

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nízkonákladový zatěžovací odporník

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Vít KUBÍN

Osobní číslo: E15B0071P

Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektrotechnika a energetika

Název tématu: Nízkonákladový zatěžovací odporník

Zadávající katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte analýzu trhu a specifikujte možnosti, jak realizovat odporovou zátěž 24V/30A. Uveďte cenové relace.
2. Navrhněte vlastní možnosti pro nízkonákladové řešení odporníku z dostupných materiálů.
3. Specifikujte cenu, rozměry, popř. další vlastnosti jednotlivých řešení.
4. Shrňte získané poznatky, porovnejte jednotlivá řešení z konstrukčního, praktického a finančního hlediska.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

1. <http://www.tesla-blatina.cz>


Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh nízkonákladového zatěžovacího odporníku. V práci jsou navrženy různé druhy rezistorů z běžně dostupných materiálů, které jsou porovnávány s dostupnými rezistory na trhu. K modelování těchto rezistorů je použit program Solidworks.

Klíčová slova

Rezistor, odporový materiál, odpor, oteplení, pasivní součástky, výkonový rezistor, nízkonákladový rezistor.

Abstract

This thesis describes the issue of low cost resistor. There are few different solutions of resistors, made from a common materials, that can be normally purchase. Those solutions are compared to resistors, that are commonly available on the market. Program used for modeling those resistor is named Solidworks.

Key words

Resistor, resistive material, resistance, heating, passive components, power resistor, low cost resistor

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 6.6.2018

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D.za cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a především za ochotu a čas, který strávil vedením mé práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 PASIVNÍ ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY	11
1.1 REZISTORY – ODPORY.....	11
1.1.1 Elektrická vodivost v kovech.....	12
1.2 PEVNÉ LINEÁRNÍ REZISTORY.....	13
1.2.1 Meze platnosti Ohmova zákona.....	13
1.2.2 Vliv parametrů na změnu odporu.....	15
1.2.3 Vlastní indukčnost a kapacita.....	18
1.2.4 Šum rezistoru.....	19
1.2.5 Druhy rezistorů.....	20
1.3 OTEPLENÍ PROUDOVÉ DRÁHY.....	23
1.3.1 Odvod tepla.....	23
1.3.2 Ochlazování vedením.....	24
1.3.3 Ochlazování prouděním.....	25
1.3.4 Ochlazování sáláním.....	26
2 PRŮZKUM TRHU	26
2.1 TESLA BLATNÁ, A.S.....	26
2.1.1 Výkonové drátové rezistory tmelené.....	27
2.2 SR PASSIVES.....	28
2.3 OHMITE.....	28
2.4 FAIRFIELD.....	29
3 VLASTNÍ NÁVRH REZISTORŮ	32
3.1 OBECNÝ POSTUP NÁVRHU.....	32
3.2 NÁVRH REZISTORU Z OCELOVÉHO DRÁTU.....	34
3.2.1 Optimalizace s ohledem na oteplení.....	35
3.3 NÁVRH REZISTORU Z OCELOVÉHO PLECHU.....	38
3.4 NÁVRH VODNÍHO REZISTORU.....	40
3.4.1 Válcový tvar.....	41
4 SHRUTÍ JEDNOTLIVÝCH DOSTUPNÝCH A NAVRŽENÝCH ŘEŠENÍ ODPOROVÉ ZÁTĚŽE	43
5 KONSTRUKCE REZISTORU	43
5.1 POPIS VLASTNÍ KONSTRUKCE.....	44
5.1.1 Konstrukce stojanu.....	44
5.1.2 Konstrukce izolátoru.....	45
5.1.3 Konstrukce háků.....	46
5.1.4 Konstrukce elektrické části.....	46
5.2 MĚŘENÍ NA REZISTORU.....	47
5.2.1 Měření odporu.....	47
5.2.2 Měření teploty.....	47
6 ZÁVĚR	50
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52

Úvod

Rezistory jsou využívány jako základní stavební součástka ve většině elektrických obvodů. Proto je třeba se věnovat jejich vlastnostem a možnostem jak ušetřit při jejich výrobě.

V této práci se zabývám problematikou návrhu zatěžovacího odporníku – rezistoru. V teoretické části jsou nejprve zpracovány vlastnosti odporových materiálů. Dále jsem uvedl funkci Ohmova zákona, který je základem pro funkci rezistorů v obvodech, a jeho meze platnosti. Na toto jsem navázal parametry, které mění velikost odporu, jako je například teplota. Další část teorie se zabývá parazitními vlastnostmi rezistorů, které jsou velmi důležité v závislosti na použití rezistoru. V další části jsem popsal konstrukční druhy rezistorů a jejich vlastnosti, které jsou důležité pro další představu při návrhu, či nákupu rezistoru. V neposlední řadě jsem zpracoval problematiku oteplení a ochlazování proudové dráhy, která nám určuje prostředí, ve kterém lze rezistor využít.

Praktická část mé práce je rozdělena na tři části. První část se zaměřuje na analýzu trhu s rezistory, tj. jaké výkonové rezistory lze koupit, jejich základní vlastnosti a jejich cenu. V druhé části se zabírám návrhem a výpočty různých typů rezistorů z běžně dostupných materiálů a vypracováním jejich modelů. V poslední části popíšu mnou zpracovanou konstrukci rezistoru, jež jsem vyrobil. Na závěr porovnáím výhodnost konstrukčních a ekonomických parametrů těchto rezistorů.

Seznam symbolů a zkratek

U	.....	napětí (V)
I	.....	elektrický proud (A)
R	.....	elektrický odpor (Ω)
V	.....	objem (m^3)
E	.....	intenzita elektrického pole (V/m)
J	.....	proudová hustota (A/m^2)
γ	.....	elektrická vodivost (S)
e	.....	elementární náboj
n	.....	koncentrace elektronů
μ_b	.....	pohyblivost nosičů náboje
m	.....	hmotnost (g)
τ	.....	časová konstanta (s)
Z	.....	impedance
δ	.....	hloubka vniku (m)
μ_0	.....	permeabilita vakua (H/m)
μ_r	.....	relativní permeabilita (H/m)
ω	.....	úhlová frekvence (rad/s)
ρ	.....	měrný odpor ($\Omega \cdot m^2/m$)
Θ	.....	absolutní teplota (K)
ϑ	.....	teplota (K)
Q	.....	Jouelovo teplo (K)
$\Delta \vartheta$	.....	oteplení (K)
α_k	.....	součinitel přestupu tepla ($\text{}$)
A	.....	chlazená plocha (m^2)
P	.....	činný výkon (W)
r	.....	řpoloměr (mm)
N	.....	počet závitů
B, d, c, e	.....	ostatní rozměry rezistoru (mm)

1 Pasivní elektronické součástky

Pasivní součástky jsou základní stavební prvky všech elektrických obvodů. Jejich elektrické vlastnosti jsou vyjádřitelné pomocí prvků se soustředěnými parametry. Základní charakteristikou těchto součástek je V-A charakteristika, jejímž typickým průběhem je funkce $I = f(U)$. Tato charakteristika je statická – lichá funkce \Rightarrow 1. a 3. kvadrant, symetrie dle počátku. [7], [1]

Základními pasivními součástkami jsou rezistory, kondenzátory, cívky, transformátory, piezoelektrické rezonátory a filtry. [2]

1.1 Rezistory – Odpor

Pro začátek si ujasníme názvosloví, jelikož výraz „elektrický odpor“ se používá ve dvojitým významu:

- Jako fyzikální vlastnost vodiče elektrického proudu nebo libovolné součástky v elektrotechnice, v níž se elektrická energie mění na teplo [2]
- Jako součástka, u níž proud I vyvolaný přivedeným napětím U nemá žádný jmenovitý fázový posun, pokud jsou parazitní vlastnosti (indukčnost L a kapacita C) dostatečně potlačeny. [2]
- Vlastnost (elektrický odpor) samozřejmě u součástky „odpor“ převládá nad všemi ostatními vlastnostmi. Pro další text budu používat výraz „odpor“ pouze pro označení veličiny a součástku budu nazývat rezistor. [2]

Obecná definice odporu je dána vztahem

$$R = \frac{U}{I} = \frac{V_2 - V_1}{I} = \frac{\int_1^2 E dl}{\int_S J dS} \quad (1.1)$$

kde $V_2 - V_1$ je rozdíl potenciálů, E intenzita elektrického pole, J proudová hustota a S plocha. [2]

Ze vztahu (1.1) je patrné, že odpor je závislý na uspořádání a na rozměrech elektrod, taktéž i na rozměrech a vlastnostech prostředí, v němž elektrické pole a proudová hustota vzniká.[2]

Pro výpočet odporu vodiče lze dále využít vztah pro výpočet odporu proudové dráhy:

$$R = \rho * \frac{l}{S} \quad (1.2)$$

Kde ρ ($\Omega \cdot m^2/m$) je měrný elektrický odpor, l (m) je délka proudové dráhy, S (m^2) je průřez vodiče.

1.1.1 Elektrická vodivost v kovech

Pro přibližnou představu použijeme úvahu z klasické fyziky. Podle této úvahy se mohou volné nosiče náboje vlivem elektrického pole pohybovat uvnitř krystalické mřížky. Pohyb je periodický a statický a urychluje se během volné dráhy. K omezení volné dráhy dochází při srážkách nosičů náboje s krystalickou mřížkou. Nosiče náboje ztrácejí energii s každou srážkou. Velikost volné dráhy je závislá na počtu poruchových míst v krystalické mřížce (bodové poruchy, dislokace, popř. atomy jiných prvků ve formě tzv. nečistot). Čím méně těchto míst krystalická mřížka obsahuje, tím je větší volná dráha. V kovech se uplatňují jako vodiče náboje pouze elektrony. [2], [1]

Výpočet vodivosti

$$\gamma = \sum_i e_i * n_i * \mu_{bi} = \sum_i \frac{e_i^2}{m_i} * n_i \tau_i \quad (1.3)$$

1.2 Pevné lineární rezistory

Vodiče vedou elektrický proud při všech teplotách a mají zpravidla kladný teplotní činitel odporu. [2]

Mezi okamžitými velikostmi napětí a proudu je u lineárních rezistorů přímá úměrnost; platí Ohmův zákon

$$J = \gamma * E \quad (1.4)$$

1.2.1 Meze platnosti Ohmova zákona

Ohmův zákon

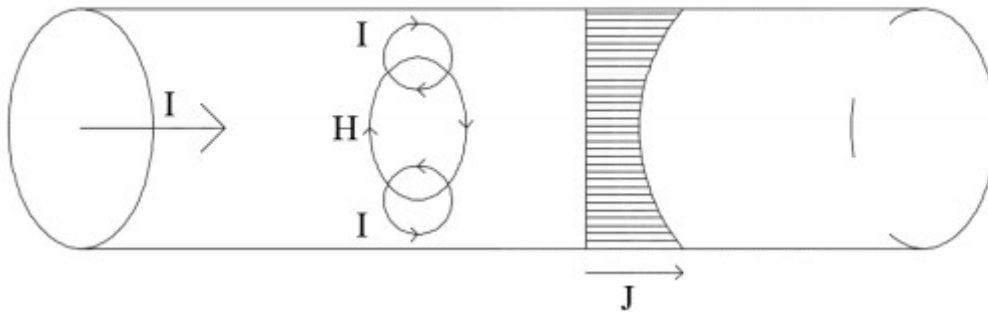
$$U = R * I \text{ (popř. } U = Z * I \text{)} \quad (1.5)$$

neplatí při:

- vysokém kmitočtu – dochází ke dvěma jevům relaxaci a povrchovému jevu
- vysoké hodnotě intenzity elektrického pole – dochází k průrazu u materiálů s malou vodivostí
- velmi nízké teplotě – tzv. supravodivost

1.2.1.1 Povrchový jev

Povrchový jev neboli skin efekt je fyzikální děj, při kterém je proud vytlačován k okraji vodiče. Pro jednoduchost budeme uvažovat pouze válcový vodič. K vytlačování proudu dochází v důsledku toho, že střídavý proud tekoucí vodičem kolem tohoto vodiče uzavírá siločáry magnetického toku. Tyto siločáry procházejí zčásti i našim vodičem, a tak se indukují ve vodiči vířivé proudy. Tyto proudy mají u středu vodiče opačnou orientaci, než proud procházející vodičem, tzn., že se odečítají, naopak směrem k okraji vodiče mají oba proudy shodnou orientaci a tím pádem se sčítají. Výsledkem toho je nerovnoměrné rozložení proudové hustoty ve vodiči a také fázový posuv mezi proudovou hustotou v jednotlivých průřezech vodiče. [2], [7]



Obrázek 1-1 Vliv skin efektu [10]

Tento jev zhoršuje využití vodiče, dochází k nárůstu odporu vodiče. Pro zohlednění byl zaveden činitel povrchového jevu. Tento činitel bere v potaz nárůst odporu vodiče při průchodu střídavého oproti přenosu stejnosměrného proudu. U konkrétních výpočtů se vychází ze vzorců, které již zohledňují profil vodiče, popřípadě z hodnot daných tabulkami pro daný profil. Činitel povrchového jevu nabývá pouze hodnot rovných, nebo větších než 1. [3], [7], [12]

$$k_p = \frac{R_{\sim}}{R_{=}} \quad (1.6)$$

Dále zavádíme veličinu pro posouzení vlivu povrchového děje. Tato veličina je hloubka vniku a udává nám vzdálenost od povrchu vodiče, kde je pokles velikosti proudové hustoty na hodnotu e^{-1} . S klesající hloubkou vniku se bude zvyšovat vliv skin efektu. Z toho je zřejmé, že se skin efekt bude uplatňovat u vodičů velkého průřezu.

$$\delta = \sqrt{\frac{2 * \rho}{\mu_0 * \mu_r * \omega}} \quad (1.7)$$

Kde δ je hloubka vniku, ρ je měrný odpor, ω je úhlová rychlost, μ je magnetická permeabilita.

Z tohoto vztahu je zřejmé, že povrchový jev bude narůstat s rostoucí frekvencí proudu, vodivostí materiálu a relativní permeabilitou vodiče. Pro komerčně využívané materiály vodičů, jako je např. Cu, Al je při frekvenci 50 Hz hloubka vniku přibližně 10 mm. Povrchový jev se tedy uplatní pouze u vodičů s výrazně vyšším poloměrem. [3], [6], [7]

1.2.1.2 Relaxace nosičů náboje

Při jevech, které jsou v kvazistacionárním stavu popsány určitým zákonitým vztahem, dochází při velmi vysokém kmitočtu ke znatelným časovým prodlevám (relaxace) mezi příčinou a účinkem, které jsou propojeny s vnitřní přeměnou energie (tlumení). Relaxace dosáhne maxima, jestliže frekvence příčiny dosáhne rezonanční frekvence příčiny. Vliv relaxace je prozatím téměř nulový, protože se projevuje až při kmitočtech vyšších než 1000 GHz. [2]

1.2.1.3 Supravodivost

Supravodivost neboli povrchový jev při stejnosměrném proudu. Podobně jako skin efekt při vysokých kmitočtech a obyčejných teplotách, dochází při stejnosměrném proudu a velmi nízkých teplotách k podobnému jevu spojenému s extrémním snižováním odporu až k nulové hodnotě. K supravodivosti dochází při tzv. kritické teplotě, která je charakteristická pro každý materiál. Pokud budeme kovový materiál ochlazovat, bude se jeho rezistivita postupně snižovat, při kritické teplotě najednou prudce, tedy skokem padne na nulu. [2], [9]

1.2.2 Vliv parametrů na změnu odporu

Vlastnosti rezistoru se mění např. s teplotou a u některých materiálů s tlakem a s magnetickým polem.

1.2.2.1 Teplotní závislost odporu

S ohledem na své vlastnosti jsou nejpoužívanějším materiálem kovy. U kovů s rostoucí teplotou nelineárně roste i hodnota odporu. Tento nežádoucí jev je třeba v mnoha případech zohlednit. K zjištění tepelné závislosti materiálu nám slouží teplotní činitel měrného odporu.

Pro teplotní činitel měrného odporu platí Matthiesenův vztah:

$$\alpha_{\rho} = \frac{\delta\rho}{\rho\delta\theta} \quad (1.8)$$

kde α je teplotní činitel, ρ měrný odpor, Θ absolutní teplota [K].

Po odvození ze vztahu (1.6) dostaneme vztah pro teplotní závislost rezistorů, který platí přibližně při $\alpha_{\rho} = \text{konst}$, platí pouze pro malý rozsah teplot.

$$\rho = \rho_0 e^{\alpha_{\rho}(\vartheta - \vartheta_0)} = \rho_0 [1 + \alpha_{\rho}(\vartheta - \vartheta_0)] \quad (1.9)$$

Kde ρ_0 je rezistivita při teplotě 20°C, α je teplotní činitel měrného odporu a $(\vartheta - \vartheta_0)$ je oteplení vodiče.

V praxi se oteplení pohybuje v desítkách stupňů Celsia. [1], [6]

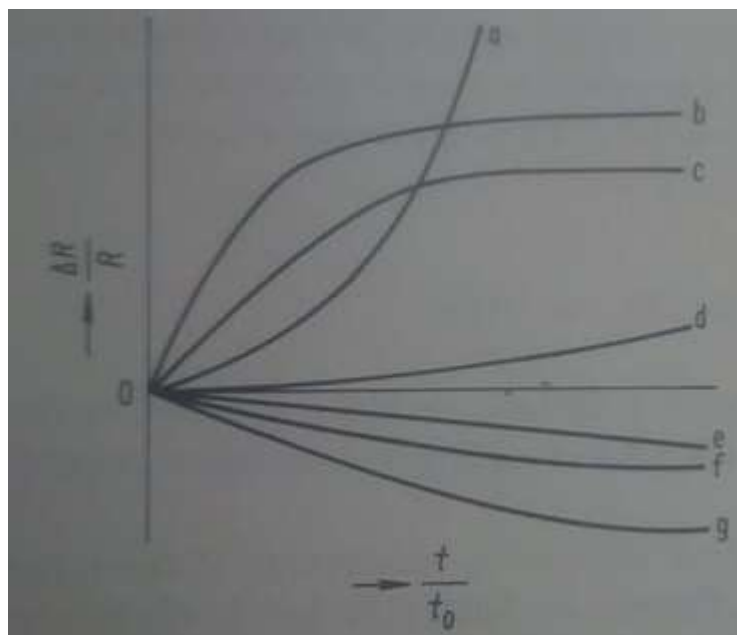
1.2.2.2 Vliv vlhkosti a stárnutí

Důsledkem nedostatečné povrchové ochrany rezistoru může se vlhkost dostat k vodivému materiálu, tím se kontakty mezi jednotlivými zrny vrstvy deformují a dochází ke změně vodivosti. Pokud nebude rezistor pod napětím, tak se vlivem vlhkosti přinejlepším jen zvětší hodnota odporu, ale tento proces je téměř úplně vratný. Při působení vlhkosti pod napětím, je možný vznik nevratných chemických pochodů, v důsledku čehož je odpor trvale změněn. Korozi povrchu tenké odporové vrstvy se rovněž velikost odporu změní. Proto je nutné pro výrobu rezistorů používat velmi stálé kovy. Ohřev rezistoru zpravidla urychluje proces pronikání vlhkosti. Existuje zde také vlhkostní činitel, který se měří při 85% a 98% relativní vlhkosti v uzavřeném prostoru po 24 a 400 hodinách. Odchyly odporu od udávaných hodnot rezistoru jsou u rezistorů s dobrou povrchovou úpravou 2 – 5%, u hmotových rezistorů bez ochrany 10 – 15%. [2]

Stárnutí je jev, při kterém působením různých vlivů dochází k průběžným a nevratným změnám vlastností v čase. Stárnutí závisí na těchto parametrech:

1. Typ rezistoru (konstrukce, materiál)
2. Změna struktury (krystalizace a změna hustoty)
3. Výdej a příjem plynů
4. Chemické reakce (okysličení, elektrolýza a vytvrzení)
5. Změny na vývodech

Na obr. 2 jsou znázorněny průběhy změn odporu způsobené různými vlivy v závislosti na čase. Průběhy jsou samozřejmě pouze informativní, díky jejich značné závislosti na intenzitě příslušného vlivu.



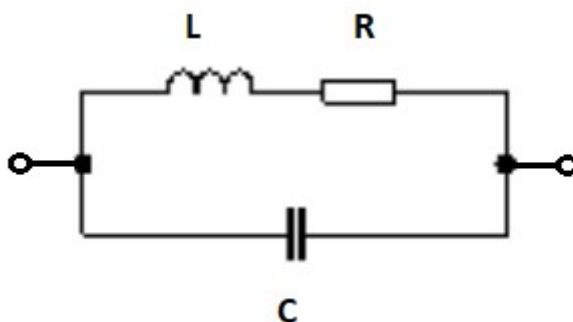
Obrázek 1-2 Stárnutí vrstevných rezistorů v závislosti na různých parametrech [2]
 a – elektrolýza při zatížení DC proudem, b – uvolňování plynů, c – okysličování materiálu vodiče,
 d – změna přechodového odporu, e – krystalizace materiálu vodiče, f – vytvrzení, g – uvolňování plynů,
 odpaření rozpouštědel z izolačních materiálů

Přibližné podmínky při skladování rezistorů: teplota – 5 - 35° C, relativní vlhkost ≤ 80%, aktivní činidla – vzdušný kyslík.

Při těchto podmínkách jsou změny odporu poměrně nepatrné, přibližně 1 – 2% za rok. Tím pádem je skladovací činitel ze začátku záporný, později je kladný v důsledku střídání rozhodujících změn. Naopak ve venkovním prostředí jsou meze různých vlivů mnohem širší a uplatňují se rovněž jejich náhlé a velké změny. Účinkem těchto častých změn je několikanásobné urychlení stárnutí. Nárůst až na několik procent měsíčně. Stárnutí je též urychlováno elektrickým zatěžováním. [2]

1.2.3 Vlastní indukčnost a kapacita

Rozdíl mezi ideálním rezistorem a reálným rezistorem je ten, že reálný rezistor obsahuje kromě činného odporu ještě imaginární složky jako vlastní indukčnost a kapacitu, tyto vlastnosti se projevují hlavně při vyšších kmitočtech. Pro zahrnutí výše uvedených parazitních vlastností reálného rezistoru do řešení elektrických obvodů zavádíme model náhradního zapojení. Pro oblast vyšších kmitočtů je možné použít model rezistoru, znázorněný na obr. (1.3). Kde L je indukčnost odporové vrstvy a přívodů rezistorů, R je činná složka odporu a C představuje parazitní kapacitu. [3]



Obrázek 1-3 Reálný model rezistoru [7]

Tyto modely rezistorů se liší pro různá použití. Např. pro použití rezistoru v oblasti stejnosměrných proudů lze zanedbat jak jeho indukčnost, tak i kapacitu, potom by jeho model mohl obsahovat pouze značku rezistoru, ale mohou se v tomto modelu objevit i např. zdroje šumu. [3]

Pro snížení vlastní indukčnosti rezistoru lze použít např. tenkostěnné základní tělísko, křížové vinutí, bifilární vinutí (dvojitě vinutí zapojené v sérii, zvětšuje se kapacita a snižuje napěťová odolnost), bifilární vinutí vinuté současně od středu k oběma koncům tělíska. [2]

1.2.4 Šum rezistoru

Každý elektrický rezistor nejen přeměňuje elektrickou energii v teplo, ale také vytváří miniaturní rušivý výkon v celém pásmu kmitočtů jako šumový generátor. Důvodem, proč dochází k tomuto šumovému výkonu, je tepelný pohyb elektronů. Šum rezistorů se skládá z několika složek:

1. Tepelný šum
2. Proudový šum (hlavně u uhlíkových vrstevných a polovodičových rezistorů)
3. Šum kontaktů

1.2.4.1 Tepelný šum

Tento šum je způsoben statickým kolísáním rozdělení náboje ve vodiči. Na tepelném šumu se podílejí všechny frekvence. Proto se mu také říká bílý šum, neboli také v odborné literatuře Johnsonův šum. Při normální pokojové teplotě rovné 300 K a při frekvenci do 600 GHz vychází tepelný šum přibližně 15nW. Pro frekvence vyšší než 600GHz dochází ke kvantovým jevům, které se již liší do tepelného šumu. [2], [3]

1.2.4.2 Proudový šum

Za proudový šum je podle dosavadních zkušeností považován kontaktní šum mezi jednotlivými vodivými oblastmi v nehomogenním odporovém materiálu. Je způsoben kolísáním přechodového odporu mezi samotným rezistorem a jeho vývodem. U drátových rezistorů a rezistorů s kovovou vrstvou s dobrými vývody se udává, že proudový šum je velmi nízký. Tento šum bývá problémový spíše u rezistorů uhlíkových a polovodičových, kde je proud určen převážně přechodovým odporem mezi jednotlivými vodivými částicemi. [2], [3]

1.2.4.3 Šum kontaktů

Z měření na rezistorech se zjistilo, že některé rezistory mají obzvláště velké šumové napětí. Tyto rezistory mají většinou špatný kontakt s vývody. Z toho plyne, že šum kontaktů je způsoben kolísáním přechodového odporu mezi vývodem a vlastním

rezistorem. Kolísání bývá vysoké a šum kontaktů může obsahovat různá pásma kmitočtů. K tomuto šumu patří též šum vznikající při pohybu jezdce u potenciometrů. [2], [3]

1.2.4.4 Celkový šum

Šumové jevy jsou založeny na statickém kolísání, z čehož plyne, že jejich šumová napětí nejsou v korelaci a mají tedy libovolnou fázi. Výsledný šum je dán součtem všech složek šumu. [2], [3]

1.2.5 Druhy rezistorů

V následující kapitole se zaměřím na různé typy rezistorů, jejich konstrukci a vlastnosti.

1.2.5.1 Drátové rezistory

Jsou historicky prvním typem rezistorů. Jejich konstrukce vypadá tak, že se navine odporový drát z požadovaného materiálu o požadovaných rozměrech, jako jsou délka a průřez, na izolační podložku (např. keramický váleček). Na koncích těchto navinutých drátů je vždy přidělaný vývod. U některých typů drátových rezistorů je možné vyvést odbočky. K povrchové ochraně drátových rezistorů se nejběžněji používají speciální teplotně odolné laky, smalty, tmely, nebo keramická pouzdra. Ukázka tmelených rezistorů je na obr. 1-4. [3]



Obrázek 1-4 Tmelené výkonové drátové rezistory [11]

Tato pouzdra jsou dimenzována spíše na nižší výkony, kvůli špatnému odvodu tepla. Existují proto tedy také hliníková pouzdra. Ukázka tohoto pouzdra je na obr. 1-5. Drátový rezistor je možné vyrábět od $0,1 \Omega$ do jednotek $M\Omega$. Jako odporový materiál pro drátové rezistory se převážně využívají různé slitiny kovů, nejčastěji mědi, niklu, manganu, chromu a železa. [3]



Obrázek 1-5 Rezistory výkonové v AL pouzdru [11]

U některých typů drátových rezistorů je možné dosáhnout vysokých maximálních provozních teplot, např. až 350°C . Chlazení sáláním je při těchto teplotách dosti účinné, díky čemuž rozměry těchto rezistorů mohou být menší než u vrstevových rezistorů na stejné výkony. Hlavní nevýhodou drátových rezistorů je jejich vlastní indukčnost. Jelikož jsou vinuty jako cívka, bývá jejich indukčnost vysoká, a proto je jejich použití možné jen ve stejnosměrných a nízkofrekvenčních obvodech. Avšak existují způsoby, jak tuto indukčnost snížit. Jedním z příkladů je bifilární vinutí. Principem bifilárního vinutí je, že se na válcové tělísko navinou dva dráty vedle sebe a na konci se spojí. To má za důsledek, že ve dvou vedlejších závitech teče proud opačným směrem a tím pádem se magnetická pole vznikající v těchto sousedních závitech odečítají a výsledné magnetické pole je zanedbatelné, a tím je zanedbatelná i jejich indukčnost. [3]

1.2.5.2 Fóliové rezistory

Konstrukce fóliového rezistoru umožňuje výrobu vysoce stabilního a nízkošumového rezistoru s nízkou vlastní indukčností. Hlavním rozdílem je teplotní roztažnost fólie oproti keramické destičce. Tímto dosahujeme malého teplotního koeficientu. Tato konstrukce je ale velmi drahá. [3]

1.2.5.3 Vrstvové rezistory

Vrstvové rezistory jsou nejrozšířenějším typem rezistorů. Jejich základním mechanickým nosným prvkem je keramické tělísko. Na tomto tělísku je nanесena vrstva z odporového materiálu. Na této vrstvě je nanесena ochranná vrstva ze speciálních laků, smaltů, popř. umělé pryskyřice sloužící k ochraně před mechanickým poškozením, vlhkostí a dalšími vnějšími vlivy. Přesné hodnoty vrstevových rezistorů jsou dodělávány pomocí drážek v odporové vrstvě, tzv. trimování. Tyto drážky jsou laserem vypalovány do odporové vrstvy. [3]

1.2.5.4 Uhlíkové rezistory

Základním konstrukčním prvkem uhlíkového rezistoru je válcové keramické tělísko, na které je pyroliticky (při vysoké teplotě, ve vakuu) nanášena vrstva odporového materiálu. Jako materiál odporové vrstvy se běžně používají sloučeniny uhlíku s borem, lak plněný grafitem, směsi uhlíku s keramikou nebo polymerem. Povrch uhlíkových rezistorů je zpravidla chráněn speciálním lakem. Běžné uhlíkové rezistory mají zpravidla velký rozsah hodnot, ve kterém jsou vyráběny, přibližně od jednotek Ω do desítek $M\Omega$. Avšak zatížitelnost uhlíkových rezistorů je celkem nízká řádově do 3W. Oproti rezistorům, kde je vodivá cesta z metalické sloučeniny, je u uhlíkových rezistorů teplotní koeficient záporný. Mezi výhody uhlíkových rezistorů patří např. nízká indukčnost, schopnost přenášet pulzní signály, určitá odolnost proti vysokonapětovým špičkám. Naopak mezi nevýhody patří vyšší úroveň šumů oproti jiným rezistorům a jejich náchylnost k vnějším vlivům. [3]

1.2.5.5 Tenkovrstvé rezistory

Moderní rezistory převážně využívají metodu nanášení vrstvy odporového materiálu o známé tloušťce na izolační podložku, čímž je zlepšena rovnoměrnost rozložení protékajícího proudu. Pro nanášení tenkých vrstev existují tyto metody: katodové naprašování, vakuové naprašování, galvanické pokovení. Jako materiál pro tenkovrstvé rezistory lze použít různé kovy jako např. chromnikl, cupron, nebo různé sloučeniny např. nitrid tantalu, nichrom, nebo různé metaloxidy. Výhodami tenkovrstvých rezistorů jsou vysoká přesnost a stabilita, možnost využití v širokých frekvenčních rozsazích a snadná miniaturizace. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká cena. [3]

1.2.5.6 Další druhy rezistorů

Jako další druhy rezistorů existují metal – oxidové rezistory, metalizované rezistory, pojistkové rezistory, SMD rezistory. [3]

1.3 Oteplení proudové dráhy

Průchodem elektrického proudu vodičem vzniká teplo, které označujeme jako Jouleovo. Toto teplo vzniká důsledkem srážek elektronů způsobujících elektrický proud s částicemi, které se vedení proudu neúčastní. Srážkou je předána část pohybové energie elektronům, které způsobí ohřev vodiče. Při stacionárním stavu, tedy ustáleném stejnosměrném proudu nebo ustálené efektivní hodnotě střídavého proudu můžeme toto teplo popsat vztahem:

$$Q = I^2 * R * t \quad (1.10)$$

Kde Q (J) je Jouleovo teplo, I (A) je elektrický proud, R (Ω) je elektrický odpor, t (s) je čas. [3], [6]

Pro oteplení povrchu rezistoru dále zavádíme vztah:

$$\nabla\theta = \frac{P}{\alpha_k * S} \quad (1.11)$$

Kde $\nabla\theta$ (K) je oteplení povrchu rezistoru, P (W) je výkon přiváděný na rezistor, α_k ($W/m^2 * K$) je součinitel přestupu tepla, S (m^2) je chlazená plocha.

1.3.1 Odvod tepla

Teplo se na základě II. věty termodynamické nevratně šíří vždy z místa s vyšší teplotou do míst s nižší teplotou. Rozlišujeme stacionární a nestacionární přenos tepla. Při zapojení zařízení nebo při změnách proudového zatížení od konstantní hodnoty stoupá teplota vodiče, a tedy i ostatních částí zařízení, což je nestacionární přenos tepla. Pokud se tento děj ustálí na konstantní hodnoty, mluvíme o stacionárním přenosu tepla, kde je teplota v různých bodech sice různá, ale není závislá na čase, tedy tepelný tok a akumulované teplo se nemění. Rozeznáváme tři základní způsoby sdílení tepla. Jimiž jsou:

- vedením (kondukcí)
- prouděním (konvekcí)
- sáláním (radiací)

Všechny tyto způsoby sdílení tepla se podílejí různou měrou na ochlazování rezistorů, jejich vliv je popsán v dalších kapitolách. [4], [5]

1.3.2 Ochlazování vedením

Sílením tepla vedením se přenáší tepelná energie bezprostředně z jedné částice tělesa na druhou. Dochází zde k předávání kinetické energie částic s vyšší energií sousedním částicím s nižší energií na atomární úrovni. Vedením se šíří teplo hlavně v tuhých tělesech, nicméně za určitých okolností se může projevit i v kapalném nebo plynném prostředí. Zde ale převládá přenos tepla prouděním. V porovnání s ostatními druhy je vedení nejpomalejší způsob šíření tepla. Rychlost šíření je dána prostředím, v kapalinách a v plynech je tato rychlost obzvlášť nízká, jelikož jednotlivé molekuly jsou jen málo vzájemně vázané a udržují od sebe větší vzdálenost. Definujeme měrnou tepelnou vodivost, která charakterizuje schopnost materiálu vést teplo. Tato veličina definuje množství tepla, které za jednotku času projde jednotkou plochy jednotkové homogenní desky s jednotkovým spádem. [4], [5]

Ochlazování vedením má dvě důležité části. Jedna část zohledňuje ochlazování samotného tělesa přes stykové plochy, které jsou z mechanických důvodů spojeny s vodičem, jako jsou různé šrouby a konstrukční prvky rezistorů. Těmito částmi dochází k odvodu tepla v místech dotyku do jiných částí zařízení, kde je toto teplo dále odváděno pomocí proudění nebo sálání. Druhá část zohledňuje rozložení teplot uvnitř vlastního vodiče, popřípadě izolace. Nicméně zde nedochází k odběru tepla z celého vodiče, ale jen k tepelnému toku k okraji vodiče, kde je odvod tepla uskutečňován jiným způsobem. [4], [5]

Je patrné, že vedení tepla nejvíce přispívá k rozložení teplot uvnitř vodiče a přilehlých pevných částí, ale teplo do okolí ve větší míře neodvádí. Pokud zkoumáme průběh oteplení vodiče jako celku, většinou vedení tepla uvnitř materiálů neuvažujeme. [4], [5]

1.3.3 Ochlazování prouděním

Při tepelném toku z pevného materiálu do kapaliny nebo plynu je předávána tepelná energie částicím na povrchu materiálu. Vlivem ohřátí těchto částic se mění jejich hustota a tím dochází k jejich přirozenému unášení. Přechod tepla prouděním je tedy míšení částic s různou tepelnou energií. Může tedy probíhat pouze v látkách, kde nejsou částice pevně vázány, což jsou látky plynného a kapalného skupenství. Mezi teplotou prostředí a teplotou ochlazovaného povrchu pevné látky je vždy určitý teplotní rozdíl daný tím, že na povrchu zůstává vrstva částic o různé tloušťce, která se neúčastní proudění. Tato vrstva je důsledkem přilnavosti molekul k povrchu. V této vrstvě dochází ke sdílení tepla vedením. Protože tepelná vodivost plynů a kapalin je většinou nízká, vzniká zde velký teplotní rozdíl.

Pro výpočty se používá Newtonův zákon:

$$Q = \alpha_k * A * (\vartheta_1 - \vartheta_p) \quad (1.12)$$

kde α_k (W/m²*K) je součinitel přestupu tepla, ϑ_1 (K) je teplota povrchu, ϑ_p (K) je teplota prostředí, A(m²) je plocha povrchu. [4], [5], [6]

Klíčová je znalost součinitele přenosu tepla, který je ovšem závislý na mnoha proměnných jako jsou rozměry, tvar, drsnost povrchu, rozdíl teplot, tepelná vodivost, viskozita, rychlost proudění atd. Z toho důvodu je určení správného součinitele velmi obtížné. Proto byly vytvořeny empirické vztahy založené na teorii podobnosti popisující tento děj.

Činitel přestupu tepla popsáný pomocí těchto empirických vztahů a tabulek vede spíše k přibližným výpočtům, protože skutečné poměry mohou být odlišné od podmínek, při kterých tyto vztahy a tabulky vznikaly. Z toho důvodu je většinou třeba určit součinitel přestupu tepla pomocí měření na modelu ilustrujícím konkrétní případ. [8], [5]

1.3.4 Ochlazování sáláním

Ke sdílení tepla sáláním dochází u všech těles, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula

a jsou obklopena průzračným prostředím. Těleso uvolňuje svou tepelnou energii do prostoru prostřednictvím elektromagnetického vlnění, které se šíří do všech směrů podle zákonů geometrie optiky. Toto vylučované záření předává svou energii prostředí, kterým prochází, a ploše, na kterou dopadá. Tím těleso předává přebytečné teplo prostředí, které ho obklopuje, ale zároveň tímto způsobem přijímá i teplo vyzařované svým okolím. Zda se bude těleso pomocí sálání ochlazovat, nebo oteplovat rozhoduje poměr vyzářené ku přijaté energii. Záření dopadající na povrch není celé absorbováno, ale jeho část je odražena do okolí. V případě čírého tělesa část záření projde tělesem. Pro záření platí rovnost Kirchhoffova zákona:

$$\text{pohlčené} + \text{odražené} + \text{propuštěné} = \text{celkové. [4], [5]}$$

Vakuum (absolutně prázdný prostor) je dokonale propustný prostor, nedochází tedy k pohlcení nebo odrazům. Žádné jiné prostředí není dokonale propustné, část energie se tedy vždy absorbuje. Definicí absolutně černého tělesa je takové těleso, které všechnu dopadající energii absorbuje, stejně tak je to nejlepší možný zářič. V praxi se vyskytují pouze šedá tělesa, kde je skombinováno pohlcení odrazu a případně propustnosti.

2 Průzkum trhu

V této kapitole se zaměřím na rezistory, které lze zakoupit již vyrobené. Základním předpokladem pro tyto rezistory je, že jejich jmenovité zatížení musí být rovné, nebo větší (720 W.), jelikož můj vlastní návrh je ze zadání na toto zatížení. Rezistory rozdělím podle jednotlivých výrobců.

2.1 Tesla Blatná, a.s.

V sortimentu této firmy je pět rezistorů vyhovujících našemu požadavku na jmenovitý výkon. Všech pět těchto rezistorů je drátových, liší se většinou jen povrchovou úpravou, krytím a jmenovitou hodnotou zatížení. Všechny tyto rezistory jsou tmelené, pouze dva z nich mají krytí IP54 nebo IP20. [11]

2.1.1 Výkonové drátové rezistory tmelené

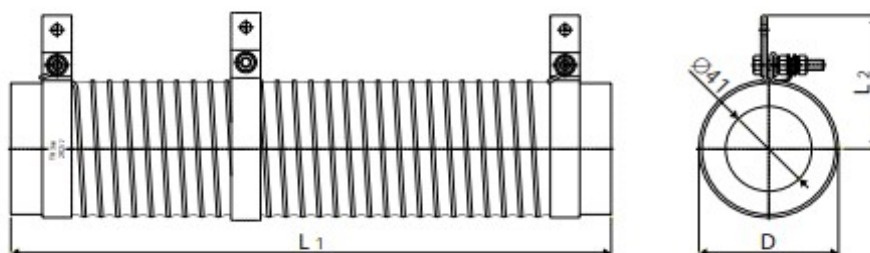
Rezistory vyhovující našemu zatížení z této kategorie jsou TRR309, TRR310 a TRR320. Výrobce udává, že tyto rezistory jsou vhodné pro využití v průmyslové elektrotechnice a ve ztížených klimatických podmínkách. Jejich základní vlastnosti jsou v tabulce (2.1). [11]

		Parametry a rozměry			Parameters and dimensions			
Jmenovité zatížení při 25°C Nominal load at 25°C		rozsah hodnot resistance range	max. provozní napětí operating voltage	D_{max} /mm/	L_1 /mm/	L_{2max} /mm/	/g/	
Typ	Type							P_N
TR 309	TRR 309	750 W	3R6 – 130K	4 000 V \cong	68	390 \pm 5,5	68	2 200
TR 310	TRR 310	1000 W	4R7 – 180K	4 500 V \cong	68	515 \pm 6,8	68	2 800
TR 320	TRR 320	1300 W	6R2 – 180K	4 500 V \cong	68	660 \pm 6,8	68	3 500

Tabulka 2-1 základní vlastnosti TRR309,310,320 [12]

Z tabulky (2.1) je patrné, že nejshodnějším rezistorem k mému požadavku je TR309, který má jmenovité zatížení 750W. Samozřejmě lze využít i rezistory TR310 a TR320, které mají jmenovité zatížení mnohem vyšší. Maximální průměr všech rezistorů je stejný, a to 68mm. Tolerance rezistorů je $\pm 5-10\%$. [12]

Rozdíl mezi značením TR XXX a TRR XXX je v tom, že rezistory TRR XXX mají jako bonus nastavitelnou odbočku, kterou lze po domluvě udělat pevnou. [12]



Obrázek 2-1 výkres TRR309,310,320 [12]

Na obr. (2.1) jsou zakótovány rozměry rezistorů, které jsou uvedeny v tabulce (2.1).[12]

Typ	Cena (Kč)
TRR309	2057,-
TRR310	2541,-
TRR320	3617,-

Tabulka 2-2 ceny jednotlivých typů

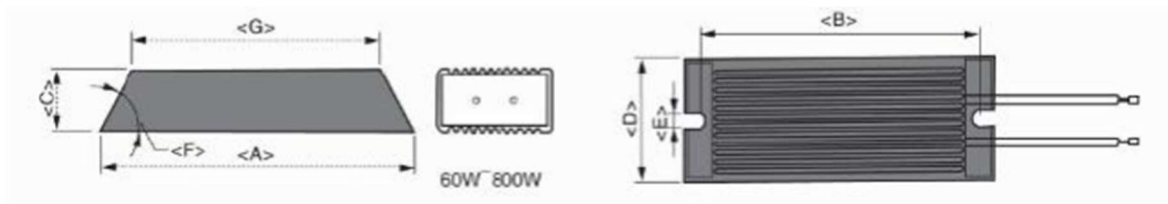
V tabulce (2.2) jsou uvedeny ceny za kus podle typu rezistoru. [12]

2.2 SR Passives

V nabídce této firmy nacházím jeden rezistor vyhovující požadavkům. Je to typ AL800W, který je drátový a má hliníkový chladič. Jeho použití je hlavně jako brzdný odpor. [13]

(W) Power Rating	Dimensions (mm)							(Ω) Resistance Range
	A±2	B±2	C±1	D±1	E±1	F±1	G±2	
AL - 800W	400	385	40	80	5.2	60°	355	1 - 50K

Tabulka 2-3 rozměry rezistoru AL800W [13]

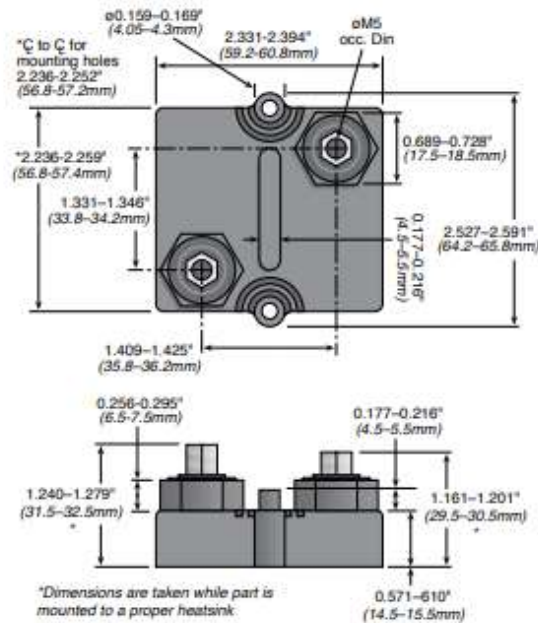


Obrázek 2-2 výkres rezistoru AL800W [13]

Tolerance tohoto rezistoru je $\pm 5\%$, jeho maximální provozní teplota 350°C , maximální provozní napětí je 2000V . Těto vyšší provozní teploty je dosaženo díky konstrukci krytí a chladiči. Váha tohoto rezistoru je 2090g . Cena jednoho kusu tohoto rezistoru je 1175 Kč . [13]

2.3 Ohmite

Tato firma nabízí jeden velmi zajímavý planární rezistor na požadovaný výkon. Jeho označení je TAP800K220E a je na maximální zatížení do 800 W při teplotě 85°C . Rozsah hodnot odporů je $1\Omega - 10\text{K}\Omega$ s tolerancí $\pm 5\% - \pm 10\%$. Maximální provozní napětí 5KV stejnosměrných. Pro ideální přenos tepla je na spodu rezistoru metalizovaná keramika s obsahem hliníku. Odporový materiál tohoto rezistoru je speciálně navržen pro snížení parazitních vlastností. [14]



Obrázek 2-3 výkres rezistoru TAP800K220E [14]

Pro stabilní a lepší vlastnosti je doporučeno kapalinové nebo vzduchové chlazení.

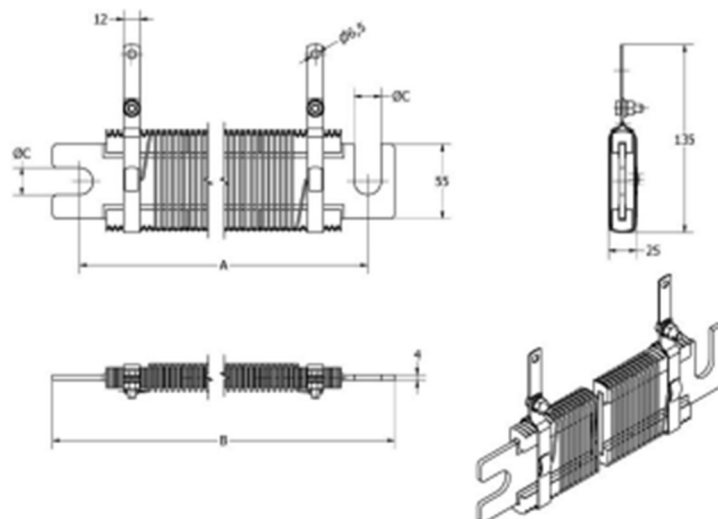
Model

a rozměry rezistoru jsou zobrazeny na obr (2.3). Jeho cena je 3334 Kč. [14]

2.4 Fairfield

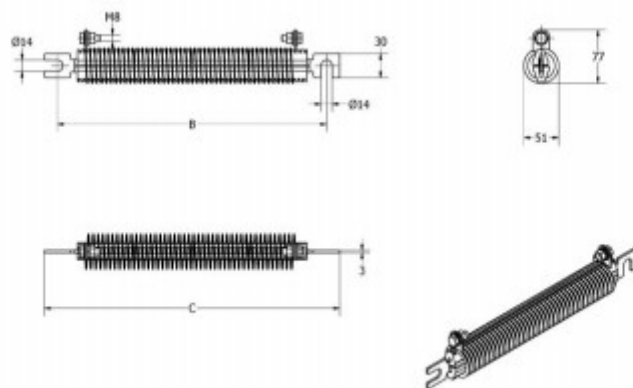
Tato firma se specializuje na výrobu výkonových rezistorů. V jejich sortimentu lze nalézt vícero druhů drátových rezistorů.

Prvním druhem jsou rezistory z holého drátu na keramickém tělese upevněném v kovovém držáku. Které mají velmi nízkou tepelnou odolnost díky jejich konstrukci a také vysoké tepelné kapacitě. Jejich designem je kupec nucen k chlazení pomocí ventilátoru. Jako nejvíce vyhovující zástupce tohoto typu rezistorů je RMS 5, který má jmenovité zatížení 1000W a maximální provozní napětí 2KV. Rozsah rezistivity tohoto odporu je 1Ω - 47Ω při toleranci $\pm 5\%$. Za příplatek je možné objednat tento rezistor i s přídatnými vývody. Jeho rozměry jsou zakótovány na obr (2.4), kde A = 340mm, B = 380mm, c = 20mm a jeho váha je 1050g. Cena tohoto rezistoru je od 1071 Kč. [15]



Obrázek 2-4 výkres rezistoru RMS 5 [15]

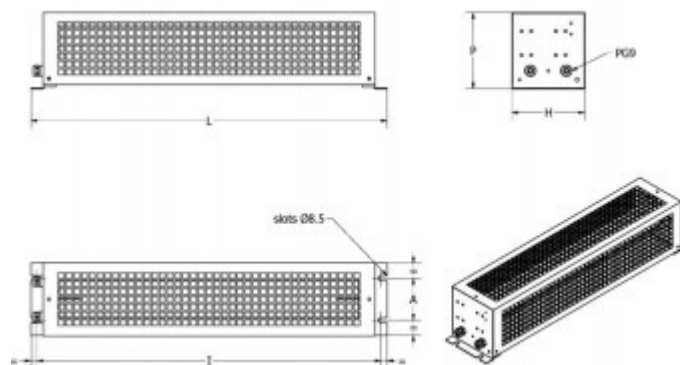
Dalším druhem jsou rezistory z plochých drátů, které vypadají jako pružiny. Podobně jako předchozí typ rezistorů mají tyto rezistory nízkou tepelnou odolnost. Tyto rezistory si dokážou velmi dobře a rychle poradit s velmi vysokými elektrickými pulzy. Konstrukce je totožná s předchozím typem rezistoru až na vodivou cestu. Nejvhodnějším typem pro naše požadavky je RNP 800, jehož jmenovitá zátěž je v rozmezí 800W – 1800W při maximálním napětí 1500V. Rozsah hodnot odporu je $0,1\Omega$ – $2,7\Omega$ s tolerancí $\pm 10\%$. Rozměry rezistoru jsou na obr (2.5), kde $B = 338\text{mm}$, $C = 371\text{mm}$ a jeho váha je 1350g. Cena rezistoru není uvedena. [16]



Obrázek 2-5 výkres rezistoru RNP 800 [16]

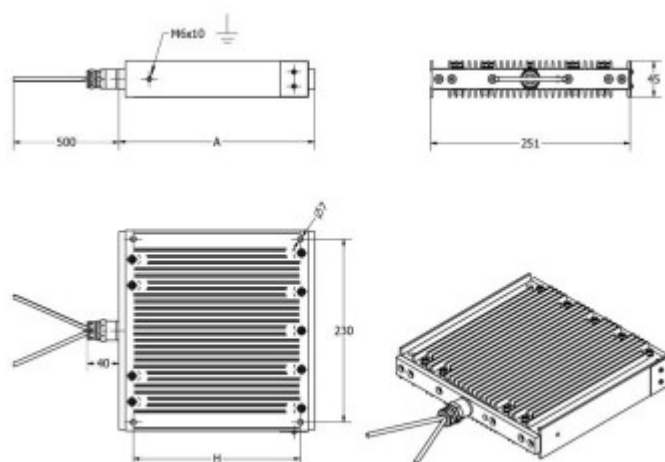
Třetím typem rezistorů od této firmy jsou cementované drátové rezistory v kovovém galvanickém pouzdru se stupněm krytí IP 20 / IP 23. Tyto rezistory mají konstrukci stejnou jako první typ rezistorů od této firmy, pouze jsou upevněny v kovovém pouzdru, které zlepšuje jejich tepelnou odolnost. Nejvhodnějším typem tohoto rezistoru je RM 01M, který

má jmenovité zatížení 900W a maximální provozní napětí 700V. Jeho krytí je IP 20. Rozsah hodnot odporu $0,82\Omega - 91\Omega$ s tolerancí $\pm 5\%$. Rozměry rezistoru jsou na obr. (2.6), kde $A = 70\text{mm}$, $l = 475\text{mm}$, $H = 120\text{mm}$, $L = 495$, $P = 126\text{mm}$ a jeho váha je 2300g. Cena rezistoru je 1767 Kč. [17]



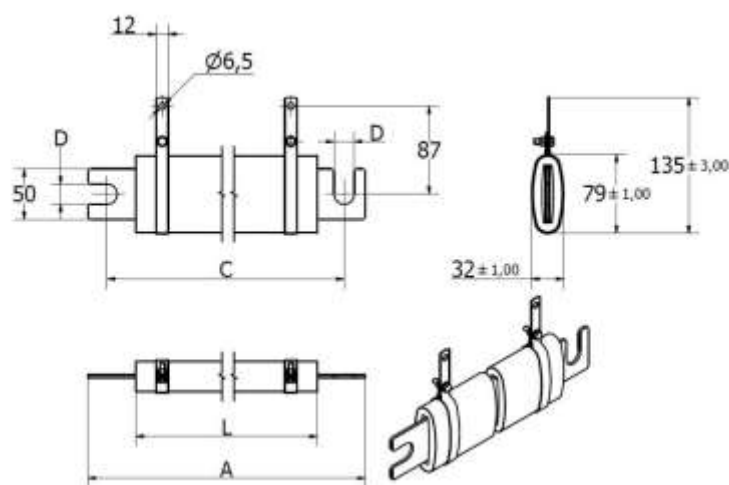
Obrázek 2-6 Výkres rezistoru RM 01M [17]

Čtvrtým druhem rezistorů dodávaným touto firmou jsou plošné rezistory v kovovém pouzdře. Tyto rezistory lze velmi dobře používat jako brzdné a vybíjecí rezistory. Díky kovovému pouzdru je krytí těchto rezistorů vyšší než IP 55. Tyto rezistory se vyrábějí na maximální jmenovité zatížení 700W, což je o něco méně, než požadujeme, ale jen o 20W. Na toto zatížení jsou zde tři, u kterých je hlavní rozdíl ve stupni krytí od IP 55 – IP 65. Nám bohatě stačí IP 20, a proto volím typ rezistoru RFH 1PG 2000, který - jak jsem již zmiňoval - má jmenovité zatížení 700W a maximální provozní napětí 1000V. Rozsah hodnot odporu je $3,3\Omega - 24K\Omega$ s tolerancí $\pm 5\%$. Rozměry rezistoru jsou zobrazeny na obr. (2.7), kde $A = 386\text{mm}$, $H = 350\text{mm}$ a jeho váha je 7500g. Cena tohoto rezistoru je 5227Kč. [18]



Obrázek 2-7 výkres rezistoru RFH 1PG 2000 [18]

Posledním typem rezistorů od této firmy jsou drátové cementované odpory, které díky své konstrukci mají velmi vysoké rozsahy hodnot odporů. Konstrukce těchto rezistorů je taková, že se vine odporový drát na eliptické keramické těleso, poté je tento rezistor potažen neorganickým fosfátovým cementem. Účelem tohoto potažení je zajištění mechanické ochrany drátů a zlepšení tepelné odolnosti. Na elektrické vlastnosti nemá potah žádný vliv. Pro mě nejvhodnějším typem tohoto rezistoru je RCE 800, který má jmenovité zatížení 800W a maximální provozní napětí 3KV. Rozsah hodnot odporů tohoto rezistoru je $1,5\Omega - 3,3K\Omega$ s tolerancí $\pm 5\%$. Rozměry rezistoru jsou zobrazeny na obr. (2.8), kde $A = 380\text{mm}$, $C = 340\text{mm}$, $L = 295\text{mm}$, $D = 20\text{mm}$ a jeho váha je 1400g. Cena rezistoru je 803Kč. [19]



Obrázek 2-8 výkres rezistoru RCE 800 [19]

3 Vlastní návrh rezistorů

V rámci této kapitoly se zaměřím na návrh různých druhů rezistorů z běžně dostupných materiálů, jako jsou např. ocelový drát, ocelový plech, ocelový pásek nebo třeba slaná voda. U všech těchto odporů budu počítat jejich rozměry a oteplení s předpokladem jejich návrhu na 720W, který je dán zadáním.

3.1 Obecný postup návrhu

Pro výpočty vycházím ze zadaného napětí U a proudu I . Z tohoto zadání lze vypočítat jmenovité zatížení rezistoru, jako:

$$P = U * I(W) \quad (3.1)$$

Také pomocí Ohmova zákona mohu spočítat odpor tohoto rezistoru, jako:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{P}{I^2} (\Omega) \quad (3.2)$$

Dále vycházím ze vztahu (1.2), ze kterého spočítám délku odporové cesty tak, že znám jeho odpor, měrnou vodivost materiálu a ze zvolených rozměrů spočítám průřez této dráhy, podrobněji popíšu výpočet průřezu u jednotlivých návrhů rezistorů.

$$l = \frac{R * s}{\rho} (m) \quad (3.3)$$

Dalším důležitým výpočtem je výpočet oteplení materiálu při plném zatížení, které spočítám jako:

$$\Delta\vartheta = \frac{P}{\alpha_0 * A} (K) \quad (3.4)$$

kde P (W) je jmenovité maximální zatížení, α_0 (W/m²*K) je koeficient přestupu tepla do okolí a A (m²) je chlazená plocha.

Změna odporu vodiče při provozní teplotě se vypočte jako:

$$R_{\vartheta} = (1 + \alpha * \Delta\vartheta)R_{20^{\circ}} (\Omega) \quad (3.5)$$

kde R_{ϑ} je hodnota odporu při pracovní teplotě, α je teplotní součinitel odporu, $\Delta\vartheta$ je oteplení proudové dráhy a $R_{20^{\circ}}$ je teplota rezistoru při teplotě 20°C

Celkovou hmotnost rezistoru dále spočtu jako:

$$m = \rho * V (Kg) \quad (3.6)$$

3.2 Návrh rezistoru z ocelového drátu

Po dosazení zadaných hodnot proudu $I = 30\text{A}$ a napětí $U = 24\text{V}$ do vzorce (3.1) dostaneme:

$$P = U * I = 30 * 24 = 720\text{ W}$$

Z téhož zadání výpočtu požadovanou hodnotu odporu po dosazení do vzorce (3.2):

$$R = \frac{U}{I} = \frac{24}{30} = 0,8\ \Omega$$

Nyní je třeba zvolit průměr drátu, abych mohl vypočítat průřez odporové dráhy jako:

$$s = \pi * r^2 (\text{mm}^2) \tag{3.7}$$

Nejběžněji dostupnými dráty jsou dráty o průměru 1-2 mm, pro náš výpočet nyní volím drát o průměru 2 mm. Tedy po dosazení do vzorce (3.7) dostávám:

$$s = \pi * r^2 = \pi * 1^2 = 3,14\ \text{mm}^2$$

Díky spočtenému průřezu a měrným odporem oceli známým z tabulek $\rho = 0,0996\ \Omega * \text{mm}^2 * \text{m}^{-1}$ mohu dosadit do vzorce (3.3) a vypočítat, tak délku proudové dráhy:

$$l = \frac{R * s}{\rho} = \frac{0,8 * 3,14}{0,0996} = 25,22\ \text{m}$$

Nyní je třeba spočítat plochu odporové dráhy, která bude chlazená, tato plocha je u drátu rovna ploše válce, kterou lze vypočítat jako:

$$A = 2 * \pi * r * (r + l) \tag{3.8}$$

Po dosazení do vzorce (3.8) dostávám:

$$A = 2 * \pi * r * (r + l) = 2 * \pi * 1 * 10^{-3} * (1 * 10^{-3} + 25,22) = 0,16 \text{ m}^2$$

Se známou plochou A, jmenovitým zatížením P a součinitelem přestupu tepla α_0 , jehož hodnota je pro samovolné chlazení vzduchem rovna $\alpha_0 = 15$, mohu dosadit do vzorce (3.4) a spočítat oteplení rezistoru jako:

$$\Delta\vartheta = \frac{P}{\alpha_0 * A} = \frac{720}{15 * 0,16} = 303,04 \text{ K}$$

Nyní mohu spočítat, na jakou hodnotu se změní odpor rezistoru v ustáleném stavu, hodnota teplotního součinitele odporu je pro ocel $\alpha = 0,006$:

$$R_{\vartheta} = (1 + \alpha * \Delta\vartheta)R_{20^{\circ}} = (1 + 0,006 * 303,04) * 0,8 = 2,25 \Omega$$

Výsledné oteplení je ukazatelem toho, že by se tento rezistor samovolným prouděním vzduchu neuchladil. Máme dvě řešení tohoto problému: jedním je přidání chlazení, což může být velmi drahé, druhým řešením je zvýšení průměru vodiče rezistoru, tím se zvýší i chlazená plocha, což má za důsledek snížení oteplení, ale problémem je mnohonásobné zvýšení rozměrů vodiče.

3.2.1 Optimalizace s ohledem na oteplení

Optimalizaci rezistoru na oteplení provedu - jak jsem již výše naznačil - změnou průměru drátu. Touto změnou se změní nejen ochlazovaná plocha rezistoru, ale také jeho průřez,

a v důsledku toho i délka odporové dráhy, a to celkem významně. Průměr drátu volím podle katalogu prodáváných ocelových drátů 3,1 mm. Výpočty budou vypadat takto:

Průřez:

$$s = \pi * r^2 = \pi * 1,55^2 = 7,54 \text{ mm}^2$$

Délka vodiče:

$$l = \frac{R * s}{\rho} = \frac{0,8 * 7,54}{0,0996} = 60,59 \text{ m}$$

Chlazená plocha:

$$A = 2 * \pi * r * (r + l) = 2 * \pi * 1,5 * 10^{-3} * (1,5 * 10^{-3} + 60,59) = 0,59 \text{ m}^2$$

Oteplení:

$$\Delta\vartheta = \frac{P}{\alpha_0 * A} = \frac{720}{15 * 0,59} = 81,38 \text{ K}$$

Hodnota odporu při pracovní teplotě:

$$R_{\vartheta} = (1 + \alpha * \Delta\vartheta)R_{20^{\circ}} = (1 + 0,006 * 81,38) * 0,8 = 1,19 \Omega$$

Pomocí této optimalizace se mi povedlo snížit oteplení rezistoru více než trojnásobně na již celkem přijatelnou hodnotu, za cenu prodloužení odporové dráhy přibližně o dvojnásobek a rozšíření průměru vodiče o 1,1 mm.

Celkové rozměry tohoto rezistoru závisí na mechanickém provedení, většinou je drát navinut na keramické tělísko, ale v mém případě navinu drát jako pružinu a zavěším do stojanu. Jako průměr pružiny volím hodnotu $d = 100 \text{ mm}$. Z této hodnoty je možné vypočítat délku jednoho závitu jako:

$$l_z = 2 * \pi * \left(\frac{d}{2} + r\right) = 2 * \pi * (50 + 1,55) = 323,73 \text{ mm} = 0,324 \text{ m}$$

Z délky jednoho závitu lze vypočítat počet závitů jako:

$$N = \frac{l}{l_z} = \frac{60,59}{0,324} = 187 \text{ závitů}$$

Díky znalosti počtu závitů mohu určit délku keramického tělíska B, vzduchovou mezeru mezi vodiči volím 0,5 mm.

$$B = N * d + 0,5 = 187 * 0,0031 + 0,0005 = 0,67 \text{ m}$$

Pro dosažení do vzorce (3.6) musím nyní spočítat objem odporové dráhy, který spočtu jako:

$$V = s * l = 7,54 * 10^{-6} * 60,59 = 0,0046 \text{ m}^3$$

Hustota pro ocel je dána z tabulek a to $\rho = 7850 \text{ Kg} / \text{m}^3$, nyní mohu dopočítat hmotnost:

$$m = \rho * V = 7850 * 0,0046 = 35,86 \text{ Kg}$$

Cena drátu o průměru 3,1 mm je 242 Kč za potřebnou délku pro můj rezistor. Model rezistoru je znázorněn na obr. (3.1).



Obrázek 3-1 model drátového rezistoru v Solidworks

3.3 Návrh rezistoru z ocelového plechu

Tento rezistor bude konstruován z ocelového plechu, do kterého bude vyřezána proudová plocha.

Začneme naprosto stejným postupem jako u drátového rezistoru a to tak, že si spočítáme jmenovité zatížení a odpor rezistoru. Výsledky jsou stejné.

$$P = U * I = 30 * 24 = 720 \text{ W}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{24}{30} = 0,8 \Omega$$

Pro svůj návrh použiji plech o tloušťce $d = 1 \text{ mm}$, proudová cesta bude o šířce $c = 10 \text{ mm}$, z těchto rozměrů je možné spočítat průřez vodiče jako:

$$s = d * c = 1 * 10 = 10 \text{ mm}^2$$

Se spočítaným průměrem a známou hodnotou měrného odporu oceli mohou dosadit do vzorce (3.3) a spočítat délku odporové dráhy jako:

$$l = \frac{R * s}{\rho} = \frac{0,8 * 10}{0,0996} = 80,32 \text{ m}$$

Pro výpočet oteplení nyní musím vyjádřit obsah chlazené plochy. Ten lze vyjádřit jako obsah kvádry poté, co si domyslíme linearizovanou odporovou cestu.

$$A = 2 * (d * c + d * l + c * l) \text{ (m}^2\text{)} \quad (3.9)$$

Po dosazení rozměrů do vzorce (3.9) dostávám:

$$A = 2 * (d * c + d * l + c * l) = 2 * (0,001 * 0,01 + 0,001 * 80,32 + 0,01 * 80,32) \\ = 1,77 \text{ m}^2$$

Stejně jako u předchozího rezistoru mohu nyní vypočítat oteplení ze vzorce (3.4), jelikož znám všechny potřebné hodnoty:

$$\Delta\vartheta = \frac{P}{\alpha_0 * A} = \frac{720}{15 * 1,77} = 27,16 \text{ K}$$

Hodnotu odporu při provozní teplotě dále dopočítám podle vzorce (3.5):

$$R_{\vartheta} = (1 + \alpha * \Delta\vartheta)R_{20^\circ} = (1 + 0,006 * 27,16) * 0,8 = 0,93 \Omega$$

Nyní mohu dopočítat výsledné rozměry rezistoru, které jsou zobrazeny na obrázku (3.2) tak, že jednu stranu volím pevně, označím ji jako $A = 1 \text{ m}$ a rozměr druhé strany označený B dopočítám jako:

$$B = \frac{l}{l_i} * (c + e) = \frac{80,32}{1,002} * (0,01 + 0,002) = 0,96 \text{ m}$$

Kde l je délka odporové dráhy, l_i je délka jednoho článku odporové cesty a e je vzduchová mezera mezi články odporové dráhy

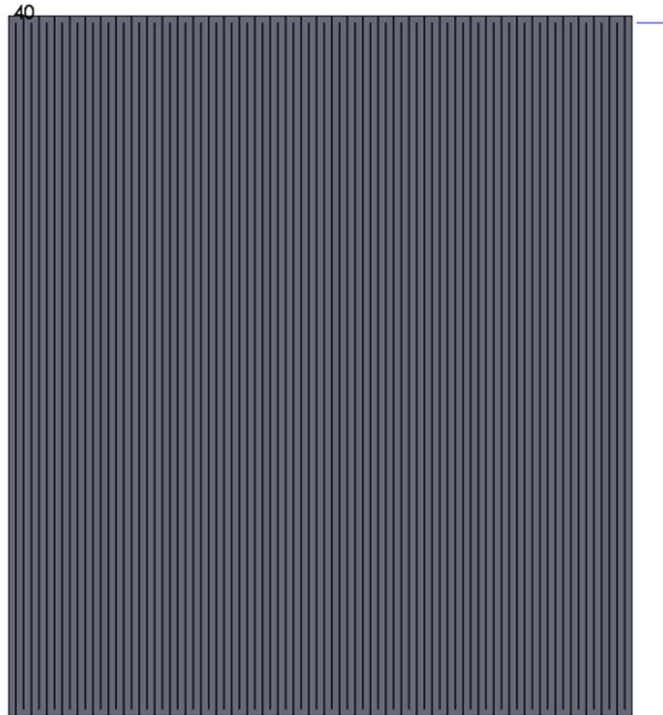
Jako poslední je třeba dopočítat hmotnost rezistoru dosazením do vzorce (3.6), proto musím nyní spočítat objem rezistoru jako:

$$V = s * l = 10 * 10^{-6} * 80,32 = 0,00803 \text{ m}^3$$

$$m = \rho * V = 7850 * 0,00803 = 63,05 \text{ Kg}$$

Z výsledné hodnoty oteplení, která je příznivá a plyne z ní, že se rezistor uchladí prouděním okolního vzduchu, je patrné, že není nutná optimalizace rezistoru. Jeho rozměr

dopadl podle mého názoru též nad očekávání a z těchto rozměrů vím, že pro výrobu rezistoru by stačil 1 m² ocelového plechu o tloušťce 1 mm, jehož cena je 266,5 Kč. Model rezistoru je zobrazen na obr. (3.2).

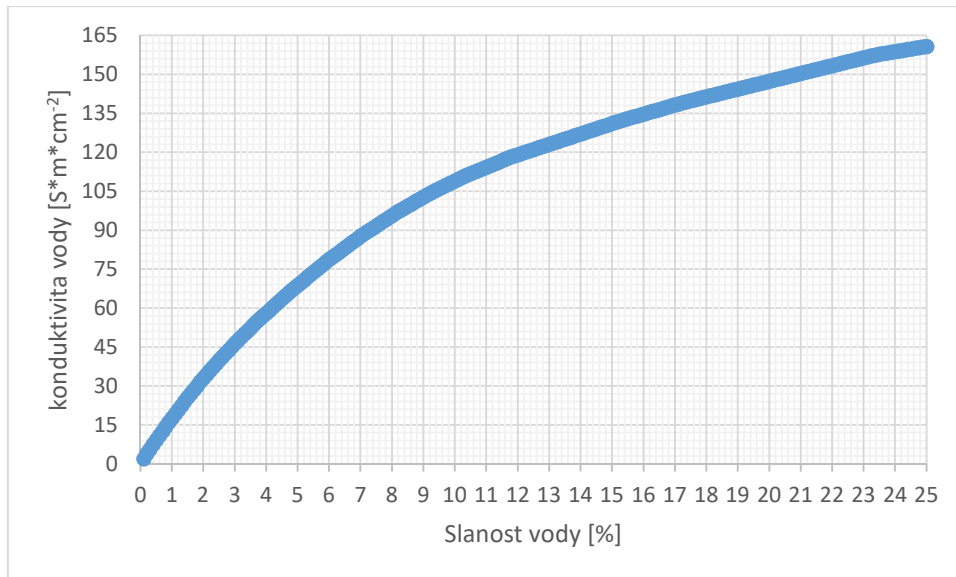


Obrázek 3-2 model plechového rezistoru v Solidworks

3.4 Návrh vodního rezistoru

Základem pro návrh tohoto rezistoru je zjistit hodnotu vodivosti v závislosti na slanosti vody. Tuto závislost zobrazují na grafu (3.1) a pro první výpočet budu využívat hodnotu konduktivity při slanosti 25%, což je $\gamma = 160,8 \text{ S} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$, z této hodnoty je možné vypočítat hodnotu měrného odporu vody jako:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{160,8} = 0,0062 \frac{\Omega \cdot \text{m}}{\text{cm}^2} = 0,62 \frac{\Omega \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$$



Graf 3-1 Závislost konduktivity vody na její slanosti [20]

Nyní je třeba se rozhodnout, jaký konstrukční koncept tohoto rezistoru chceme navrhnout. Na výběr mám z vícero možností, ale popíši pouze dvě, a to válcový tvar (např. teplu odolná hadice s elektrodami na každém konci) nebo tvar kvádru (skleněná nádoba s elektrodami u okrajů).

3.4.1 Válcový tvar

Stejně jako u předchozích návrhů využiji výpočty pro zatížení a odpor:

$$P = U * I = 30 * 24 = 720 \text{ W}$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{24}{30} = 0,8 \Omega$$

Jako vnitřní průměr hadice volím 8mm a po dosazení do vzorce (3.6) dostávám:

$$s = \pi * r^2 = \pi * 4^2 = 50,24 \text{ mm}^2$$

Nyní, když máme spočtený průřez a hodnotu měrného odporu, tak mohu spočítat délku odporové dráhy:

$$l = \frac{R * s}{\rho} = \frac{0,8 * 50,24}{0,62} = 64,83 \text{ m}$$

Následující výpočet je důležitý pro výpočet oteplení, a to výpočet chlazené plochy:

$$A = 2 * \pi * r * (r + l) = 2 * \pi * 4 * 10^{-3} * (4 * 10^{-3} + 64,83) = 1,63m^2$$

Výpočet oteplení:

$$\Delta\vartheta = \frac{P}{\alpha_0 * A} = \frac{720}{15 * 1,63} = 29,47K$$

Na obr. (3.3) je znázorněn model vodního rezistoru zkonstruovaného ze zahradní hadice, kterou stačí zavěsit. Teplotní odolnost této hadice je do 60°C, což je pro tento rezistor dostačující. Cena vodního rezistoru se tedy odvíjí od ceny hadice, požadované množství hadice lze zakoupit za 500 Kč.



Obrázek 3-3 model vodního rezistoru v Solidworks

Podobně jako u předchozích rezistorů musím nyní dopočítat hmotnost rezistoru, dosazením do vztahu (3.6), proto nyní musím spočítat objem odporové dráhy, jako:

$$V = \pi * r^2 * l = \pi * 4^2 * 64,83 = 0,0032 m^3$$

Tabulková hodnota hustoty vody je $\rho = 997 \text{ kg} / \text{m}^3$.

$$m = \rho * V = 3,23 \text{ Kg}$$

4 Shrnutí jednotlivých dostupných a navržených řešení odporové zátěže

V této kapitole se zaměřím na shrnutí vlastností, rozměrů, váhy a cen jednotlivých rezistorů, jak dostupných ke koupi, tak i mnou navržených řešení. Pro toto shrnutí jsem si vytvořil dvě jednoduché tabulky, z nichž budou patrné výše zmíněné parametry. V tabulce (4.1) jsou shrnuty poznatky o rezistorech z kapitoly číslo (2).

Typ rezistoru	P _n (W)	R (Ω)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	m (g)	cena (Kč)
TR 309	750	3,6 - 130K	68	68	390	2200	2057
TR 310	1000	4,7 - 180k	68	68	515	2800	2541
TR 320	1300	6,2 - 180k	68	68	660	3500	3617
AL 800	800	1 - 50k	80	40	400	2090	1175
TAP800K220E	800	1 - 10K	66	61	30,5	-	3334
RMS 5	1000	1 - 47Ω	25	135	380	1050	1071
RNP800	800	0,1 - 2,7Ω	51	77	371	1350	-
RM 01M	900	0,82 - 91Ω	120	126	495	2300	1767
RFH 1PG 2000	700	3,3 - 24K	45	251	386	7500	5227
RCE 800	800	1,5 - 3,3K	32	79	380	1400	803

Tabulka 4-1 souhrn parametrů rezistorů dostupných na trhu

V tabulce (4.2) jsou shrnuty parametry o mnou navržených rezistorech z kapitoly číslo (3).

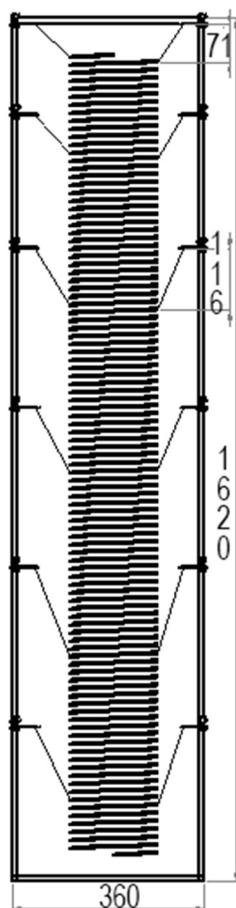
Typ rezistoru	P _n (W)	R (Ω)	A (mm)	B (mm)	C (mm)	m (g)	cena rezistoru (Kč)
drátový rezistor	720	0,8	100	100	670	35860	285
plošný rezistor	720	0,8	1	1000	960	63051	267
Vodní rezistor	720	0,8	100	100	-	3,23	500

Obě tyto tabulky slouží k porovnání parametrů rezistorů, jež provedu v závěru.

5 Konstrukce rezistoru

V této kapitole nyní popíši konstrukci stojanu na rezistor, kterou jsem prakticky zpracovával. Základem této konstrukce budou stejně jako pro návrh rezistoru běžně dostupné materiály. Rezistor, jež jsem zavěšoval do stojanu, není ani jeden z výše navrhovaných rezistorů. Je to koupený rezistor, jehož vlastnosti budu určovat v kapitole (4.2).

Moje myšlenka je taková, že zavěším pružinový rezistor na ocelovou konstrukci z pásoviny. K zavěšení jsem použil dráty z výpletu jízdního kolo, jako háčky, které bylo třeba odizolovat od ocelové konstrukce. Tohoto odizolování jsem dosáhl, tak že jsem jeden háček rozdělil na dva a mezi ně vyrobil pertinaxovou destičku, jako jednoduchý izolátor. Konstrukční výkres rezistoru je vidět na obr. (5.1).



Obrázek 5-1 konstrukční výkres stojanu s rezistorem

Celková cena stojanu připraveného na zavěšení rezistoru, složeného z částí popsanych níže činí 827 Kč.

5.1 Popis vlastní konstrukce

V této kapitole přiblížím konstrukci jednotlivých částí stojanu, do kterého jsem rezistor zavěšoval.

5.1.1 Konstrukce stojanu

Jak jsem již avizoval v předchozí kapitole, stojan jsem vyrobil z ocelové pásoviny o rozměrech 12 mm na 6 mm. Stojan má čtvercovou základnu o délce strany 360 mm. Tuto

základnu jsem svařil dohromady z výše uvedeného materiálu v počtu dvou kusů. Na každém rohu základny jsou přivařeny nosníky o délce 1600 mm, propojující obě základny. Čímž dostávám základní tvar stojanu. Dalším krokem je navaření příčníků vždy mezi dva nosníky proti sobě, příčníků je po celé výšce stojanu 5 a k tomu dva z každé základny, rozložených tak, že 4 příčnky jsou přivařeny po 300 mm od spodní základny a pátý příčnky, který je nejvýše, je 150 mm pod vrchní základnou. Toto rozložení příčníků jsem volil z předpokladu, že na vrcholu ponesou háky vyšší váhu, než dole. Tyto příčnky jsou důležité pro zavěšení rezistoru. Jak, je již patrné z konstrukce stojanu, tak na jednotlivé příčnky bude vždy připevněn hák. Háky, jejichž konstrukci popíši v další kapitole, jsem se rozhodl připevnit k příčnky pomocí šroubu, a proto jsem musel do všech příčníků vyvrtat díru pro tyto šrouby. S ohledem na mechanickou pevnost jsem se rozhodl pro šrouby M6. Cenu stojanu určuje hlavně ocelová pásovina, jejíž celková cena je 326 Kč, k tomu je nutné připočítat cenu šroubů, podložek, matek, jež činí 30Kč a tím pádem je celková cena stojanu 356 Kč. Výkres stojanu a jeho uvedené rozměry jsou zobrazeny na obr (5.2).

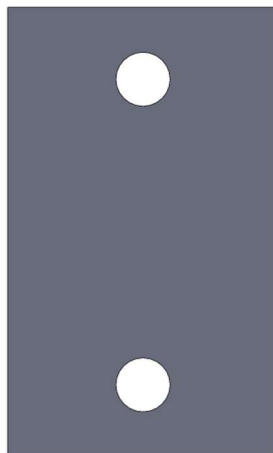


Obrázek 5-2 model stojanu v programu Solidworks

5.1.2 Konstrukce izolátoru

Pro odizolování háčků jsem použil již zmiňovaný materiál a to pertinax. Pertinax je druh plastu s vysokou teplotní odolností a mechanickou pevností. S ohledem na tyto vlastnosti jsem vyrobil 14 těchto izolátorů. Jeden izolátor má rozměry 50 mm na 30 mm. Výroba izolátoru probíhala, tak že bylo nejdříve třeba nastříhat pertinaxovou destičku na výše uvedené rozměry, což jde lehce provést nůžkami na plech. Další důležitou věcí při výrobě izolátoru bylo vyvrtat dvě díry, jednou se izolátor zavěsí na hák připevněný pomocí

šroubů do stojanu a na druhou se zavěsí další hák, který drží rezistor. Výkres s rozměry jednoho izolátoru je zobrazen na obr (5.3). Cena všech izolátorů je 35 Kč.



Obrázek 5-3 model izolátoru v programu Solidworks

5.1.3 Konstrukce háků

Jak jsem již uvedl na začátku této kapitoly, tak pro výrobu háků k zavěšení rezistoru jsem použil drátu z výpletu jízdního kola. Výroba těchto háků nebyla nijak složitá a spočívala v pouze v ohýbání drátů na požadovanou délku a tvar. V zásadě jsem potřeboval vyrobit dva druhy drátů, jak je již zmíněno výše. Jeden typ háků, jsou háky, jež připevním pod podložku šroubu. Tyto háky mají na jedné straně očko, jež je okolo šroubu, poté jsou ohnuty v požadovaném úhlu a po pěti centimetrech ohnuty, tak aby drželi izolátor. Druhým typem drátů jsou již jen oboustranné háčky, které jsou z jedné strany zaháknuty do izolátoru a z druhé strany drží rezistor. Cena drátů je pouze přibližná a je 20 Kč.

5.1.4 Konstrukce elektrické části

Pro jednoduché připojení rezistoru do obvodu jsem zkonstruoval jednoduchou svorkovnici, za použití zdírek na banánky. Tyto zdírky jsem přidělal na pertinaxovou desku, jež jsem přišrouboval ke stojanové konstrukci. Svorkovnice má čtyři zdírky pro připojení jak celého rezistoru, tak i jen jeho částí, dvě zdírky jsou napevno připojené na začátek a konec rezistoru a zbylé dvě zdírky jsou připojené na kontakty, kterými je možné libovolně pohybovat po rezistoru. Pro propojení rezistoru se svorkovnicí jsem použil kabel SiF se silikonovou izolací, kvůli jeho teplotní odolnosti. Na jednotlivé zdírky je vždy kabel připájen napevno, na rezistor je však přidělán pomocí kabelových oček a šroubků. Připojení k zátěži je provedeno pomocí stejného kabely, na jehož jednom konci jsou

banánky pro připojení ke svorkovnici a na druhém konci jsou kabelové vidlice pro připojení pomocí šroubu. Celková cena všech součástí uvedených v této kapitole je 416 Kč.

5.2 Měření na rezistoru

Na rezistoru, jež jsem zavěsil do výše popisovaného stojanu jsem prováděl dvě měření, a to měření odporu rezistoru pomocí stejnosměrné metody a měření rozložení teploty na rezistoru.

5.2.1 Měření odporu

Měření odporu rezistoru stejnosměrnou metodou spočívá ve změření napětí a proudu, jež protéká rezistorem. K tomuto měření jsem použil dva měřicí přístroje, a to multimetr, pomocí kterého jsem změřil napětí na svorkách rezistoru a klešťový ampérmetr, kterým jsem změřil procházející proud. Tento ampérmetr bylo nutné použít z důvodu vysokého procházejícího proudu. Změřené hodnoty jsou $U = 106,2 \text{ V}$ a $I = 28,7 \text{ A}$. Z těchto dvou hodnot mohu dále vypočítat hodnotu odporu rezistoru a zatížení rezistoru jako:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{106,2}{28,7} = 3,72 \Omega$$

$$P = U * I = 106,2 * 28,7 = 3047,94 \text{ W}$$

5.2.2 Měření teploty

V tomto měření jsem pomocí termokamery zjišťoval rozložení teploty v jednotlivých částech rezistoru. Toto měření jsem prováděl při ustáleném stavu rezistoru. Teplotu jsem měřil v šesti různých úsecích rezistoru, rozdělených přibližně po 250 mm. Toto měření jsem musel provést dvakrát, z důvodu uvedených níže, zdůrazňuji, že tato měření byla provedena za stejných podmínek a při stejném zatížení, z důvodu relevantnosti měření.

Naměřené hodnoty v prvním měření:

část	t (°C)
1	175
2	166
3	158
4	150
5	131,1
6	127,3

Tabulka 5-1 naměřené hodnoty při prvním měření

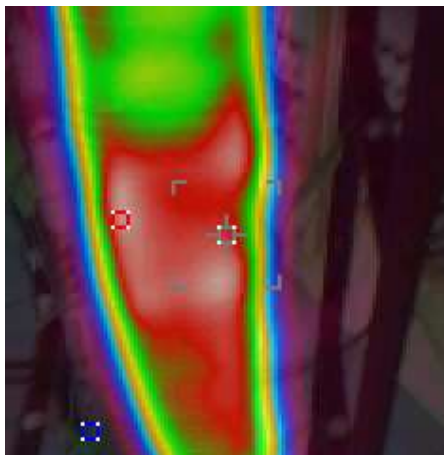
Z tabulky (5.1) je patrné, že se rezistor v první části zahřívá o 47,7°C více, než v části šesté. Po následném zamyšlení na výsledky tohoto měření jsem zjistil, že tento vysoký rozdíl teplot je způsoben vyšší hustotou závitů rezistoru v první části, proto jsem byl nucen převést rezistor, tak abych zlepšil toto teplotní rozložení.

Naměřené hodnoty v druhém měření:

část	t (°C)
1	173
2	172
3	168
4	175
5	154
6	149

Tabulka 5-2 naměřené hodnoty při druhém měření

Z tabulky (5.2) je zjevné, že mé úsilí zlepšit rozložení teplot na rezistoru se vydařilo. Pomocí lepšího rozložení závitů rezistoru jsem dosáhl maximálního teplotního rozdílu v jednotlivých částech rezistoru pouhých 26°C, což je oproti prvnímu měření o více než 20°C méně. Absolutně rovnoměrného rozložení tepla na tomto rezistoru nebylo možné, z důvodu jeho mechanických opotřebení, způsobeného stářím a špatným skladováním rezistoru. Na obr. (5.4) je zachycena fotografie rezistoru termokamerou v ustáleném stavu.



Obrázek 5-4 fotka rezistoru z termokamery

Pro porovnání se lze podívat na obr. (5.5), kde je vyfocena celá konstrukce rezistoru.



Obrázek 5-5 fotografie kompletní konstrukce rezistoru

6 Závěr

Hlavním cílem bakalářské práce bylo porovnat parametry a cenu rezistorů, jež lze koupit s rezistory, které sám navrhnu z běžně dostupných materiálů.

V první části bakalářské práce se zaměřuji na teorii o rezistorech a jejich vlastnostech. Tato část je důležitá z hlediska teoretických znalostí a uvedení do problematiky, kterou v dalších částech řeším, hlavně tedy pro návrh jednotlivých rezistorů.

Prvním cílem byla analýza trhu s rezistory, které lze použít, jako odporovou zátěž na napětí 24V a proud 30A. Mezi mnoha výrobci rezistorů, jež jsem na internetu dohledal, jsem našel 10 různých typů rezistorů, jejichž parametry jsou popsány v kapitole číslo (2). Rozsah cen těchto rezistorů je 803 – 5227 Kč, jejich ceny jsou odvíjeny hlavně z konstrukcí jednotlivých rezistorů a jejich odolnost.

Dalším cílem mé práce bylo navrhnout nízkonákladové řešení pro odporovou zátěž na 24V a 30A. V této části jsem pomocí výpočtů v kapitole číslo (3) byl schopen navrhnout 3 typy rezistorů. Každé z těchto řešení má své jisté výhody, ale musím upozornit, že všechna tři tato řešení jsou spíše pro laboratorní použití, což vychází z jejich konstrukce, jejíž odolnost je velmi nízká oproti koupitelným rezistorům a z požadavku na nízkou cenu.

Praktickou částí mé práce byly jak výše popsané analýza trhu a návrh rezistorů, tak i konstrukce rezistoru. Konstruování rezistoru spočívalo hlavně v návrhu a konstrukci stojanu do, něž jsem zavěsil požadovaný rezistor. Konstrukce je blíže popsána v kapitole číslo (5). Dále jsem na tomto rezistoru prováděl dvě měření, ze kterých jsem zjistil hodnotu odporu tohoto rezistoru, jež je $R = 3,72 \Omega$ a v neposlední řadě rozložení teplot na povrchu rezistoru v ustáleném stavu.

Nyní se dostávám k poslednímu cíli mé práce, a to porovnání jednotlivých typů rezistorů. Toto porovnání bude vycházet hlavně z kapitoly číslo (4), kde jsou shrnuty všechny důležité parametry jednotlivých rezistorů. Jako první provedu srovnání rezistorů na základě jejich rozměrů, toto srovnání je důležité z nároku na prostor, který rezistor zabere. Nejmenším z rezistorů dostupných ke koupi je od firmy Fairfild a to model RCE 800, nejmenším z mnou navržených rezistorů je rezistor vodní, který je ale stále o mnoho

větší než rezistor RCE 800, a proto je zřejmé, že nejlepším rezistorem z hlediska rozměrů je RCE 800. Výsledkem tohoto porovnání je, že z běžně dostupných materiálů nejsme schopni minimalizovat rezistory, tak jako profesionální firma. Jako další porovnám hmotnost jednotlivých rezistorů, která je důležitá např. pokud budeme chtít rezistor zavěsit. Nejlehčí rezistor dostupný z trhu je taktéž od firmy Fairfild a to model RMS 5, nejlehčím z mnou navrhovaných rezistorů je nejlehčí vodní rezistor, to je dáno hlavně hustotou vody, jež je o mnoho nižší, než hustota oceli. Váhově srovnatelný s koupitelnými rezistory je tedy pouze vodní rezistor. Ocelové rezistory jsou velmi těžké. Předposledním porovnávaným parametrem bude cena rezistorů. Tento parametr je velmi zásadní pro rozhodnutí zda konstruovat mnou navržené rezistory. Nejlevnějším koupitelným rezistorem je již výše zmíněný model RCE 800, jehož cena je 803Kč, což je v porovnání s ostatními koupitelnými rezistory velmi levné. Za to mnou navržené rezistory jsou všechny levnější než 500 Kč. Nejlevnějším z nich je plošný rezistor z ocelového plechu, jehož cena je 267 Kč. Poslední porovnání bude z hlediska praktičnosti, toto porovnání je velmi jednoduché, jelikož mnou navržené rezistory s cenou uvedenou výše, jsou schopny provozu, ale pouze v laboratorních podmínkách. Konstruovaný rezistor jsem uvedl k provozu v laboratoři katedry KEV.

Přínosem této práce je důkaz, toho že jsme schopni navrhnout a zkonstruovat rezistor z běžně dostupného materiálu za velmi nízkou cenu a uvést ho do provozu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PLATT, Charles. *Encyclopedia of electronic components. Volume 1, [Power sources & conversion: resistors, capacitors, inductors, switches, encoders, relays, transistors]*. Sebastopol: Maker Media, 2012. xxi, 278 s. ISBN 978-1-449-33389-8.
- [2] HÖFL, Herbert. *Pasívní součástky pro elektroniku*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1983. 361 s.
- [3] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky. 1. díl, Základy elektroniky, ideální a reálné prvky: rezistor, kondenzátor, cívka*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 338 s. ISBN 80-7300-146-2.
- [4] FUKÁTKO, Jaroslav, FUKÁTKO, Tomáš a ŠINDELKA, Jiří. *Teplo a chlazení v elektronice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1997. 30 s. ISBN 80-86056-24-4.
- [5] FUKÁTKO, Tomáš a FUKÁTKO, Jaroslav. *Teplo a chlazení v elektronice II*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 118 s. ISBN 80-7300-199-3.
- [6] RUSŇÁK, Štěpán a ŘEZÁČEK, Petr. *Elektrické přístroje. 1. 2., přeprac. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 155 s. ISBN 80-7082-825-0.
- [7] DĚDEK, L. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990. ISBN 80-214-0219-9.
- [8] BUL', B. K. *Elektrické přístroje: základy teorie*. Praha: SNTL, 1977. Řada elektrotechnické literatury.
- [9] *Supravodivost - naděje pro 21. století | Fyzikální ústav Akademie věd ČR. Vítejte na stránkách FZÚ | Fyzikální ústav Akademie věd ČR* [online]. Copyright © 2008 [cit. 14.04.2018]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-nadeje-pro-21-stoleti>
- [10] LANGER, E. *Elektrotepelná technika, část I + II*. vyd. 2. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1974.
- [11] *Výkonové drátové rezistory. Tesla Blatná* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.tesla-blatna.cz/cs/vyrobky-rezistory.php#vrstvove-rezistory>
- [12] *Datasheet - Rezistory_2011_v2. Tesla Blatná* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.tesla-blatna.cz/soubory/rezistory-vykonove-resistors-power.pdf>
- [13] *Datasheet - AL large capacity metal - clad wire wound resistor. Tme.eu* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/a88b9e948f6d3bbb4a8f7850cbfb34dd/AL.pdf>
- [14] *Datasheet - TAP800 series. Mouser.com* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/303/res_tap800-1265482.pdf
- [15] *Datasheet - RMS. Fairchild power resistors* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.fairchild.com/media/import/DATASHEETPDF/DS.0314.MS.pdf>
- [16] *Datasheet - RNP. Fairchild power resistors* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.fairchild.com/media/import/DATASHEETPDF/DS.0314.NP.pdf>
- [17] *Datasheet - RM. Fairchild power resistors* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.fairchild.com/media/import/DATASHEETPDF/DS.0314.RM.pdf>
- [18] *Datasheet - RFH. Fairchild power resistors* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.fairchild.com/media/import/DATASHEETPDF/DS.0314.FH1PG.pdf>
- [19] *Datasheet - RCEHP. Fairchild power resistors* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.fairchild.com/media/import/DATASHEETPDF/DS.0314.FH1PG.pdf>

- [20] Ions in Water, and Conductivity. In: *Horiba scientific* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.horiba.com/sg/application/material-property-characterization/water-analysis/water-quality-electrochemistry-instrumentation/ph-knowhow/the-basis-of-conductivity/ions-in-water-and-conductivity/>