

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra technické kybernetiky Školní rok: 1990/91

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Milana ŠPIRKU**
obor **23-40-8 ASŘ výrobních procesů ve strojírenství**

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Srovnání výhodnosti různých metod měření teplot z hlediska užití v zařízeních na dělení vzduchu a návrh optimálního měření.**

Zásady pro vypracování:

- 1) Studiem literatury se seznámte s metodikou měření teploty s důrazem na použití v průmyslových aplikacích.
- 2) Proveďte rozbor jednotlivých metod měření teploty a navrhnete optimální způsob měření teploty v zařízeních na dělení vzduchu.
- 3) Seznámte se s průmyslově vyráběnými a v současnosti dodávanými zařízeními s ohledem na realizaci navrženého měření teploty podle zadání.

V 4 / 92 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC, CENKOVSKÁ 6
602 02 LIBEREC

LTP / 92 S

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: 50 - 60 stran

Seznam odborné literatury:

- /1/ Temperature sensor guide (firma Lake shore, USA)
- /2/ Lake shore product catalog
- /3/ Jan Obr; Jiří Růžička: Průmyslová zařízení na výrobu kyslíku a dusíku. Praha, SNTL 1964
- /4/ Jepifamova a kol.: Razdělení vzduchu metodou hlubokovo ochlazení (I. a II. díl); Moskva, 2.vydání 1973

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vladimír Michna

Konzultant:

Ing. Charouz, FEROX Děčín

Zadání diplomové práce:

15.10.1990

Termín odevzdání diplomové práce:

3. 6.1991



Věchet
Doc. Ing. Vladimír Věchet, CSc.
Vedoucí katedry

vz. Benet
Prof. Ing. Zdeněk Kovář, CSc.
Děkan

V Liberci

dne 15.10. 1990

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci

fakulta strojní

obor 23-40-8

Automatizované systémy řízení výrobních procesů
ve strojírenství.

Srovnání výhodnosti různých metod měření teplot
z hlediska užití v zařízeních na dělení vzduchu
a návrh optimálního měření.

Milan Špirka

KTK ASŘ FS 16862

Vedoucí práce: ing. Vladimír Michna
VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh

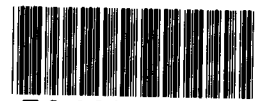
počet stran: 61

počet obrázků: 29

počet příloh: 0

datum: 28.5.1991

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY U LIBERCI



3146075835

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 28.5.1991

Spurba Milan

Na úvod své diplomové práce bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce ing. Vladimíru Michnovi a konzultantovi ing. Charouzovi z Feroxu Děčín za všestrannou pomoc a cenné rady, které mi v průběhu celé práce poskytovali.

Obsah:

strana

1. Úvod	6
2. Přehled elektrických snímačů nízkých teplot	9
3. Odporové snímače nízkých teplot	10
3.1. Odporové snímače kovové	10
3.1.1. Odporové kovové snímače s čistými kovy	11
3.1.1.1. Snímače platinové	11
3.1.1.2. Snímače niklové	16
3.1.1.3. Snímače měděné	18
3.1.2. Odporové kovové snímače slitinové	19
3.1.2.1. Snímače rhodium-železné	19
3.1.3. Odporové kovové snímače složené	21
3.1.3.1. Snímače nikl-manganiové	21
3.2. Odporové nekovové snímače	23
3.2.1. Snímače uhlíkové	23
3.2.1.1. Snímače hmotové	23
3.2.1.2. Snímače sklouhlíkové	26
3.2.2. Snímače polovodičové	29
3.2.2.1. Snímače termistorové	29
3.2.2.2. Snímače germaniové	33
3.2.2.3. Snímače křemíkové	37
3.2.2.4. Snímače galium-arzenidové	40
4. Kapacitní snímače nízkých teplot	44
4.1. Snímače sklokeramické	44
5. Indukční snímače nízkých teplot	47
5.1. Snímače feritové	47
5.2. Snímače slitinové	48
6. Termoelektrické snímače nízkých teplot	49
7. Vyhodnocovací obvody a přístroje odporových snímačů	55
8. Závěr	58

1. Úvod

S rozvojem průmyslových oborů, které pro svou výrobu potřebují jednotlivé čisté složky vzduchu, dochází k rozvoji průmyslové výroby kyslíku, dusíku a ostatních složek vzduchu.

Složky vzduchu se v průmyslových podmínkách získávají pomocí zařízení na dělení vzduchu. Technologickým procesem je zde nízkoteplotní destilace zkapalněného vzduchu.

Na počátku tohoto technologického procesu se do zařízení kompresorem vhání stlačený vzduch, který je třeba nejprve ochladit. Toto ochlazení se provádí v protiproudých výměnících. V těchto výměnících se jako ochlazovací média používají vystupující produkty ze zařízení /kyslík, dusík/. Ve výměnících se také většinou vzduch zbavuje příměsí vodní páry a kysličníku uhličitého. Po ochlazení se část vzduchu vede na expanzní turbínu. Tato turbína je spojena s brzdícím generátorem nebo dotlačovacím kompresorem. Vzduch na této brzděné turbíně vykonává práci, čímž se dále ochlazuje. Takto ochlazený vzduch se dále vede do dalšího protiproudého výměníku, na jehož výstupu se získává zkapalněná směs vzduchu. Tato směs prochází destilační kolonou, kde nízkoteplotní destilací se od sebe oddělují jednotlivé složky. Nejprve je to kapalný kyslík a dusík. Ty se posléze odvádějí z části do vnějších zásobníků a z části jako ochlazovací médium do protiproudých výměníků. Zbývající směs zkapalněného argonu, neonu a helia je oddělována na jiných destilačních kolonách.

Využití těchto prvků je velice široké. Pomocí kyslíku je možno značně zintenzívnit, zhospodárnit a zkvalitnit výrobní procesy v hutnictví, při výrobě neželezných i železných kovů, v různých odvětvích chemického a plynárenského průmyslu, ve

strojírenství, potravinářství, stavebnictví, lékařství atd. Vzácené plyny se uplatňují v osvětlovací technice, slaboproudé elektrotechnice, v lékařství a v dalších oborech.

Při tomto technologickém procesu je třeba měřit teplotu v probíhající ději. Tyto teploty se pohybují v rozmezí pokojových teplot až po teploty kapalného kyslíku a dusíku. Jedná se tedy o nízké teploty v intervalu od 70 do 300 K.

Teploměry používané pro tato měření jsou zpravidla založeny na teplotní závislosti vybraných fyzikálních vlastností vhodných látek. Z těchto vlastností přichází v úvahu např. elektrický odpor, termoelektrické napětí, magnetická susceptibilita, aj.

Každé měření teplot se skládá ze dvou podstatných částí - snímače a vyhodnocovacího obvodu nebo přístroje.

Snímač snímá teplotu nebo změnu teploty měřeného objektu a převádí ji na úměrnou výstupní veličinu. Tato veličina může být buď neelektrická /např. tlak plynu/, nebo elektrická /např. odpor, napětí/ a podle toho rozlišujeme neelektrické snímače a elektrické snímače.

Vyhodnocovací obvod nebo přístroj převádí výstupní veličinu snímače na teplotní údaj čtený zpravidla na stupnici.

O volbě měřicí metody nebo teploměru rozhoduje především jeho přesnost, citlivost, krátkodobá a dlouhodobá stálost. Dále je nutné brát v úvahu průběh závislosti termometrického parametru snímače na teplotě, citlivost snímače na magnetické pole a geometrické rozměry snímače.

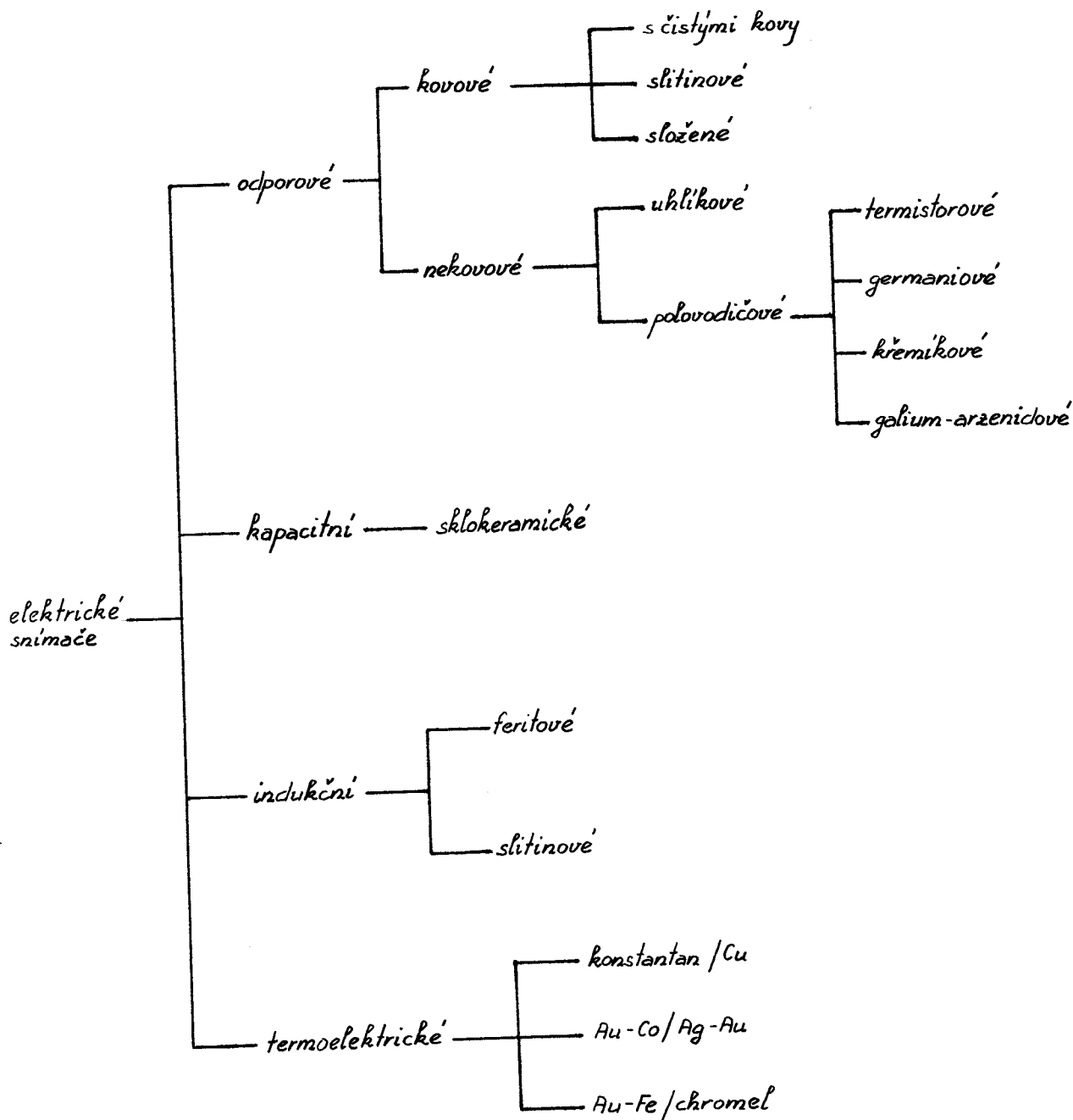
Po zvážení výhod a nevýhod současných možností měření nízkých teplot vyplývá, že v převážné většině jsou pro měření nízkých teplot používány teploměry s vyhodnocováním elektrických veličin závislých na teplotě.

O těchto teploměrech s ohledem na jejich praktické použití v zařízeních na dělení vzduchu pojednává tato práce.

2. Přehled elektrických snímačů nízkých teplot

Elektrické teploměry určené pro oblast nízkých teplot mohou být rozděleny podle typů současných snímačů na teploměry odporové, kapacitní, indukční a termoelektrické.

Přehled elektrických snímačů nízkých teplot je uveden na následujícím obrázku.



3. Odporové snímače nízkých teplot.

3.1. Odporové kovové snímače.

Hlavní požadavky klademe na kovy vhodné pro výrobu odporových snímačů nízkých teplot, jsou :

1. Velký teplotní součinitel odporu
2. Konstantní teplotní součinitel odporu v širokém teplotním rozsahu
3. Dlouhodobě stálý teplotní součinitel odporu
4. Velký měrný odpor
5. Dobré mechanické vlastnosti /tažnost, ohebnost .../
6. Snadná výroba s velkou chemickou čistotou

Z těchto hlavních požadavků největší důraz je třeba klást na požadavky 1 a 3.

K bodu číslo 1 je třeba poznamenat, že v oblasti nízkých teplot mají velký teplotní součinitel odporu především čisté kovy. Jsou to především sodík, draslík, cesium, rubidium, thalium, galium, indium, olovo, vizmut, dále pak stříbro, zlato, platina, mangan, měď a nikl. Protože však většina těchto kovů nespĺňuje ani v základní míře následující požadavky, je počet kovů vhodných pro výrobu odporových snímačů nízkých teplot značně omezen.

K bodu 3 je třeba dodat, že dlouhodobá stálost teplotního součinitele odporu podmíněné dlouhodobou stálostí odporu kovu předpokládá především co největší chemickou čistotu kovu /to jest co nejmenší obsah nežádoucích nečistot/, dále netečnost kovu k okolnímu prostředí a necitlivost kovu na vnější magnetické pole.

Po zvážení všech výše uvedených požadavků kladených na kovy pro odporové snímače nízkých teplot, vychází závěr, že z čistých kovů nejlépe splňuje požadavky platina, v menší míře ještě nikl a částečně měď. Byly též snahy uplatnit indium a mangan, jenže tyto snahy se nesetkaly s velkým ohlasem pro špatné mechanické vlastnosti zmíněných kovů. Indium se ukázalo jako příliš měkké a mangan jako příliš tvrdý a velmi křehký.

3.1.1. Odporové kovové snímače s čistými kovy.

3.1.1.1. Snímače platinové.

Přednosti platiny jako materiálu vhodného pro výrobu odporových snímačů nízkých teplot lze shrnout do následujících bodů :

1. Dlouhodobě stálý teplotní součinitel odporu související s dlouhodobou stálostí odporu platiny, resp. dlouhodobou stálostí závislosti odporu platiny na teplotě. Dlouhodobá stálost odporu platiny je největší ze všech v úvahu přicházejících kovů.
2. Dobré mechanické vlastnosti, především tažnost a ohebnost. Tyto vlastnosti dovolují vyrábět snímače s velmi dobrým vyloučením mechanického napětí v drátu, čímž se přispěje k dlouhodobé stálosti odporu hotových snímačů.
3. Poměrně snadná výroba kovu bez příměsí.

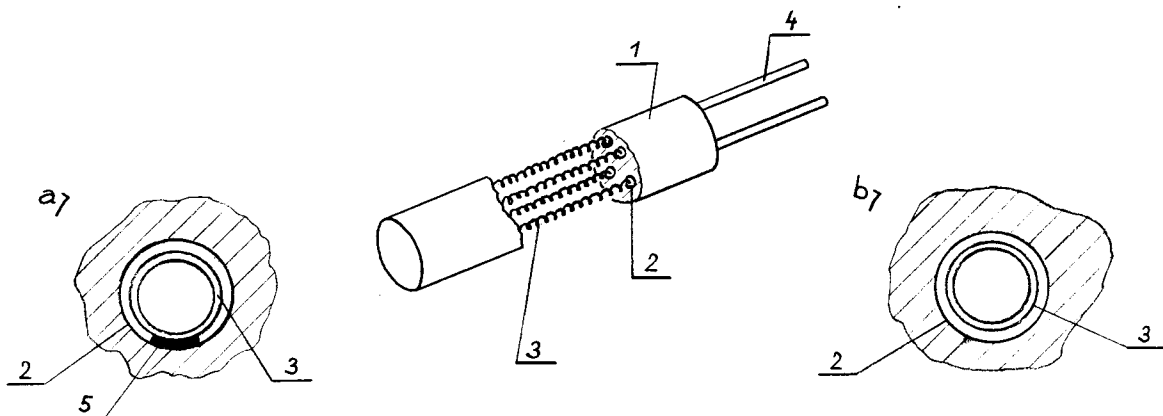
Vedle těchto předností vykazuje však platina i jiné nedostatky. Jsou to :

1. Malý teplotní součinitel odporu, zvláště pod 10 K.

2. Proměnný teplotní součinitel odporu v celém rozsahu nízkých teplot.
3. Malý měrný odpor.

Přibližně od 30 K vykazuje platina vynikající dlouhodobou stálost elektrického odporu. Při nižší teplotě může platina za jistých okolností projevit určitou časovou nestálost a neurčitost průběhu závislosti elektrického odporu na teplotě.

Schematický řez provozním platinovým snímačem je na obr.1. Snímač se skládá z keramického válečku /1/ s dvěma či čtyřmi kanálky /2/, ve kterých jsou uloženy spirálky /3/ navinuté z platinového drátku o průměru 0,05 mm. Podle teplotního rozsahu, pro který je snímač určen, mohou být kanálky opatřeny volnými spirálkami /obr.1b/ nebo spirálkami, které jsou ke stěnám kanálků připájeny /obr.1a/ sklovinou /5/ s vysokým bodem tání. Po zasunutí platinových spirálek do kanálků se snímač opatří dvěma nebo čtyřmi elektrickými přívody /4/ o průměru 0,25 až 0,4 mm a oba konce keramického tělíska se hermeticky uzavřou skleněným zátavem.



obr.1. Konstrukční úpravy provozních platinových snímačů nízkých teplot : a/ s přitavenou platinovou spirálkou
b/ s volnou platinovou spirálkou

Platinové snímače mohou být opařeny kryty podle místa a způsobu uložení snímačů.

Platinové snímače firmy ROSEMOUNT patří mezi běžné platinové snímače vhodné pro měření nízkých teplot.

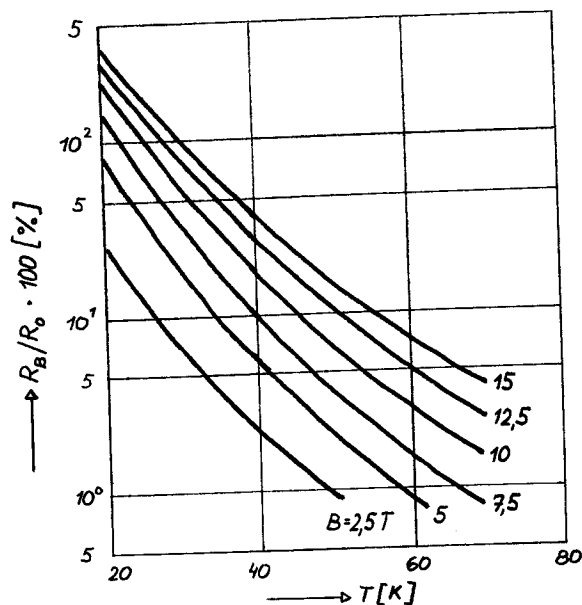
Firma vyvinula 3 typy tohoto druhu snímačů : E 712A, 1000, 118G, které poskytují pro měření široký teplotní rozsah. Technické údaje těchto typů jsou uvedeny v následující tabulce:

Pt snímač	ROSEMOUNT		
	E 712A	1000	118G
Typ	E 712A	1000	118G
Teplotní rozsah /K/	75 až 1073	13 až 1023	13 až 1273
Jmenovitý odpor /R _{273K} / /K/	100	10;20;50; 100; 400;	100
Stálost odporu /%/	±0,05	±0,05	-
Rozměry /mm/	3,2 x 25	3,1 x 19	6 x 6 x 0,75

Závislost relativní změny odporu $\Delta R_B/R_0$ na teplotě T při různé indukci magnetického pole B platinových snímačů této firmy je vyznačena na obr.2.

Citlivost platinových snímačů na magnetické pole - magnetorezistence - způsobuje, že se i při této stálé teplotě odpor těchto snímačů mění s magnetickým polem. Magnetorezistence platinových snímačů se vyznačuje závislostí poměru $\Delta R_B/R_0$ na indukci B magnetického pole.

Z obr.2 je zřejmé, že magnetorezistence platinových snímačů rychle stoupá, klesne - li jejich teplota pod 30 K.



obr.2. Závislost relativní změny odporu $\Delta R_B/R_0$ na teplotě T při různé indukci magnetického pole B platinových snímačů firmy ROSEMOUNT

Naší domácí firmou, která vyrábí platinové snímače jsou Závody průmyslové automatizace /ZPA/. Tato naše firma produkuje též snímače, které mají platinovou spirálku zatavenou do keramického válečku.

Z produkce této firmy se pro měření nízkých teplot používá běžně snímač typu MT, jehož teplotní rozsah je 75 až 873 K. Jmenovitý odpor tohoto snímače je 100Ω a rozměry keramického válečku jsou : průměr 3 mm a délka 30 mm.

Dovolené tolerance tohoto snímače jsou následující : při teplotě 73 K je to $\pm 0,5\Omega$; při 173 K je to $\pm 0,3\Omega$ a při 273 K je dovolená tolerance $\pm 0,1\Omega$.

Další firmou zabývající se produkcí platinových snímačů je firma DEGUSSA. Provozní snímače této firmy mají spirálku zcela zatavenou buď ve skle, nebo v keramice.

Snímače skleněné se vyskytují pod označením P, snímače keramické pod označením W.

Z řady snímačů skleněných se nejčastěji pro měření nízkých teplot používá snímač s označením P3. Tento snímač je opatřen dvěma elektrickými přívody. Teplotní rozsah je 23 až 823 K, jmenovitý odpor je 100Ω a rozměry skleněného válečku jsou - průměr 3 mm a délka 18 mm.

Ze snímačů, jejichž spirálka je zatavena do keramiky se nejčastěji používá snímač typového označení W60/7. Tento snímač je opatřen čtyřmi elektrickými přívody. Teplotní rozsah je 23 až 873 K, jmenovitý odpor $2 \times 50\Omega$ a rozměry keramického válečku jsou - průměr 3 mm a délka 22 mm.

Poslední nejznámější firmou, která produkuje platinové snímače nízkých teplot je firma LAKE SHORE.

Snímače této firmy tvoří vynikající širokou řadu stabilních teplotních snímačů. Kromě toho se platinové snímače této firmy vyznačují vysokou reprodukovatelností a při použití v teplotách nad 40 K nízkou závislostí na magnetickém poli.

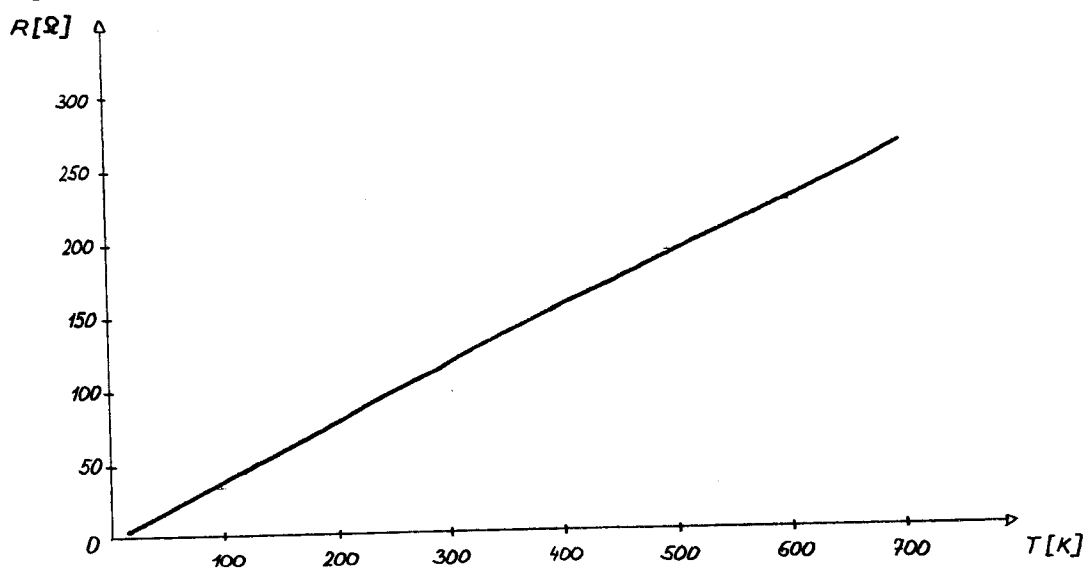
Tato firma produkuje tři typy platinových snímačů pod řadovým označením PT-100. Jejich označení je PT-102 a PT-103 pro snímače keramické a PT-111 pro snímač skleněný. Všechny tři typy jsou opatřeny dvěma elektrickými přívody.

Teplotní rozsah keramických snímačů je 14 až 873 K. Jmenovitý odpor je 100Ω . Délka keramického válečku u snímače PT-102 je 20,3 mm, jeho průměr 2,0 mm. U snímače s označením PT-103 je délka válečku 12,1 mm a průměr 1,8 mm.

Teplotní rozsah skleněného snímače /typ PT-111/ je 14 až 673 K. Jmenovitý odpor je stejně jako u keramických snímačů 100Ω . Rozměry skleněného válečku jsou následující : délka válečku 5 mm a průměr 1,8 mm.

Platinové odporové teploměry řady PT-100 vyhovují standardizaci DIN v teplotním rozsahu od 70 do 850 K. Jestliže je požadována větší přesnost než jakou udává výrobce, je možné firmu požádat o individuální cejchování snímačů s přesností 0,01 K nad 77 K.

Platinové snímače jsou velice vhodné pro měření nízkých teplot pro již uvedené přednosti platiny, zvláště pro její téměř lineární průběh závislosti odporu na teplotě. Tuto výjimečnou vlastnost příkladně dokumentuje následující obr.3, kde je vykreslen průběh závislosti odporu R na měřené teplotě T u platinových snímačů řady PT-100 firmy LAKE SHORE.



obr.3. Závislost odporu R na měřené teplotě T u platinových snímačů firmy LAKE SHORE.

3.1.1.2. Snímače niklové

V katalogu firmy DEGUSSA jsou popsány dva typy niklových snímačů určených pro měření v teplotním rozsahu 213 až 423 K. Jsou to snímače uvedené pod označením N2 a N2D.

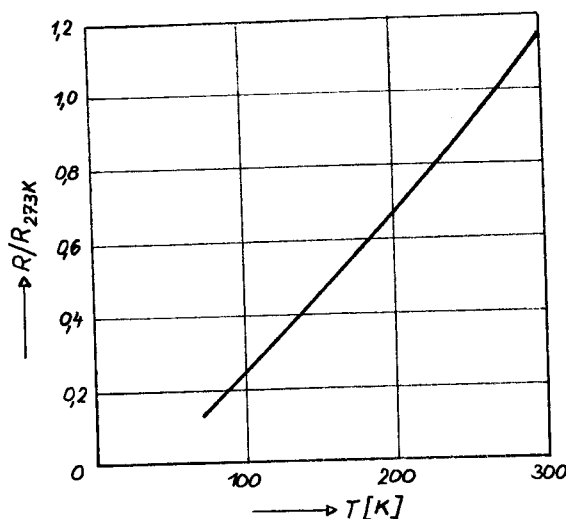
Konstrukčně jsou tyto typy provedeny následujícím způsobem : předem izolovaný niklový drát je navinut na skleněném nosném tělísku, které je po navinutí drátu zalito smaltem, popř. porcelánovou glazurou.

Typ N2 je opatřen dvěma elektrickými přívody a jeho jmenovitý odpor je 60Ω .

Typ N2D je opatřen čtyřmi elektrickými přívody a jeho jmenovitý odpor je 85Ω .

Další firmou, která vyvinula niklový snímač s označením TSG je firma MICRO-MEASUREMENTS. Snímač této firmy je určen pro teplotní rozsah 77 až 530 K. Odporová část tohoto snímače má tvar meandru a je zhotovena jako tenká folie z čistého niklu, která je posléze zalisována do sklolaminátové nosné podložky. Rozměry těchto snímačů se pohybují od $2,5 \times 3,8 \times 0,1$ mm až do $6,2 \times 10,5 \times 0,1$ mm. Snímač je opatřen dvěma elektrickými přívody a k měřenému objektu se připevňuje speciálním lepidlem.

Niklové snímače mají proti snímačům platinovým menší dlouhodobou stálost odporu a při teplotách pod 100 K i menší citlivost. Závislost poměru odporů R/R_{273K} na teplotě T niklu v teplotním rozsahu 77 až 300 K je uvedena na obr.4.



obr.4. Závislost poměru odporů R/R_{273K} na teplotě T niklu

3.1.1.3. Snímače měděné

Vedle platinových a niklových snímačů nízkých teplot se řadí i snímače měděné. Předností těchto snímačů je, že jejich závislost odporu R na měřené teplotě T je téměř lineární, a proto i jejich teplotní součinitel odporu je téměř konstantní v širokém rozsahu nízkých teplot.

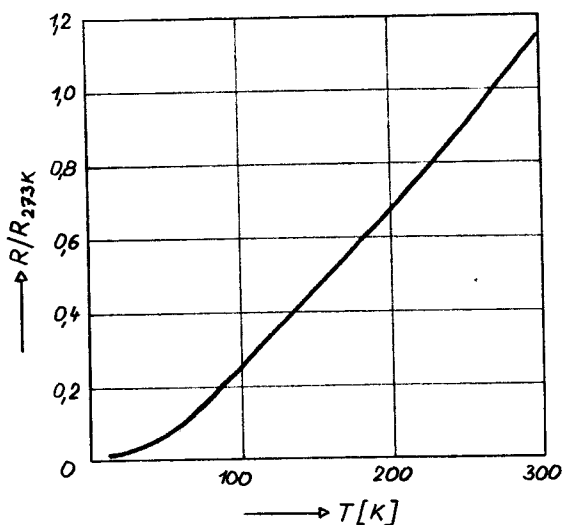
Měděné snímače mají však i závažné nedostatky. Mezi ty hlavně patří to, že měď, i přesto, že ji můžeme vyrobit čistou, snadno oxiduje a reaguje s okolním prostředím. Proto dlouhodobá stálost odporu měděných snímačů není srovnatelná se stálostí odporu snímačů platinových a ani niklových. Další nevýhodou je, že má malý měrný odpor a proto je obtížné zhotovit snímač s větším jmenovitým odporem. Z těchto důvodů nejsou měděné snímače pro měření nízkých teplot vyráběny průmyslově.

Vyžaduje-li některé měření či regulace teploty snímače zvláštního tvaru, který je nutné vyrobit takzvaně na míru, je nejdostupnější snímač měděný.

Protože, jak už bylo uvedeno, měď časem oxiduje, je nut-

né měděné snímače čas od času přecejchovat, vyžadujeme-li větší přesnost měření.

Závislost poměru odporů R/R_{273K} na teplotě T mědi v teplotním rozsahu 10 až 300 K je na obr.5.



obr.5. Závislost poměru odporů R/R_{273K} na teplotě T mědi.

3.1.2. Odporové kovové snímače slitinové

3.1.2.1. Snímače rhodium-železné

Základním materiálem pro výrobu rhodium-železného snímače je čisté rhodium s obsahem 0,5 atom. % železa. Nad teplotou asi 40 K rozhoduje o odporu snímače rhodium, které se z hlediska průběhu závislosti odporu R na teplotě T snímače chová jako jiné čisté kovy. Pod teplotou 40 K ovlivňuje odpor snímače obsah železa.

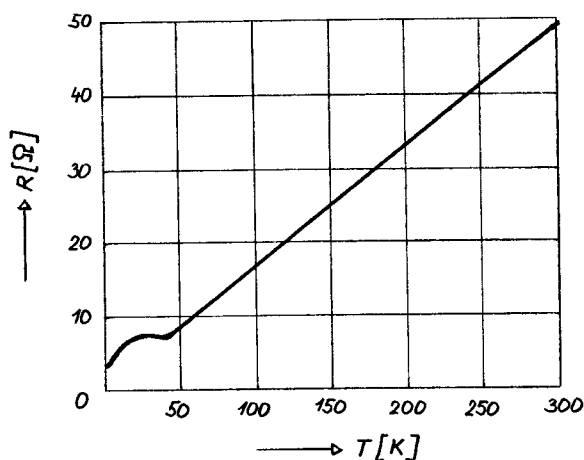
Firmou, která produkuje rhodium-železné snímače je firma CRYOGENIC CALIBRATIONS.

Snímač této firmy je snímač Barberova typu, kdy odporová spirála je navinutá na skleněném nosníku. Tento snímač je určený pro rozsah teplot od 2 do 300 K. Odporová spirála navi-

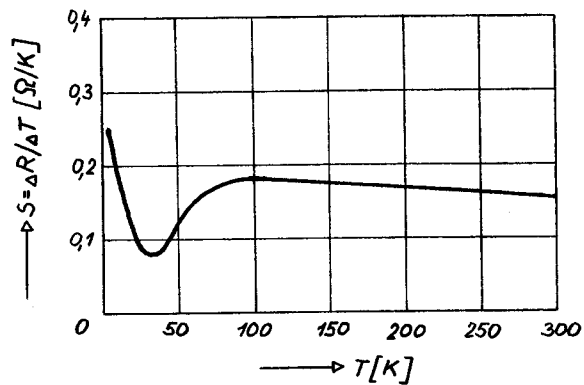
nutá z rhodium-železného drátu je nesena skleněným nosníkem zasunutým do platinového pouzdra uzavřeného skleněným záta-
vem, jímž procházejí čtyři platinové přívody. Pouzdro je na-
plněno heliem. Snímač má délku 45 mm a průměr 9 mm. Jmenovi-
tý odpor snímače je 45Ω . Provozní proud spínače je 0,5 mA.

Firmou, která vyvinula rhodium-železný snímač pod ozna-
čením RF-800-4, je firma LAKE SHORE. Tento snímač je určený
pro měření v teplotním rozsahu od 1 až do 500 K. Odporová
spirála je u tohoto snímače nesena do skleněného válcového
pouzdra. Pouzdro je naplněno kysličníkem hlinitým a je opat-
řeno čtyřmi platinovými přívody. Snímač má délku 20 mm a prů-
měr 3,17 mm. Jmenovitý odpor je 27Ω a budicí proud se při
teplotě nad 4 K doporučuje 1 mA.

V následujících dvou obrázcích je ukázán průběh odporu R
s teplotou T pro rhodium-železný snímač a závislost citli-
vosti S na teplotě T.



obr.6. Závislost odporu R na teplotě T rhodium-železného snímače.



obr.7. Závislost citlivosti S na teplotě T rhodium-železného snímače

Z obr.6 vyplývá, že odpor R se u rhodium-železných snímačů od 60 K lineárně mění s teplotou. Z obr.7 je patrné, že citlivost rhodium-železných snímačů klesá v oblasti kolem 30 K až pod hodnotu $0,1 \Omega / K$, ale od teploty 100 K je téměř lineární. Rhodium-železné snímače se vyznačují dobrou dlouhodobou stálostí, která zaručuje velkou dlouhodobou stálost cejchování snímače. Stálost cejchování při teplotě 4,2 K je $\pm 0,3$ mK a při teplotě 273 K je $\pm 0,5$ mK.

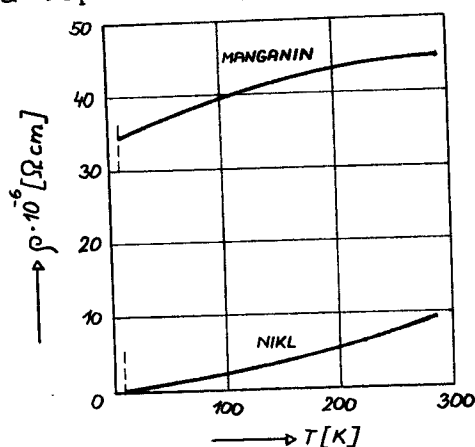
3.1.3. Odporové kovové snímače složené

3.1.3.1. Snímače nikl-manganiové

Firma MICRO-MEASUREMENTS uvedla na trh nikl-manganiový snímač pod označením CLTS. Tento snímač se vyznačuje lineárním průběhem závislosti odporu R na měřené teplotě T v rozsahu teplot od 4,2 do 300 K.

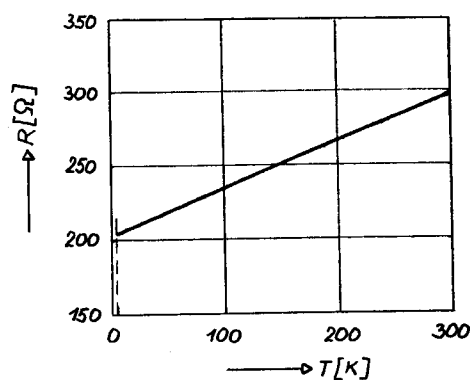
Lineárního průběhu odporu se dosahuje sériovým řazením dvou dílčích odporů, z nichž jeden je zhotoven z manganinu /84% Cu, 12% Mn, 4% Ni/ a druhý z niklu. Průběh závislosti měrného od-

poru ρ obou kovů na teplotě T je na obr.8.



obr.8. Průběh závislosti měrného odporu ρ na teplotě T manganinu a niklu.

Z tohoto obrázku vyplývá, že oba kovy se vyznačují obráceným průběhem této závislosti, takže při vhodném poměru obou dílčích odporů může být dosaženo téměř lineárního průběhu závislosti odporu R na teplotě T , jak je uvedeno v obr.9.



obr.9. Závislost odporu R na teplotě T nikl-manganiového snímače CLTS

Zajímavé je konstrukční řešení tohoto snímače. Oba dílčí odpory mají tvar meandru a jsou zhotovené jako tenké folie zalisované do sklolaminátové nosné podložky o rozměrech $11 \times 4 \times 0,1$ mm. Snímač se k měřenému objektu přilepuje speciálním lepidlem. Tento snímač je opatřen buď dvěma nebo čtyřmi elektri-

ckými přívody. Jmenovitý odpor snímače je 285Ω . Při teplotě $4,2\text{ K}$ je odpor snímače 220Ω , citlivost je $0,24\Omega/\text{K}$ a teplotní součinitel odporu snímače je $1,1\%/K$. Pracovní proud snímače je $100\mu\text{A}$.

Odchylky skutečného průběhu charakteristiky $R=f/T$ snímače od čistě lineárního průběhu jsou $\pm 0,5\text{ K}$ v teplotním rozsahu $4,2$ až 100 K a $\pm 1,5\text{ K}$ v rozsahu 100 až 300 K .

3.2. Odporové nekovové snímače

3.2.1. Snímače uhlíkové

3.2.1.1. Snímače hmotové

Uhlíkové snímače nízkých teplot patří pro řadu svých příznivých vlastností mezi snímače oblíbené a často používané. Jejich hlavní předností je velká citlivost, poměrně malá magnetorezistence a nízká cena. Jistým nedostatkem těchto snímačů je poněkud menší dlouhodobá stálost.

První snímače tohoto druhu byly zhotovené laboratorně již ve třicátých letech nanášením koloidní suspenze amorfního uhlíku na papírové pásky, které se vypékaly až vznikla pevná uhlíková vrstva. K této vrstvě pak byly připevněny elektrické přívody.

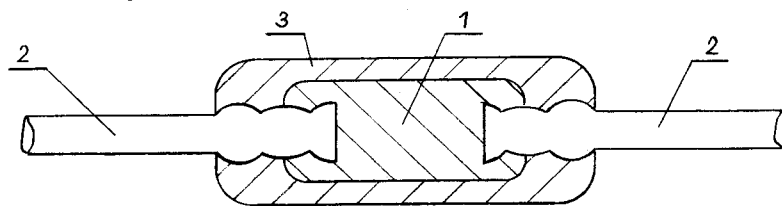
Tyto páskové snímače byly postupem času nahrazeny běžnými radiotechnickými hmotovými odpory. Přestože jako snímače nízkých teplot byly postupně zkoušeny hmotové odpory různých výrobců, zaměřili se zájemci o měření nízkých teplot vlastně jen na odpory firmy ALLEN-BRADLEY a firmy SPEER-CARBON, neboť tyto odpory mají ve srovnání s jinými výrobky významnou před-

nost, kterou je dlouhodobá stálost elektrického odporu i při vystavení těchto prvků mnohonásobným rychlým změnám teploty.

Hmotové snímače firmy ALLEN-BRADLEY se úspěšně používají pro měření nízkých teplot v rozsahu 2 až 20 K s jmenovitým odporem 2,7 až 270 Ω /odpor při teplotě 20°C/ a dovoleným zatížením 0,1 až 1 W.

Hmotové odpory firmy SPEER-CARBON byly podrobně vyzkoušeny pro měření v rozsahu od 0,02 do 4,2 K s jmenovitým odporem 50 až 500 Ω a dovoleným zatížením 0,1 až 1 W.

Základním materiálem používaným pro výrobu hmotových snímačů je prachový uhlík nebo grafit s velikostí zrn asi 10^{-5} mm, který se po smíchání s pojidlem lisuje do tvaru tyčinek opatřených dvěma elektrickými přívody a vypéká se při teplotě, při níž dochází ke spečení zrn. Hotové tyčinky se chrání před poškozením nalisováním ochranné vrstvy z plastické hmoty. Řez hmotovým snímačem je na obr.10. Na obrázku je uhlíková tyčinka /1/ opatřená dvěma elektrickými přívody /2/ a chráněná před vnějšími nepříznivými vlivy ochrannou vrstvou /3/.

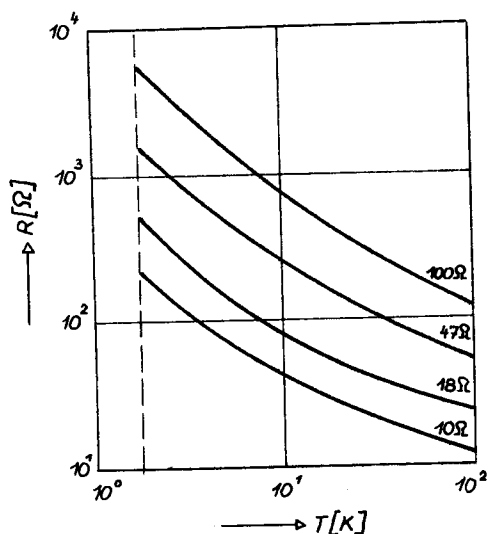


obr.10. Řez hmotovým uhlíkovým snímačem.

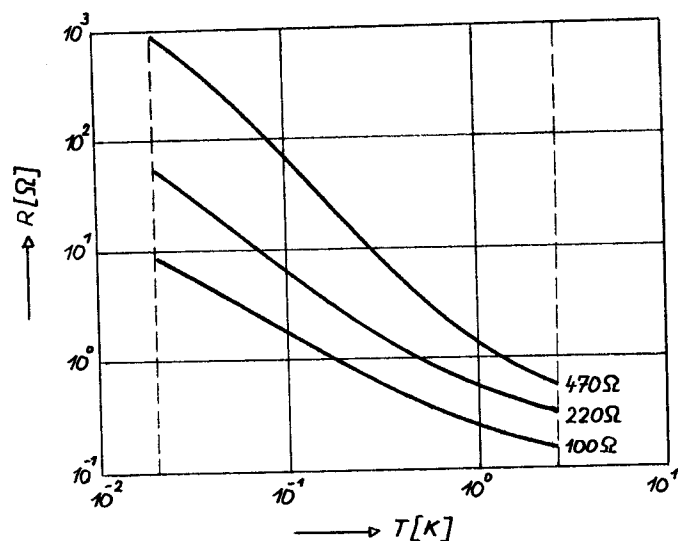
Na obr.11 jsou vyznačeny průběhy závislosti R/T/ čtyř hmotových snímačů ALLEN-BRADLEY s jmenovitým odporem 10, 18, 47, 100 Ω pro rozsah teplot 2,5 až 100 K.

Na obrázku 12 jsou vyznačeny průběhy závislosti R/T/ tří snímačů SPEER-CARBON, třídy 1002 s jmenovitým odporem 100,

220 a 470 Ω a dovoleným zatížením 0,5 W, pro rozsah teplot 0,03 až 4,2 K.



obr.11. Závislost $R/T/$ čtyř druhů uhlíkových snímačů ALLEN-BRADLEY v rozsahu 3 až 100 K.



obr.12. Závislost $R/T/$ tří druhů uhlíkových snímačů SPEER-CARBON třídy 1002 v teplotním rozsahu 0,03 až 4,2 K.

Jelikož odpor snímačů ALLEN-BRADLEY pod teplotou 1K prudce vzrůstá, takže jeho měření je již obtížné, používají se pro tyto nízké teploty hmotové snímače firmy SPEER-CARBON. To vyplývá z obr.12, stejně jako to, že pod teplotou 0,03 K a nad teplotou 4,2 K citlivost snímačů SPEER-CARBON rychle klesá. Proto jejich používání mimo uvedený rozsah není již vhodné.

Citlivost hmotových snímačů na magnetické pole - magneto- rezistence - způsobuje, že odpor těchto snímačů v magnetickém poli se mění, i když jejich teplota je stálá. Tato změna je vždy tím větší, čím větší je indukce magnetického pole a může být buď kladná /odpor se zvětšuje/, nebo záporná /odpor se zmenšuje/. Pro měření nízkých teplot v magnetickém poli se z uvedených dvou druhů hmotových snímačů používají hmotové sní-

mače ALLEN-BRADLEY.

Uhlíkové hmotové snímače nízkých teplot se pro svoje výhodné termometrické vlastnosti a nízkou cenu často používají. Z provozního hlediska však jsou tyto snímače dosti choulostivé.

Hmotové snímače jsou velmi citlivé na mechanické a tepelné namáhání jak vlastní uhlíkové hmoty, tak i elektrických přívodů, které jsou do hmoty zalisované. Protože oba dva druhy namáhání mění průběh závislosti R/T snímačů, je nutné snímače, které byly vystaveny některému z uvedených namáhání, znovu ocejchovat. Z uvedených důvodů je nutné i velmi opatrné instalování těchto hmotových snímačů do měřicího prostoru. Je nutné vyhnout se ohýbání přívodů a pájení přívodů pájkou s vysokým bodem tání.

Poněvadž hmotové snímače jsou schopny pohlcovat vodní páru, může se opět měnit průběh závislosti R/T . Proto je vhodné ocejchované snímače uchovávat v skleněných ampulkách hermeticky uzavřených pryžovými zátkami.

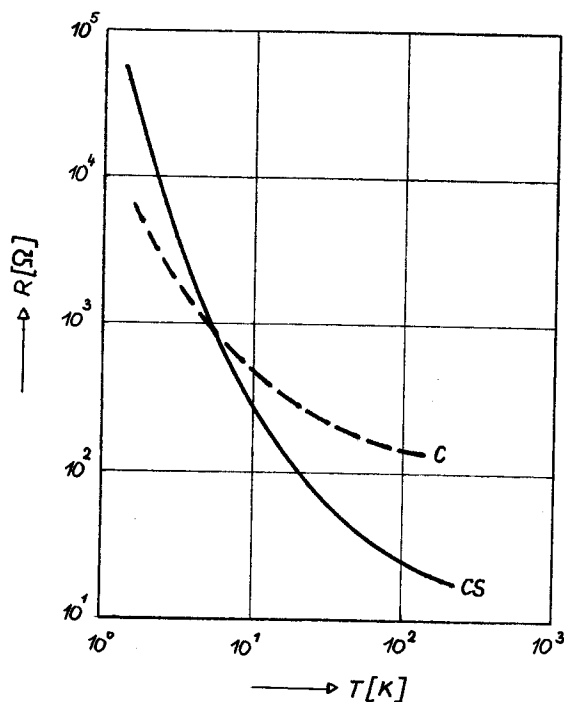
3.2.1.2. Snímače sklouhlíkové

V pojednání o termometrických vlastnostech uhlíkem napuštěného porézního skla za nízkých teplot je popsán sklouhlíkový snímač nízkých teplot vhodný pro teplotní rozsah 4,2 až 273 K, jehož termometrické vlastnosti v některých směrech předčí často používané, již zmíněné, uhlíkové hmotové snímače.

Postup výroby sklouhlíkového snímače je následující: alkalické borokřemičité sklo je vyluhováno, čímž se ze základní sklovité hmoty odstraní fáze bohatá na bór. Vznikne porézní sklo, které se jeví jako shluk křemičitých kuliček o průměru

asi 3×10^{-5} mm. Póry mezi kuličkami o rozměrech asi 0,3 až $0,4 \times 10^{-5}$ mm se vyplní velmi čistým a jemně rozemletým uhlíkem namáčením skla do organických kapalin, v nichž je uhlík suspendován. Tím vznikne výchozí surovina, která se po vysušení rozřeže na destičky o rozměru 4,8 x 1,6 x 1 mm. Na konce destiček se ve vakuu napaří nichrom-zlaté elektrody, k nimž se stříbroepoxidovým tmelem přitmelí měděné vodiče o průměru 0,13 mm. Destičky s přívodními vodiči se dále vypékají při teplotě 100°C po dobu 24 hodin a pak se hermeticky uzavřou do platinových pouzder naplněných heliem.

Na obr.13 je vyznačena základní charakteristika sklouhlíkového snímače, to jest jeho závislost R/T/. Pro srovnání je v tom samém obrázku uvedena i závislost R/T/ hmotového snímače firmy ALLEN-BRADLEY s jmenovitým odporem 100Ω.



obr.13. Závislost R/T/ sklouhlíkového snímače /CC/. Pro srovnání je uvedena i závislost R/T/ pro uhlíkový snímač /C/ ALLEN-BRADLEY s jmenovitým odporem 100Ω.

Z obrázku je zřejmé, že ve srovnání s uhlíkovým hmotovým snímačem má sklouhlíkový snímač zřetelně strmější charakteristiku R/T/, a tedy i větší citlivost.

Dalšími sklouhlíkovými snímači jsou snímače firmy LAKE SHORE. Tato firma produkuje čtyři druhy sklouhlíkových snímačů pod seriovým označením CGR. Tyto snímače jsou teplotně cyklovány od pokojové teploty až k teplotě kapalného helia.

V konstrukčním provedení se od již zmíněného sklouhlíkového snímače liší tím, že vodiče těchto typů nejsou měděné, ale fosforo-bronzové. Tyto vodiče jsou izolované. Teplotní zatížení izolace je 220°C. Průměr vodiče včetně izolace je 0,24 mm a délka 150 mm. Další změnou je změna materiálu pouzdra. U těchto typů se používají pouzdra zlato-platinová. Rozměry těchto pouzder jsou následující: průměr je 3 mm, délka 8,5 mm.

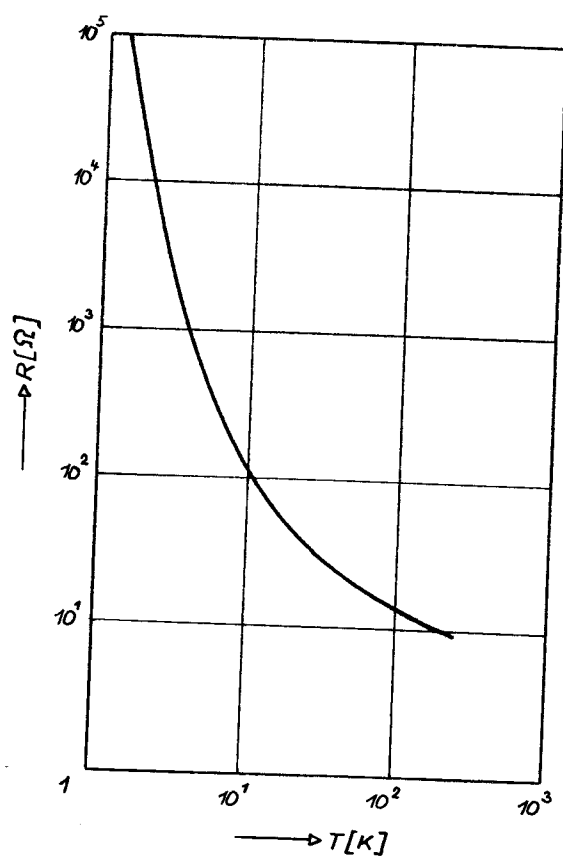
Teplotní rozsahy měření u snímačů této firmy jsou následující:

CGR-1-500	1,0 až 77 K
CGR-1-1000	1,4 až 100 K
CGR-1-1500	2,0 až 200 K
CGR-1-2000	2,5 až 325 K

Všechny čtyři typy lze použít až do 325 K, ale první tři pouze se sníženou citlivostí.

Na obr.14 je ilustrována závislost R/T/ pro sklouhlíkový snímač typu CGR-1-1000.

U ostatních tří typů jsou průběhy závislosti R/T/ podobné. Jak z obrázku vyplývá jsou sklouhlíkové snímače v charakteristice odpor-teplota monotónní mezi 1 a 325 K, ale snížení jejich citlivosti při teplotách nad 100 K činí jejich užívání při pokojových teplotách poněkud omezené.



obr.14, Závislost R/T / sklouhlíkového snímače CGR-1-1000 firmy LAKE SHORE.

Sklouhlíkové snímače této firmy jsou velmi vhodné pro měření nízkých teplot v prostředí magnetického pole od 19 Tesla výše. Dále se tyto snímače vyznačují dobrou reprodukovatelností v rozsahu od 1,4 do 100 K.

3.2.2. Snímače polovodičové

3.2.2.1. Snímače termistorové

Základními materiály pro výrobu termistorových snímačů jsou kysličníky niklu a manganu, které se mísí společně s pojídkem ve vhodném poměru, formují se do požadovaného tvaru, zpravidla perličkového, tyčinkového a destičkového, a techno-

logií kovové keramiky se spékají při teplotě blízké bodu tání použitých kysličníků. Termistory jsou opatřeny dvěma elektrickými přívody, které jsou do termistoru buď zalisovány, nebo připájeny k jeho povrchu.

Termistorové snímače nízkých teplot lze rozdělit na dvě skupiny, na skupinu snímačů vhodných pro teplotní rozsah 77 až 300 K a na skupinu snímačů určených pro teplotní rozsah 4,2 až 77 K. Termistory náležející do druhé skupiny jsou z důvodů zmenšení elektrického odporu na přijatelnou hodnotu dopovány nečistotami.

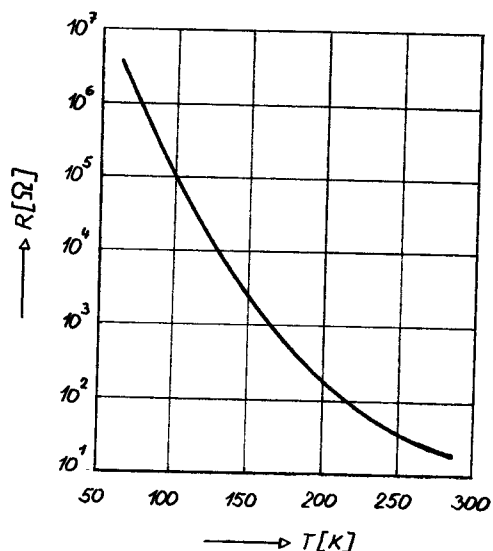
Termistory první skupiny se vyznačují exponenciálním a záporným průběhem závislosti odporu na teplotě.

Termistory druhé skupiny mají exponenciální a záporný průběh závislosti odporu na teplotě jen při nižších teplotách. Při vyšších teplotách může být průběh této závislosti kladný a velmi přibližně i přímkový.

Výzkumný ústav práškové metalurgie dodává na trh termistorové snímače pod označením TH 120/22-20, které jsou vhodné pro měření teplot v rozsahu 77 až 273 K.

Průběh závislosti odporu R na teplotě T těchto termistorů dokumentuje obr.15.

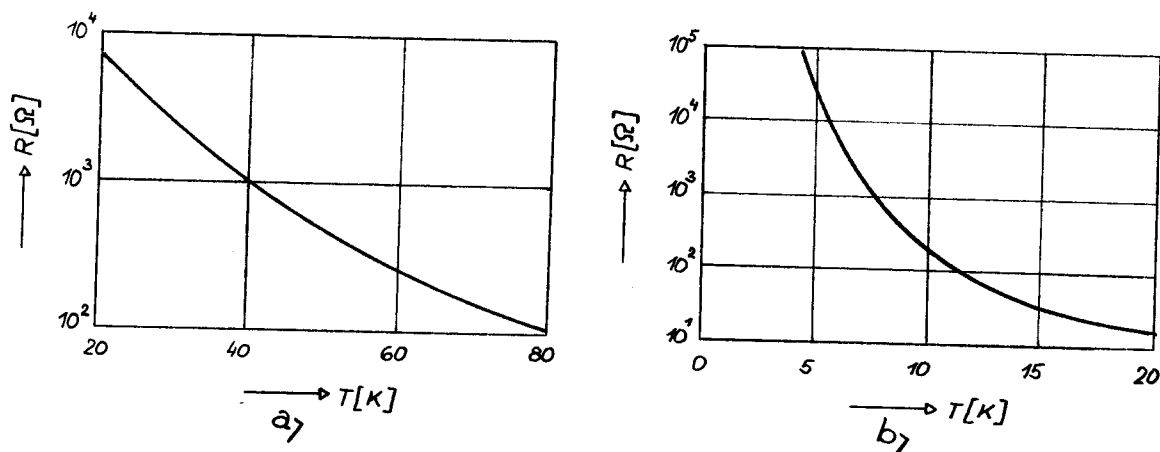
Odpor těchto termistorů TH 120/22-20 je 20Ω při teplotě 298 K a $1,2\text{ M}\Omega$ při teplotě 77 K. Tento termistor má průměr 1,8 mm a délku 6 mm.



obr.15. Závislost odporu R na teplotě T termistoru VÚPM, typ TH 120/22-20.

Další firmou, která dodává termistorové snímače je firma VICTORY ENGINEERING CORPORATION. Tato firma vyvinula termistorový snímač Veco, typ A 208. Perličkový termistor zatavený do skla je chráněn skleněným krytem ze zvláštního skla. Prostor mezi termistorem a krytem je pro lepší přenos tepla vyplněn héliem. Průběh závislosti odporu R na teplotě T tohoto snímače je stejný jako u snímače našeho Výzkumného ústavu práškové metalurgie.

Výrobce, kterým je firma ARTRONIX, dodává dva termistory, typ TH1 a TH4. Typ TH1 je určen pro rozsah teplot 20 až 80 K. Typ TH4 je vhodný pro rozsah teplot 4,2 až 20 K. Termistory mají tvar disku o průměru 2,5 mm a tloušťce 2 mm. Povrch termistorů je chráněn zvláštní ochrannou vrstvou. Závislost odporu na teplotě těchto termistorů je na obr.16.



obr.16. Závislost odporu R na teplotě T termistoru ARTRONIX; a/ typ TH1 b/ typ TH4

V následující tabulce jsou uvedeny základní technické údaje termistorů firmy KEYSTONE. Termistory této firmy mají tvar disku o průměru 2,5 mm a tloušťce 1 mm.

Typ	RL10X04		LC904-H	L0904-He
Vhodná tepl. oblast použití	O ₂ /92K/	N ₂ /77K/	H ₂ /20K/	He/4,2K/
Odpor */	10kΩ	31,5kΩ	125kΩ	3MΩ

*/ při uvedené teplotě kapalného plynu

Dlouhodobá stálost odporu termistorů, ovlivňující podstatným způsobem přesnost měření teploty, je u termistorů od různých výrobců rozdílná. Názorným měřítkem dlouhodobé stálosti odporu termistorů je chyba měření teploty, způsobená časovou změnou jejich odporu. U termistorů typu TH 120/22-20 je tato chyba menší než $\pm 0,25$ K při 77 K a menší než $\pm 2,5$ K při teplotě 273 K. Naproti tomu u termistorů firmy ARTRONIX, typ TH1 a TH4 je uvažovaná chyba průměrně $\pm 0,03$ K při všech teplotách. U termistorů firmy KEYSTONE je chyba měření $\pm 0,1$ K.

Ze všech předchozích poznatků vyplývá, že výraznou předností termistorových snímačů nízkých teplot je jejich velká

citlivost, malá magnetorezistance a nízká cena. Jejich méně příznivou vlastností je menší dlouhodobá stálost.

3.2.2.2. Snímače germaniové

Základním materiálem pro výrobu uvažovaných snímačů je germanium. Čisté germanium má však v oblasti nízkých teplot příliš velký měrný odpor, takže snímače zhotovené z čistého germania nejsou pro tento rozsah vhodné. Zmenšení tohoto měrného odporu lze dosáhnout dopováním germania nečistotami, např. arzémem, galiem, popř. antimonem. Obsah zmíněných nečistot je asi 10^{16} až 10^{18} atomů/cm³.

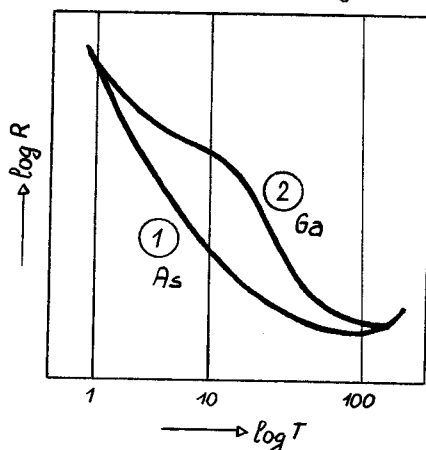
Elektrická vodivost germania dopovaného nečistotami je v teplotním rozsahu od 1 do 100 K dvojnásobná. V rozsahu teplot asi od 10 do 100 K je vodivost ovládána volně pohyblivými nosiči, tj. elektrony a děrami odloučenými od atomů nečistot. V rozsahu teplot přibližně od 1 do 10 K je vodivost ovládána nečistotami. V oblasti nad 100 K se tyto snímače pro svůj malý teplotní součinitel odporu nepoužívají.

Na obr.17 je obecný příklad průběhu závislosti R/T v logaritmickém měřítku pro germanium dopované arzémem - křivka 1 a germanium dopované galiem - křivka 2. Křivka 2 vykazuje v porovnání s křivkou 1 ostřejší přechod z vodivosti dané nečistotami ($T < 10$ K) na vodivost danou volnými nosiči ($T > 10$ K).

Z tohoto je zřejmé, že druhem nečistot a jejich koncentrací lze dosáhnout jak různých odporů při téže teplotě, tak různých průběhů závislosti odporu na teplotě.

Germaniové snímače nízkých teplot jsou vyráběny buď se dvěma přívody - tyčinkový typ, nebo se čtyřmi přívody - můst-

kový typ. První se používá jako běžný odporový snímač, u druhého slouží dva vodiče jako proudové přívody, druhé dva vodiče jako přívody dovolující měřit úbytek napětí na snímači.



obr.17. Obecný průběh závislosti odporu R na teplotě T germania dopovaného arzenem /křivka 1/ a galiem /křivka 2/.

Konstrukční úprava tyčinkového snímače je následující: tyčinka řezaná z monokrystalu dopovaného germania má tvar hranolku o rozměrech $6 \times 0,5 \times 0,5$ mm. Oba konce tyčinky jsou pozlaceny. Jeden konec je připájen k přívodnímu vodiči, druhý konec tyčinky je spojen zlatým drátkem o průměru 0,1 mm s druhým přívodním vodičem. Přívodní vodiče zhotovené z platinového drátku o průměru 0,25 mm procházejí skleněnou průchodkou, k níž je přímo přivařena skleněná, zevnitř načerněná /pro vyloučení fotoefektu/ baňka.

U můstkového typu je konstrukční úprava podobná. Můstek je zhotoven a upraven podobným způsobem jako tyčinka u tyčinkového snímače. K tomuto můstku jsou připájeny čtyři zlaté drátky spojené s přívodními platinovými vodiči. Tyto zlaté drátky současně tvoří pružný nosný systém můstku, potlačující vznik piezoelektrického odporu vlivem mechanického namáhání můstku vznikajícího při chvění a otřesech přenášených na

snímač. Skleněná průchodka je opatřena platinovým límečkem, k němuž je připájen kovový kryt, zhotovený buď z platiny nebo pozlacené mědi. Pro zlepšení přenosu tepla mezi krytem a můstkem je snímač naplněn čistým héliem. Vnitřek krytu je vyložen teflonovou fólií jako elektrickou izolací.

Mezi hlavní výrobce germaniových snímačů nízkých teplot patří firmy TEXAS INSTRUMENTS, MINNEAPOLIS-HONEYWELL a firma RADIATION RESEARCH. Technické údaje germaniových snímačů těchto firem jsou uvedeny v následující tabulce.

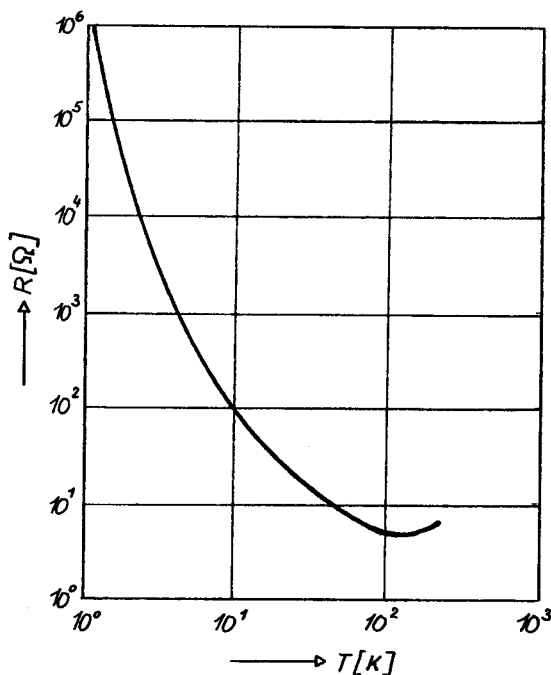
SNÍMAČ	TEXAS INSTRUMENTS	MINNEAPOLIS - HONEYWELL	RADIATION RESEARCH
TYP SNÍMAČE	tyčinkový typ 104	můstkový	můstkový
ROZSAH SNÍMANÝCH TEPLOT	1 až 40 K	1. typ SI 2 až 40 K 2. typ SII 1 až 100 K	1. typ CG6 4 až 40 K 2. typ CG3 2 až 80 K 3. typ CG4 0,3 až 6 K
ROZSAH ODPORU SNÍMAČE	1 MΩ až 10 Ω	1. 10 kΩ až 10 Ω 2. 20 kΩ až 2 Ω	1. 40 kΩ až 8 Ω 2. 10 kΩ až 4 Ω 3. 4 kΩ až 12 Ω
ODPOR PŘI 4,2 K	1,2 kΩ	1. 1,2 kΩ 2. 0,4 kΩ	1. 38,0 kΩ 2. 2,2 kΩ 3. 20,0 Ω
CITLIVOST PŘI 4,2 K	450 Ω/K	1. 250 Ω/K 2. 150 Ω/K	1. 12,0 kΩ/K 2. 1,2 kΩ/K 3. 10,0 Ω/K

Další firmou, která se podílí na dodávkách germaniových snímačů na trh je firma LAKE SHORE. Tato firma vyrábí můstkové snímače dvou typů. Jsou to snímače typu GR-200A a typu GR-200B. Tyto snímače se pro svoji vysokou citlivost při nízkých teplotách a vynikající stabilitu využívají pro přesné a

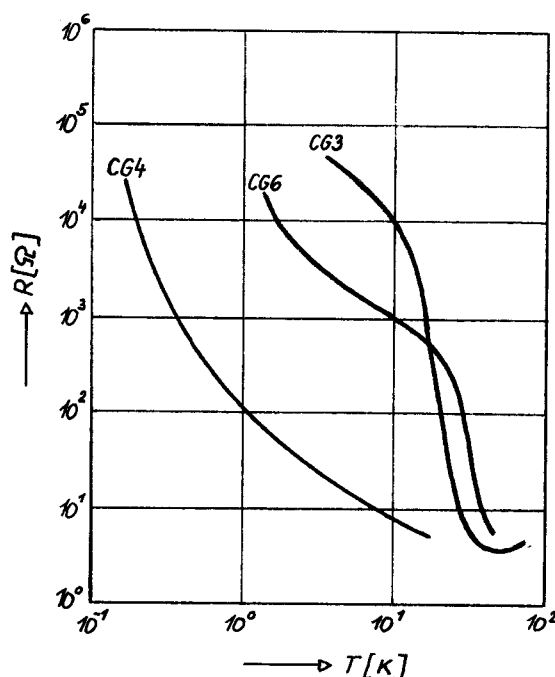
opakované měření mezi 0,05 K a 30 K. Protože citlivost zařízení rapidně roste s klesající teplotou, využívají se tyto snímače pro podmilikelvinové řízení za teploty 4,2 K a nižší.

Rozsah snímaných hodnot typu GR-200A je 0,05 až 100 K. Rozsah odporu tohoto typu je 40 k Ω až 3 Ω . Rozsah snímaných teplot typu GR-200B je 1 až 100 K. Rozsah odporu je téměř shodný s rozsahem odporu snímače typu GR-200A.

V následujících obrázcích jsou pro ukázkou zachyceny závislosti odporu R na teplotě T u germaniových snímačů některých z uvedených firem.



obr.18. Závislost R/T/ germaniového snímače TEXAS INSTRUMENTS, typ 104.



obr.19. Závislost R/T/ germaniového snímače firmy RADIATION RESEARCH.

Použití germaniových snímačů v magnetickém poli je pro jejich silnou magnetorezistenci velmi omezené. Je zřejmé, že magnetické pole odpor snímače zvetšuje, tzn., že snímač udává nižší teplotu než jakou má ve skutečnosti. To se týká všech germaniových snímačů bez ohledu na jejich provedení.

Protože však obsah dopujících příměsí a konstrukční provedení germaniových snímačů je odlišné nejen u různých výrobců, ale i u různých výrobků téhož výrobce, je nutné při požadavku přesnějšího měření teplot zjišťovat vliv magnetického pole na odpor germaniových snímačů vždy individuálně. Z uvedeného je jistě patrné, že užívání germaniových snímačů v prostředí magnetického pole se příliš nedoporučuje.

3.2.2.3. Snímače křemíkové

Na základě dobrých zkušeností s odporovými germaniovými snímači nízkých teplot bylo přirozenou snahou vyvinout také odporové snímače křemíkové. Ty se však pro oxidaci povrchu křemíku nevyrábějí, neboť tato oxidace nepříznivě ovlivňuje dlouhodobou stálost elektrického odporu křemíkových snímačů.

S rozvojem aplikací křemíkových diod a tranzistorů byla uskutečněna měření, která měla zjistit možnost použití těchto prvků jako snímačů nízkých teplot. U diod byl měřen úbytek napětí na diodách jako funkce teploty, u tranzistorů byl měřen buď úbytek napětí ve směru báze - kolektor, nebo úbytek napětí ve směru báze - emitor rovněž jako funkce teploty. Všechna tato měření byla provedena v teplotním rozsahu 4,2 až 300 K.

Protože závislost U/T některých uvedených součástek má v teplotním rozsahu přibližně od 150 do 350 K téměř lineární průběh, bylo snahou vyvinout jako snímač nízkých teplot diodu, která by měla v co nejširším teplotním rozsahu závislost U/T téměř přímkovou. Snímače s přímkovou závislostí U/T dovolují totiž přímé spojení teploměru se zapisovačem a mimoto teplotní údaj teploměru může být snadno převeden do číslicového tvaru.

Firmou, která se zabývá výrobou těchto druhů snímačů, je firma LAKE SHORE. Tato firma vyvinula teplotní snímače pod označením DT-500, DT-470, DT-471 a DT-450.

Konstrukční provedení prvních tří typů je následující: safírová základna je pokryta vrstvou z molybdenu a manganu. Na tuto základnu je umístěno hliníkové tělo snímače a na něm hliníkové víčko, které je poniklováno a pozlaceno. Víčko je zapečetěno zlato-cínovou pájkou. Vedení je z pozlaceného neizolovaného Kovaru. Vodiče mají v průměru 0,38 mm, délku 12,7 mm.

Typ DT-450 je konstrukčně řešen následujícím způsobem: plochý měřicí element je namontován k pozlacené kovové základně, jejíž teplotní vodivost je poloviční, než je teplotní vodivost mědi. Přes toto měřicí zařízení je přilepena epoxidovým lepidlem plastické víčko, které zabraňuje odhermetizování okolí snímacího čipu. Rozměry tohoto snímače jsou: 1,58 mm průměr a 3,18 mm délka. Vodiče jsou stejně jako u předchozích typů z pozlaceného Kovaru s průřezovými rozměry 0,25 x 0,1 mm a délkou 12,7 mm.

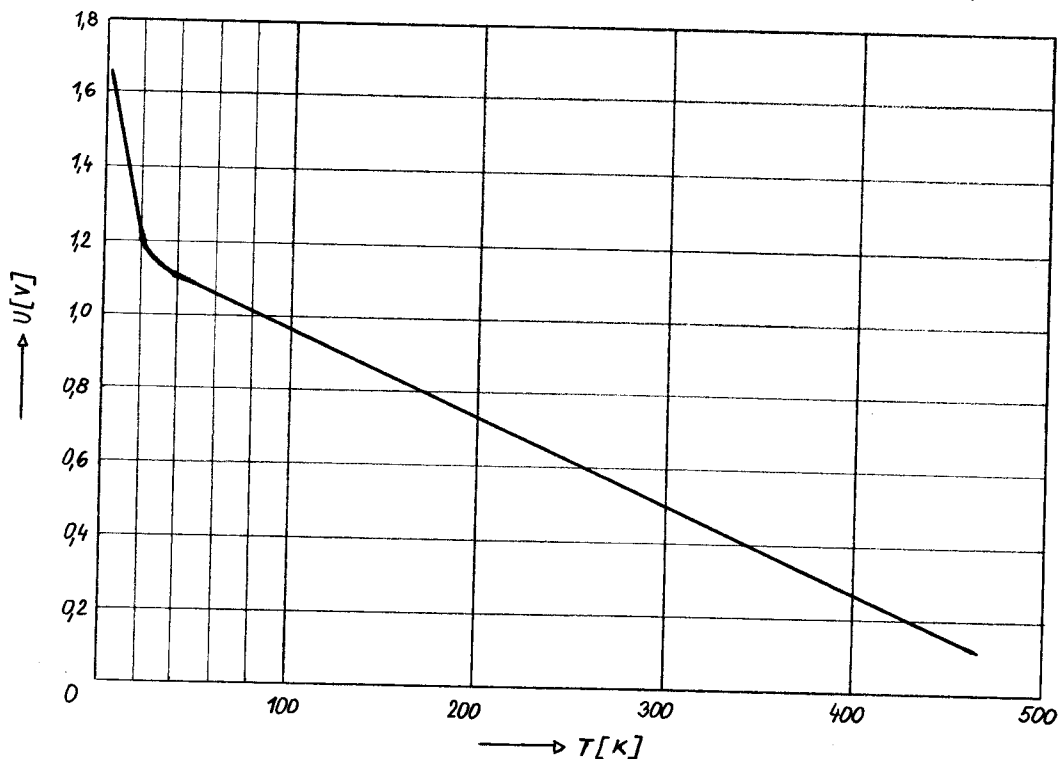
Teplotní rozsahy jednotlivých typů křemíkových diodových snímačů jsou udány v následující tabulce.

TYP	teplotní rozsah
DT-500	1 až 400 K
DT-470	1,4 až 475 K
DT-471	10 až 425 K
DT-450	1,4 až 325 K

Pro všechny uvedené typy snímačů platí stejný budicí proud $10 \mu\text{A}$ a také stejná možnost použití těchto snímačů v

prostředí magnetického pole. Všechny uvedené typy vykazují malou závislost na magnetickém poli při teplotách nad 60 K a magnetické indukci nad 5 T. Nedoporučují se pro užití v magnetických polích při teplotách nižších než je 60 K.

Průběh závislosti úbytku napětí U na snímači na teplotě T je zobrazen na obr.20. Tento průběh je velice podobný pro všechny uvedené typy křemíkových diodových snímačů.



obr.20. Závislost úbytku napětí U na snímači na teplotě T u křemíkových diodových snímačů firmy LAKE SHORE.

Závislost U/T se skládá ze dvou téměř přímkových částí. V první, strmější části, spadající do rozsahu teplot od 1 do 30 K, je citlivost snímače DT-500 rovna -55 mV/K, u ostatních snímačů -25 mV/K. V druhé, méně strmé části, týkající se teplotního rozsahu 50 až 450 K, má snímač DT-500 citlivost $-2,75$ mV/K, ostatní snímače mají v tomto rozsahu citlivost $-2,3$ mV/K.

3.2.2.4. Snímače galium-arzenidové

Galium-arzenidové snímače nízkých teplot jsou vyráběny buď jako snímače odporové nebo jako snímače diodové s přechodem PN. Hlavní předností odporových galium-arzenidových snímačů je jejich malá citlivost na vnější magnetické pole, téměř lineární závislost úbytku napětí na snímači na teplotě v širokém rozsahu teplot a rovněž malá citlivost na vnější magnetické pole jsou hlavními přednostmi diodových snímačů.

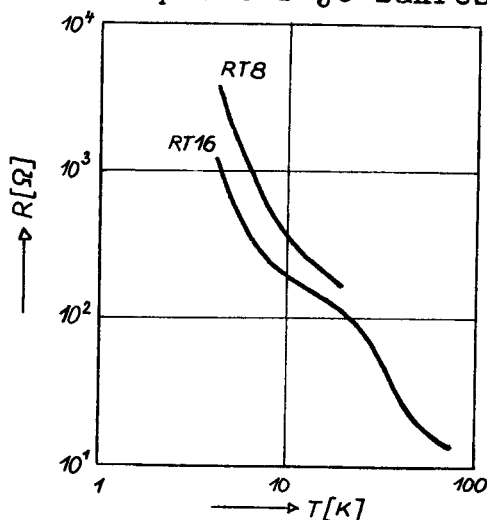
Odporové galium-arzenidové snímače:

Tyto snímače jsou připravovány z monokrystalů typu P /galium-arzenid dopovaný mědí, zinkem nebo manganem/. Koncentrace zmíněných příměsí se pohybuje v rozmezí 10^{16} až 10^{18} atomů/cm³. Z monokrystalů jsou řezány buď tyčinky o rozměrech asi 1 x 1 x 5 mm pro dvousvorkové snímače, nebo můstky přibližně stejných rozměrů pro čtyřsvorkové snímače. Konce těchto dílců se potáhnou mědí nebo se porlatí a k nim se připájí zlaté přívodní drátky. Takto upravené dílce se uzavřou do skleněného nebo měděného pozlaceného pouzdra naplněného heliem. Konstrukce těchto snímačů připomíná konstrukci snímačů germaniových.

Jako zástupce těchto odporových snímačů je možno uvést snímače RT8 a RT16. Oba snímače jsou dopovány zinkem a jsou popsány v Elektrotechnickém časopise v článku rozebírajícím použití těchto snímačů v nízkoteplotní termometrii.

Oba zmíněné snímače jsou můstkového typu, čtyřsvorkové. Snímač RT8 má koncentraci příměsí $3,7 \times 10^{17}$ atomů/cm³, snímač RT16 má koncentraci příměsí $4,5 \times 10^{17}$ atomů/cm³. Průběh

závislosti odporu R na teplotě T je zakreslen v obr.21.



obr.21. Závislost R/T dvou typů odporových galium-arzenidových snímačů.

Z obrázku je patrné, že průběh charakteristiky R/T uvažovaných snímačů i jejich elektrické hodnoty se blíží snímačům germaniovým. Odporové galium-arzenidové snímače jsou však méně citlivé na vnější magnetické pole než snímače germaniové, např. chyba měření teploty galium-arzenidovým snímačem při indukci pole 3 T je více než desetkrát menší než chyba měření snímačem germaniovým.

Diodové galium-arzenidové snímače:

Základní částí diody a současně její jednou elektrodou je destička o rozměrech 2 x 2 x 0,5 mm, vyříznutá z manokrystalu typu N /galium-arzenid dopovaný selenem nebo telurem/. Koncentrace příměsí je 10^{16} až 10^{18} atomů/cm³. Druhou elektrodou je zinková vrstva nanosená na jednu stranu destičky. Zinek při teplotě 900°C difunduje do základní destičky a vytvoří tak přechod PN, jehož elektrická vodivost v propustném směru značně závisí na teplotě. Dioda se opatří přívodními vodiči a uzavře se do pouzdra, podobně jak je tomu u snímačů germaniových.

Výrobce, kterým je firma LAKE SHORE, dodává diodové galium-arzenidové snímače s typovým označením TG100 pro teplotní rozsah 1,5 až 400 K. Snímače jsou vyráběny jako typ TG100-M, který obsahuje větší množství příměsí, a typ TG100-H s menším množstvím příměsí. V rozsahu od 1,5 do 50 K má typ TG100-H strmější část charakteristiky $U/T/$ než typ TG100-M. V oblasti od 50 do 400 K je závislost $U/T/$ obou typů snímačů lineární. Typ TG100-H je také v rozsahu 1,5 až 50 K o mnoho více citlivější na teplotní změny.

Snímač typu M vykazuje menší teplotní citlivost, ale i menší citlivost na vnější magnetické pole než snímač typů H. Až do indukce 0,5 T je chyba měření teploty způsobená magnetickým polem u obou typů snímačů téměř zanedbatelná.

Dlouhodobá stálost obou snímačů je $\pm 5 \times 10^{-3}$ K.

Novějším typem těchto snímačů, které firma LAKE SHORE vyvinula, jsou snímače pod typovým označením TG-120. Jedná se o snímače s označením TG-120P a TG-120FP. Citlivostní prvek těchto dvou snímačů obsahuje kromě galia a arzenu také hliník. Teplotní rozsah obou snímačů je od 1,4 do 325 K, budící proud je $10 \mu\text{A}$. Vynikající citlivost při teplotách nižších než 50 K z nich dělá ideální náhradu za již uvedené galium-arzenidové diodové teplotní snímače.

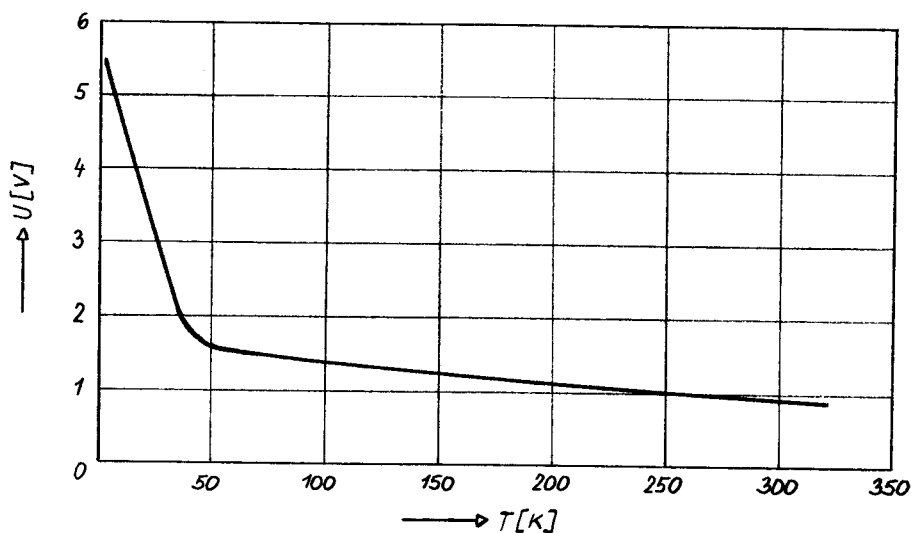
Typ TG-120P má průměr 3 mm, délku 2,8 mm, hmotnost je 0,05g. Vodiče, které jsou dva, jsou na snímač přilepeny epoxidem. Vodiče tvoří fosforo-bronzové dráty o průměru 0,15 mm. Katoda je dlouhá 25 mm, anoda 19 mm.

Typ TG-120FP je kruhového tvaru o průměru 1,6 mm. Hmotnost snímače je 0,025 g. I tento typ je dvou vodičový. Anodou je zde zlatý drát o průměru 0,05 mm, dlouhý 38 mm. Katodou je

opět fosforo-bronzový drát o průměru 0,15 mm, dlouhý 25 mm.

Tyto galium-arzenidové diodové snímače jsou zvláště vhodné pro aplikaci v nízkých magnetických polích za nízkých teplot. Další jejich předností je vynikající citlivost za nízkých teplot.

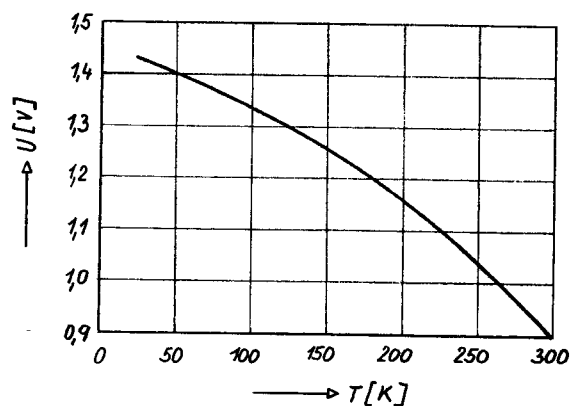
Charakteristika U/T je při použitelném teplotním rozsahu snímače /1,4 až 325 K/ monotónní, jak dokazuje obr.22.



obr.22. Závislost U/T galium-arzenidových snímačů firmy LAKE SHORE, typu TG-120P a TG-120FP.

Výrobce, kterým je firma SCIENTIFIC INSTRUMENTS, dodává diodové galium-arzenidové snímače s označením GA 300 vhodné pro teplotní rozsah 4 až 300 K. Budící proud je $10\mu\text{A}$. Závislost úbytku napětí U na teplotě T je na obr.23.

Z obrázku je zřejmé, že průběh závislosti U/T tohoto snímače se dosti liší od téměř přímkových částí závislosti snímačů firmy LAKE SHORE. Kromě toho je i citlivost uvažovaného snímače poněkud menší než u již uvedených galium-arzenidových diodových snímačů.



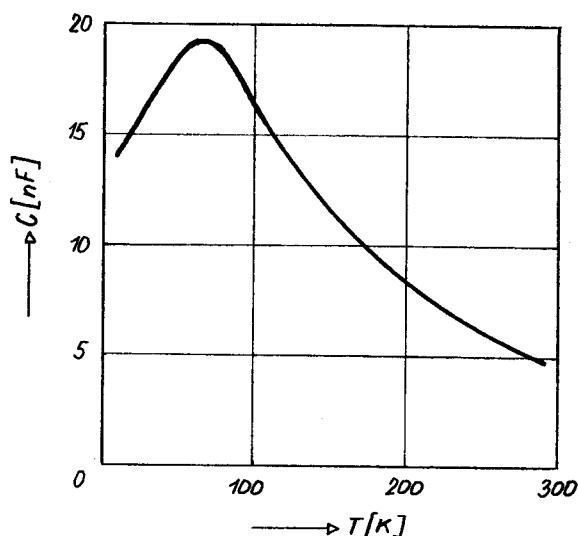
obr.23. Závislost U/T diodového galium-arzenidového snímače typu GA 300.

4. Kapacitní snímače nízkých teplot

4.1. Snímače sklokeramické

Tyto snímače se vyrábějí technologií skleněné keramiky. Kysličník křemičitý se v jistém poměru smísí, roztaví a roz-taví s kysličníkem strontnatým, titaničitým a hlinitým. Získá se velmi stálá sklovitá hmota, která při novém řízeném ohřevu na vhodnou krystalizační teplotu /asi 1100°C/ zkrystalizuje. Vznikne krystalické sklo perovskit SrTiO_3 , jehož reálná slož-ka komplexní permitivity je v důsledku obsahu složky Ti závis-lá na teplotě. Z krystalu se zhotoví destičky o ploše 5 x 2 mm, které se opatří plošnými elektrodami ze slitiny Au - Pt. Jis-tý počet destiček se paralelně složí a souhlasné elektrody vyvedené na protilehlých koncích destiček se spájí. Spájené kon-ce se opatří platinovými přívody. Tím vznikne vícevrstvý kon-denzátor tvaru hranolku o rozměrech 5 x 2 x 2 mm. Snímače se používají buď přímo v popsané úpravě, nebo zapouzdřené do vá-lečkových pouzder podobně jako snímače germaniové nebo galium-arzenidové.

Základní elektrickou charakteristikou sklokeramického snímače je závislost jeho kapacity C na teplotě T . V pojednání o tomto druhu snímačů je číslem 1100 označen sklokeramický snímač pracující v teplotním rozsahu od 1,7 do 300 K. Průběh charakteristiky C/T tohoto snímače je zobrazen na obr.24. Maximum charakteristiky C/T patrné na obrázku souvisí s fotoelektrickým jevem u tohoto krystalu SrTiO_3 . Tohoto maxima je dosahováno v oblasti kolem 70 K.

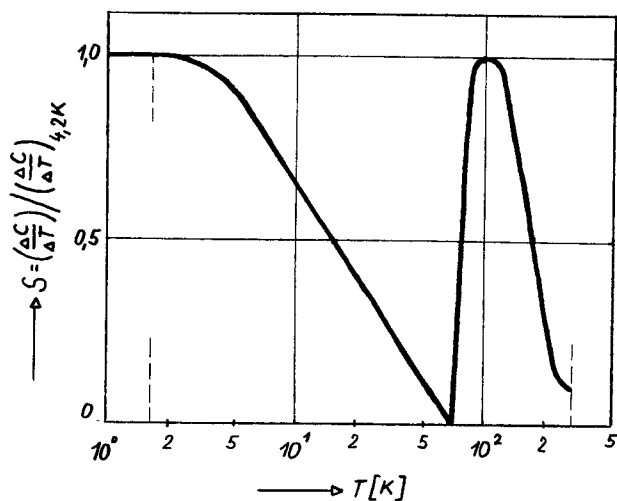


obr.24. Závislost C/T sklokeramického snímače 1100.

Významná je závislost citlivosti S sklokeramického snímače na teplotě T . Průběh této závislosti je pro rozsah teplot 1,7 až 300 K zobrazen na obr.25. Z obrázku je patrné, že do 5 K je citlivost konstantní. V rozsahu od 5 do 70 K citlivost klesá, aby opět znovu prudce vzrůstala. To se děje až do teploty 100 K. Od této hranice až do 300 K citlivost snímače opět klesá. Tentokrát však daleko prudčeji než v rozsahu od 5 do 70 K.

Firma LAKE SHORE uvedla na trh tři typy sklokeramických snímačů. Jsou to snímače s typovým označením CS-400, CS-401

a CS-501.



obr.25. Závislost $S/T/$ sklokeramického snímače 1100.

Typ CS-400 je vhodný pro rozsah od 1 do 300 K. Kapacita tohoto typu je 20 nF při teplotě 4,2 K a 5,5 nF při teplotě 300 K. Citlivost snímače je 250 pF/K při teplotě 4,2 K.

Typ CS-401 patří spolu s dalším typem CS-501 k novějším typům produkováným touto firmou. Teplotní rozsah snímače CS-401 je od 1 do 60 K a od 80 do 300 K. Kapacita tohoto typu je 5,3 nF při teplotě 4,2 K a 1,9 nF při teplotě 300 K. Citlivost je 65,2 pF/K při teplotě 4,2 K. Vlastní citlivostní prvek je u tohoto typu zapouzdřen do pozlaceného měděného válečku o průměru 3 mm a délky 8,5 mm.

Typ CS-501 je vhodný pro teplotní rozsah od 1 do 290 K. Kapacita tohoto snímače při teplotě 4,2 K je 6,5 nF a při teplotě 300 K je jeho kapacita 122 nF. Citlivost při teplotě 4,2 K je 30,7 pF. I u tohoto typu je vlastní citlivostní prvek zapouzdřen do pozlaceného měděného válečku.

U všech typů vodiče tvoří fosforo-bronzové dráty, které jsou izolované tvrdým polyimidem. Teplotní odolnost izolace je 220°C.

Termometrické charakteristiky jsou téměř shodné s charakteristikami již uvedeného sklokeramického snímače s označením 1100.

Významnou předností těchto sklokeramických snímačů je jejich nezávislost na prostředí i poměrně silného magnetického pole při poměrně dobré dlouhodobé stálosti kapacity.

5. Indukční snímače nízkých teplot

5.1. Snímače feritové

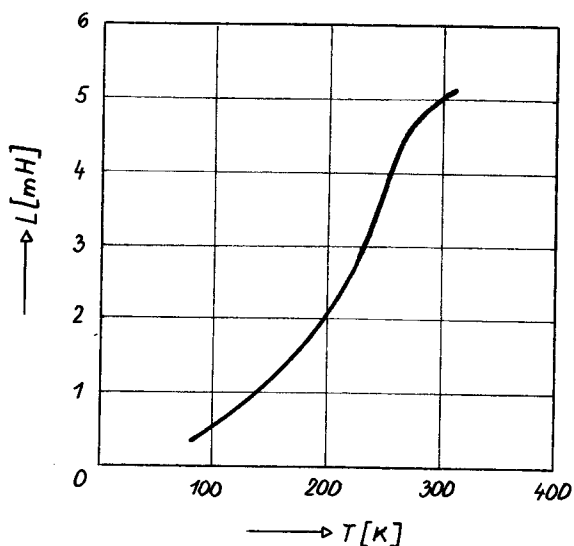
Činnost feritových snímačů je založena na teplotní závislosti reálné složky komplexní permeability.

Základem snímače popsaného ing. Jaroslavem Vepřekem v článku o feritových snímačích je feritový kroužek /toroid/ vyrobený z manganato-zinečnaté hmoty. Vnější průměr kroužku je 4 mm, vnitřní průměr je 2,3 mm a výška kroužku 1,5 mm. Na kroužek je navinuto 120 závitů měděného vodiče o průměru 0,1 mm. Cívka, impregnovaná ve vakuu epoxidovou pryskyřicí, je uložena do kovového pouzdra válečkového tvaru o průměru 8 mm a výšce 6,6 mm. Pro dobrý přenos tepla mezi pouzdrem a cívkou je pouzdra naplněno apiezonovým tukem.

Tento feritový snímač je vhodný pro měření teploty od 77 do 300 K. Indukčnost cívky při teplotě 300 K je 5 mH, činný odpor cívky při této teplotě je 3Ω . Nejvyšší provozní napětí na snímači při kmitočtu 800 Hz je 3mV.

Průběh závislosti indukčnosti L na teplotě T feritového snímače je na obr.26. Závislost L/T se vyznačuje inflexním bodem v oblasti kolem 225 K, tzn., že teplotní citlivost sní-

mače je největší v oblasti uvedené teploty a směrem k oběma krajním teplotám se zmenšuje.



obr.26. Závislost L/T feritového snímače.

Chyba měření teploty, závislá na dlouhodobé stálosti indukčnosti feritového snímače je asi 2 K.

Feritové snímače jsou především vhodné pro měření teplot od 77 do 273 K, pokud na přesnost měření nejsou kladeny zvláštní nároky.

5.2. Snímače slitinové

Tyto snímače jsou vhodné pro teplotní rozsah 4,2 až 273 K. Jádra těchto snímačů jsou zhotovena z kovových slitin - buď ze slitiny kobaltu, železa a chromu /52% + 36% + 12%/ nebo ze slitiny kobaltu, železa a vanadia /52% + 34% + 14%/.

Z uvedených materiálů, z nichž především slitina s vanadiem má příznivý průběh závislosti reálné složky komplexní permeability na teplotě, se zhotovují kroužky o vnějším průměru 6,4 mm, vnitřním průměru 3,2 mm a tloušťce asi 0,05 mm. Složením několika kroužků a jejich spojením epoxidovou prys-

kyřící vzniknou toroidy, na které je navinuto 165 závitů měděného izolovaného drátu.

Indukčnost takto zhotovených cívek, jejichž jádra jsou vyrobena ze slitiny kobaltu, železa a vanadia, je $212 \mu\text{H}$ při 4,2 K; $67 \mu\text{H}$ při 77 K a $14 \mu\text{H}$ při 293 K. Indukčnost cívek, jejichž jádra jsou vyrobena ze slitiny kobaltu, železa a chromu je již poněkud menší.

6. Termoelektrické snímače nízkých teplot

Termoelektrické snímače nízkých teplot se vyznačují ve srovnání se snímači odporovými některými přednostmi, především jednoduchostí, snadnou výrobou, malými rozměry /ty dovolují měřit teplotu téměř bodovým způsobem/, malou časovou konstantou a poměrně nízkou cenou. Proti těmto kladům mají určitou nevýhodu danou malou citlivostí, která navíc není stálá a směrem k nižším teplotám se zmenšuje.

Vedle tohoto nedostatku společného všem termoelektrickým snímačům nízkých teplot je třeba uvést závažné nedostatky další, specifické pro jednotlivé snímače, které se při měření vyšších teplot zanedbávají, avšak při nižších teplotách hrají svou roli. Mezi tyto nedostatky náleží nehomogenity vodičů některých snímačů, velká tepelná vodivost vodičů některých snímačů a závislost termoelektrického napětí a citlivosti snímačů na magnetické pole.

Přehled kovů používaných pro termoelektrické snímače nízkých teplot je uveden v následující tabulce. Pro zápornou větev těchto snímačů může být kromě konstantanu použito zlato s obsahem kobaltu nebo zlato s obsahem železa. Kladnou vě-

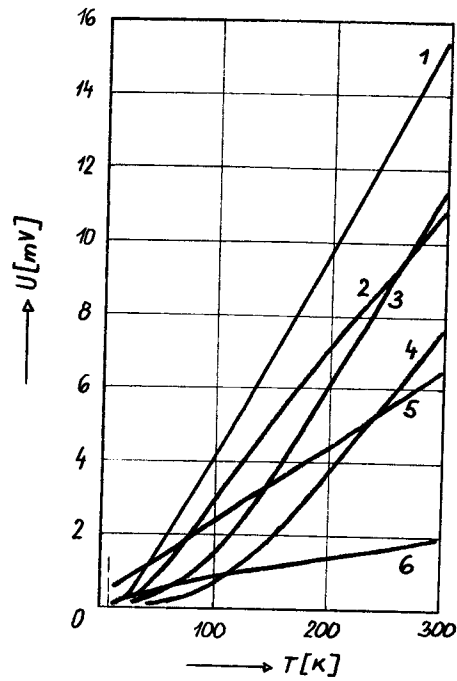
tev může tvořit měď, stříbro s obsahem zlata nebo chromel. Tabulka dále uvádí tepelnou vodivost a nehomogenitu materiálů pomocí porovnávacích indexů: 1 /nejnižší/ až 5 /nejvyšší/.

Záporná větev			Kladná větev		
Tep. vodivost	Porovnávací indexy		Tep. vodivost	Porovnávací indexy	
Nehomogenity			Nehomogenity		
Kov			Kov		
Zlato-kobalt	4	1	Měď	1	5
Konstantan	1	1	Stříbro-zlato	3	3
Zlato-železo	5	3	Chromel	3	1

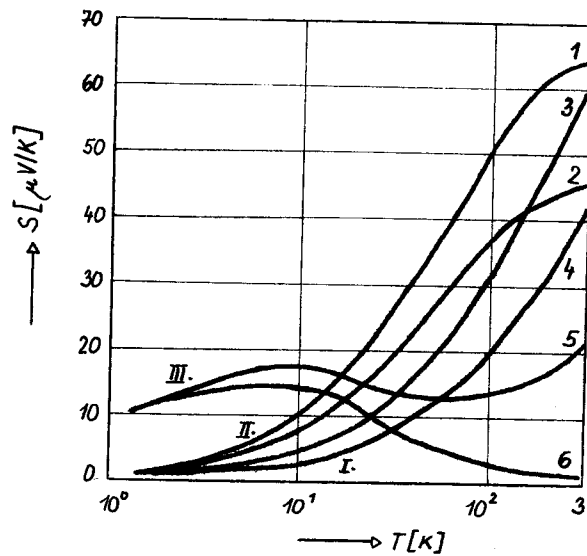
Z uvedených materiálů se zhotovují vodiče o průměru 0,05 mm až 0,2 mm buď holé, nebo izolované skleněnou bavlnou, teflonem, popř. tereftalátovými laky. Spojením dvou vodičů pájením nebo svařením vzniknou termoelektrické snímače: Konstantan/měď; konstantan/stříbro-zlato; konstantan/chromel; zlato-kobalt/měď; zlato-kobalt/stříbro-zlato; zlato-kobalt/chromel; zlato-železo/měď; zlato-železo/stříbro-zlato; zlato-železo/chromel.

Z uvedených snímačů nejsou však používány všechny, neboť ne všechny snímače mají /vlivem rozdílných vlastností určitých kovů/ stejně výhodné vlastnosti.

Pro porovnání termoelektrických vlastností jednotlivých snímačů stačí uvažovat spojení konstantanu, zlato-kobaltu a zlato-železa s mědí a dále spojení uvedených kovů s chromelem. Závislost termoelektrického napětí na teplotě šesti uvažovaných snímačů je vyznačena na obr.27. Závislost termoelektrické síly /citlivosti/ na teplotě těchto snímačů je uvedena na obr.28.



obr.27. Závislost termoelektrického napětí U na teplotě T snímačů: 1. zlato-kobalt/chromel; 2. zlato-kobalt/měď; 3. konstantan/chromel; 4. konstantan/měď; 5. zlato-železo/chromel; 6. zlato-železo/měď.



obr.28. Závislost termoelektrické síly S na teplotě T snímačů uvažovaných na obr.27; /dělení osy je logaritmické/

Z obr.28 vyplývá, že jednotlivé termoelektrické snímače mohou být zařazeny do tří skupin. Skupina I. obsahuje snímače s konstantanem, skupina II. se zlato-kobaltem a skupina III. se zlato-železem. Z obrázku dále plyne, že nejnižší vhodná snímatelná teplota je u skupiny I. asi 10 K, u skupiny II. asi 4 K a u skupiny III. asi 1 K. Z obrázku je vidět, že snímače III. skupiny se zlato-železem vykazují při teplotě 1 K proti snímačům skupiny I. s konstantanem téměř desetinásobnou citlivost. Další údaje dovolující porovnat vlastnosti tří nejpoužívanějších termoelektrických snímačů nízkých teplot jsou uvedeny v následující tabulce.

<i>Termoelektrický snímač</i>	<i>konstantan měď</i>	<i>zlato-kobalt měď</i>	<i>zlato-železo chromel</i>
<i>Nejnižší vhodná snímatelná teplota</i>	10K	4K	1K
<i>Termoelektrické napětí při této teplotě</i>	15,9 μ V	8,2 μ V	16,1 μ V
<i>Termoelektrická síla při této teplotě</i>	3 μ V/K	4 μ V/K	10 μ V/K
<i>Termoelektrické napětí při 273 K</i>	6,25 mV	9,86 mV	5,82 mV
<i>Termoelektrická síla při 273 K</i>	39 μ V/K	43 μ V/K	18 μ V/K

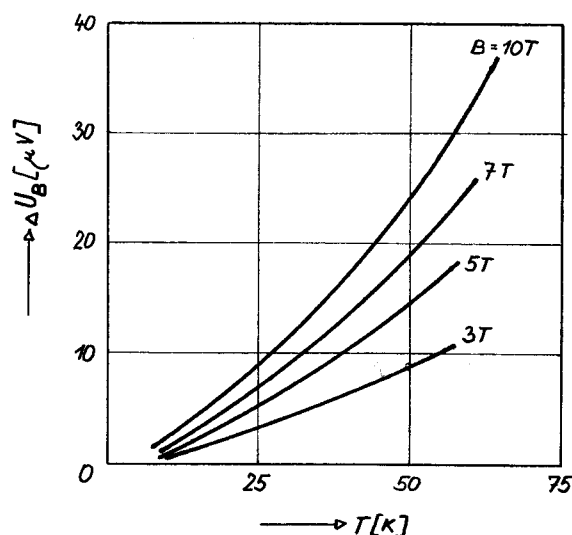
Citlivost termoelektrických snímačů na magnetické pole - magnetorezistence - způsobuje, že se termoelektrické napětí a tím i termoelektrická síla těchto snímačů mění, i když měřená teplota je stálá.

V současné době jsou pro měření nízkých teplot nejčastěji používány termoelektrické snímače konstantan/měď a dále snímače III. skupiny, tj. snímače, jejichž zápornou větev tvoří zlato-železo a kladnou větev měď, stříbro.zlato nebo chromel. Poněvadž slitinové kovy uvedených termoelektrických snímačů obsahují feromagnetické složky /Ni,Fe/, je přirozené, že vnější magnetické pole, v němž se mohou nacházet měřící spoje těchto

to snímačů, bude ovlivňovat jejich termoelektrické napětí a termoelektrickou sílu.

Vliv magnetického pole na termoelektrické vlastnosti často používaného snímače konstantan/měď je sledován na obr.29. Na obrázku je závislost přírůstku termoelektrického napětí ΔU_B uvažovaného snímače na teplotě T . Tato závislost je sledována v rozsahu 5 až 70 K při různých hodnotách indukce B magnetického pole. Z obrázku je zřejmé, že přírůstek napětí se zvětšuje přibližně s druhou mocninou teploty.

U snímače zlato-železo/chromel může být termoelektrická síla vlivem magnetického pole větší nebo menší než při nulové indukci.



obr.29. Závislost změny termoelektrického napětí ΔU_B na teplotě T snímače konstantan/měď při různých hodnotách indukce magnetického pole.

Ve všech pracích, které se zabývají vlivem magnetického pole na termoelektrické snímače, je zdůrazněno, že tento vliv je značný a kvalitativně rozdílný i u vodičů stejného složení. Proto je nutné pro přesnější měření nízkých teplot těmito snímači v magnetickém poli individuální cejchování těchto

snímačů.

Při snímání teploty termoelektrickými snímači je nutné dbát na to, aby se teplota snímače co nejvíce blížila teplotě měřeného objektu. To znamená dbát na to, aby rozdíl mezi teplotou měřenou a teplotou měřicího spoje byl co nejmenší /teoreticky nulový/.

Tento požadavek se zajistí dobrým tepelným spojením měřicího spoje s měřeným objektem, dobrou tepelnou izolací tohoto spoje od okolí a potlačením tepelného toku vodičů snímače mezi jeho výstupními svorkami a měřícím spojem. Potlačení tohoto tepelného toku lze zajistit dlouhými vodiči o malém průřezu. Při volbě některého druhu snímače volíme ten snímač, jehož vodiče jsou při vyhovující termoelektrické síle tenké a mají malou tepelnou vodivost.

7. Vyhodnocovací obvody a přístroje odporových snímačů nízkých teplot

Základní požadavky, které jsou kladeny na vyhodnocovací obvody odporových snímačů nízkých teplot lze shrnout do dvou bodů :

1. Obvody musí dovolovat stálou kontrolu elektrického výkonu rozptýleného ve snímačích.
2. Obvody musí vylučovat vliv odporu elektrických přívodů snímačů na přesnost měření bez ohledu na jeho velikost.

Základní požadavky kladené na vyhodnocovací obvody odporových snímačů nízkých teplot splňuje několik obvodů, z nichž je nejčastěji používán obvod srovnávací, upravený Wheatstoneův můstek a můstek Kelvinův.

Obvody používané jako vyhodnocovací obvody odporových snímačů nízkých teplot mohou být napájeny buď stejnosměrným, nebo střídavým proudem. Podle toho se rozlišují obvody stejnosměrné a obvody střídavé. Oba obvody mohou být zatíženy chybami měření odporu snímačů, které jsou pro oba druhy proudu rozdílné.

Obvody stejnosměrné :

Hlavním zdrojem chyb stejnosměrných obvodů je termoelektrické napětí vznikající především na styku přívodních vodičů snímačů se svorkami vyhodnocovacích obvodů. Vznik termoelektrického napětí lze potlačit vyrobením svorek ze stejného kovu, z jakého jsou vyrobeny přívodní vodiče. Při rozdílných kovech můžeme zabránit vzniku termoelektrického napětí udržováním svorek na stejné a stálé teplotě. Jestliže i potom dojde ke vzniku tohoto napětí, můžeme jeho vliv na přesnost měření vy-

loučit změnou polaritý napájecího proudu. Při tomto postupu je však třeba číst odpor snímače dvakrát a stanovit z obou hodnot hodnotu střední.

Druhou závažnou chybou při měření odporu stejnosměrnými obvody je rušivé stejnosměrné napětí vznikající pronikáním střídavého napětí nežádoucí kapacitní vazbou do přívodních vodičů snímačů a usměrněním tohoto napětí na zoxidovaných vstupních svorkách a kontaktech přepínačů vyhodnocovacích obvodů. Potlačení vlivu tohoto napětí na přesnost měření odporu snímačů lze jednoduše dosáhnout udržováním svorek a přepínačů v čistém a elektricky dokonalém stavu a případným elektrickým stíněním přívodních vodičů snímačů.

Obvody střídavé :

Ve střídavých obvodech nevznikají chyby měření, způsobené vznikem stejnosměrných napětí ve vyhodnocovacích obvodech, ať jsou to napětí termoelektrická či usměrněná napětí střídavá. Na přesnost střídavých vyhodnocovacích obvodů mají vliv chyby měření související s impedančními vlastnostmi přívodních vodičů snímačů a dále s impedančními vlastnostmi odporových dekád představujících podstatné části vyhodnocovacích obvodů. Účinného zmenšení vlivu jmenovaných prvků může být dosaženo použitím vhodných vodičů s malou kapacitou a indukčností a použitím odporových dekád s malou kapacitou a indukčností.

Vliv kapacit a indukčností zmíněných částí na přesnost měření lze dále zmenšit napájením vyhodnocovacích obvodů střídavým proudem s nízkým kmitočtem /v rozsahu 20 až 200 Hz/.

Velkou předností střídavých vyhodnocovacích obvodů je, že mezi obvody a jejich porovnávací indikátory může být zařa-

zen střídavý zesilovač vyznačující se velkým a časově stálým zesílením značně přispívajícím ke zvětšení citlivosti těchto obvodů a současně i k přesnosti měření.

V současné době se používá počítačových řídicích a měřících systémů. Tyto systémy umožňují přímé měření elektrického odporu nebo stejnosměrného napětí a proudu.

Z praktického hlediska to tedy znamená, že pro měření nízkých teplot v zařízeních na dělení vzduchu je možné použít takové snímače nízkých teplot, které umožňují jejich přímé napojení na řídicí systém nebo které je možné kompletovat průmyslově vyráběným převodníkem výstupní veličiny snímače teploty na stejnosměrné napětí nebo proud.

8. Závěr

O volbě měřicí metody nebo teploměru rozhoduje především jeho přesnost, citlivost, krátkodobá a dlouhodobá stálost. Dále je nutné brát v úvahu průběh závislosti termometrického parametru snímače /např. odporu, napětí/ na teplotě, kterou snímáme, tepelnou kapacitu snímače ovlivňující jeho časovou konstantu, geometrické rozměry a citlivost snímače na magnetické pole.

Tuto posledně jmenovanou vlastnost elektrických snímačů nízkých teplot není nutno pro daný uvažovaný případ brát v úvahu. V technologickém procesu nízkoteplotního dělení zkapalněného vzduchu se totiž nevytváří žádné magnetické pole.

Elektrické teploměry určené pro měření nízkých teplot mohou být rozděleny podle typů současných snímačů na teploměry odporové, kapacitní, indukční a termoelektrické. Ze všech uvedených snímačů jsou nejvýznamnější snímače odporové a termoelektrické.

Nejčastěji používanými odporovými snímači nízkých teplot jsou snímače platinové, náležející do skupiny odporových snímačů kovových, a snímače uhlíkové a germaniové, které náležejí do skupiny odporových snímačů nekovových.

Hlavní předností platinových a germaniových snímačů je jejich vynikající dlouhodobá stálost odporu, která se nemění ani po mnohonásobném cyklování a horších provozních podmínkách. Naproti tomu uhlíkové snímače vykazují výrazně menší dlouhodobou stálost odporu, která navíc může být zhoršena cyklováním a málo pečlivým zacházením.

Pro platinové snímače nízkých teplot hovoří i cenová relace těchto snímačů. Jsou totiž společně s uhlíkovými snímači v

podstatně nižší cenové hladině než snímače germaniové.

A jaké je srovnání platinových snímačů odporových se snímači termoelektrickými?

Oba uvedené druhy plně odpovídají požadovanému teplotnímu rozsahu měření. Pro platinové snímače hovoří některé přednosti platiny jako materiálu pro výrobu odporových snímačů nízkých teplot. Je to její dlouhodobě stálý teplotní součinitel odporu, který souvisí s dlouhodobou stálostí závislosti odporu platiny na teplotě. Tato dlouhodobá stálost odporu platiny je největší ze všech v úvahu připadajících kovů. Další předností těchto snímačů je to, že platina se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi, především tažností a ohebností. To dovoluje vyrábět snímače s velmi dobrým vyloučením mechanického napětí na drát. Důležitou vlastností je též poměrně snadná výroba kovu bez příměsí. Největším kladem platinových snímačů nízkých teplot je jejich téměř lineární průběh závislosti odporu na měřené teplotě.

Termoelektrické snímače se ve srovnání se snímači odporovými vyznačují především jednoduchostí, snadnou výrobou, malými rozměry /které dovolují měřit teplotu téměř bodovým způsobem/, malou časovou konstantou a hlavně poměrně nízkou cenou. Proti těmto kladům mají i určitou nevýhodu danou menší citlivostí, která navíc není stálá a směrem k nižším teplotám se zmenšuje. Mezi další nedostatky je třeba zařadit závislost přesnosti měření na stálosti teploty srovnávacího spoje snímačů. Vedle již uvedených nedostatků společných všem termoelektrickým snímačům je třeba uvést nedostatky další, specifické pro jednotlivé snímače. Mezi tyto nedostatky náleží nehomogenity vodičů některých snímačů, velká tepelná vodivost vodičů některých snímačů.

Z cenového hlediska, jak již bylo řečeno, vycházejí ve vzájemném srovnání lépe termoelektrické snímače nízkých teplot. U těchto termoelektrických snímačů se oproti snímačům platinovým používá pouze dvou vodičové zapojení. U platinových snímačů se používá čtyřvodičové zapojení a tudíž je potřeba dvakrát delší kabeláž. Při instalaci těchto snímačů na větší vzdálenost tímto výrazně stoupají náklady na měření nízkých teplot pomocí platinových odporových snímačů.

Jedním z důležitých hledisek při výběru vhodného snímače je i hledisko dostupnosti jednotlivých druhů snímačů na našem trhu. V současné době i z tohoto hlediska vyplývají jako nejdostupnější snímače platinové a snímače termoelektrické. Ovšem v blízké době se jistě situace na našem trhu, díky pronikání nových zahraničních firem, zlepší a výsledek tohoto hlediska nebude tak jednoznačný.

Za pozornost by totiž jistě stály diodové snímače nízkých teplot, které umožňují, pro svou přímkovou závislost napětí na teplotě, přímé spojení teploměru se zapisovačem a mimoto teplotní údaj teploměru může být snadno převeden do číslicového tvaru. Diodové snímače firmy LAKE SHORE jsou novinkou na trhu se snímači nízkých teplot. Jsou to snímače velmi malých rozměrů a velké citlivosti.

Zatím bych však navrhoval používání platinových odporových teploměrů nebo snímačů termoelektrických. Oba uvedené druhy jsou pro měření nízkých teplot vhodné a pro volbu jednoho z nich se uživatel musí rozhodnout po zvážení svých požadavků na přesnost a cenovou stránku věci.

-60-

/1/ Obr, J.-Růžička, J. : Průmyslová zařízení na výrobu kyslíku a dusíku. Praha, SNTL, 1964.

/2/ Jepifamov, A. a kol. : Razdělenija vozducha metodom glubokovo ochlažděniija /I. a II. díl/. Moskva, 1973.

/3/ Katalog fy Lake Shore Cryotronics : Temperature Sensor Guide.

Seznam literatury

- /1/ Obr, J.-Růžička, J. : Průmyslová zařízení na výrobu kyslíku a dusíku. Praha, SNTL, 1964.
- /2/ Jepifamov, A. a kol. : Razdělení vzducha metodou hlubokovo ochlazení /I. a II. díl/. Moskva, 1973.
- /3/ Katalog fy Lake Shore Cryotronics : Temperature Sensor Guide.
- /4/ Katalog fy Lake Shore Cryotronics : Lake Shore product catalog.
- /5/ Vepřek, J. : Elektrická měření nízkých teplot. Praha, SNTL, 1977.