátěže. AgCdO má malý opal obloukem, což má využití i u jističů. V nízkonapětovém použití dokáže spínat proudy do 60 A. Podobné vlastnosti lze očekávat i u AgSnO₂. [14; 12; 5, s. 199]

Materiál AgNi, s velkým obsahem stříbra, vykazuje o něco menší vypínací schopnost než AgCdO. AgNi se využívá v domácích spotřebičích s proudem do 10 A, ale je možné ho použít i u spínání motorové zátěže, a to do proudu 25 A. Vykazuje dobrou tepelnou a elektrickou vodivost, tvrdost a odolnost proti opotřebení obloukem. Nevýhodou je již zmíněný nárůst oxidových vrstev niklu způsobených vzdušnou vlhkostí, které mohou celkově zvyšovat velikost stykového odporu materiálu AgNi. [5, s. 199; 7, s. 9; 5, s. 179]

2.1.3 Závislost stykového odporu na přitlačné síle

Nejpoužívanější vztah mezi stykovým odporem R_s a přitlačnou silou F_k pro kontaktní systém je

$$R_s = \frac{k_n}{\left(\frac{F_k}{F_1}\right)^m}. \quad (2.4)$$

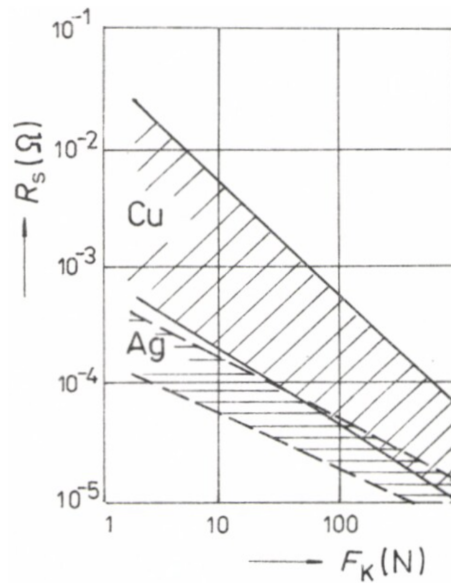
k_n je součinitel určující vlastnosti materiálu kontaktů, jeho cizích vrstev a poměrů v místě styku. Například pro měď se pohybuje v hodnotách $(15 \text{ až } 400) \cdot 10^{-4} \Omega$ a pro stříbro $(3,8 \text{ až } 12) \cdot 10^{-4} \Omega$. Závislost stykového odporu na přitlačné síle těchto dvou materiálů je znázorněna na obrázku 2.3. Vyšší hodnoty stykového odporu materiálu jsou pro zoxidované a nižší pro čisté povrchy kontaktů. Stříbrné kontakty a kontakty na bázi stříbra mají celkově nižší hodnotu a rozptyl součinitele k_n v porovnání s měděnými kontakty. Exponent m udává druh styku, kde pro bodový styk se rovná 0,5, přímkový styk 0,5 až 0,7 a pro plošný styk 0,6 až 1. Takže například bodový styk, který má nejnižší hodnotu exponentu m , bude ze všech druhů styků způsobovat největší velikost stykového odporu. $F_1 = 1 \text{ N}$ je v rovnici pouze kvůli sjednocení jednotek levé a pravé strany rovnice. [5, s. 181; 10, s. 47]

Rovnice 2.4 je získána experimentálně a předpokládá, že stykový odpor má vždy kovový charakter. Vliv cizích vrstev je zde tedy nepodstatný, a to i z důvodu obtížnosti výpočtu a jeho složitosti matematického vyjádření. Aproximace rovnice stykového odporu se podobá rovnici pro výpočet celkového úžinového odporu R_{un} pro případ styku koule s rovinou v rámci pružné deformace. Úžinový odpor je tvořen počtem n (1) stykových plošek kontaktního spoje, a je vyjádřen následující rovnicí

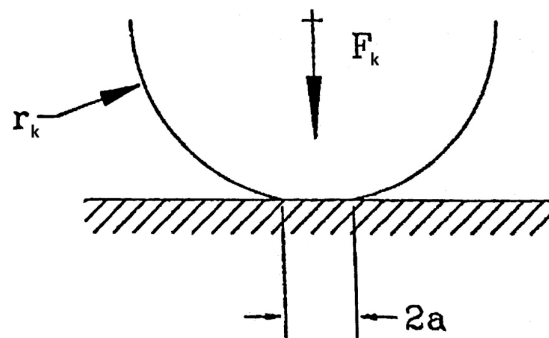
$$R_{un} = \frac{\rho E_p^{\frac{1}{3}}}{2,22 r_k^{\frac{1}{3}} n^{\frac{2}{3}} F_k^{\frac{1}{3}}}. \quad (2.5)$$

ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) je elektrická rezistivita materiálu, E_p (Pa) modul pružnosti v tahu a r_k (m) je poloměr koule zakulaceného povrchu kontaktu zobrazeného na obrázku 2.4. Navíc platí, že pro bodový styk je n rovno 1, pro přímkový styk 2 a pro plošný styk 3. [5, s. 177; 7, s. 6]

Za pomoci rovnice 2.5 je možné určit stykový odpor konkrétního kontaktního systému a vyjádřit jeho závislost na velikosti přitlačné síly.



Obr. 2.3: Závislost stykového odporu na přitlačné síle mědi a stříbra [5, s. 181]



Obr. 2.4: Kontakt - styk koule s rovinou [10, s. 42]

2.1.4 Závislost stykového odporu na přitlačné síle v konkrétním kontaktním systému

Stykový odpor se při změně přitlačné síly mění. Odlišnosti budou i mezi jednotlivými materiály, kvůli jejich rozdílným vlastnostem. Závislosti stykového odporu na přitlačné síle budou znázorněny pro materiály AgNi (10) a AgSnO₂ (10). Značení (10) u materiálu AgNi znamená, že 10 % materiálu tvoří nikl a zbylých 90 % stříbro. AgSnO₂ (10) je pak tvořen z 10 % oxidem ciničitým a z 90 % stříbrem. [5, s. 179; 10, s. 49]

Tyto kontaktní materiály budou obsahovat stykače, na kterých bude provedena oteplovací zkouška v rámci praktické části práce. Nicméně procentní složení kontaktů není v dokumentaci stykačů uvedeno a v této kapitole bylo vybráno pouze pro

porovnání kontaktních materiálů se stejným poměrem složení.

Pro výpočet charakteristiky stykového odporu v závislosti na přítláčné síle není možné použít vztah 2.5, protože v publikacích se nenachází hodnota modulu pružnosti v tahu E_p pro materiál AgSnO_2 . Místo toho lze aplikovat vzorec využívající tvrdost H (N m^{-2}) podle Vickersovi stupnice, která umožňuje teoretický výpočet stykového odporu bez ohledu na velikost kontaktů. Vzorec je

$$R_s = \rho \left(\frac{\pi H}{4F_k} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.6)$$

[15, s. 882]

Hodnoty tvrdosti a elektrické rezistivity pro oba konkrétní materiály jsou uvedeny v následující tabulce. Z rozsahu tvrdosti materiálů jsou vybrány nižší hodnoty. [15, s. 1202]

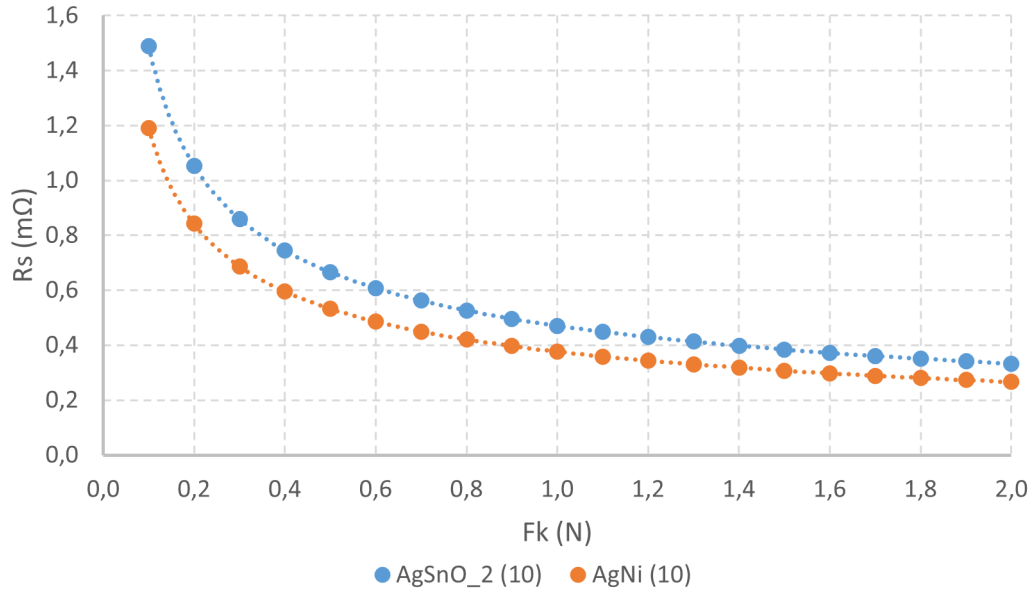
Tab. 2.1: Hodnoty pro výpočet stykového odporu v závislosti na přítláčné síle

Materiál	ρ ($\mu\Omega$ cm)	H (N mm^{-2})
AgNi (10)	1,9	500
AgSnO ₂ (10)	2,1	640

Příklad výpočtu odporu ve styku R_s materiálu AgNi (10) podle rovnice 2.6 a přítláčnou sílu $F_k = 1$ N je

$$R_s = 1,9 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\pi \cdot 500 \cdot 10^6}{4 \cdot 1} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,3765 \text{ m}\Omega. \quad (2.7)$$

Charakteristika závislosti odporu ve styku na přítláčné síle tvoří mocninnou funkci, kterou je také proložena. Pro oba materiály je vykreslena na následujícím obrázku, a to pro přítláčnou sílu v rozsahu 0,1 až 2 N.



Obr. 2.5: Stykový odpor v závislosti na přitlačné síle dvou materiálů kontaktů

Z uvedené charakteristiky vyplývá, že materiál AgNi má oproti AgSnO₂ nižší stykový odpor, a tím pádem i nižší tepelné ztráty. Je však nutné podotknout, že rovnice 2.6, podle níž byly průběhy vypočteny, nezohledňuje vliv cizích vrstev, což může mít v praxi zásadní dopad.

V praktické části práce obsahují instalační stykače můstkový kontaktní systém s čelními kontakty. Nevýhoda tohoto druhu kontaktů tkví v tom, že při jeho sepnutí nedochází k mechanickému narušení cizích vrstev [5, s. 200]. V kombinaci se zmíněnými oxidovými vrstvami niklu a nízkou přitlačnou silou kontaktů to může představovat problém a vést ke zvýšení stykového odporu.

3 Metody analýzy oteplení elektrických přístrojů

Na začátku této kapitoly je potřeba vysvětlit rozdíl mezi pojmem teplota a teplo. Teplota popisuje konkrétní stav, ve kterém se těleso nachází, a proto se jedná o stavovou veličinu (dalším příkladem stavové veličiny je tlak a vnitřní energie). Řadí se mezi základní veličiny v soustavě SI. Teplota se nedá měřit přímo, proto je nutné ji za pomoci teploměru (senzoru) převést na jinou fyzikální veličinu, ze které určíme teplotu tělesa. Teplo je, na rozdíl od teploty, forma energie přenesená mezi soustavami s rozdílnou teplotou. Jedná se o takzvané dějovou veličinu, neboť je závislá na konkrétním ději a vývoji soustavy, který probíhal v minulosti. Oteplení je pak rozdíl mezi referenční a finální teplotou. [16; 8, s. 15]

Měření teploty se provádí senzory, které jsou ve styku s měřeným prostředím. Jejich členění se dělí podle druhu transformace hodnoty teploty na jinou fyzikální veličinu. Slovo senzor je synonymem pro označení snímače (součástka obsahující čidlo), čidla (část snímače, která převádí teplotu na jinou fyzikální veličinu) a teploměru. [8, s. 19]

Senzory lze rozdělit podle fyzikálního principu, kterým měří teplotu. Druhů je mnoho, ale ne všechny se hodí na měření oteplení elektrických přístrojů. Senzory, které by se k měření daly použít jsou kovové odporové, termoelektrické a termovizní. Dále lze dělení rozčlenit podle toho, zdali se senzory dotýkají měřeného materiálu, a to na dotykové a bezdotykové. A poslední členění určuje, zda se senzor chová jako zdroj napájení při působení teploty, což se značí jako aktivní, nebo zda je nutné mu napájení dodat a pouze měřit některou z proměnných veličin, což se označuje jako pasivní senzory teploty. [8, s. 19]

3.1 Kovové odporové senzory teploty

U kovových odporových sensorů teploty se využívá stejné problematiky, která byla popsána na začátku této práce, a to té, že s rostoucí teplotou kovového materiálu se zvyšuje i jeho odpor. Děje se tak, protože atomy v krystalové mřížce zvětšují velikost svých kmitů, a tím pádem kladou větší odpor průchodu elektronů. V tomto případě je této vlastnosti využito. Kovové senzory musejí být napájeny elektrickým proudem a vyhodnocení velikosti jejich odporu se nejčastěji provádí za pomoci Wheatstoneova můstku. Jedná se tedy o pasivní dotykové senzory teploty. [8, s. 37; 17; 8, s. 45]

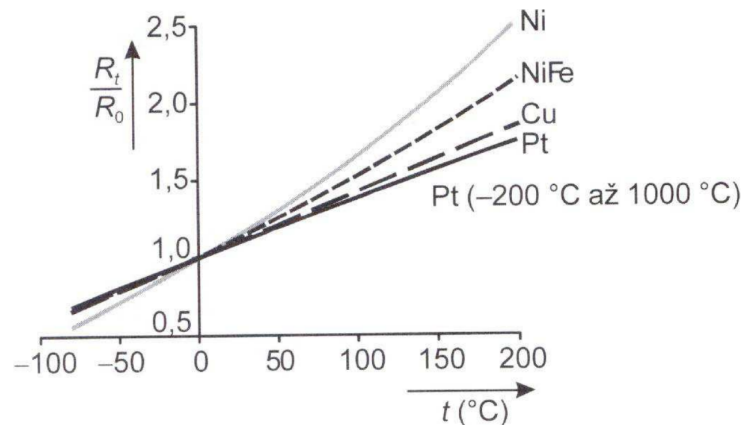
Stejně jako u vodičů, lze i pro kovové snímače teploty definovat základní parametr materiálu, kterým je součinitel odporu α_{rf} (K^{-1}). Jeho výpočet se provádí podle následující rovnice, kde R_{100} je hodnota odporu snímače při $100\text{ }^\circ\text{C}$ a R_0 při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$

$$\alpha_{\text{rf}} = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}. \quad (3.1)$$

Pro platinové a niklové snímače může být základní hodnota odporu R_0 rovna 100, 200, 500, 1000 a 2000 Ω . Dalším parametrem je poměr odporů čidla W (1), který udává strmost nárůstu odporu s rostoucí teplotou pro jednotlivé materiály

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}. \quad (3.2)$$

Tyto strmosti můžeme vidět na obrázku 3.1. Například poměr odporů W_{100} pro platinu (Pt) je 1,385 a pro nikl (Ni) 1,618. Z toho vyplývá, že nikl má větší nárůst odporu oproti platině. [8, s. 37]



Obr. 3.1: Teplotní závislost odporových kovových snímačů [8, s. 38]

Obrázek 3.1 ukazuje, že charakteristiky nárůstu odporu s rostoucí teplotou u jednotlivých senzorů nejsou lineární. Lineární vztah, který je shodný s rovnicí 1.2, lze použít pouze v rozsahu teplot od $0\text{ }^\circ\text{C}$ do $100\text{ }^\circ\text{C}$, když zanedbáme nejistotu měření způsobenou nelinearitou. U měděných senzorů lze lineárního vztahu využít dokonce pro rozsah od $-50\text{ }^\circ\text{C}$ do $+150\text{ }^\circ\text{C}$. Pro vyšší teploty se u každého senzoru používá k výpočtu konkrétního polynomu. [8]

3.1.1 Konstrukce odporových kovových snímačů teploty

U těchto snímačů se můžeme nejčastěji setkat se dvěma typy konstrukce, a to s drátkovou a tenkovrstvou technologií.

Drátkovou technologií se značí tenký vodič určitého materiálu, který je spirálovitě namotán na keramické tělísko a zataven do skla. Případně je možné tento celek navíc uložit do ochranné kovové trubice. Výhodou drátkové technologie oproti tenkovrstvé je její časová stálost. [8, s. 50; 17]

V rámci tenkovrstvé technologie dochází k napařování a iontovému leptání materiálu na podložku z korundové keramiky. Snímače vyrobené touto technologií mají oproti drátkovým rychlejší čas odezvy, vyšší odpor a lepší cenu. [8, s. 51; 17]

3.1.2 Platinové snímače teploty

Platinové snímače se používají jak v drátkové, tak v tenkovrstvé technologii. Vlastnostmi je vysoká teplota tání, časová stálost a chemická netečnost. Jedná se o jakýsi standard měření teploty v průmyslu. Rozsah teplot, kde se dá platina v rámci průmyslu podle normy IEC-751 použít, se dělí podle tříd přesnosti. Třída přesnosti A určena pro teploty od -200 °C do $+650\text{ °C}$ a třída B je pro teploty od -200 °C do $+850\text{ °C}$. Třída B je sice pro větší rozsah teplot, ale její dovolená velikost odchylky je podstatně větší. Pro stejné teploty měří méně přesně v porovnání s třídou A. Dlouhodobá stabilita úzce souvisí s čistotou platiny, ale standardně se pohybuje okolo $0,05\text{ \%/1000 h}$. [8, s. 38; 18, s. 185]

3.1.3 Niklové snímače teploty

Niklové snímače jsou nejčastěji vyráběné tenkovrstvou metodou. Hodnota jmenovitého odporu vrstvy niklu se nastavuje za pomoci laseru. Ze zmiňovaných kovových snímačů u nich dochází k nejprudšímu zvětšení odporu, mají tudíž největší citlivost viz obrázek 3.1. Dalšími výhodami může být rychlá odezva a malé rozměry. Ve srovnání s platinou může být nevýhodou nižší teplotní rozsah (od -70 °C do $+150\text{ °C}$), vysoká nelinearita, nižší stabilita a špatná odolnost vůči vlivům prostředí. Dlouhodobá stabilita niklových snímačů je přibližně $0,08\text{ \%/1000 h}$ při 150 °C . [18, s. 186; 8, s. 43]

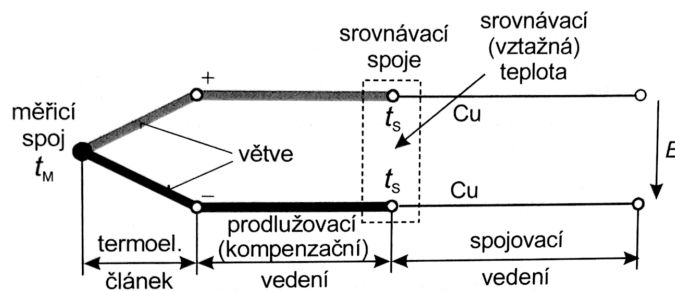
3.1.4 Měděné snímače teploty

Měděné snímače jsou málo používané z důvodu nízkého odporu a velké reaktivnosti (oxidaci) vlivem prostředí. Používají se pro teplotní rozsah od -200 °C do $+200\text{ °C}$. Výhoda nastává v momentě, kdy se měď bere jako celek konkrétního stroje a ne

jako senzor. Příkladem je měření odporu měděného vinutí elektrických strojů za pomoci měření odporu vinutí (při vypnutém napájení motoru). Této metody lze využít i při měření teploty elektromagnetické cívky elektromechanického stykače, kde se měřením hodnot odporů stanovuje teplota cívky a na základě oteplení se vyhodnocuje úspěšnost zkoušky. Výhodou v obou případech je, že není potřeba zasahovat do zařízení a je možno provést měření teploty pouze z naměřených hodnot odporů. [8, s. 44; 6, s. 98]

3.2 Termoelektrické články

Termoelektrické články se řadí mezi dotykové aktivní teploměry, které se při působení teploty chovají jako zdroje elektrického napětí. Jiným využitím může být i použití termočlánku jako zdroje konstantního proudu. Skládají se ze dvou materiálově odlišných vodičů, které jsou spojeny v jednom bodě. Celý princip těchto nejlevnějších měřičů teploty je postaven na Seebeckově jevu. Terminologie termoelektrického článku lze pozorovat na následujícím obrázku. [19; 8, s. 89]



Obr. 3.2: Terminologie měřicího řetězce termoelektrického článku [8, s. 95]

3.2.1 Seebeckův jev

Nositelé náboje mají v teplejší části vodiče větší energii, a proto mají tendenci přecházet do chladnější části vodiče. S tím také souvisí výběr kovů tak, aby obsahovaly různé koncentrace nositelů náboje a byl tím podpořen jejich přenos. Díky tomuto jevu se na jednom konci objeví převaha kladných a na druhém záporných nositelů náboje. Údaj o množství nábojů v kovu udává absolutní Seebeckův koeficient $S_k(T)$ ($V K^{-1}$), který vytváří mezi konci vodičů s rozdílnou teplotou θ termoelektrické napětí E (V)

$$S_k(T) = \frac{dE}{d\theta}. \quad (3.3)$$

[8, s. 89]

Seebeckův jev lze konkrétně vysvětlit tak, že pokud jsou dva rozdílné materiály spojeny ve dvou bodech a jeden spoj má vyšší teplotu než druhý, obvodem začne procházet elektrický proud. Pokud dojde k rozpojení elektrického obvodu na kterémkoliv místě a spoj má jinou teplotu než nově vytvořený rozpojený srovnávací konec (spoj), tak se na svorkách tohoto srovnávacího konce objeví termoelektrické napětí. Proto je důležité, aby oba kontakty srovnávacího konce měly stejnou a konstantní teplotu. Pokud není dosaženo konstantní teploty, použije se prodlužovací vedení vyrobené ze stejných materiálů jako vedení termoelektrického článku. Díky tomu se srovnávací spoj dostane do míst, kde oba jeho konce mají konstantní teplotu. [8, s. 90; 19; 8, s. 96]

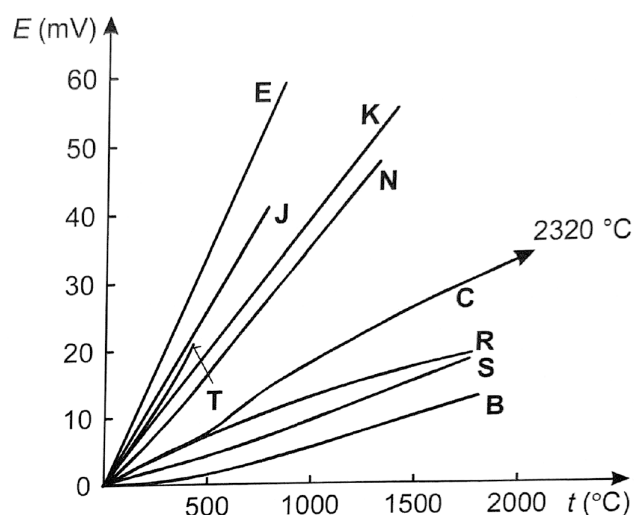
Elektromotorické napětí E (V) je napětí na rozpojených svorkách termoelektrického článku a ekvivalentním názvem může být i termoelektrické napětí. Lze ho definovat i jako dodanou práci zdroje podělenou elektrickým nábojem, který prošel obvodem. Velikost termoelektrického napětí se pohybuje v jednotkách až desítkách milivoltů. Termoelektrický koeficient α_k ($V K^{-1}$), tudíž změna napětí vzhledem ke změně teploty o $1\text{ }^\circ\text{C}$, je pro kovy v řádech jednotek až desítek mikrovoltů. Vzorec pro výpočet termoelektrického napětí je pouhé jeho vyjádření z rovnice 3.3. [8, s. 90; 8, s. 101; 8, s. 91; 20]

3.2.2 Typy termoelektrických článků

Jednotlivé typy termočlánků, vyrobené z různých párů kovů, mají odlišná použití a vlastnosti. Tyto kombinace byly normalizovány, aby se dosahovalo požadovaných vlastností jako je co nejlepší linearita závislosti napětí na teplotě, odolnost proti vnějším vlivům a dlouhodobá stabilita. Rozdílem je také rozsah teplot a strmost charakteristik, které jsou zobrazeny na obrázku 3.3. [8, s. 92]

Pro měření oteplení stykačů, na kterých budou v rámci této práce provedeny oteplovací zkoušky, jsou nejvíce vhodné termoelektrické články s nejvyšší hodnotou termoelektrického koeficientu (největší strmostí charakteristiky) a lineární charakteristikou. Rozsah teplot zde nehraje roli, neboť se bude měřit v rozmezí přibližně od $20\text{ }^\circ\text{C}$ do $100\text{ }^\circ\text{C}$, což se nachází v intervalu všech zde zobrazených článků.

Jako ideální se jeví termočlánek typu K, který má velkou strmost charakteristiky. Jeho vodiče jsou vyrobeny z různých materiálů - jeden z NiCr a druhý z Ni [21]. Je vhodný pro použití v oxidační atmosféře, ale nehodí se pro měření ve vakuu z důvodu své oxidace [22, s. 93]. Teplotní rozsah má od $0\text{ }^\circ\text{C}$ do $+1100\text{ }^\circ\text{C}$ a přibližná hodnota Seebeckova koeficientu, který se v praxi značí jako α_k , je $42\text{ }\mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ [8, s. 93].



Obr. 3.3: Charakteristiky vybraných termoelektrických článků [8, s. 92]

3.2.3 Potlačení rušení

Vzhledem k malé hodnotě termoelektrického napětí je nezbytné zamezit jakémukoliv rušení. Z tohoto důvodu jsou vodiče spojovacího či prodlužovacího vedení spirálovitě stočené, aby se zamezilo vlivu magnetického pole. Stínění pak zamezuje působení elektrostatických a elektromagnetických polí. Stínění má být připojené na zemní potenciál a nesmí jím procházet žádný proud. [8, s. 101]

Při různé kombinaci zapojení termočlánků mezi sebou, je možné dosáhnout odlišných vlastností měření. Takzvané diferenční zapojení článků dokáže měřit teplotní rozdíl. Jeden druh materiálu vodičů obou článků je spojený a druhý je poté vyveden na srovnávací svorky (na svorkách se nacházejí stejné materiály vodičů). Oproti tomu sériové zapojení zvyšuje přesnost a citlivost měření anebo měří průměrnou hodnotu teploty mezi rozdílnými místy. Termočlánky jsou zde jednoduše zapojené za sebou do série a na srovnávacím spoji se nacházejí oba materiály kovů. [8, s. 103]

3.3 Termografie

Termokamery jsou bezdotykové plošné měřicí přístroje teploty, které převádějí tepelné (infračervené) záření na viditelný termovizní obraz. Toho se využívá při analýze teploty objektu, jeho citlivých částí (spoje a kontakty) a případně defektů materiálu. Zachycení a zpracování záření je realizováno na maticovém detektoru. Rozsah spektra, které dokáže termokamera zachytit, je individuální pro každý měřicí přístroj. Nejčastěji však měří v rozsahu vlnových délek od 2 μm do 13 μm , tudíž od

krátkovlnného po dlouhovlnné infračervené spektrum. Tato spektra se označují jako tepelné záření. [8, s. 187; 23, s. 96]

Výhodou bezdotykových měřicích přístrojů je jejich minimální vliv na měřicí objekt, měření teploty rotujících těles, měření z dostatečné vzdálenosti a zobrazení celkového tepelného obrazu objektu, čehož využívá právě termovize [8, s. 157].

Oproti tomu nevýhody jsou chyby v měření zapříčiněné neznalostí povrchové emisivity tělesa a prostupností prostředí. Další chybu může způsobovat odražené záření jiného tělesa od měřeného objektu. [8, s. 157] V ten moment se objekt může jevit jako teplý, ale jedná se pouze o odraz záření pocházejícího z jiného objektu. Praktickým příkladem může být, když je termokamera namířena proti oknu, tak se na obrazovce nezobrazí teplota skla, nýbrž odraz měřené osoby.

3.3.1 Emisivita a její stanovení

Emisivita ε (1) je poměr vyzařování měřeného objektu ku vyzařování absolutně černého tělesa za stejné teploty, dále je závislá na vlnové délce a druhu povrchu. Dává tedy najevo, jak dobře dokáže objekt vyzařovat tepelnou energii. Absolutně černé těleso má emisivitu rovnou 1, tudíž dokáže energii dokonale pohlcovat a zároveň vyzařovat. [8; 24]

Nízká emisivita, zejména u lesklých materiálů, snižuje přesnost měření. Oxidace materiálu emisivitu naopak zvyšuje. Příkladem může být lesklý plech z oceli s emisivitou 0,1 a zoxidovaná ocel s emisivitou 0,6. [8; 24]

V rámci přesného měření je potřeba stanovit správnou hodnotu emisivity, která se nastaví v měřicím přístroji. Toho lze dosáhnout s použitím tabulek emisivit jednotlivých materiálů, nátěrem nebo samolepkou se známou emisivitou, změřením teploty dotykovým teploměrem a následným nastavením odpovídající emisivity, nebo změřením emisivity vzorku spektrometrem. [8, s. 191; 24]

3.3.2 Vzdálenost od měřeného objektu

Při měření termokamerou je nutné dodržet poměr vzdálenosti D od objektu k jeho průměru S , který udává hodnota $D:S$. Její nejčastější velikost se pohybuje v rozmezí od 3:1 do 80:1. Tedy v případě poměru 40:1 lze plochu o průměru 10 cm měřit ze vzdálenosti maximálně 4 m. Samozřejmě je lepší měřit z větší blízkosti, aby bylo dosaženo vyšší přesnosti měření. Naopak při překročení maximální vzdálenosti dochází k tomu, že je měření ovlivněno teplotou objektů, které jsou za měřeným objektem. [24]

4 Normativní požadavky oteplovacích zkoušek

Norma stanovuje minimální požadavky a doporučení, které by zařízení měla splňovat. Řešená je hlavně bezpečnost a kvalita výrobku. Je nutné podotknout, že normy nejsou závazné. Stávají se povinnými v momentě, kdy jsou nařízené právním předpisem. V rámci elektrických zařízení musí být splněno prohlášení o shodě CE, jehož plnění vyplývá na základě předpisu Evropské unie, o kterém pojednává nařízení vlády č. 118/2016 Sb. Aby mohlo být elektrické zařízení v EU prodáváno, je potřeba, aby splňovalo veškeré technické požadavky a normy, a následně získalo označení zkratkou shody CE. Pro elektrická zařízení je tedy plnění norem závazné. Spínací přístroje musí také vyhovět zkouškám, které jsou v odpovídající normě stanoveny. [25; 26]

Normy vycházející z evropské či mezinárodní technické normy jsou značeny EN, ISO, IEC a ETS. Značení ČSN EN například znamená, že norma byla převzata do soustavy českých norem z normy evropské, kterých je většina. Čistě české normy jsou pak značeny ČSN, které tvoří jen malý podíl v soustavě českých norem. [25]

Zkoušenými spínacími přístroji budou stykač LSD2503 od firmy Schrack a dva dvoukontaktní instalační stykače, přičemž každý z nich má kontakty z jiného materiálu.

Na stykači LSD2503 bude provedena oteplovací zkouška dle normy ČSN EN IEC 60947-4-1 ed. 4, pojednávající o spínacích a řídicích přístrojích nízkého napětí - elektromechanických stykačích a spouštěcích motorů. Tato norma se v mnoha částech odkazuje na normu ČSN EN 60947-1 ed. 4, kterou nahradila norma ČSN EN 60947-1 ed. 5. V té jsou sepsány všeobecné požadavky pro provádění oteplovací zkoušky u spínacích a řídicích přístrojů nízkého napětí. [27; 6]

Oteplovací zkoušky instalačních stykačů budou vykonány dle normy ČSN EN 61095 ed. 2, obsahující normativní požadavky pro elektromechanické stykače pro domácnost [28].

Normy se v rámci oteplovacích zkoušek mezi těmito přístroji nijak neliší. Norma ČSN EN 61095 ed. 2 pro domácnost je zjednodušenou a přizpůsobenou verzí normy 60947-1 ed. 5. Rozdíl je tedy patrný až pro vyšší proudové zátěže, velké průřezy vodičů nebo u stykačů s cívkami v oleji. Jednotlivé body pro splnění oteplovacích zkoušek a jejich vyhodnocení budou popsány v následujících kapitolách.

4.1 Obecné požadavky

Zkouška má být provedena na novém, čistém a plně vybaveném zařízení, které bude instalováno ve volném prostoru bez průvanu na vlastní stojan. Veškeré otvory, které jsou za normálního provozu zavřeny, musí být uzavřeny i v průběhu zkoušky. Při utahování svorek musí být dodržen stanovený utahovací moment, který se řídí podle dokumentace zařízení. Při chybějícím údaji velikosti utahovacího momentu v technické dokumentaci přístrojů se využijí normou stanovené hodnoty. [6, s. 94; 28, s. 52]

Zařízení musí být zkoušeno v prostředí, které se nenachází v nadmořské výšce nad 2000 m. Dále je nutné, aby relativní vlhkost v prostoru s teplotou do +40 °C nepřekročila 50 %. Při +20 °C je možná relativní vlhkost až 90 %. [6, s. 67; 28, s. 31]

4.2 Teplota okolí

Teplota okolí musí být měřena dvěma snímači teploty. Z těchto dvou teplot se vypočte průměrná teplota, která bude jako výchozí k určení oteplení přístroje. Jejich umístění je v polovině výšky zařízení ve vzdálenosti 1 m. Musí být zabráněno ovlivňování výsledků měření teploty prouděním vzduchu a sáláním tepla. [6, s. 97; 28, s. 54]

V průběhu zkoušky musí být teplota okolí v rozmezí od +10 °C do +40 °C a její změna nesmí být větší než 10 K [6, s. 97; 28, s. 54]. V případě normy ČSN EN 60947-1 ed. 5 se teplota během zkoušky nesmí změnit o více než 3 K, aby se nemusel používat korekční součinitel [6, s. 97].

4.3 Měření oteplení částí

Měření teploty jednotlivých částí se provede v místech, kde se předpokládá největší nárůst teploty. Nainstalované senzory teploty nesmí negativně ovlivňovat výsledky zkoušky. Měření se provede vhodnými snímači, které budou spojeny s měřicím objektem tak, aby docházelo k co nejdokonalejšímu přestupu tepla a byla zaručena nejvyšší tepelná vodivost. [6, s. 98; 28, s. 54]

Měření teploty cívky elektromagnetu se provede na základě poměru odporu cívky R_c (Ω) za studena při teplotě θ_c ($^{\circ}\text{C}$) a odporu cívky R_h (Ω) za tepla pro teplotu θ_h ($^{\circ}\text{C}$). Cívka se musí napájet její jmenovitou frekvencí a napětím. Její teplota se před zahájením oteplovací zkoušky nesmí vůči teplotě okolí lišit o více než 3 K. Výpočet teploty za teplého stavu se provede na základě následující rovnice, která vychází

z rovnice 1.2

$$\theta_h = \frac{R_h}{R_c}(\theta_c + 234,5) - 234,5. \quad (4.1)$$

[6, s. 98; 28, s. 54; 27, s. 56; 28, s. 39]

Oteplení je pak rozdíl mezi teplotou části a průměrnou teplotou okolí. Zkouška probíhá do té doby, než se oteplení všech částí zařízení ustálí tak, aby nepřekročilo růst o 1 K za hodinu. Zkouška nesmí probíhat déle jak 8 hodin. [6, s. 98; 28, s. 54]

4.4 Oteplení hlavního obvodu

Hlavní obvod má být napájený smluveným tepelným proudem bez krytu I_{th} (A), který nemá být menší než maximální jmenovitý pracovní proud I_e (A). Smluvený tepelný proud je maximální hodnota proudu, která má být použita pro oteplovací zkoušku. Když smluvený tepelný proud není na zařízení uveden, použije se právě maximální hodnota jmenovitého pracovního proudu pro provedení zkoušky. Napětí může mít libovolnou hodnotu. [6, s. 57; 28, s. 26]

Během zkoušky je nutno dodržet toleranci zkušebních veličin. Efektivní hodnoty proudu mají horní toleranci +5 % a spodní 0 %. [6, s. 127; 28, s. 53]

U více pólových zařízení napájených střídavým proudem, kde jsou všechny póly stejné, je možné přístroj zapojit se všemi póly do série a provést tak zkoušku jednofázově [6, s. 99; 28, s. 55].

Napájení hlavního obvodu bude zrealizováno jednožilovými vodiči z mědi a izolací z PVC [6, s. 99; 28, s. 55]. Instalační stykače mají podle normy ČSN EN 61095 ed. 2 minimální délku vodiče 1 m [28, s. 55]. U stykače LSD2503 se podle normy 60947-1 ed. 5 pro hodnotu proudu do 400 A a průřez do 35 mm² použije také délka vodiče 1 m [6, s. 99]. Tato vzdálenost musí být dodržena jak u propoje mezi svorkami zařízení, tak u vodiče vedeného od zdroje ke svorce. Tyto vodiče se musí vést ve volném prostoru a jejich vzájemná vzdálenost musí být, pokud možno, shodná se vzdáleností mezi svorkami. [6, s. 99; 28, s. 55]

4.5 Vyhodnocení zkoušky

Jakmile oteplení přístroje, včetně cívky elektromagnetu, nepřesahuje změnu o 1 K za hodinu, zkouška se ukončuje. Aby zařízení splnilo oteplovací zkoušku, je nutné, aby nebyly překročeny maximální povolené hodnoty oteplení, které jsou pro jednotlivé části zařízení různé. Dosažená oteplení během zkoušky nesmí zhoršit funkčnost výrobku. [6; 28]

Mezní hodnota oteplení svorek z postříbřené mědi stykače LSD2503 je 70 K a svorek z holé mědi instalačních stykačů je 60 K. Maximální hodnota oteplení

přístupné části z nekovového materiálu, která není určena k dotyku v normálním provozu je 50 K. [6, s. 117; 28, s. 38]

Povolené oteplení izolované cívky ve vzduchu se liší podle třídy izolačního materiálu. V technické dokumentaci stykače LSD2503 ani instalačních stykačů nebyla obsažena informace o druhu izolačního materiálu cívky. Pro vyhodnocení zkoušky je proto zvolena třída s nejnižším povoleným oteplením, konkrétně třída A s mezní hodnotou oteplení 85 K. [27, s. 56; 28, s. 38]

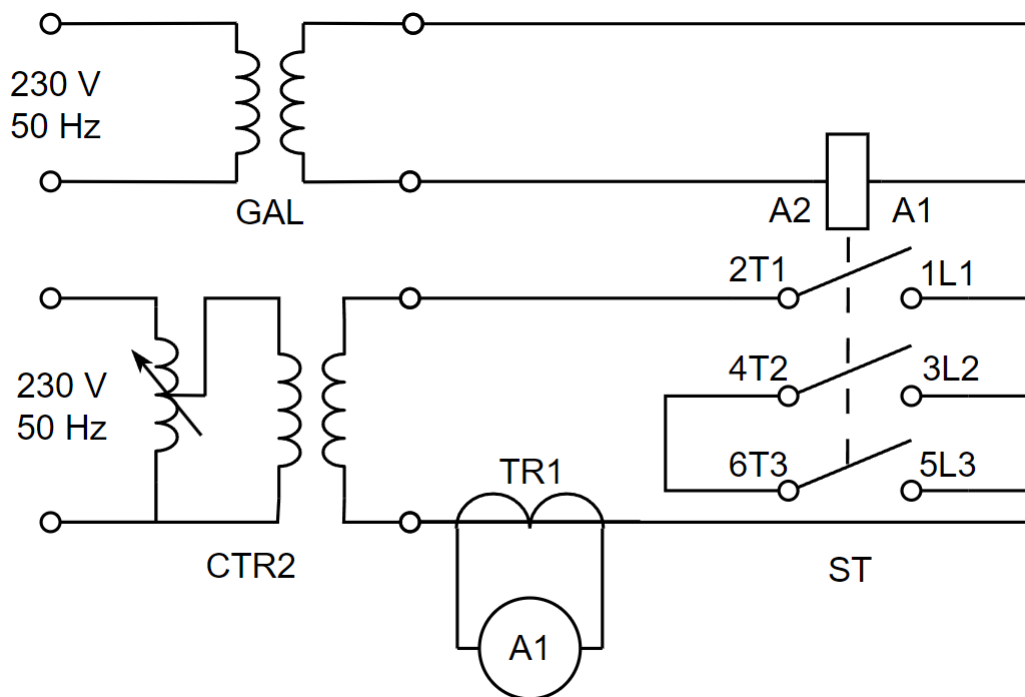
5 Oteplovací zkouška stykače LSD2503

Prvním zkoušeným zařízením je stykač LSD2503 určený ke spínání motorů. Jde o třífázový stykač bez pomocných kontaktů, který je určen pro výkony 22 kW v kategorii užití AC-3 (napájení motorů). Jeho maximální jmenovitý pracovní proud I_e je 60 A pro kategorii užití AC-1 (odporová zátěž). Jmenovité napájecí napětí cívky je 230 V při frekvenci 50 Hz. Řídí se normou ČSN EN IEC 60947-4-1, podle které bude probíhat oteplovací zkouška. Na hlavní kontakty se připojí vodiče 16 mm², které je potřeba dotáhnout momentem maximálně 4,5 Nm. Tento průřez hrubě slané vodiče, který bude použit při proudu 60 A, odpovídá jak štítku přístroje, tak i mezím stanoveným podle normy ČSN EN 60947-1 ed. 5. [29, s. 233; 6, s. 138]

5.1 Schéma zapojení

Tab. 5.1: Seznam přístrojů zkoušky stykače LSD2503

Značení	Přístroj	Výrobní číslo
ST	Stykač SCHRACK LSD2503	140912
	Teploměr, vlhkoměr, barometr	16910113
A1	Digitální multimetr Hexagon	122180534
TR1	Transformátor (proudová sonda)	129255JDV
	Termokamera FLIR	
C3	Ústředna pro měření teploty Comet MS55D	20555037



Obr. 5.1: Schéma zapojení silové části stykače LSD2503

5.2 Průběh měření

Zapojení silového obvodu bylo provedeno podle schématu zobrazeného na obrázku 5.1. Hlavní póly přístroje byly zapojeny do série a bylo použito jednofázové napájení. Silový obvod byl propojen hrubě slaněnými vodiči s PVC izolací, průřezem 16 mm^2 a délkou 1 m. Tato délka byla dodržena jak mezi svorkami, tak mezi napájecím zdrojem a svorkou stykače. Vodiče byly naohýbány tak, aby jejich vzájemná vzdálenost byla stejná jako vzdálenost mezi svorkami. Dotažení svorek hlavního obvodu stykače bylo provedeno za pomoci momentového klíče s nastaveným momentem $4,5 \text{ Nm}$. Do svorek stykače byly společně se silovými vodiči přimontovány i termočlánky.

Napájení cívky stykače bylo zapojeno přes galvanické oddělení z důvodu bezpečnosti. Bylo použito jmenovité napájení 230 V s frekvencí 50 Hz .

Do obvodu byly připojeny měřicí přístroje podle obrázku 5.1. Proudová sonda TR1 spolu s multimetrem A1 byly použity k měření proudu hlavním obvodem.

Měření teploty jednotlivých částí bylo realizováno termočlánky typu K, třídy 1, jejichž rozmístění bylo podle obrázku 5.2 a tabulky 5.2. Byly připevněny na místech s předpokládaným nejvyšším tepelným nárůstem. Kromě měření teploty na přístroji byla měřena teplota okolí dvěma termočlánky. Ty byly umístěny 1 m od stykače v polovině jeho výšky, kde jeden byl před stykačem a druhý za ním. Připevněny

byly k měděným plátům kvůli zvýšení tepelné kapacity a byly obaleny molitanem pro zamezení ovlivňování měření prouděním a sáláním. Tím bylo zamezeno kolísání měřené teploty okolí. Zaznamenávání dat zkoušky bylo uskutečněno základnou Comet MS55D.

Před započítáním samotné oteplovací zkoušky byl změřen odpor cívky stykače pro zjištění jejího odporu R_c za studena při teplotě θ_c .

Započetí zkoušky nastalo zapnutím nahrávání měřicí teplotní ústředny, zaznamenávající teploty z termočlánků každou minutu. Byly zapsány okolní podmínky. Po oživení měřicích přístrojů byla cívka stykače připojena k napájení a následně byl na transformátoru proudu nastaven proud hlavním obvodem v rozmezí od 62 do 63 A.

Měření probíhalo po dobu dostatečnou, aby se oteplení jednotlivých částí neměnilo více než o 1 K za hodinu.

Před ukončením zkoušky byl stykač a jeho zapojení nafocen termokamerou, jejíž snímky jsou zobrazeny na obrázku 5.4 a 5.5.

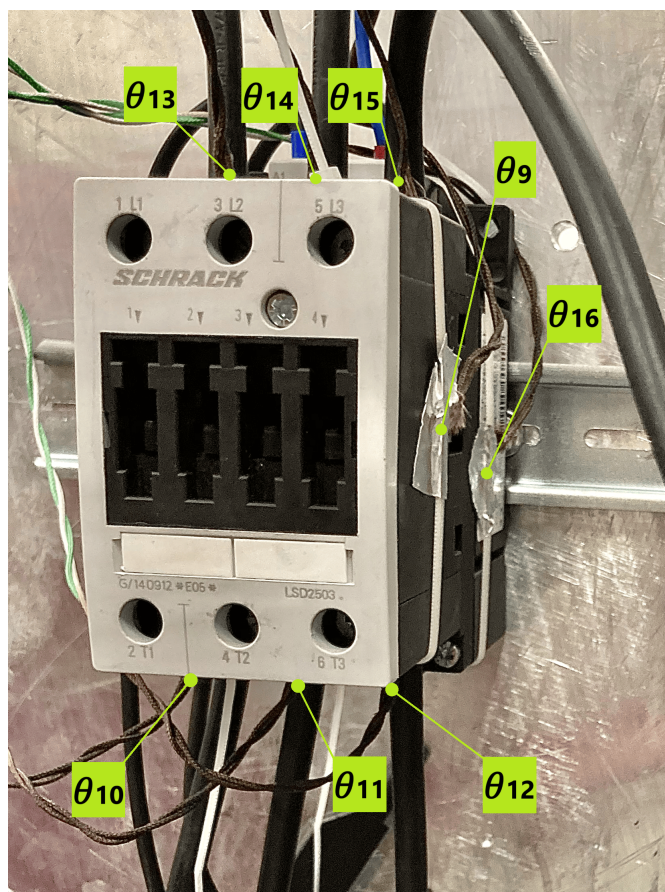
Na samém konci oteplovací zkoušky byl přístroj zcela odpojen od napájení a multimetrem byl změřen odpor cívky stykače R_h , aby z něho mohla být vypočtena teplota cívky θ_h , a to podle rovnice 4.1 a hodnot změřených před začátkem zkoušky.

Následně z naměřených hodnot byly vyhotoveny grafy a bylo provedeno vyhodnocení zkoušky podle normy ČSN EN IEC 60947-4-1 ed. 5.

5.3 Měřené body

Tab. 5.2: Popis měřených bodů stykače LSD2503

Označení bodů	Popis umístění
θ_1	Okolní teplota před stykačem
θ_2	Okolní teplota za stykačem
θ_9	Boční část krytu (oblast hlavních kontaktů)
θ_{10}	Svorka 2T1 (spodní) – přívod
θ_{11}	Svorka 4T2 (spodní)
θ_{12}	Svorka 6T3 (spodní)
θ_{13}	Svorka 1L1 (vrchní)
θ_{14}	Svorka 3L2 (vrchní)
θ_{15}	Svorka 5L3 (vrchní) – přívod
θ_{16}	Boční část krytu (oblast cívky)



Obr. 5.2: Rozmístění jednotlivých termočlánků na stykači LSD2503

5.4 Naměřené a vypočtené hodnoty

Před začátkem měření byly zaznamenány podmínky okolí a to teplota 23,3 °C, tlak 992,4 hPa a relativní vlhkost 28,6 %.

Teplota v okolí přístroje byla měřena termočlánky θ_1 a θ_2 . Z těchto dvou hodnot se určila průměrná teplota θ_{AMB} , ke které se vztahovalo oteplení, jakožto rozdíl mezi teplotou části přístroje a průměrnou teplotou okolí.

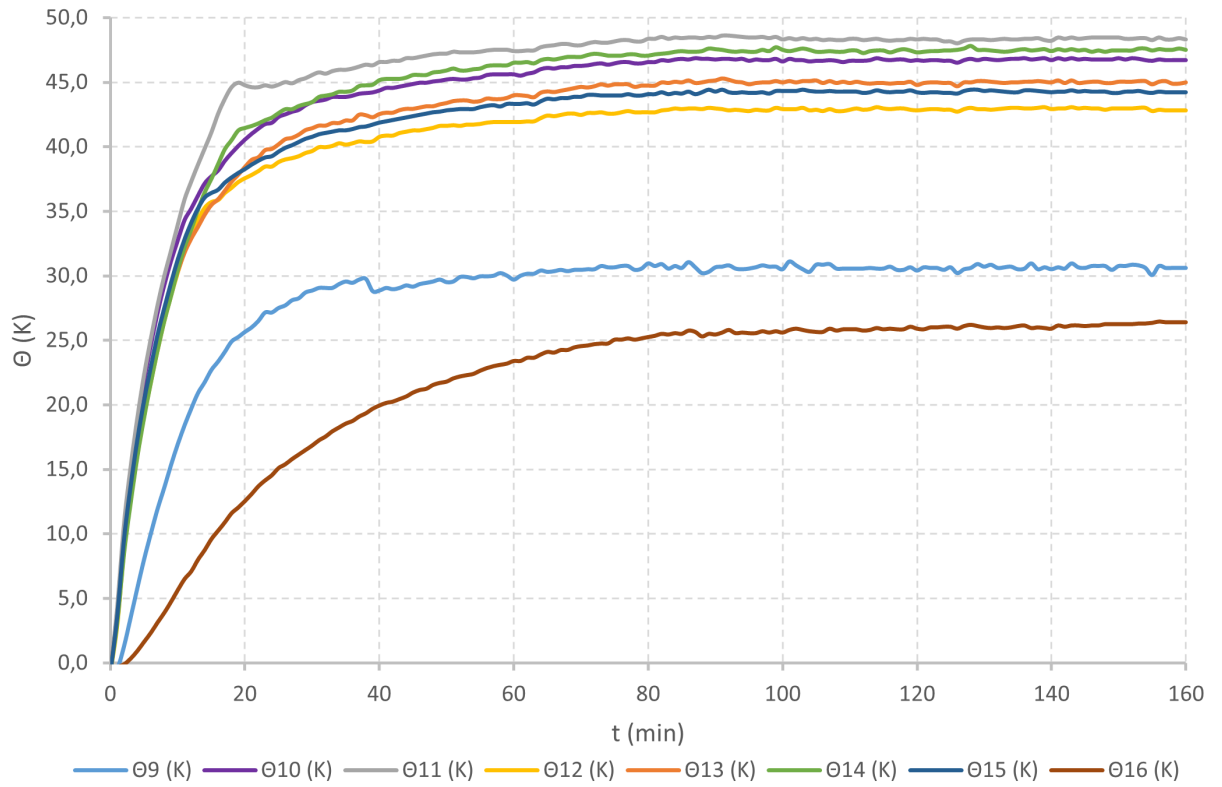
Průběhy oteplení konkrétních bodů lze pozorovat na obrázku 5.3. Ty vycházejí na základě hodnot z tabulek A.1 až A.6 obsažených v příloze A.

Před začátkem zkoušky byl změřen odpor cívky za studena R_c , který měl hodnotu 216,2 Ω při teplotě okolí θ_c rovnou 23,3 °C. Teplota okolí byla v tento moment změřena digitálním teploměrem, umístěným uvnitř zkoušené místnosti. Na konci zkoušky byl změřen odpor cívky za tepla R_h , a to 274,6 Ω . Dosazením naměřených hodnot do rovnice 4.1 se vypočte teplota cívky na konci oteplovací zkoušky

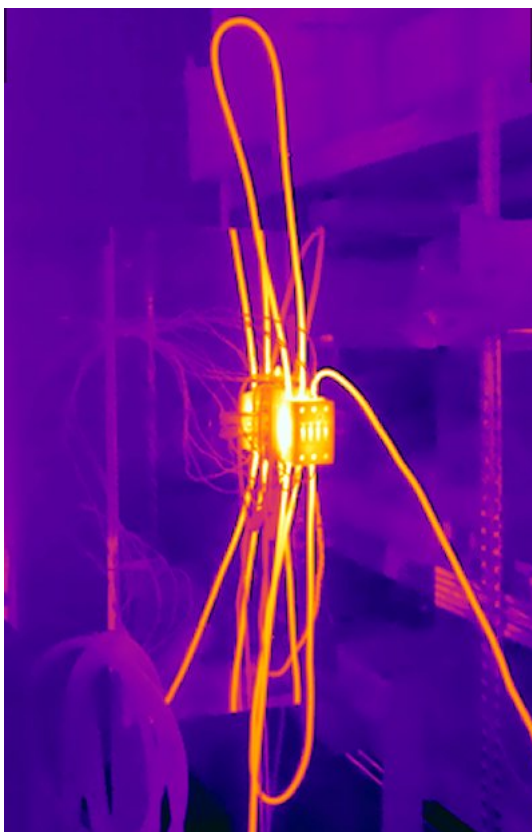
$$\theta_h = \frac{274,6}{216,2} \cdot (23,3 + 234,5) - 234,5 = 92,9 \text{ °C.} \quad (5.1)$$

Oteplení vinutí cívky stykače je rozdíl mezi její teplotou po ukončení a teplotou okolí před začátkem oteplovací zkoušky

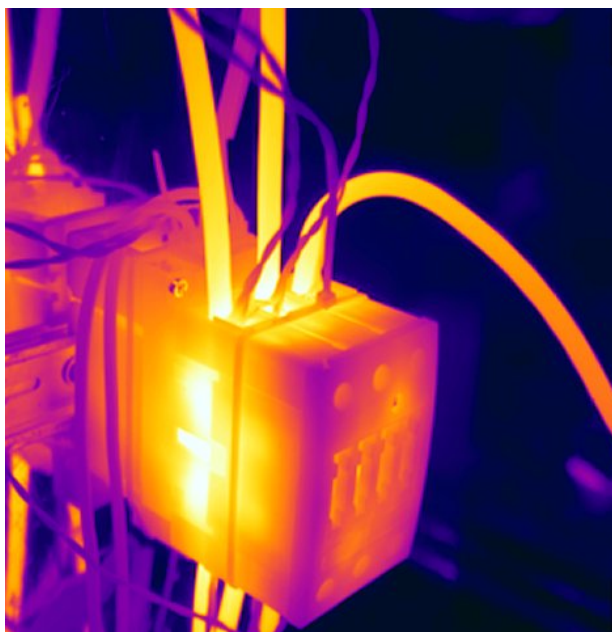
$$\Theta_C = \theta_h - \theta_c = 92,9 - 23,3 = 69,6 \text{ K.} \quad (5.2)$$



Obr. 5.3: Průběh oteplení svorek a boku stykače LSD2503



Obr. 5.4: Snímek zapojení stykače LSD2503 provedený termokamerou



Obr. 5.5: Snímek boku stykače LSD2503 provedený termokamerou

5.5 Vyhodnocení měření

Zkouška byla ukončena po 160 minutách, kdy se oteplení všech částí během poslední hodiny nezměnilo více než o 1 K. Je nutné podotknout, že zkouška nebyla vykonána na novém zařízení.

Jednotlivé výkyvy v průbězích oteplení zobrazených na obrázku 5.3 jsou způsobeny regulací proudu hlavního obvodu, která zajišťovala jeho udržení v tolerančních mezích. Maximální dosažené hodnoty oteplení v rámci konkrétních bodů jsou znázorněné v tabulce 5.3.

Termočlánky s číselným značením 10 až 15 měřily teplotu na svorkách z postříbřené mědi. Největší oteplení, kterého na nich bylo dosaženo, činilo 48,6 K. Normativním požadavkem pro tuto část zkoušky je povolené limitní oteplení 70 K [6, s. 117]. Stykač tuto část normy splnil. U svorek, které byly mezi sebou prosmýčkované, lze pozorovat vyšší oteplení, neboť se teplo hromadilo ve vodiči chlazeném pouze okolním vzduchem. Svorky připojené ke zdroji napájení mají naopak nižší oteplení, protože teplo bylo odváděno vodičem přímo do zdroje napájení, který ho absorboval. To lze pozorovat na termosnímku obrázku 5.5. Nejvyšší oteplení vykazuje svorka s termočlánkem číslo 11. To je způsobeno jejím umístěním uprostřed stykače. Navíc teplo vytvořené připojenými vodiči, které jsou umístěné pod přístrojem, stoupá vzhůru a ohřívá spodní část zařízení.

Boční část stykače je z nekovového materiálu a za normálního provozu není určena k dotyku. Norma u těchto částí povoluje oteplení 50 K [6, s. 117]. Maximální oteplení těchto částí dosáhlo hodnoty 31,1 K. Jednalo se o body měřené termočlánky číslo 9 a 16. První ze zmíněných termočlánků měřil teplotu v okolí hlavních kontaktů stykače a druhý okolí jeho cívky. Část s hlavními kontakty dosáhla ustáleného oteplení za stejnou dobu jako svorky zařízení. Nejdéle ustálení trvalo oblasti s cívkou stykače.

Právě cívce trvalo ustálení oteplení nejdelší dobu. Problémem bylo, že zkouška neumožňovala měření odporu cívky v jejím průběhu. Na základě ustálené hodnoty oteplení termočlánku číslo 16 lze oteplení cívky označit také za ustálené. Její oteplení je vypočteno v rovnici 5.2 a rovná se 69,6 K. Normativním limitem je zde hodnota 85 K [6, s. 117].

Stykač LSD2503 na základě provedení a vyhodnocení oteplovací zkoušky vyhověl požadavkům podle normy ČSN EN IEC 60947-4-1 ed. 4.

Tab. 5.3: Maximální dosažené oteplení jednotlivých bodů stykače LSD2503

Měřený bod	Max. oteplení (K)	Limit oteplení (K)
Θ_9	31,1	50
Θ_{10}	46,9	70
Θ_{11}	48,6	70
Θ_{12}	43,1	70
Θ_{13}	45,3	70
Θ_{14}	47,8	70
Θ_{15}	44,4	70
Θ_{16}	26,5	50

6 Oteplovací zkouška instalačních stykačů

Další oteplovací zkoušky budou provedeny na dvou instalačních stykačích, které jsou ve dvoukontaktním provedení. Tyto dva stykače mají totožný maximální trvalý proud 25 A a jsou na stejné jmenovité napětí 250/440 V. Byly vybrány tytéž cívky s jmenovitým napětím 24 V DC/AC. Rozdíl je u jejich druhů kontaktů. [2, s. 3]

Stykač s označením Sa1 má kontaktní materiál AgSnO_2 a stykač Sa2 AgNi . Rozdíl je možné pozorovat u maximálního spínaného proudu, kde AgSnO_2 spíná vysoké zapínací proudy do 120 A a AgNi malé a střední zapínací proudy do 80 A. Další odlišností je přípustné výkonové zatížení, které je u materiálu AgSnO_2 dvojnásobné oproti AgNi . To vyjadřuje, jak velký může být maximální spínaný výkon pro konkrétní druh zátěže. Zátěží jsou myšleny například žárovky, halogenové žárovky, LED a zářivky. [2, s. 3]

Materiál AgSnO_2 tedy snese vyšší zapínací proudy a má vyšší spínací schopnost oproti AgNi , jak bylo řečeno v podkapitole 2.1.2. Vzhledem k teoretickým výpočtům v podkapitole 2.1.4 vykazuje materiál AgSnO_2 vyšší stykový odpor, a lze tedy předpokládat, že bude mít vyšší oteplení oproti stykači s materiálem kontaktů AgNi . Nicméně, proti tomuto předpokladu stojí fakt, že stykač Sa1 s materiálem AgSnO_2 má podle technické dokumentace až dvakrát větší přípustné výkonové zatížení než stykač Sa2 s materiálem AgNi . Toto souvisí spíše s odolností kontaktního materiálu, ale mohlo by to mít vliv i na velikost oteplení. Je také nutné poukázat na oxidaci niklu způsobené vzdušnou vlhkostí, která by mohla mít vliv na zvýšení stykového odporu kontaktního styku, což by znamenalo vyšší oteplení stykového materiálu AgNi . [2, s. 3; 5, s. 179]

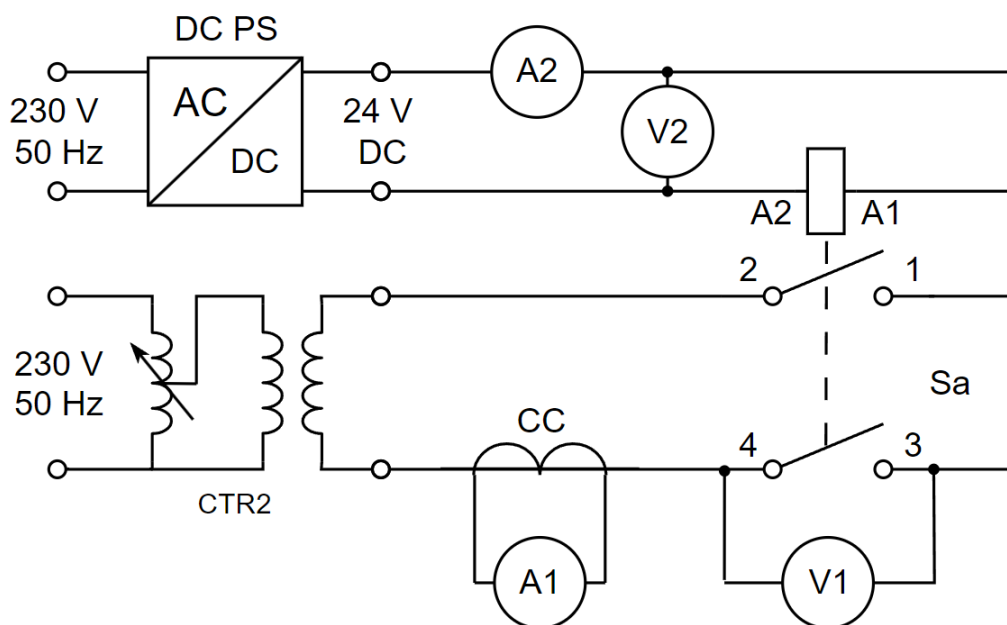
Cena přístrojů včetně DPH činila 371,36 CZK pro stykač Sa1 a 593,92 CZK pro stykač Sa2. Kromě toho je mezi stykači patrný rozdíl v elektrické životnosti. Stykač Sa2 (AgNi) má elektrickou životnost $70 \cdot 10^3$ sepnutí, zatímco stykač Sa1 (AgSnO_2) pouze $30 \cdot 10^3$ sepnutí [2, s. 3].

Oteplovací zkouška u těchto stykačů bude provedena podle normy ČSN EN 61095 ed. 2. Zdroj se stykačem a hlavní kontakty mezi sebou budou propojeny vodiči 6 mm^2 . Tato hodnota odpovídá jak technické dokumentaci, tak normě. Na veškeré šroubové svorky stykačů bude použit utahovací moment 0,8 Nm. [2, s. 9]

Tab. 6.1: Seznam přístrojů zkoušky instalačních stykačů

Značení	Přístroj	Výrobní číslo
Sa	Instalační stykač (Sa1; Sa2)	
CC	Proudové kleště Chauvin Arnoux C 173	125708QLS
A1	Měřicí modu AC 1,3 V	19090318
V1	Měřicí modu AC 1,3 V	19090317
A2	Digitální multimetr Hexagon	122180534
V2	Digitální multimetr Hexagon	122180532
	Termokamera FLIR E95	
	Měřicí ústředna Almemo 5690-2	A12110214
	Teploměr, vlhkoměr, barometr	16910113

6.1 Schéma zapojení



Obr. 6.1: Schéma zapojení silové části instalačních stykačů

6.2 Průběh měření

Podmínky pro zapojení a normativní požadavky se řídily v podstatě stejnými pravidly a postupy jako u oteplovací zkoušky stykače LSD2503. Byly ale použity hodnoty odpovídající konkrétnímu přístroji. Proto zde budou uvedeny jen rozdíly, které se mezi zkouškami vyskytly.

Cívka stykače byla připojena přes stejnosměrný zdroj napájení (UNI-T UTP3705S) na její jmenovité napětí 24 V. Touto cívkou byl měřen procházející proud multimetrem A2 a napětí multimetrem V2, kvůli určení hodnoty odporu cívky. Tyto hodnoty byly ručně zaznamenávány.

Silová část obvodu byla připojena na transformátor proudu CTR2, který kontakty stykače napájel maximálním trvalým proudem v rozmezí od 25 do 26,25 A. Tento proud byl měřen proudovými kleštěmi CC a následně zaznamenáván měřícím modulem A1 do měřicí ústředny Almemo, která sloužila nejen k zaznamenávání hodnot teplot z termočlánků, ale právě i dat z těchto modulů. Měřícím modulem V1 byl navíc měřen úbytek napětí na kontaktním spoji svorek číslo 3 a 4, aby mohl být určen stykový odpor kontaktu.

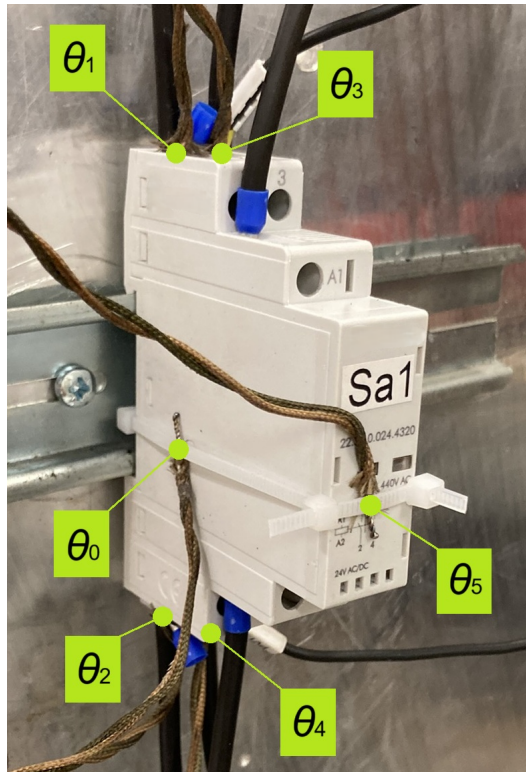
Umístění termočlánků typu K, třídy 1, na stykači je zobrazeno na obrázku 6.2 a je přidán popis v tabulce 6.2. Měřící základna Almemo z těchto termočlánků a měřících modulů zaznamenávala data každou minutu.

Nejdříve byl zkoušen stykač Sa1 s materiálem kontaktů AgSnO_2 , poté následoval druhý stykač Sa2 s materiálem kontaktů AgNi. Stykače byly nainstalovány s co nejmenšími rozdíly, aby výsledky byly co nejméně negativně ovlivněny. Zkoušky byly ukončeny, když se za poslední hodinu oteplení nezměnilo více než o 1 K.

6.3 Měřené body

Tab. 6.2: Popis měřených bodů instalačních stykačů

Označení bodů	Popis umístění
θ_0	Boční část krytu
θ_1	Svorka 1 (vrchní)
θ_2	Svorka 2 (spodní) - přívod
θ_3	Svorka 3 (vrchní)
θ_4	Svorka 4 (spodní) - přívod
θ_5	Přední část krytu
θ_6	Okolní teplota za stykačem
θ_7	Okolní teplota před stykačem



Obr. 6.2: Rozmístění jednotlivých termočlánků na instalačních stykačích

6.4 Naměřené a vypočtené hodnoty

Okolní podmínky před zahájením zkoušky stykače Sa1 byly následující: teplota 22,4 °C, tlak 984,2 hPa a relativní vlhkost 24,8 %. U stykače Sa2 byly naměřeny hodnoty: teplota 22,7 °C, tlak 986,8 hPa a relativní vlhkost 26,1 %.

Teplota v okolí byla měřena termočlánky θ_6 a θ_7 . Oteplení přístrojů je poté vztaženo k průměrné hodnotě z těchto dvou termočlánků.

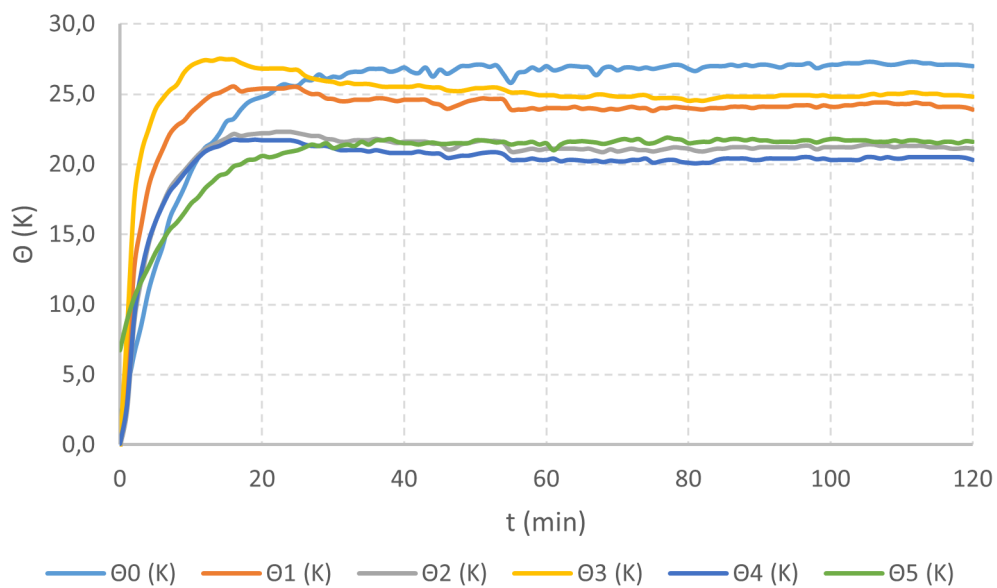
Průběhy oteplení stykače Sa1 jsou na obrázku 6.3, jehož hodnoty oteplení jsou zaznamenány v příloze B v tabulkách B.1 a B.2 a termovizní snímek je na obrázku 6.7. Průběhy oteplení pro stykač Sa2 jsou na obrázku 6.4 s hodnotami oteplení v příloze B v tabulkách B.3 a B.4 a s termovizním snímkem na obrázku 6.8.

Měření proudu a napětí cívky bylo ručně zaznamenáváno každých 5 minut zkoušky a to v příloze B do tabulek B.5 pro stykač Sa1 a B.6 pro stykač Sa2. Z těchto hodnot byly následně vypočítány jednotlivé odpory cívky R_L podle Ohmova zákona. Odpor cívky za studena byl

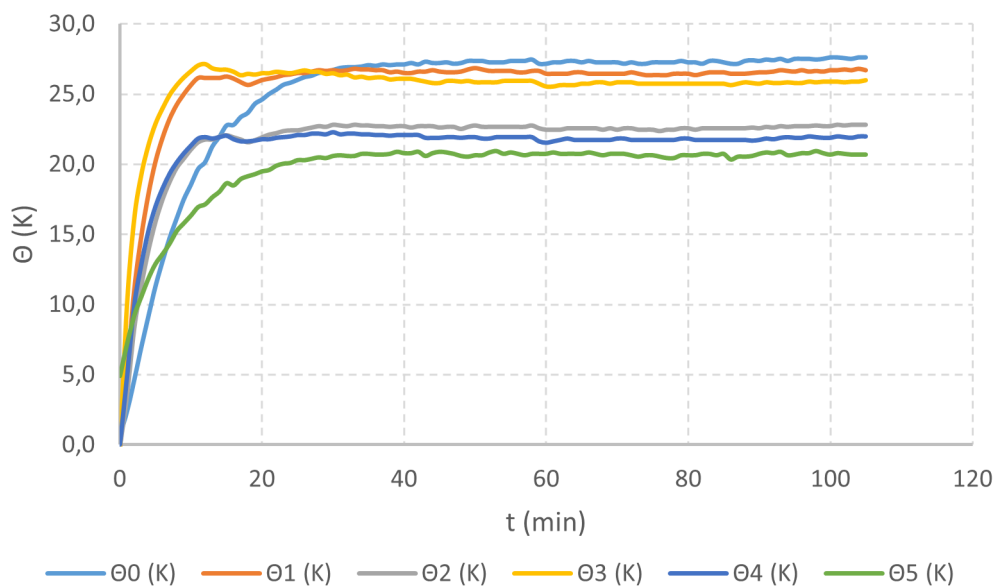
$$R_c = \frac{U_L}{I_L} = \frac{24,11}{95,0 \cdot 10^{-3}} = 253,79 \Omega. \quad (6.1)$$

Jako teplota za studena θ_c byla uvažována teplota změřená před začátkem zkoušky. Podle postupně rostoucího odporu se vypočítávala teplota cívky dosazením do rovnice 4.1. Stejným postupem jako ve výpočtu 5.2 se určilo oteplení cívky, jehož průběh je vyobrazen na obrázku 6.5 a to pro oba stykače. Oteplení cívky u stykače Sa1 dosáhlo hodnoty 47,0 K a u stykače Sa2 49,5 K.

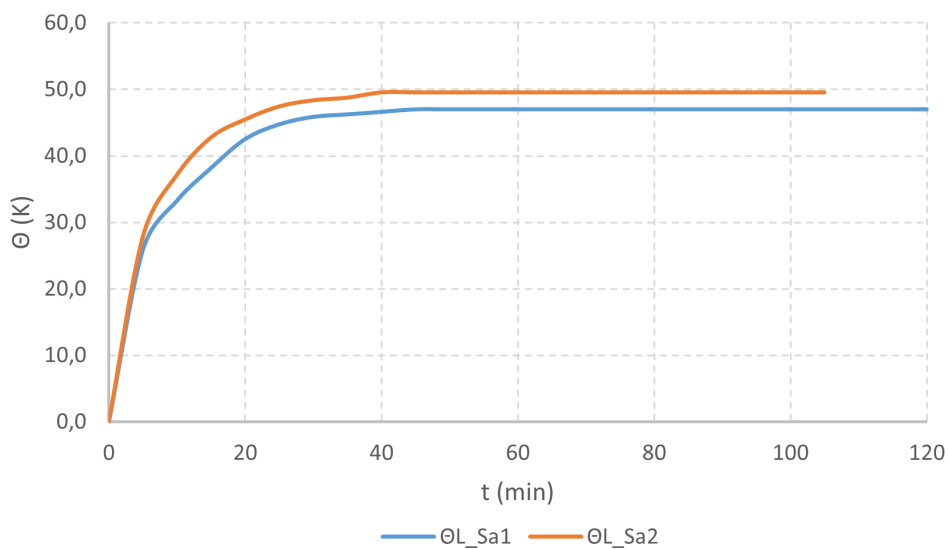
Výpočet stykového odporu je proveden podle Ohmova zákona, a to stejně jako ve výpočtu 6.1. Aby výsledná hodnota odpovídala odporu jednoho kontaktního styku, je nutné použít pouze polovinu změřeného úbytku napětí, neboť instalační stykače obsahují můstkový kontaktní systém (obrázek 7.4), který obsahuje dva kontaktní styky. Společně s polovinou úbytku napětí se do výpočtu dosadí také hodnota proudu protékajícího hlavním obvodem. Tyto měřené a vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v příloze B v tabulkách B.7 až B.10. Charakteristika změny stykového odporu v čase pro jeden kontaktní styk obou stykačů je zobrazena na obrázku 6.6. Po ustálení hodnot činí stykový odpor stykače Sa1 (AgSnO_2) 0,794 m Ω a stykače Sa2 (AgNi) 0,772 m Ω .



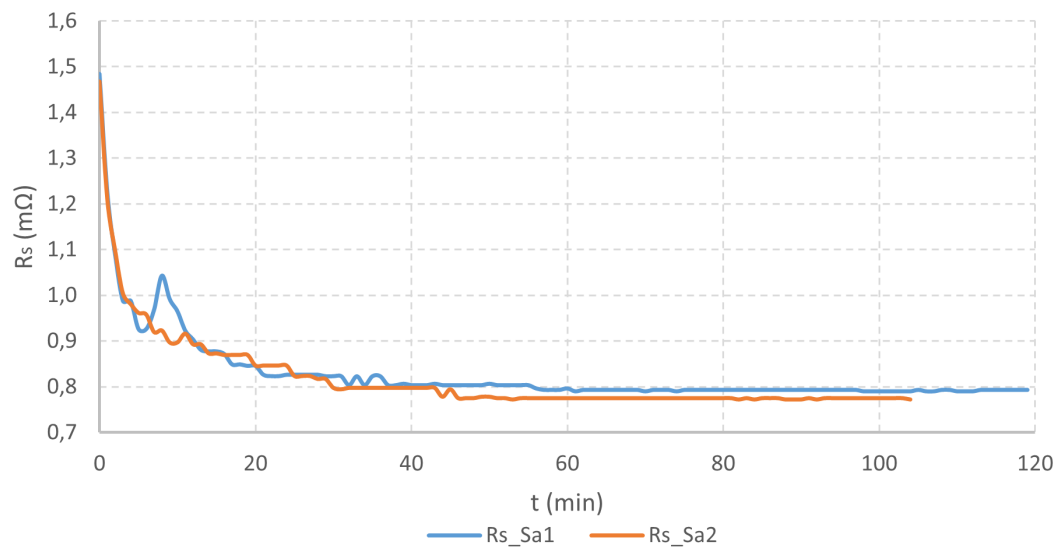
Obr. 6.3: Průběh oteplení instalačního stykače Sa1 (AgSnO_2)



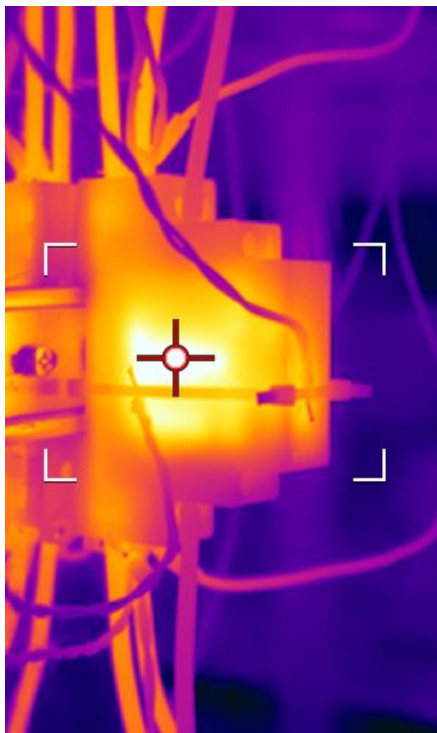
Obr. 6.4: Průběh oteplení instalačního stykače Sa2 (AgNi)



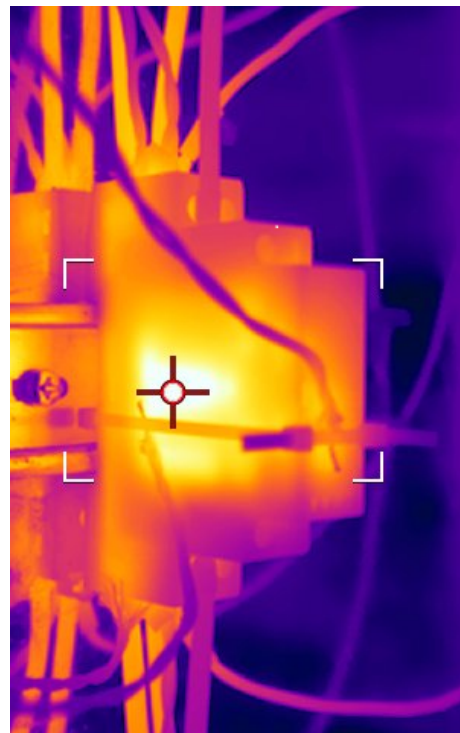
Obr. 6.5: Průběh oteplení cívek instalačních stykačů



Obr. 6.6: Změna stykového odporu u jednoho kontaktu obou instalačních stykačů



Obr. 6.7: Snímek instalačního stykače Sa1 (AgSnO_2) provedený termokamerou



Obr. 6.8: Snímek instalačního stykače Sa2 (AgNi) provedený termokamerou

6.5 Vyhodnocení měření

K ustálenému oteplení stykače Sa1 došlo po 120 minutách a stykače Sa2 po 105 minutách. Délka zkoušky mohla být stejná, ale u stykače Sa1 nastal okolo 50 minuty výkyv v oteplení, kvůli kterému se zkouška protáhla, protože se mohla ukončit až v ten moment, kdy se oteplení nezměnilo o více než 1 K za hodinu. Je nutné podotknout, že cívky obou stykačů dosáhly svého ustáleného oteplení za stejný čas. V rámci stykače Sa2 trvalo nejdelší dobu právě ustálení oteplení cívky.

Zkoušky se konaly ve dvou dnech, tudíž druhé měření nebylo ovlivněno případnou vyšší teplotou vodičů z předešlého měření.

Maximální dosažené hodnoty oteplení všech částí stykačů jsou sepsány v tabulce 6.3. Žádná z hodnot oteplení nepřekročila normou stanovený limit, a proto lze říci, že oba instalační stykače vyhověly oteplovací zkoušce dle normy ČSN EN 61095 ed. 2.

Instalační stykače mají nižší oteplení spodních svorek 2 a 4 ve srovnání s vrchními svorkami 1 a 3, což je patrné i z termosnímků 6.7 a 6.8. Důvodem vyššího oteplení vrchních svorek 1 a 3 je skutečnost, že kontakty stykače jsou umístěny blíže těmto svorkám, jak je zřejmé z obrázku 7.2.

Hodnota proudu hlavním obvodem se na začátku měření rychle měnila. To bylo pravděpodobně způsobené vlivem cizích vrstev na kontaktech, a tedy změnou jejich stykového odporu R_s . Tato změna velikosti stykového odporu vlivem cizích vrstev by odpovídala elektrickému rozrušení těchto vrstev (kontakty mají malé přitlačné síly), které je zmíněné v podkapitole 2.1.1. Což by bylo vysvětlením, proč ze začátku měření byla hodnota stykového odporu vysoká a následně klesala. Grafické znázornění této charakteristiky pro oba kontaktní materiály je uvedeno na obrázku 6.6. Materiál kontaktu AgNi stykače Sa2 zde dosahuje nižších hodnot stykového odporu R_s než materiál AgSnO₂ ve stykači Sa1. Po ustálení velikosti stykových odporů činí rozdíl mezi materiály pouhých 0,02 mΩ, což lze označit za zanedbatelný rozdíl. V následujících částech práce byla změřena přitlačná síla jednoho kontaktu, a to 0,196 N. Rozdíl mezi stykovými odpory obou materiálů odpovídající této přitlačné síle podle teoretického výpočtu v podkapitole 2.1.4 vychází na 0,21 mΩ, což je výrazně více než aktuálně změřený rozdíl 0,02 mΩ. Důvodem by mohlo být, že se na materiálu AgNi stykače Sa2 začínají vlivem vzdušné vlhkosti tvořit cizí vrstvy, které zvyšují jeho stykový odpor, a ten se tak svou hodnotou začíná přibližovat odporu materiálu AgSnO₂ stykače Sa1.

Na obrázku 6.6 v případě stykače Sa1 nastává v okolí 9 minuty měření nárůst stykového odporu. To by poukazovalo na zvýšení teploty kontaktního styku až na mez měknutí, kdy materiál začne měknout, zvýší se tak styková plocha kontaktů a následkem toho dojde ke snížení stykového odporu.

Tabulka 6.3 sice znázorňuje vyšší oteplení stykače Sa2, avšak tyto hodnoty ve

většine případů odpovídají konci měření, kdy stykačem procházel proud až o 0,7 A vyšší než v případě stykače Sa1. Proud byl sice v toleranci stanovené normou, ale pro porovnání stykačů ho nelze zanedbat. Okolo 30. minuty se hodnota proudu přestala rychle měnit s tím, že větší proud protékal stykačem Sa2 a přibližně od 50. minuty se dá oteplení obou stykačů považovat za ustálené.

Pro jejich porovnání, které již nespadá do podmínek normy, je možné provést početní korekci a převést tak oteplení stykače Sa2 na stejnou velikost proudu, která procházela stykačem Sa1. Tím se odstraní chyba vzniklá rozdílem ve velikosti proudu jednotlivými stykači. To je možné za předpokladu, že tepelné ztráty přístroje a stejně tak jeho oteplení roste s druhou mocninou proudu, jak je stanoveno v rovnici 1.3. Redukované oteplení stykače Sa2 značené $\Theta_{\text{Sa2;red}}$ lze proto přepočítat z jeho proudu I_{Sa2} na hodnotu proudu I_{Sa1} stykače Sa1. Θ_{Sa2} je pak původní neredukované oteplení stykače Sa2. To dává dohromady rovnici

$$\Theta_{\text{Sa2;red}} = \Theta_{\text{Sa2}} \left(\frac{I_{\text{Sa1}}}{I_{\text{Sa2}}} \right)^2. \quad (6.2)$$

[30]

Při dosazení je možno vypočítat (redukované) oteplení stykače Sa2 jako v případě, kdyby jím protékal proud stykače Sa1. Pro 15. minutu měření a svorku 2 pak

$$\Theta_{\text{Sa2;red}} = 22,1 \cdot \left(\frac{26,2}{25,2} \right)^2 = 23,8 \text{ K}. \quad (6.3)$$

Tímto výpočtem se převedly hodnoty oteplení stykače Sa2 na stejný proud odpovídající stykači Sa1. Maximální hodnoty oteplení jsou znázorněny v tabulce 6.4. Oteplení stykače Sa1 zůstává nezměněné. Díky této korekci se na svorkách stykačů ještě zvýšil rozdíl v otepleních.

Výsledky zkoušky ukazují, že stykač Sa2 s kontaktním materiálem AgNi má vyšší oteplení než stykač Sa1 s materiálem AgSnO₂, a to i přesto, že měřený stykový odpor stykače Sa1 je mírně vyšší.

Tab. 6.3: Maximální dosažené oteplení jednotlivých bodů instalačních stykačů

Měřený bod	Max. oteplení Sa1 (K)	Max. oteplení Sa2 (K)	Limit oteplení (K)
Θ_0	27,3	27,6	50
Θ_1	25,6	26,9	60
Θ_2	22,3	22,8	60
Θ_3	27,5	27,2	60
Θ_4	21,8	22,3	60
Θ_5	21,9	21,0	50
Cívka	47,0	49,5	85

Tab. 6.4: Maximální dosažené oteplení při korekci proudu stykače Sa2

Měřený bod	$\Theta_{\text{Sa1};\text{max}}$ (K)	$\Theta_{\text{Sa2};\text{max}}$ (K)	$\Theta_{\text{Sa2};\text{red};\text{max}}$ (K)
Θ_0	27,3	27,6	27,2
Θ_1	25,6	26,9	28,4
Θ_2	22,3	22,8	23,8
Θ_3	27,5	27,2	29,1
Θ_4	21,8	22,3	23,8
Θ_5	21,9	21,0	21,2

7 Zkouška oteplení kontaktů instalačních stykačů

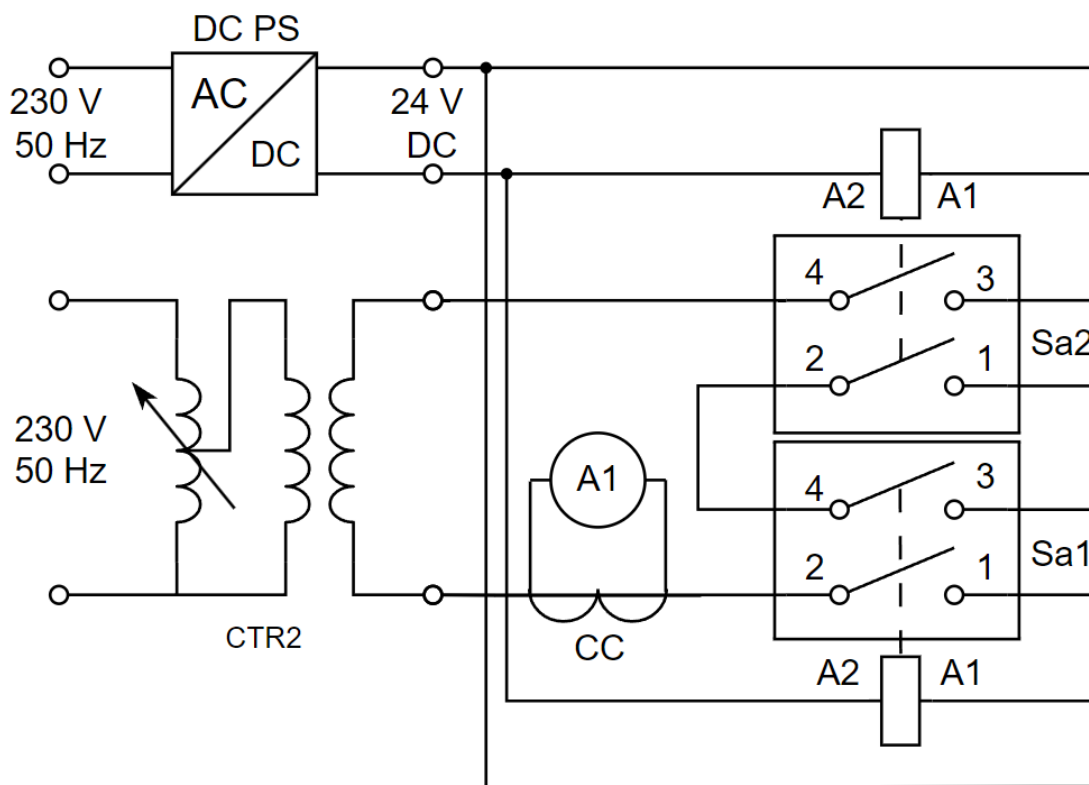
Z důvodu přesnějšího určení vlivu kontaktního materiálu na oteplení, byla provedena další oteplovací zkouška na instalačních stykačích, které měly odstraněné kryty v okolí kontaktů, aby se dalo měřit oteplení co nejbližší ke kontaktům.

Ochlazování kontaktů v místě kontaktního styku a v jeho těsné blízkosti je zanedbatelné. Tepelné ztráty se vlivem tepelné vodivosti šíří připojenými vodiči, ze kterých následně odcházejí povrchem do okolí. [11, s. 190] Oteplení kontaktů proto stačí měřit na vodičích, ke kterým jsou kontakty připojeny, ale i přesto v jejich těsné blízkosti.

7.1 Schéma zapojení

Tab. 7.1: Seznam přístrojů zkoušky oteplení kontaktů instalačních stykačů

Značení	Přístroj	Výrobní číslo
Sa1	Instalační stykač AgSnO_2	
Sa2	Instalační stykač AgNi	
CC	Proudové kleště Chauvin Arnoux C 173	125708QLS
V2	Digitální multimetr Hexagon	122180537
	Digitální multimetr Fluke 289	97220164
	Termokamera FLIR E95	
	Měřicí ústředna Almemo 5690-2	A12110214
	Teploměr, vlhkoměr, barometr	16910113



Obr. 7.1: Schéma silové části se sériovým zapojením instalačních stykačů

7.2 Průběh měření

Stykače byly zapojeny do série, podle schématu zapojení na obrázku 7.1, aby jimi procházel proud stejné velikosti. Vlastnosti zapojení, jako jsou velikosti utahovacích momentů, napájení cívek, průřezy a délky vodičů byly stejné jako v předešlé oteplovací zkoušce instalačních stykačů v kapitole 6.

Velikost proudu hlavním obvodem byla udržována na hodnotách shodných s velikostí proudu procházející stykačem Sa1 ze zkoušky v kapitole 6.

Na měření oteplení se použila taktéž měřicí základna Almemo společně s termočlánky typu K třídy 1. Umístění termočlánků na jednom stykači je zobrazeno na obrázku 7.2, kde toto umístění měřících bodů bylo shodné pro oba stykače.

Na měděné vodiče a kontaktní nýty byla na straně svorek 1 a 3 nalepena černá matná páska (viz obrázek 7.2), aby se při pořizování termovizních snímků eliminovalo nepřesné zobrazení teploty způsobené nízkou emisivitou lesklého měděného materiálu.

Po ustálení teploty, byl digitálním multimetrem Fluke 289 změřen úbytek napětí na kontaktních můstcích a zároveň hodnota protékajícího proudu, aby bylo možné

určit odpor kontaktního můstku, a tedy i stykový odpor jednoho kontaktu.

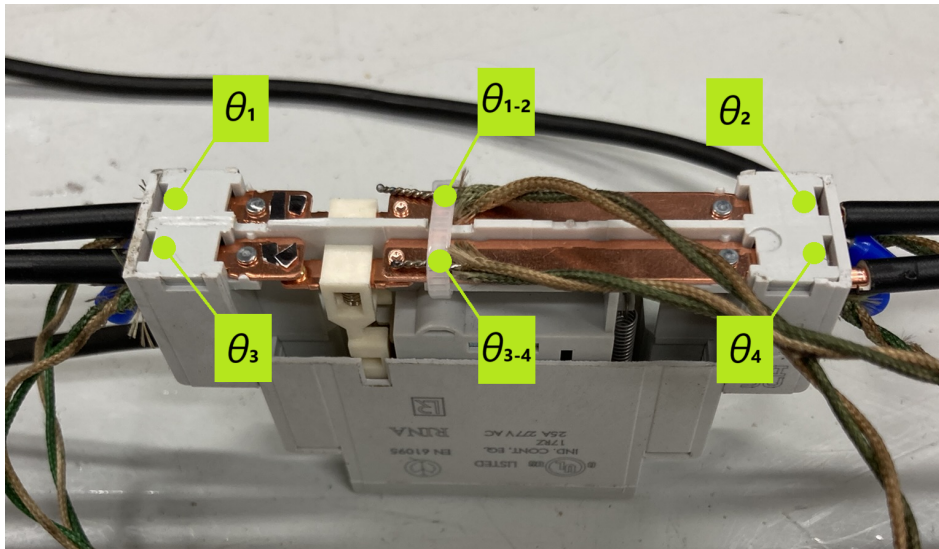
Následně byl na stykač Sa1 nasazen kryt, jak se ukázáno na obrázku 7.3, aby bylo možné simulovat provozní podmínky pro zakrytovaný přístroj. Zakrytí stykače ovlivní jeho chlazení, čímž se zvýší výsledné ustálené oteplení.

Po ukončení měření byla změřena přítláčná síla, která je vyvíjená na kontakt přítláčnou pružinou. Měření bylo provedeno tím způsobem, že se tenký měděný drátek omotal okolo kontaktního můstku na straně jednoho kontaktu. Drátek byl protažen přední částí stykače, aby bylo možné měřit přítláčnou sílu v jejím směru působení. Drátek se omotal kolem přesné váhy, která vážila hmotnost v kilogramech. Na hlavní přístroje stykače byl připojen multimetr nastavený na zvukovou signalizaci. Zapnutím napájení cívky se sepnuly kontakty. Za pomoci měřicí váhy se vyvíjel tah na kontakt. Ve chvíli, kdy multimetr přestal vydávat zvuk, došlo k rozpojení kontaktu a byla zapsána aktuální hodnota hmotnosti, ze které se následně určila přítláčná síla. Toto měření se provedlo pro oba stykače.

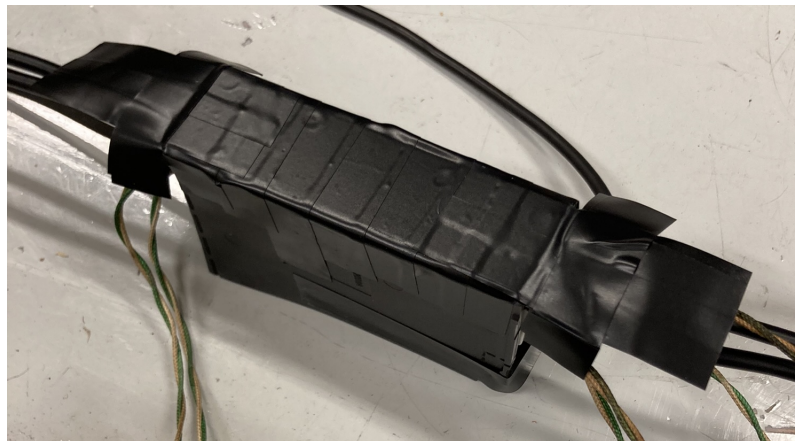
7.3 Měřené body

Tab. 7.2: Popis měřených bodů při měření oteplení kontaktů instalačních stykačů

Označení bodů	Popis umístění
θ_1	Svorka 1
θ_2	Svorka 2
θ_3	Svorka 3
θ_4	Svorka 4
θ_{1-2}	Kontakty mezi svorkami 1 a 2
θ_{3-4}	Kontakty mezi svorkami 3 a 4
θ_7 a θ_8	Měření okolní teploty



Obr. 7.2: Rozmístění termočlánků při měření oteplení kontaktů



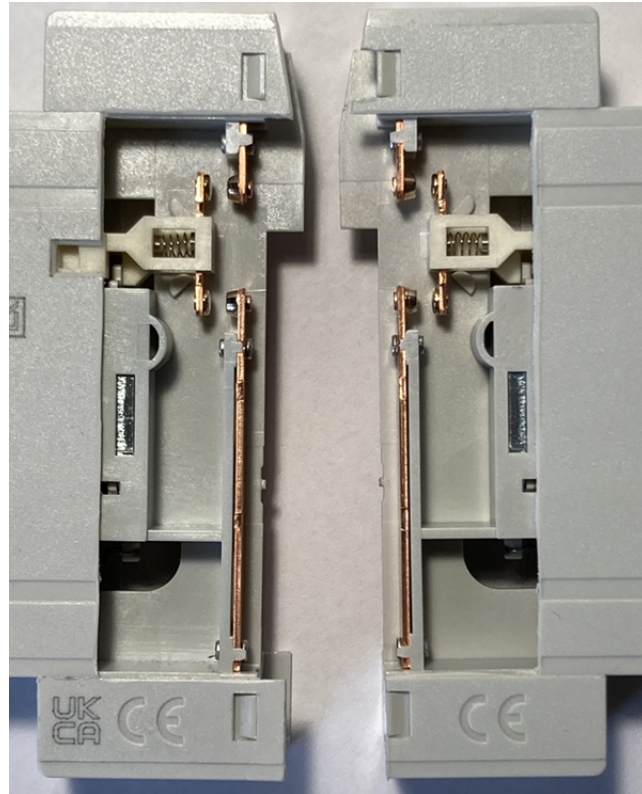
Obr. 7.3: Zakryté kontakty stykače Sa1

7.4 Kontaktní systém

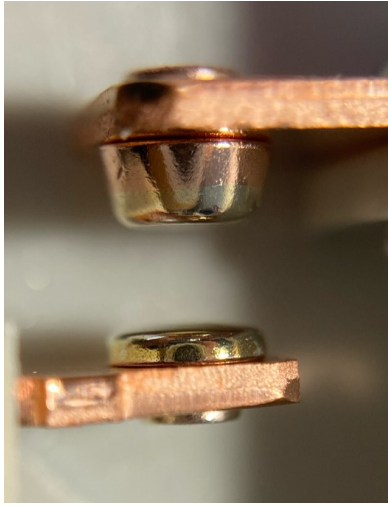
Z obrázku 7.4 je patrné, že instalační stykače obsahují čelní můstkový kontaktní systém. Vlevo se nachází stykač Sa1 a vpravo stykač Sa2.

Skladba vrchních kontaktů je zaznamenána na obrázcích 7.5 a 7.6. Podklad kontaktu je složen z mědi, se kterou jsou spojeny zkoušené materiály, vykazující lepší odolnost oproti mědi. Jediným viditelným rozdílem mezi těmito částmi kontaktu je, že kontakt materiálu AgNi má po celém obvodu mědi vytvořenou drážku.

Detail stykového místa na spodních kontaktech je pro oba materiály zobrazen na obrázcích 7.7 a 7.8. Pohled mikroskopem na tyto kontakty je pak na obrázcích 7.9 a 7.10. Mezi materiály je patrný rozdíl ve složení. AgSnO_2 má hrudkovitý povrch, což by odpovídalo jeho výrobě práškovou metalurgií [12]. AgNi se vytváří také práškovou metalurgií, ale tento materiál je více homogenní a hustší, což lze pozorovat i na uvedeném obrázku [15, s. 939].



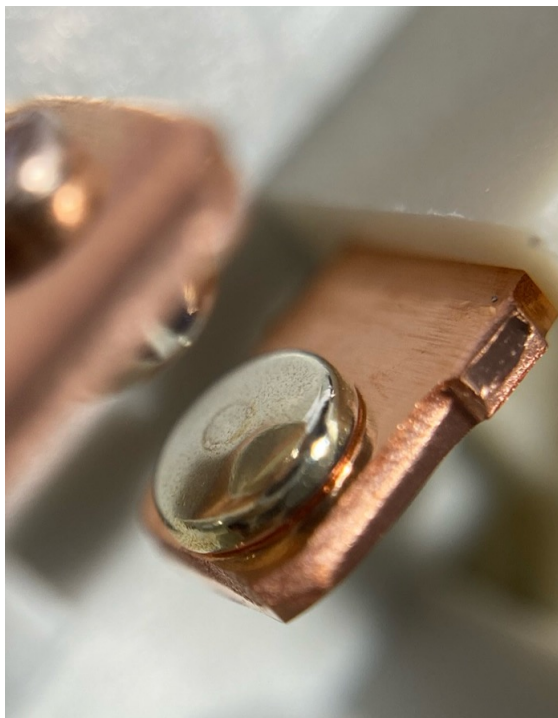
Obr. 7.4: Kontaktní systém instalačních stykačů



Obr. 7.5: Detail kontaktu instalačního stykače Sa1 (AgSnO_2)



Obr. 7.6: Detail kontaktu instalačního stykače Sa2 (AgNi)



Obr. 7.7: Detail stykového místa spodního kontaktu stykače Sa1 (AgSnO_2)



Obr. 7.8: Detail stykového místa spodního kontaktu stykače Sa2 (AgNi)



Obr. 7.9: Pohled mikroskopem na spodní kontakt stykače Sa1 (AgSnO_2)



Obr. 7.10: Pohled mikroskopem na spodní kontakt stykače Sa2 (AgNi)

7.5 Naměřené a vypočtené hodnoty

Okolní podmínky před zahájením oteplovací zkoušky instalačních stykačů byly následující: teplota $23,3\text{ }^\circ\text{C}$, tlak $995,6\text{ hPa}$ a relativní vlhkost $27,8\text{ }\%$.

Oteplení stykačů je vztaženo k průměrné hodnotě teploty z termočlánků θ_7 a θ_8 , které byly umístěné v metrové vzdálenosti od přístrojů.

Průběhy oteplení stykače Sa1 jsou zobrazeny na obrázku 7.11, podle hodnot z tabulek B.11 a B.12 obsažených v příloze B. Termovizní snímek pro tento stykač je na obrázku 7.14. Stykači Sa2 odpovídají průběhy na obrázku 7.12, shodné s hodnotami v tabulkách B.13 a B.14 z přílohy B, společně se zobrazením termovizního snímku na obrázku 7.15.

Termovizní snímky byly pořízené ze společné strany stykačů. Aby kontakty byly umístěné na stejné straně, je obrázek 7.14 zrcadlově obrácený. Pro lepší porovnání je vložen i termovizní snímek 7.16, kde se nacházejí oba stykače najednou. V levé části obrázku je stykač Sa1 a v pravé části stykač Sa2.

Po dosažení ustálené hodnoty oteplení na stykačích byl změřen úbytek napětí U_m (V) na kontaktních můstcích stykačů. Polovina z této hodnoty je pak úbytek napětí U_k (V) na jednom kontaktu. Změřené hodnoty úbytku napětí společně s velikostmi proudů hlavním obvodem jsou zapsané v následující tabulce 7.3. Úbytek napětí nebyl měřen přímo na jednom kontaktu, protože by během měření mohlo snadněji dojít ke změně stykové plochy, což by ovlivnilo odpor ve styku. Z hodnot U_k a I_{hl} se vypočetla hodnota stykového odporu stejným způsobem jako ve výpočtu 6.1, podle Ohmova zákona. Průměrná hodnota stykového odporu kontaktu stykače Sa1 vyšla $0,497\text{ m}\Omega$ a stykače Sa2 $0,973\text{ m}\Omega$.

Tab. 7.3: Měření úbytku napětí na kontaktech instalačních stykačů

Měřený můstek	U_m (mV)	U_k (mV)	I_{hl} (A)
Sa1 ₁₋₂	26,0	13,0	25,7
Sa1 ₃₋₄	25,0	12,5	25,6
Sa2 ₁₋₂	51,0	25,5	25,7
Sa2 ₃₋₄	49,0	24,5	25,7

Následně došlo k zakrytí stykače Sa1 podle obrázku 7.3. Oteplení se začalo z ustálené hodnoty exponenciálně zvyšovat na novou hodnotu ustáleného oteplení. Tento průběh je na obrázku 7.13 odpovídající hodnotám v tabulkách B.15 a B.16 v příloze B.

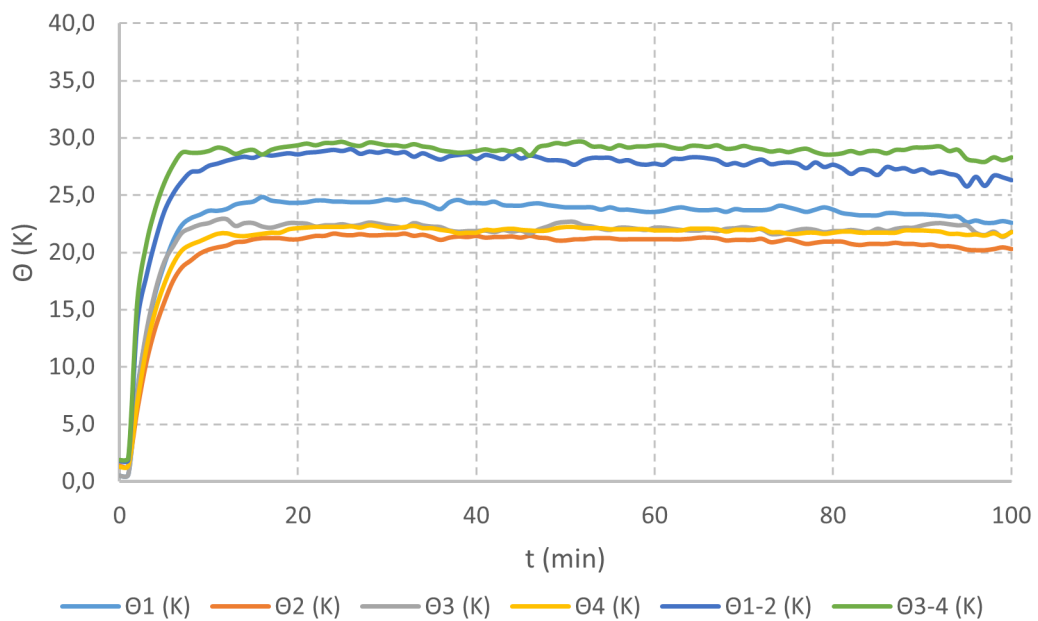
Na závěr měření se změřila přítláčná síla jednoho kontaktu na obou stykačích. Z hmotnosti m_{hm} (kg), změřené vahou tahem, se vypočítala přítláčná síla podle následujícího vzorce

$$F_k = m_{hm}g \quad (7.1)$$

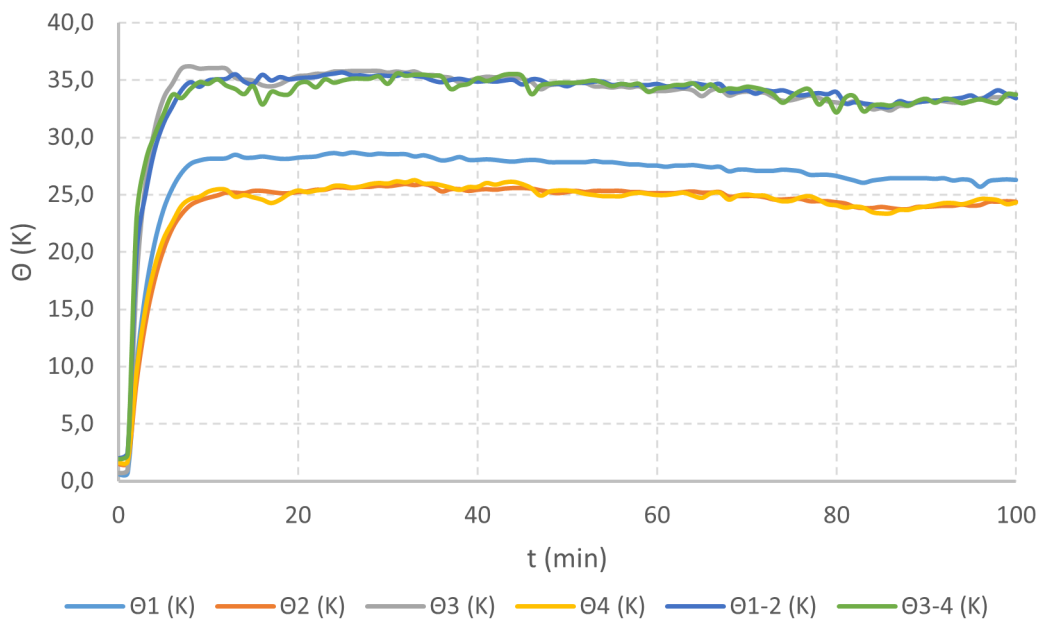
, kde g ($m \cdot s^{-2}$) je tíhové zrychlení, které je rovno $9,81 m \cdot s^{-2}$ [31]. Na obou stykačích byla změřena hmotnost tahu $0,02$ kg, což odpovídá přítláčné síle $0,196$ N. Příklad výpočtu pro stykač Sa1 je následující

$$F_k = 0,02 \cdot 9,81 = 0,196 \text{ N.} \quad (7.2)$$

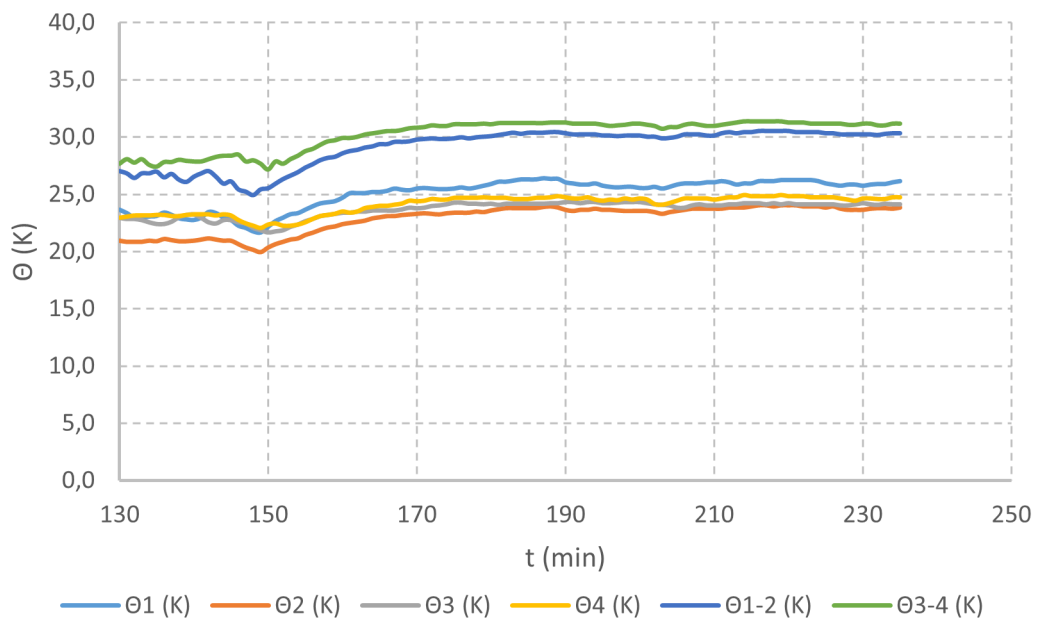
Prakticky zjištěné hodnoty přítláčné síly jsou dosazeny do teoretického výpočtu 2.7. Výsledkem je teoretická hodnota stykového odporu, která pro stykač Sa1 vychází $1,06 m\Omega$ a pro stykač Sa2 $0,85 m\Omega$. Výše zmíněný změřený odpor vycházel pro stykač Sa1 $0,497 m\Omega$ a pro stykač Sa2 $0,973 m\Omega$. Změřená hodnota stykače Sa1 tudíž vyšla nižší než teoretická a u stykače Sa2 vychází změřená hodnota sice vyšší, ale blízká hodnotě teoretické. Vyšší prakticky změřená hodnota stykového odporu materiálu AgNi stykače Sa2 oproti teoreticky vypočtené hodnotě, by mohla poukazovat na vliv oxidačních vrstev niklu. Problémem je, že teoretický výpočet podle vzorce 2.6 nebere v potaz vliv cizích vrstev a další vlastnosti materiálu, jak by tomu bylo v případě vzorce 2.4. Jenže tento druhý zmíněný vzorec nelze aplikovat, protože pro použité vícesložkové materiály není určen součinitel k_n .



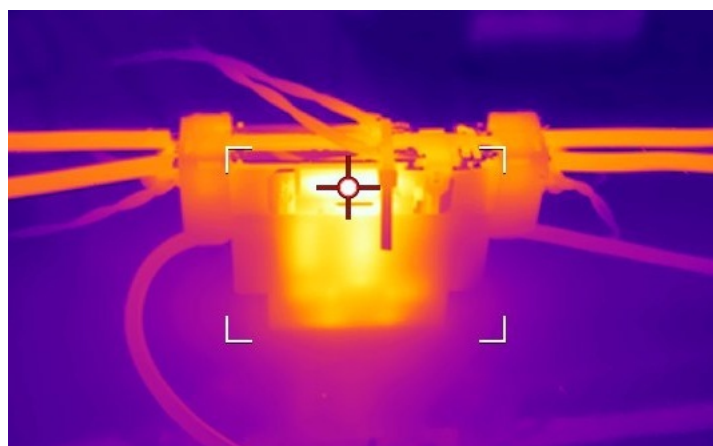
Obr. 7.11: Průběh oteplení kontaktů instalačního stykače Sa1 (AgSnO_2)



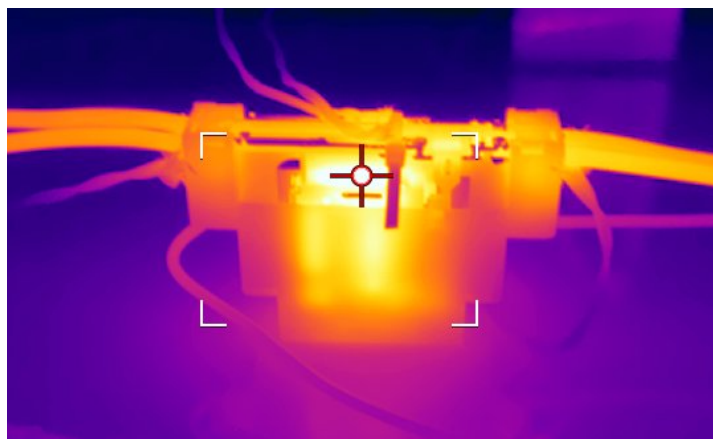
Obr. 7.12: Průběh oteplení kontaktů instalačního stykače Sa2 (AgNi)



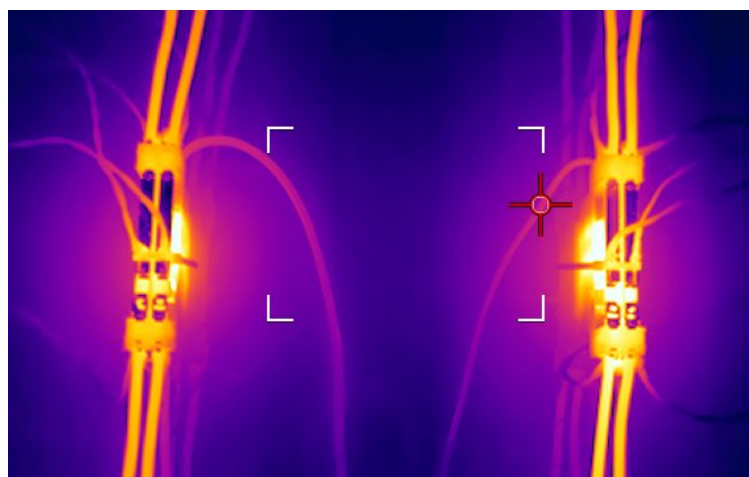
Obr. 7.13: Průběh oteplení kontaktů zakrytého instalačního stykače Sa1



Obr. 7.14: Termovizní snímek kontaktů instalačního stykače Sa1



Obr. 7.15: Termovizní snímek kontaktů instalačního stykače Sa2



Obr. 7.16: Termovizní snímek obou instalačních stykačů

7.6 Vyhodnocení měření

Tato zkouška měla tu výhodu, že oběma stykači procházel proud o stejné velikosti. Není zde tedy potřeba provádět korekci jak v rámci předešlé zkoušky. Z grafů průběhů oteplení na obrázcích 7.11 a 7.12 je na první pohled patrné, že vyššího oteplení dosáhl stykač Sa2 s materiálem kontaktu AgNi, oproti stykači Sa1 s materiálem AgSnO₂, který měl oteplení nižší. Maximální dosažené hodnoty oteplení jsou prezentované v tabulce 7.4. Největší rozdíl mezi maximálními dosaženými teplotami v blízkosti kontaktů mezi stykači dosáhl hodnoty 6,7 K. V této zkoušce se potvrdil náznak vyššího oteplení stykače Sa2 s materiálem kontaktů AgNi, který bylo možné pozorovat v předešlé zkoušce instalačních stykačů.

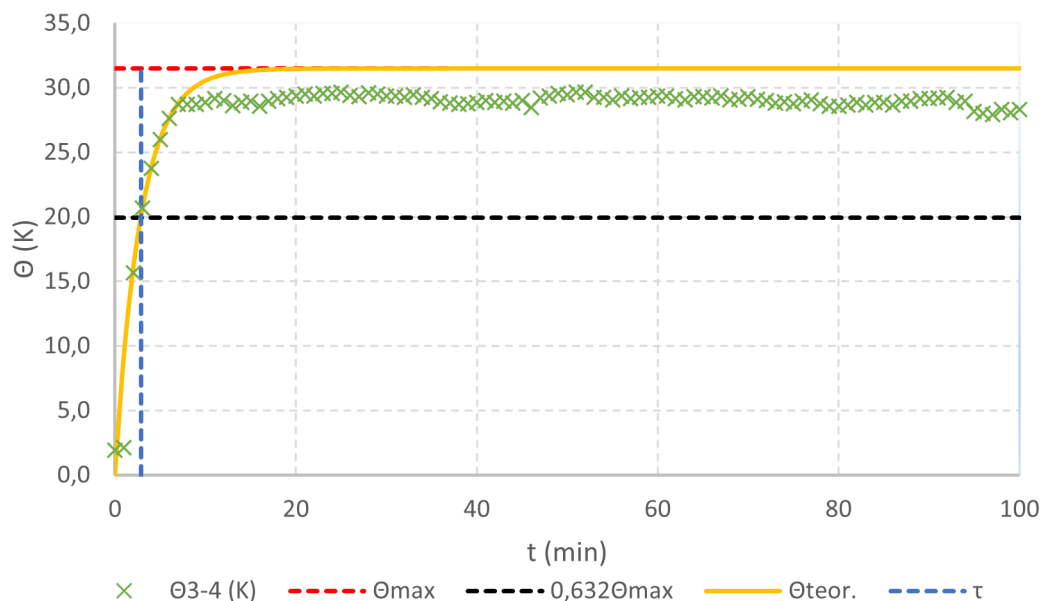
Tab. 7.4: Maximální dosažené oteplení měřených bodů instalačních stykačů

Měřený bod	Max. oteplení Sa1 (K)	Max. oteplení Sa2 (K)
Θ_{1-2}	29,0	35,7
Θ_{3-4}	29,7	35,6
Θ_1	24,9	28,7
Θ_2	21,7	26,0
Θ_3	22,9	36,2
Θ_4	22,4	26,3

Oteplení stykače Sa2 dosáhlo vyšších hodnot oteplení. Vliv na to mohlo mít uskladňování mezi zkouškami, kdy došlo k vytvoření oxidových vrstev na niklu způsobených vodními parami v ovzduší. Tyto vrstvy rychle narůstají, což způsobuje rychlý nárůst stykového odporu. Nevýhodou je, že se nedají jednoduše odstranit, kvůli vysoké odolnosti. [5, s. 179] Tuto myšlenku podporují i změřené hodnoty stykových odporů, které vycházejí vyšší pro stykač Sa2 (AgNi) oproti stykači Sa1 (AgSnO₂). Přesný opak byl předpokládán podle teoretických výpočtů v podkapitole 2.1.4 a i předešlá zkouška vyšla s mírně vyšším stykovým odporem stykače Sa1 (obrázek 6.6). Jenže teoretický výpočet neobsahuje vliv cizích vrstev, které se v tomto případě s největší pravděpodobností vyskytly. A časový rozestup mezi zkouškami mohl podpořit vytvoření oxidových vrstev na materiálu. Tudíž vyšší hodnota stykového odporu stykače Sa2 s materiálem kontaktů AgNi zapříčinila vyšší oteplení oproti stykači Sa1 s materiálem kontaktů AgSnO₂.

U stykače Sa1 (viz obrázek 7.11) se u termočlánu 3-4 v 7. minutě zkoušky oteplení přestalo řídit dosavadním exponenciálním průběhem a místo toho se začalo skokově ustalovat podle nové exponenciály s nižším maximálním oteplením. Pravděpodobnou příčinou bylo to, že kontaktní plochy mezi sebou zprvu nevytvořily dokonalé spojení, což bylo způsobené nerovností povrchu po předchozím dotyku a následným znovudosednutím na mírně odlišné místo. Tím došlo ke zvýšení teploty až na mez měknutí, následné deformaci materiálu a dokonalejšímu spojení kontaktu, což skokově snížilo stykový odpor i velikost oteplení. Kdyby průběh oteplení probíhal podle původní exponenciály, tak by maximální hodnota oteplení dosáhla přibližně 31,5 K, oproti změřeným 29,0 K. Je to patrné z obrázku 7.17, kde byl pomocí rovnice okamžitého oteplení (1.5) vynesena teoretická exponenciální průběh oteplení $\Theta_{\text{teor.}}$. Ten kopíruje původní exponenciální průběh před okamžikem měknutí materiálu. Časová konstanta τ teoretického průběhu, zjištěná aproximací, činí 2,8 minuty. Průměrný rozdíl mezi maximální teoretickou a změřenou hodnotou oteplení je 1,5 K. Příklad výpočtu pro 10. minutu teoretického průběhu je

$$\Theta_{\text{teor.}} = 31,5 \cdot (1 - e^{-\frac{10}{2,8}}) = 30,6 \text{ K.} \quad (7.3)$$



Obr. 7.17: Teoretický průběh oteplení kontaktu 3-4 instalačního stykače Sa1

Zajímavostí je, že v předchozí zkoušce došlo u stejného stykače Sa1 ke skokové změně stykového odporu téměř ve stejném čase měření, jako nastala změna nárůstu oteplení na obrázku 7.17. Je to patrné z obrázku 6.6 a dále popsáno v podkapitole 6.5, kde je rovněž zmiňován vliv měknutí materiálu kontaktů.

Svorky 2 a 4 dosahují nižšího oteplení oproti svorkám 1 a 3 z toho důvodu, že se nacházejí ve větší vzdálenosti od kontaktů. Rozdíl v otepleních mezi termočlánky (1-2 a 3-4) umístěných na kontaktech a termočlánky (2 a 4) spodních svorek zobrazuje tepelný spád na měděném vodiči. U zakrytého stykače Sa1 se tento spád pohybuje v průměru okolo 6,3 K pro pól mezi svorkami 1 a 2 a 6,1 K pro pól mezi svorkami 3 a 4.

Zajímavým měřeným bodem je termočlánek připevněný ke svorce 3 stykače Sa2. Tato svorka dosáhla v několika momentech ještě vyššího oteplení než měřená místa v blízkosti kontaktů. Průběh oteplení této svorky se podobá právě oteplení na kontaktech, což by znamenalo, že spoj mezi připojeným vodičem a svorkou musí mít podobný, nebo dokonce vyšší, stykový odpor jako v případě kontaktního styku. Mezi termočlánky na sousedních svorkách 1 a 3 je v době měření termokamerou rozdíl v teplotách 6,2 °C. Při vyhodnocení termovizního snímku softwarem Thermal Studio od společnosti Flir byl zjištěn rozdíl v teplotách 6,1 °C. Nejedná se tedy o chybu v měření. To, že se hlavní obvod nachází na spodku stykače a šroubové svorky na druhém znamenalo, že obvod byl nejdříve smontován a poté celý přetočen, aby odkrytý hlavní obvod směřoval vzhůru. V momentě otáčení pravděpodobně došlo

k tomu, že se vodič ve svorce mírně pohnul, což snížilo velikost přitlačné síly, zvýšilo odpor ve styku, a to způsobilo vyšší oteplení v tomto místě.

Ze společného termovizního snímku na obrázku 7.16 je patrné, že vyššího oteplení dosáhl pravý stykač Sa2. Na snímku lze pozorovat vliv nízké emisivity materiálu, neboť měděný vodič, který má ve skutečnosti vysokou teplotu, se na snímku jeví jako chladný. Důvodem je nízká emisivita lesklého měděného materiálu. Z tohoto důvodu byly na měděný vodič v oblasti svorek 1 a 3 nalepeny matné černé nálepky, jejichž barva už odpovídá teplotě vodiče a respektive kontaktů. Největším zdrojem tepla se u stykačů však stávají jejich cívky.

Nezakryté stykače dosáhly svého ustáleného oteplení po 25 minutách zkoušky. Hodnota oteplení nejdříve vzrostla na své maximum a následně pozvolna klesala s mírně se zmenšující velikostí proudu. Problém s ustálením oteplení byl i z toho důvodu, že měřené části byly vystavené vlivu okolí a nebylo tak úplně možné dosáhnout toho, aby se oteplení všech částí nezměnilo o více než 1 K během jedné hodiny. Z tohoto důvodu byla tato část zkoušky přerušena po 100 minutách. Při zakrytí stykače Sa1 krytem se omezilo ochlazování do okolí a ustálené hodnoty bylo dosaženo také po 25 minutách.

Vzhledem k odlišným hodnotám stykových odporů mezi materiály AgNi a AgSnO₂ a následně i k rozdílným velikostem oteplení je možné říci, že druh materiálu kontaktního systému má vliv na velikost oteplení stykače. Zkouškou bylo zjištěno, že materiál AgSnO₂ má menší vliv na oteplení než materiál AgNi, a to i navzdory jeho vyššímu teoreticky vypočítanému stykovému odporu. Největší vliv na stykový odpor a oteplení materiálu AgNi mají pravděpodobně oxidové vrstvy niklu způsobené vzdušnou vlhkostí. Z tohoto důvodu je vhodnější pro zátěže s velkým počátečním proudem vybrat materiál AgSnO₂ díky jeho menšímu vlivu na oteplení stykače a zároveň kvůli jeho větší odolnosti.

Závěr

První kapitola práce je zaměřena na obecné pojetí vzniku tepla způsobeného průchodem elektrického proudu. Řešeny jsou tepelné ztráty vznikající uvnitř vodiče a také to, jak je teplo předáváno do okolí, případně jak se ve vodiči akumuluje a zvyšuje tak jeho teplotu. Tato problematika je pak úzce spjata s průběhem oteplovací charakteristiky.

V následující kapitole jsou přiblíženy jednotlivé zdroje oteplení elektromagnetického stykače. Nejdříve je objasněna samotná funkce a využití tohoto elektrického přístroje. Hlavní pozornost je věnována vzniku tepla v kontaktním styku. Jsou popsány jednotlivé požadavky kladené na kontaktní systém, vliv přítláčné síly a působení stykového odporu na velikost oteplení. Stykový odpor je dále členěn na úžínový odpor a odpor cizích vrstev, přičemž je vysvětlena jejich povaha, princip vzniku a možnosti odstranění. V této souvislosti jsou charakterizovány vlastnosti materiálů používaných pro výrobu kontaktů, zejména stříbra, mědi a niklu. Jsou specifikovány materiálové vlastnosti i pro AgNi a AgSnO₂, které jsou v rámci této práce porovnávány. U materiálu AgNi je poukázáno na náchylnost k oxidaci niklu v přítomnosti vzdušné vlhkosti, což může vést ke zhoršení kvality kontaktního styku [5, s. 179].

Pro tyto dva kontaktní materiály je v podkapitole 2.1.4 vyjádřena teoretická závislost stykového odporu na přítláčné síle. Výsledkem je, že vypočtený stykový odpor materiálu AgNi je nižší oproti materiálu AgSnO₂. Tyto teoretické výpočty však nezohledňují vliv cizích vrstev a tedy ani oxidace materiálů.

Následuje část zabývající se měřením teploty, kde je vysvětlen rozdíl mezi teplem a teplotou. Senzory jsou rozděleny podle konkrétních principů měření a je přiblíženo jejich rozčlenění. Práce je zaměřena na senzory teploty, které se jeví jako nejvhodnější pro analýzu oteplení stykače. Těmi jsou kovové odporové a termoelektrické snímače teploty společně s termografií. Senzory jsou pak podrobněji definovány v jednotlivých podkapitolách. Je řešen jejich princip, vlastnosti, konstrukce a jsou zmíněny výhody a nevýhody. V případě termovize jsou navíc zdůrazněny skutečnosti, kterým je nutné věnovat zvláštní pozornost, aby měření nebylo negativně ovlivněno.

Normativní požadavky oteplovacích zkoušek jsou shrnuty v kapitole 4. Jedná se o normy ČSN EN IEC 60947-4-1 ed. 4 pro stykač LSD2503 a ČSN EN 61095 ed. 2 pro instalační stykače. Náplní je sepsání pravidel pro provedení zkoušek, jako jsou parametry okolí, způsob zapojení hlavního obvodu, instalace přístroje, napájení, měření teploty jednotlivých částí a následné vyhodnocení.

Kapitola 5 je soustředěna na provedení oteplovací zkoušky elektromagnetického stykače LSD2503. Je popsán průběh zkoušky, znázorněno schéma zapojení, určeny konkrétní měřené body a vypsány veškeré měřené hodnoty v tabulkách, následně zpracovaných do grafu. Výsledná data jsou porovnána s normativními požadavky

oteplovací zkoušky. Výsledkem je, že elektromagnetický stykač LSD2503 vyhověl všem požadavkům této zkoušky.

V této souvislosti se další kapitola věnuje provedení oteplovacích zkoušek na instalačních stykačích. Postup je shodný s předešlou zkouškou stykače LSD2503. Z výsledků zkoušek vyplývá, že oba instalační stykače také vyhovely požadavkům stanoveným příslušnou normou. Vzhledem k rozdílným velikostem proudů instalačními stykači je použita početní korekce, díky které se hodnoty oteplení převedou na stejnou velikost procházejícího proudu. Z těchto výsledků je patrné, že mírně vyššího oteplení bylo dosaženo u stykače s materiálem kontaktů AgNi.

Pro přesnější vyhodnocení vlivu materiálu kontaktů na oteplení stykačů je provedena v závěrečné kapitole dodatečná oteplovací zkouška, při níž mají instalační stykače odstraněny kryty v okolí kontaktních systémů. Je zachován stejný postup zkoušky jako v předešlých případech. Navíc se oteplení měří v co největší blízkosti kontaktního styku. Stykače jsou zapojeny do série, aby oběma přístroji procházející proud měl stejnou velikost. V této zkoušce znovu dosáhl vyššího oteplení stykač s materiálem kontaktů AgNi, což potvrzuje předešlé výsledky. Vliv na to s největší pravděpodobností mají oxidační vrstvy niklu vytvořené vzdušnou vlhkostí [5, s. 179], které mohly zvýšit hodnotu stykového odporu a přispět tak k vyššímu oteplení. Na zvýšení stykového odporu poukazují i naměřené hodnoty poslední oteplovací zkoušky v podkapitole 7.5. Nicméně zkouškou naměřené hodnoty v kapitole 6 i teoretické výpočty v podkapitole 2.1.4 poukazují na přesný opak, a sice ten, že vyšší stykový odpor má materiál AgSnO_2 . V případě teoretického výpočtu může být tento rozpor vysvětlen nezohledněním vlivu cizích vrstev. Měření stykového odporu v kapitole 6 má jistou nevýhodu, konkrétně že je měřen úbytek napětí celé proudovodné dráhy stykače, což může velmi zneřádnit určení velikosti stykových odporů. Hodnoty stykových odporů v kapitole 7 jsou získány z úbytků napětí změřených přímo na kontaktních místcích, a proto se dají považovat za přesnější.

Závěrem lze říci, že kontaktní materiál AgNi má ve srovnání s AgSnO_2 větší vliv na velikost oteplení elektromagnetických stykačů, a to pravděpodobně z důvodu vyššího stykového odporu, způsobeného tvorbou oxidačních vrstev na povrchu kontaktu vlivem vzdušné vlhkosti.

Při výběru mezi těmito dvěma stykači je nutné vzít v úvahu několik faktorů. Oteplení přístroje Sa2 (AgNi) dosáhlo vyšších hodnot, přičemž stále vyhovuje normativním požadavkům. Tento stykač je schopen spínat menší proudy a jeho cena je o více než 200 CZK vyšší. Podobný rozdíl v ceně lze pozorovat i u jiných prodejců. Výhodou tohoto instalačního stykače je jeho elektrická životnost, která je o 133 % vyšší oproti stykači Sa1 (AgSnO_2). Díky tomu se hodí do aplikací, které vyžadují častější spínání.

Literatura

- [1] SCHRACK. *Energie a Průmysl: Katalog Stykače a motorové spínače*. Online. In: Schrack Technic. Dostupné z: https://image.schrackcdn.com/kataloge/k-schuecz8_cz/html5forpc.html?page=232. [cit. 2024-12-18].
- [2] *Katalogový list: Řada 22 - instalační stykače* Online. In: Findernet. Dostupné z: <https://cdn.findernet.com/app/uploads/S22CS.pdf>. [cit. 2025-03-05].
- [3] POPELA, Patrik. *Ochrana rozváděčů před vlivem kondenzace vody a klimatickými podmínkami*. Online. GHV TRADING, SPOL. S R.O. ElektroPrůmysl.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/elektroinstalace/ochrana-rozvadecu-pred-vlivem-kondenzace-vody-a-klimatickymi-podminkami>. [cit. 2024-12-16].
- [4] GROSS, Martin. *Sledování vlhkosti v rozváděčích*. Online. GHV TRADING, SPOL. S R. O. Odbornecasopisy.cz. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/sledovani-vlhkosti-v-rozvadecich--11987>. [cit. 2024-12-16].
- [5] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje: učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985. Dostupné také z: <https://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:e2cb1000-c461-11e7-9c14-005056827e51>.
- [6] *ČSN EN IEC 60947-1 ed. 5 (354101) Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 1: Obecná ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2021. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [7] NOVOTNÝ, Vladimír. *Elektrické přístroje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02306-0.
- [8] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Senzory neelektrických veličin*. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [9] Teplotní závislost odporu kovových vodičů. Online. *Elektro časopis pro elektrotechniku*. Roč. 2008, č. 1, s. 1. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/teplotni-zavislost-odporu-kovovych-vodicu--11677>. [cit. 2024-10-03].
- [10] RUSŇÁK, Štěpán a ŘEZÁČEK, Petr. *Elektrické přístroje 1. 2. přeprac. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. ISBN 80-7082-825-0.

- [11] BUL', Boleslav Kazimirovič. *Elektrické přístroje: základy teorie*. Online. Řada elektrotechnické literatury. Praha: SNTL, 1977. Dostupné z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:38d8fa90-7771-11e2-abbe-005056827e51>. [cit. 2025-03-12].
- [12] FINDER. *Relay contact materials – does it really matter?* Online. Finder. 19 October 2023. Dostupné z: <https://www.findernet.com/en/uk/news/relay-contact-materials-does-it-matter/>. [cit. 2025-03-20].
- [13] HOWARD, David. *Electrical contact material selection*. Online. Repco. Dostupné z: <https://www.repcoinc.com/about/blog/Electrical-contact-material-selection-bd.html>. [cit. 2025-03-14].
- [14] WANG, Haitao et al. First-principles and experimental investigations on physical properties and arc erosion behavior of metal-doped AgSnO₂ electrical contact materials. Online. *Ceramics International*. 2023, vol. 49, no. 15, s. 26033-26048. ISSN 0272-8842. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884223014128>. [cit. 2025-03-13].
- [15] SLADE, Paul G. *Electrical contacts: principles and applications*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. ISBN 978-1-4398-8130-9.
- [16] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. V Brně: VUTIUM, 2000, s. 496-517. ISBN 80-7196-213-9. Dostupné také z: <https://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:e34772c0-c714-11e2-9592-5ef3fc9bb22f>.
- [17] ŠPRINGL, Vít. Měření teploty - kovové odporové senzory teploty. Online. *Vyvoj.hw.cz*. 2004. ISSN 1803-6392. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>. [cit. 2024-10-13].
- [18] ĎAĎO, Stanislav a KREIDL, Marcel. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02057-6.
- [19] HEŘMAN, Josef. Vývoj názorů na podstatu elektřiny. Online. *Elektro časopis pro elektrotechniku*. Roč. 2004, č. 3, article 39, s. 8.2. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyvoj-nazoru-na-podstatu-elekriny-39--14152>. [cit. 2024-10-19].
- [20] KABEŠ, Karel. Význam termoelektrických generátorů rychle roste. Online. *Elektro časopis pro elektrotechniku*. Roč. 2011, č. 4. Dostupné z:

- <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyznam-termoelektrickych-generatoru-rychle-roste--9847>. [cit. 2024-10-20].
- [21] *Thermocouple Type K (NiCr-Ni)*. Online. SAB Bröckskes. Dostupné z: <https://www.sab-cable.com/cables-wires-harnessing-temperature-measurement/technical-data/mineral-insulated-thermocouples/thermocouple-type-k.html>. [cit. 2025-04-08].
- [22] SUPERBHEATER TECHNOLOGY. *What are the characteristics of each of the K, E, J, T and other indexing thermocouples?* Online. Shenzhen Superb Heater Technology Co.,Ltd. 20 Jan 2019. Dostupné z: <https://www.superbheater.com/info/what-are-the-characteristics-of-each-of-the-k-32068302.html>. [cit. 2025-03-28].
- [23] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot. Senzory neelektrických veličin*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-180-2.
- [24] DÍTĚ, Ivan. *Bezkontaktní infračervené teploměry*. Online. *Elektro časopis pro elektrotechniku*. Roč. 2004, č. 7. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bezkontaktni-infracervene-teplomery--14006>. [cit. 2024-10-22].
- [25] ÚNMZ. *Často kladené otázky - Technická normalizace*. Online. UNMZ. Dostupné z: <https://www.unmz.cz/caste-dotazy/casto-kladene-otazky-technicka-normalizace/>. [cit. 2024-10-29].
- [26] ČESKO. Nařízení vlády č. 118/2016 Sb., o posuzování shody elektrických zařízení určených pro používání v určitých mezích napětí při jejich dodávání na trh. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-118> [cit. 2024-10-29].
- [27] *ČSN EN IEC 60947-4-1 ed. 4 (354101) Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 4-1: Stykače a spouštěče motorů - Elektromechanické stykače a spouštěče motorů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [28] *ČSN EN 61095 ed. 2 (354151) Elektromechanické stykače pro domácnost a podobné účely*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [29] *Online katalog: Stykač 50A/22kW/400V,3p./230VAC: Stykače LSD pro spínání motorů*. Online. In: Schrack Technic. Dostupné z: <https://image>.

schrackcdn.com/kataloge/k-schuecz8_cz/html5forpc.html?page=233.
[cit. 2024-11-24].

- [30] KŘÍŽ, Michal. *Dimenzování elektrického vedení z hlediska jeho oteplení*. Online. In-el. 2008. Dostupné z: <https://www.in-el.cz/referat/101205/dimenzovani-elektrickeho-vedeni-z-hlediska-jeho-otepleni-nove-prispevky-17-7-2009>. [cit. 2025-03-11].
- [31] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA, Martin. *Gravitační a tíhová síla (resp. zrychlení)*. Online. Encyklopedie fyziky. 2012. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/60-gravitacni-a-tihova-sila-resp-zrychleni>. [cit. 2025-03-22].

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

CE	prohlášení o shodě
AgSnO ₂	kontaktní materiál ze stříbra s oxidem ciničitým
AgNi	kontaktní materiál ze stříbro - niklu

Symboly:

I	elektrický proud	(A)
R	elektrický odpor	(Ω)
R_{100}	elektrický odpor při 100 °C	(Ω)
R_0	elektrický odpor při 0 °C	(Ω)
l	délka vodiče	(m)
ρ	elektrická rezistivita	(Ω m)
ρ_{rf}	referenční elektrická rezistivita	(Ω m)
ρ_{20}	elektrická rezistivita při 20 °C	(Ω m)
S	průřez vodiče	(m ²)
Q	tepelné ztráty	(J)
t	čas	(s)
α_{rf}	teplotní součinitel odporu	(K ⁻¹)
α_{20}	teplotní součinitel odporu při 20 °C	(K ⁻¹)
θ	teplota	(°C)
θ_{rf}	referenční teplota	(°C)
Θ	oteplení	(K)
Θ_{∞}	ustálené oteplení	(K)
α_0	součinitel přestupu tepla	(W m ⁻² K ⁻¹)
A	ochlazovací povrch	(m ²)

c	objemová tepelná kapacita	$(\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1})$
V	objem	(m^3)
τ	časová konstanta	(s)
k_{bl}	činitel blízkosti	(1)
F_{k}	přítlačná síla	(N)
R_{s}	stykový odpor	(Ω)
R_{u}	úžinový odpor	(Ω)
R_{p}	odpor cizích vrstev	(Ω)
k_{n}	součinitel místa styku kontaktů	(Ω)
m	exponent určující druh styku kontaktů	(1)
E_{p}	modul pružnosti v tahu	(Pa)
n	počet stykových plošek kontaktního spoje	(1)
r_{k}	poloměr koule	(m)
H	tvrdost materiálu kontaktu	(N m^{-2})
W	poměr odporů	(1)
E	elektromotorické napětí	(V)
S_{k}	Seebeckův koeficient	(V K^{-1})
α_{k}	termoelektrický koeficient	(V K^{-1})
ε	emisivita	(1)
R_{c}	Odpor cívky za studena	(Ω)
R_{h}	Odpor cívky za tepla	(Ω)
θ_{c}	Teplota cívky za studena	$(^{\circ}\text{C})$
θ_{h}	Teplota cívky za tepla	$(^{\circ}\text{C})$
Θ_{C}	Oteplení cívky	(K)
θ_{AMB}	Teplota okolí (průměrná)	$(^{\circ}\text{C})$

I_{th}	Smluvený tepelný proud bez krytu	(A)
I_e	Jmenovitý pracovní proud	(A)
I_L	Proud cívky instalačního stykače	(A)
U_L	Napětí cívky instalačního stykače	(V)
R_L	Odpor cívky instalačního stykače	(Ω)
θ_L	Teplota cívky instalačního stykače	($^{\circ}\text{C}$)
Θ_L	Oteplení cívky instalačního stykače	(K)
R_s	Stykový odpor	(Ω)
U_{3-4}	Úbytek napětí na kontaktním můstku 3-4 instalačního stykače	(V)
U_{kont}	Úbytek napětí jednoho kontaktu instalačního stykače	(V)
I_{hl}	Proud hlavním obvodem instalačního stykače	(A)
$\Theta_{Sa2;red}$	Redukované oteplení stykače Sa2	(K)
Θ_{Sa2}	Neredukované oteplení stykače Sa2	(K)
Θ_{Sa1}	Neredukované oteplení stykače Sa1	(K)
I_{Sa2}	Proud stykačem Sa2	(A)
I_{Sa1}	Proud stykačem Sa1	(A)
U_m	Úbytek napětí na můstku instalačního stykače	(V)
U_k	Úbytek napětí na kontaktu instalačního stykače	(V)
m_{hm}	hmotnost	(kg)
g	tíhové zrychlení	(m s^{-2})

Seznam příloh

Přílohy jsou přiloženy v elektronické podobě.

A Příloha oteplení stykače LSD2503

B Příloha instalačních stykačů