



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra aplikované fyziky a techniky

Diplomová práce

Vývoj mobilního měřiče rychlosti proudění

Vypracoval: Bc. Vít Ditrich
Vedoucí práce: doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.

České Budějovice 2015

Anotace

Tato diplomová práce popisuje známé metody a principy měření průtoku a rychlosti proudění tekutin. Dále obsahuje popis vývoje mobilního měřiče proudění včetně realizace a technického popisu zařízení. Popisuje také výhody a nevýhody vyvíjeného měřiče proudění. Část práce se věnuje kalibraci zařízení a popisu možností využití měřiče proudění v praxi.

Annotation

This thesis contains the description of well-known methods and principles dealing with the measurement of the flow-velocity of fluids. Furthermore, it contains the description of the development of the mobile flow-meter, including the realization and the technical description of the device. The thesis describes the advantages and disadvantages of the above mentioned flow-meter. The last part of the thesis is dedicated to the calibration of the device and to the possible practical use of the flow-meter.

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

Touto formou děkuji vedoucímu práce, doc. PaedDr. Petru Adámkovi, Ph.D.,
za odbornou pomoc a trpělivost při vedení této práce.

Děkuji také celé své rodině za podporu a pochopení při psaní této práce.

OBSAH

OBSAH	5
1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE	6
2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY MĚŘIČŮ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ	7
2.1 CO JE MĚŘIČ PROUDĚNÍ A K ČEMU SE POUŽÍVÁ	7
2.2 STÁVAJÍCÍ MOŽNOSTI PŘI MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ A PRŮTOKU	7
2.2.1 <i>Laminární proudění.....</i>	7
2.2.2 <i>Turbulentní proudění</i>	8
2.2.3 <i>Reynoldsovo číslo.....</i>	8
2.3 DRUHÝ MĚŘIČŮ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ A PRŮTOKOMĚŘŮ	9
2.3.1 <i>Měřič rychlosti proudění s rotorem.....</i>	9
2.3.2 <i>Pitotova trubice</i>	11
2.3.3 <i>Měřič rychlosti proudění na elektromagnetickém principu</i>	12
2.3.4 <i>Ultrazvukový měřič proudění.....</i>	14
2.3.5 <i>Termoanemometrický měřič proudění.....</i>	16
3 VÝVOJ MĚŘIČE RYCHLOSTI PROUDĚNÍ	19
3.1 POŽADAVKY NA MĚŘIČ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ	19
3.2 MĚŘIČ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ INSPIROVANÝ HOT WIRE ANEMOMETREM.....	19
3.2.1 <i>Inspirace hot wire anemometrem.....</i>	19
3.2.2 <i>Konstrukce senzoru s diodami</i>	20
3.2.3 <i>Realizace senzoru s diodami</i>	24
3.2.4 <i>Realizace senzoru s termistory.....</i>	27
3.3 MĚŘIČ PROUDĚNÍ NA INDUKČNÍM PRINCIPU.....	30
3.4 MĚŘIČ PROUDĚNÍ S ROTOREM	32
3.4.1 <i>Vývoj měřiče proudění s rotorem.....</i>	32
3.4.2 <i>Výroba mobilního měřiče proudění s rotorem</i>	36
4 KALIBRACE ZAŘÍZENÍ A JEHO UPOTŘEBITELNOST.....	41
4.1 KALIBRACE MĚŘIČE RYCHLOSTI PROUDĚNÍ.....	41
4.2 KALIBRACE TEPLOMĚRU	43
4.3 UPOTŘEBITELNOST ZAŘÍZENÍ A JEHO PARAMETRY	44
4.4 NÁVOD K POUŽITÍ:.....	45
5 ZÁVĚR	47
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49

1 Úvod a cíle práce

Na katedře biologie pedagogické fakulty Jihočeské univerzity vznikla potřeba měřit přesně rychlost proudění malých vodních toků v definované vzdálenosti ode dna. Stávající metody měření nebyly dostatečně přesné a komfortní. Vznikla proto idea vlastní konstrukce měřiče rychlosti proudění.

Tato diplomová práce si klade za cíle:

1. Seznámit s metodami a principy, které slouží ke zjištění rychlosti proudění kapalin a plynů.
2. Popsat volbu optimálního technického řešení měřiče.
3. Ověřit funkčnost navrhovaných odlišných technických řešení.
4. Hlavním cílem této diplomové práce je realizovat navržený měřič rychlosti proudění.
5. Kalibrovat realizovaný měřič s použitím referenčního měřiče rychlosti proudění.
6. Navrhnout aplikace měřiče rychlosti proudění a popsat jeho obsluhu.

K tvorbě obrázků a schémat v této práci byl použit software, který je součástí operačního systému Windows a Circuit Diagram 2.1, který je volně šiřitelný a dostupný z [1].

2 Základní principy měřičů rychlosti proudění

2.1 Co je měřič proudění a k čemu se používá

Měřiče rychlosti proudění se používají ke zjištění okamžité rychlosti proudění tekutiny. Měřič rychlosti proudění nezměří průtok, což je objem, který proteče měřeným průřezem za jednotku času, poskytne pouze informaci o tom, jakou okamžitou rychlostí tekutina v měřeném místě proudí nezávisle na velikosti vodního nebo plynného toku [2].

Ke zjištění průměrné rychlosti proudění přírodního vodního toku je nezbytné provést opakovaná měření okamžité rychlosti, která je nutno statisticky zpracovat. Při měření rychlosti pomocí měřiče rychlosti proudění je nutno počítat s tím, že se kapalina v různých místech pohybuje různou okamžitou rychlostí. To je způsobeno různými vnějšími vlivy, které způsobují turbulentní proudění [3].

Měřením rychlosti proudění přirozeného toku se zabývá hydrometrie, která je součástí hydrologie [4].

2.2 Stávající možnosti při měření rychlosti proudění a průtoku

Jsou dvě základní možnosti, jak provést měření průměrné rychlosti nebo průtoku. Jednou z nich je měřenou tekutinu svést do známého profilu (trubka, korýtko o známém objemu), nebo měření provést na otevřené hladině.

Důležitým faktorem jsou podmínky pro měření. Pro různé situace budou vhodné odlišné měřiče rychlosti proudění či průtoku [3].

Důležitým parametrem pro volbu měřiče je typ proudění. V zásadě se rozlišují dva základní typy proudění – turbulentní a laminární. Rozdělení je závislé na rozložení setrvačných a třecích sil v tekutině. Následující odstavce pojednávají o rozdílech laminárního a turbulentního proudění. Popis vlastností laminárního a turbulentního proudění je omezen na proudění v trubkách [3].

2.2.1 Laminární proudění

U laminárního proudění nedochází k míchání jednotlivých vrstev tekutiny, převládá zde účinek třecích sil. Částice tekutiny se pohybují po rovnoběžných drahách, jejich trajektorie se tedy nekříží. Nejvyšší rychlosti toto proudění dosahuje ve své vnitřní

ose, směrem k okrajům rychlost proudění klesá. Jedná se o typické proudění viskózních či pomalu tekoucích tekutin. Jako laminární proudění se označuje takové proudění, kde $Re < 2000$. Re je Reynoldsovo číslo, které je poměrové, bezrozměrné. O Reynoldsově čísle pojednává následující kapitola [3].

Laminární proudění:



Turbulentní proudění:



Obrázek 1 - Laminární a turbulentní proudění. Převzato a upraveno z [5].

2.2.2 Turbulentní proudění

Turbulentní proudění je charakterizováno křížením drah částic tekutiny. Často také bývá doprovázeno víry, čímž je omezován průtok. K podpoření průtoku je pak zapotřebí dosažení vyššího tlaku. Jako turbulentní proudění se označuje takové proudění, kde je $Re > 4000$. Na rozdíl od laminárního proudění se zde uplatňují spíše setrvačné síly. Rychlost proudění tekutiny je pak ve všech místech osy y téměř totožná [3].

2.2.3 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo udává poměr mezi třecími a setrvačnými silami v tekutině. Patří do skupiny podobnostních čísel a jeho výpočet se provádí dle rovnice (1) dle [6]:

$$Re = \frac{v_s d}{\nu}, \quad (1)$$

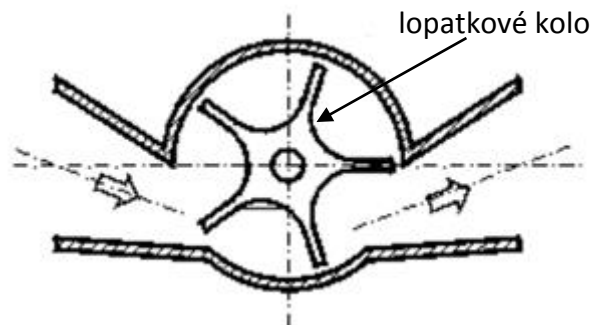
kde v_s je střední hodnota rychlosti proudění tekutiny v daném průřezu, d je průměr trubice a ν je kinematická viskozita.

Re_{krit} udává kritickou hodnotu Reynoldsova čísla, při které dochází ke změně typu proudění, jedná se tedy o hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním. Přechod z jednoho typu proudění do druhého se neděje postupně, ale jde o změnu náhlou [3].

2.3 Druhy měřičů rychlosti proudění a průtokoměrů

2.3.1 Měřič rychlosti proudění s rotorem

Jedná se asi o vůbec nejběžnější typ měřiče. Rychlost proudění je zde odvozena od otáčivého pohybu turbíny, lopatkového nebo šroubového kola. Turbíny nebo kola se do rotačního pohybu uvedou silovým působením proudící kapaliny. Rychlost otáčení je pak přímo úměrná střední rychlosti proudění. Samotné odečtení rychlosti proudění pak může být realizováno buď mechanicky převody, nebo i elektronicky. Lopatky rotujícího šneku nebo kola mohou být magneticky (indukčně) detekovány a každé pootočení může být impulsem pro zaznamenání počtu otáčení [7].



Obrázek 2 - Radiální lopatkový průtokoměr. Převzato a upraveno z [8].

První ze způsobů záznamu má výhodu, že ke své funkci nepotřebuje externí zdroj napájení a funguje čistě na mechanickém principu. To však s sebou přináší nevýhody, jako je opotřebení převodů, a tedy nutné častější výměny průtokoměrů. V případě magnetické detekce je servisní interval delší, nevýhodou je ale potřeba externího napájení a také vyšší pořizovací náklady [3].

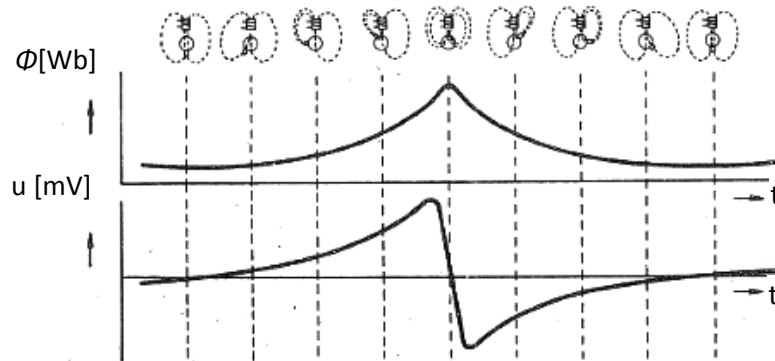
Průtokoměry s rotorem se řadí do skupiny rychlostních průtokoměrů, jejichž vlastností je nepřímé vyhodnocení průtoku v závislosti na rychlosti proudění. Tento stav popisují rovnice (2) a (3) dle [9]:

$$Q_V = \frac{V}{t} = S \cdot w \quad ; \quad (2)$$

$$Q_m = \frac{m}{t} = Q_V \cdot \rho = \frac{V}{t} \cdot \rho = S \cdot w \cdot \rho \quad , \quad (3)$$

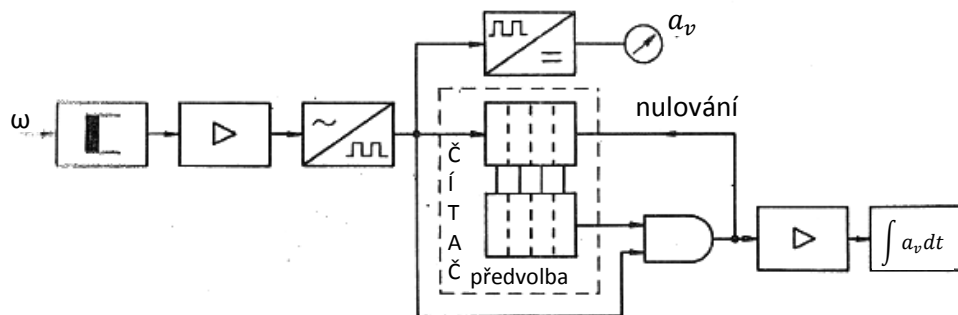
kde Q_v je objemový průtok, Q_m je hmotnostní průtok, V je objem, t je čas, S je průtočný průřez, w je střední průtočná rychlost, m je hmotnost tekutiny, a ρ je hustota tekutiny.

Další obrázek uvádí pravděpodobný průběh při impulsním snímání otáček:



Obrázek 3 - Průběh magnetického toku a napětí. Převzato a upraveno z [9].

Jedno z blokových schémat zapojení vyhodnocovacího členu indukčního snímače otáček, kde ω je úhlová rychlost otáčení rotoru:



Obrázek 4 - Schéma zapojení vyhodnocovacího členu indukčního snímače.

Převzato a upraveno z [9].

Ze schémat vyplývá, že pro detekci otáček se využívá proměnného magnetického odporu mezi lopatkami, které bývají vyrobeny z feromagnetického materiálu, a magnetem, který je umístěn v detekční cívce mimo trubici. Dále dochází k zesílení signálu a k tvarování signálu na obdélkový průběh. K vyhodnocení objemu proteklého přes průtokoměr se využívá konstanta k , která je dána konstrukcí přístroje a vypočítá se dle (4), [9]:

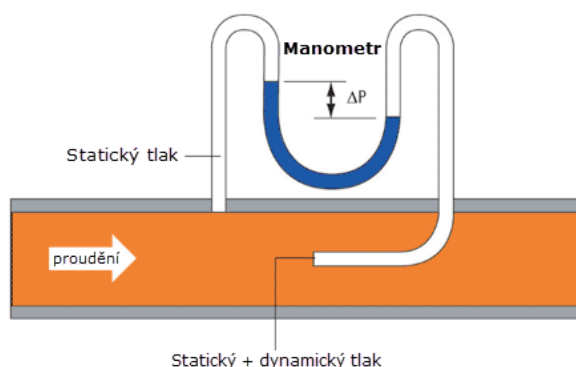
$$k = \frac{f}{Q_v}, \quad (4)$$

kde f je frekvence impulsů. Konstanta má výrobní rozptyl, a proto je nutné použití čítače s nastavitelnou předvolbou. Při dosažení počtu impulsů, které byly předvoleny, vyšle čítač impuls, který odpovídá hodnotě proteklého objemu [9].

Linearita takovýchto průtokoměrů se pohybuje mezi 0,1 % a 0,5 %. Výhodou tohoto řešení je použitelnost měřiče i v extrémních podmínkách. Podle typu měřené tekutiny mohou být provozní podmínky v rozsahu teplot $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ při tlaku až 32 MPa [3].

2.3.2 Pitotova trubice

Pitotovy trubice určují rychlost proudění na základě difference tlaku ve středu trubice a na jejím okraji. Pitotovu trubici tvoří trubice, která má ve svém středu zahnutou jinou trubici s užším průměrem, jejíž střed leží ve směru proudění tekutiny (viz obrázek 5). Dále Pitotovu trubici tvoří rovná trubice, která je na proudění kolmá. Výsledkem je manometr, který měří rozdíl mezi statickým a dynamickým tlakem [3].



Obrázek 5 - Princip Pitotovy trubice. Převzato a upraveno z [10]

Rozdíl mezi statickým a dynamickým tlakem udává rychlost proudění na základě výpočtu dle Bernoulliovy rovnice (5).

Bernoulliova rovnice představuje aplikaci zákona o zachování mechanické energie na proudící tekutinu [11].

$$\frac{1}{2}\rho_t v_t^2 + p + \rho_t g h = konst., \quad (5)$$

kde ρ_t je hustota tekutiny, v_t je rychlost tekutiny, p je tlak v tekutině v daném místě potrubí, g je gravitační zrychlení a h je výška hladiny (v manometrických trubicích).

Pro korektnost rovnice je nutné stanovit základní podmínku, kterou je platnost rovnice kontinuity. Ta definuje, že v nestlačitelných tekutinách musí být zachována hmotnost tekutiny, která proudí v uzavřeném potrubí. Rovnici kontinuity lze zapsat v obecném diferenciálním tvaru dle (6), [12]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0, \quad (6)$$

kde ρ je prostorová hustota zachovávající se veličiny, $\frac{\partial}{\partial t}$ je derivace podle času, \mathbf{j} je veličina vyjadřující hustotu toku a $\nabla \cdot \mathbf{j}$ je divergence hustoty toku.

Je také možno zapsat dle [11] rovnicí (7):

$$Q_v = S \cdot v = konst., \quad (7)$$

kde Q_v je objem tekutiny, S je průřez potrubí a v je rychlost proudění. Čili dle rovnice (8) dle [12]:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (8)$$

Jelikož střední proudnice se v Pitotově trubici zastaví na překážce (zahnutá trubice – bod stagnace), je $v_2 = 0$. Bernoulliovu rovnici tudíž lze upravit do tvaru rovnice (9) dle [3]:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 \quad (9)$$

Z úpravy rovnice (9) a následného dosazení vychází, že rychlost je možné vypočítat dle rovnice (10), [3]:

$$v = \sqrt{2g(h_2 - h_1)}, \quad (10)$$

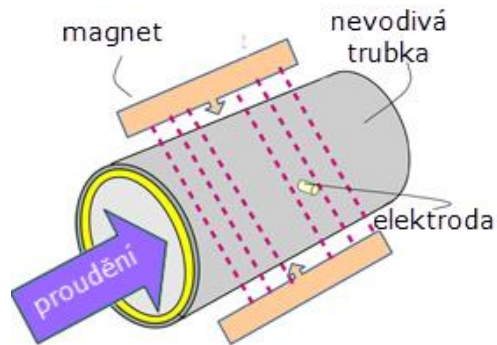
kde v je rychlost proudění, g je gravitační zrychlení a h_2 a h_1 je rozdíl výšky hladin získaných z manometru.

Složitější Pitotovy trubice se často používají jako rychloměry letadel. Vzhledem ke složitým povětrnostním podmínkám, kde se letadla nacházejí, bývají často Pitotovy trubice vyhřívané, aby nedošlo k jejich zamrznutí [13].

2.3.3 Měřič rychlosti proudění na elektromagnetickém principu

Elektromagnetický měřič rychlosti proudění je moderní měřič, který se dle norem řadí mezi měřiče indukční. Toto označení však není fyzikálně přesné, jelikož funkce měřiče vychází spíše z Lorentzova zákona než ze zákona Faradayova [3]. Předpokladem

pro použití tohoto typu měřiče je, aby tekutina, která potrubím proudí, byla elektricky vodivá. Naopak potrubí by mělo být vyrobeno z izolantu [3, 11].



Obrázek 6 - Elektromagnetický průtokoměr. Převzato a upraveno z [14].

Základní konstrukční schéma měřiče tvoří dvě elektrody umístěné naproti sobě z vnějšku trubky ve vzdálenosti d . Proudící tekutina, která protéká magnetickým polem o indukci \vec{B} , pak generuje napětí U na elektrodách. Děje se tak proto, že magnetická síla působí na náboj q pohybující se v magnetickém poli a zapříčiní jeho vychýlení a usazení na elektrodách (směr vychýlení je dán pravidlem pravé ruky). Vzniká tak rozdíl potenciálů [11].

Výpočet magnetické síly působící na náboj dle (11), [11]:

$$\vec{F}_B = q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (11)$$

kde \vec{v} je rychlost náboje q pohybujícího se v magnetickém poli. Elektrická síla, která působí v opačném směru než síla magnetická, je dle rovnice (12), [11].

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E} \quad (12)$$

Intenzita elektrického pole \vec{E} , které vzniká jako důsledek rozdílu potenciálů, je dána vztahem (13) dle [11].

$$|\vec{E}| = \frac{U}{d}, \quad (13)$$

kde U je napětí mezi elektrodami a d je vzdálenost mezi nimi. Rovnováha nastává, pokud se síly rovnají, a pro napětí tak vzniká závislost (14) dle [3]:

$$U = v \cdot B \cdot d \quad (14)$$

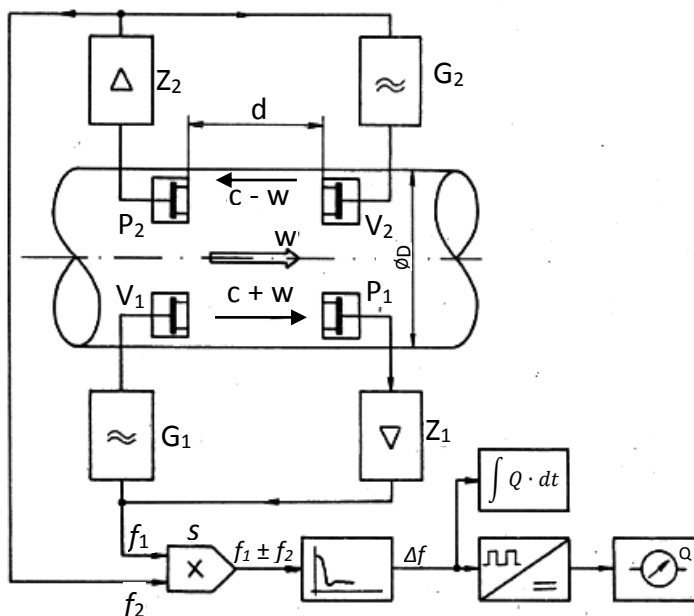
Tohoto výsledku lze dosáhnout uplatněním Faradayova zákona, vznik napětí ovšem odpovídá spíše Hallovu jevu u polovodičů [2].



Obrázek 7 - Elektromagnetický průtokoměr. Převzato z [15].

2.3.4 Ultrazvukový měřič proudění

Ultrazvukových měřičů rychlosti proudění existuje několik druhů. Jednoduché vysvětlení principu tohoto druhu měřiče je, že proudící tekutina způsobuje buď zpomalení, anebo zrychlení rychlosti ultrazvuku v závislosti na tom, jakým směrem (po proudu, anebo proti proudu) je ultrazvuk vyslán. Ke zvýšení přesnosti měření se využívá diferenciálního uspořádání měničů, a to za účelem odstranění vlivu teploty a jiných vlastností tekutin, které by mohly mít vliv na měření [9].



Obrázek 8 - Schéma uspořádání a zapojení ultrazvukového průtokoměru.

Převzato a upraveno z [9].

Na základním schématu (obrázek 8) jsou znázorněny dva generátory G_1 a G_2 , které generují krátkodobý signál na vysíláče V_1 a V_2 . Odtud se vysílaný ultrazvuk šíří

tekutinou k přijímačům P1 a P2, které jsou umístěny ve vzdálenosti d . Dále se přijatý signál zesiluje v zesilovačích Z1 a Z2 a vrací se zpět na generátory, které opět vyšlou nový signál.

Časový interval mezi dvěma vyslanými signály a frekvenci impulsů uvádějí vztahy (15) dle [9].

$$\Delta t = \frac{l}{c+v} \quad ; \quad f = \frac{1}{\Delta t'} \quad (15)$$

kde l je vzdálenost mezi vysílači, c je rychlost ultrazvuku v neproudící kapalině a v je rychlost proudící kapaliny.

Signál doputuje od zesilovačů do směšovače S, kde dojde ke zpracování obou kmitočtů. Po odfiltrování součtové frekvence platí pro rozdíl kmitočtů rovnice (16) dle [9].

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2 \cdot v}{l} \quad (16)$$

Při zajištění rovnoměrné rychlosti v celém průřezu trubky lze objemový průtok vypočítat dle rovnice (17), [9].

$$Q_V = v \frac{\pi D^2}{4} = \frac{l \pi D^2}{8} \Delta f, \quad (17)$$

kde D je průřez trubky.

Popsaný typ ultrazvukového měřiče je pouze jeden z mnoha. Uveden je značně zjednodušený, vystihuje však základní princip. Ultrazvukové měřiče rychlosti proudění je možno rozdělit na tři hlavní skupiny: přímé impulzní, zpětnovazební nebo Dopplerovy [3].

Samotné přijímače a vysílače ultrazvukového signálu mohou být umístěny v různých pozicích. Mohou být instalovány přímo v proudící tekutině, především však vně trubice. Jako výhodnější se jeví umístění šikmo přes měřicí trubici. Vznikne tím delší dráha šíření ultrazvukového signálu. Odrazem ultrazvukového signálu o reflektory přidané do trubice lze dráhu prodloužit. Výpočet objemového průtoku je nutno upravit dle použité aplikace [3].

Výhodou ultrazvukových průtokoměrů je univerzálnost použití. S ultrazvukovým průtokoměrem lze měřit nejen průtok kapalin a plynů, ale také přehřáté páry, kouřové plyny, čehož se využívá např. v elektrárnách. Jinou výhodou je variabilita umístění a schopnost pracovat v jakékoli poloze. Další výhodou je malá tlaková ztráta, v případě

měření plynu se tlaková ztráta bude pohybovat v řádech jednotek Pa. Dalším benefitem je, že podobně jako elektromagnetické průtokoměry, ultrazvukové průtokoměry neobsahují žádné pohyblivé části [3].

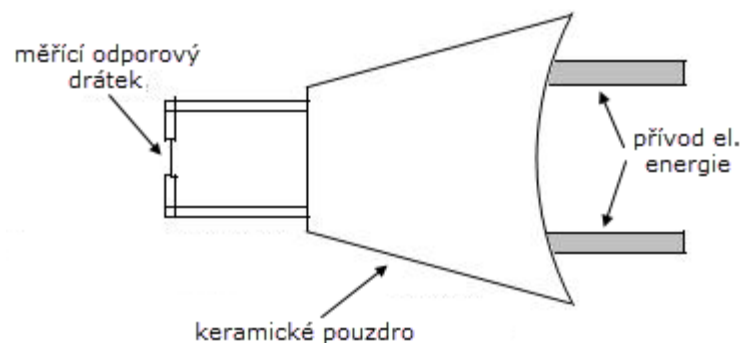
Rozsah měření je udáván v rozsahu (2 až 400 000) m³.h⁻¹, do tlaku 100 MPa. Provozní teplota se pohybuje v rozsahu -300 °C až 600 °C.

Praxe využívá ultrazvukového měření především při měření průtoku nevodivých kapalin, jako jsou petrochemické produkty nebo demineralizovaná voda [3].

2.3.5 Termoanemometrický měřič proudění

Termoanemometrické měřiče rychlosti proudění se využívají především ke zjištění rychlosti proudění plynů. Princip tohoto druhu měřičů je založen na výměně tepla mezi zdrojem tepelné energie a okolním prostředím. Zdrojem tepelné energie je v tomto případě vyhřívaný drátek.

Základní termoanemometr se skládá ze dvou přívodů, které by měly mít co nejmenší tepelnou vodivost a které jsou obvykle usazené do keramického pouzdra. Mezi dvěma vývody je pak natažen měrný odporový drátek, který je vyhříván protékajícím elektrickým proudem [3].



Obrázek 9 - Model termoanemometrického průtokoměru. Převzato a upraveno z [16].

Průměr drátku se pohybuje v řádech μm, materiálem je obvykle kov (Pt, Ni, W, atp.).

Pro výpočet tepelných ztrát lze využít Newtonova vztahu (18), [3].

$$Q = \xi \cdot S(T_d - T), \quad (18)$$

kde ξ je součinitel přestupu tepla, S je povrch měrného odporového drátku, T_d je teplota odporového drátku a T je teplota prostředí.

Při zanedbání energetických ztrát zářením platí pro energeticky vyvážený stav rychlostního senzoru rovnice (19), [9]:

$$R_d \cdot I^2 = \xi \cdot S(T_d - T), \quad (19)$$

kde R_d je odpor měrného drátku, I je proud, S je povrch měrného odporového drátku, T_d je teplota odporového drátku a T je teplota okolního prostředí. Součinitel přestupu tepla ξ je funkcí mnoha fyzikálních vlastností měřené tekutiny, jako je hustota, viskozita, tepelná vodivost atp.

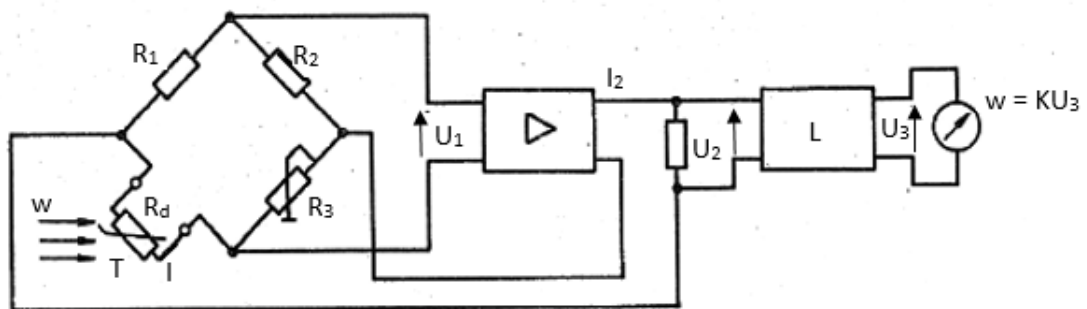
V praxi se více využívá experimentální rovnice (20), která je zjednodušenou Kingovou rovnicí [3]. Zjednodušená rovnice pak může mít tvar [17]:

$$I \approx \sqrt{A + B_m^n}, \quad (20)$$

kde I je proud procházející měrným drátkem, A je konstanta, která zahrnuje tepelné ztráty vedením a konvekcí, B_m je konstanta zahrnující ztráty prouděním a n je experimentální konstanta.

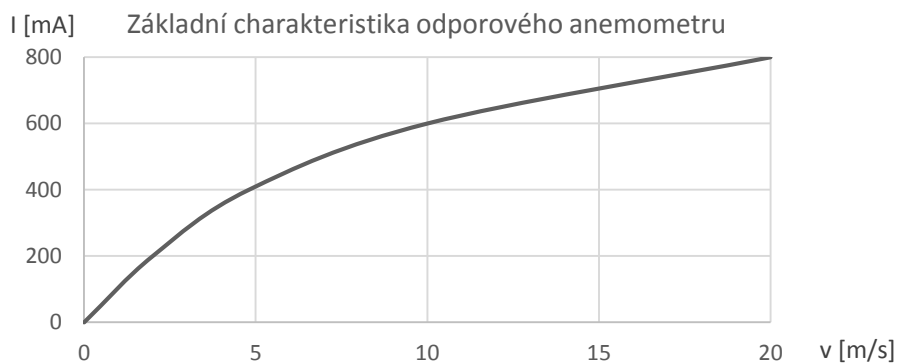
Velmi často je využíváno takové zapojení, kde se udržuje konstantní teplota měrného drátku, tedy veličina R_d zůstává konstantní.

Příkladem použití takového měřiče proudění může být anemometr v základním zapojení:



Obrázek 10 - Příklad zapojení anemometru. Převzato a upraveno z [9].

Na schématickém zobrazení je zobrazen měrný drátek reprezentovaný odporem R_d , který je ochlazován proudem tekutiny w , linearizátor L a konstanta K , která je závislá na okolním prostředí. V grafu 1 je uveden příklad průběhu protékajícího proudu v závislosti na rychlosti proudění tekutiny [3]. Z uvedeného grafu vyplývá, že dle velikosti procházejícího proudu je možné určit velikost rychlosti proudění tekutiny.



Graf 1 - Základní charakteristika odporového anemometru. Převzato a upraveno z [3].

Častěji se v praxi setkáváme se zapojením dvou čidel. Jedno čidlo, umístěné do proudu, je ochlazováno proudící tekutinou, druhé čidlo - kompenzační - je umístěno mimo proudící tekutinu do téhož prostředí, má tedy jeho teplotu. Kompenzační čidlo je pak zapojeno do můstku s měřicím čidlem a slouží k automatické korekci teploty měřené tekutiny. S tímto typem zapojení je proto možné dosáhnout přesnějších výsledků [3].

Zpravidla pak, dle volby rezistorů, prochází měrným drátkem vyšší proud než v případě kompenzačního snímače. Nedochozí tím k negativnímu ovlivňování výsledků tím, že samotné kompenzační čidlo vyhřívá tekutinu v důsledku vznikajícího Joulova tepla [3].

Čidla bývají umístěna přímo do tekutiny proudící trubkou, a to kolmo ke směru proudění. Bývají umístěna vedle sebe anebo za sebou, dle konstrukce a aktuálních potřeb měřeného prostředí.

Mezi hlavní výhody tepelných průtokoměrů patří jejich velký měřicí rozsah, zanedbatelná tlaková ztráta, rychlá odezva, citlivost a přímé měření hmotnostního průtoku. Průtokoměr neobsahuje žádné pohyblivé části, funguje za rozdílných provozních podmínek. Přesnost se pohybuje od $\pm 0,1\%$ do $\pm 0,5\%$ [3].

Mezi nevýhody termoanemometrických průtokoměrů patří zejména nutnost kalibrace při změně měřeného média. Také je nutné kvalitní usměrnění měřeného média k omezení tvorby vírů, které mohou způsobovat nepřesnosti měření. Jinou nevýhodou je citlivost na čistotu měřeného média [9].

3 Vývoj měřiče rychlosti proudění

3.1 Požadavky na měřič rychlosti proudění

Před samotnou realizací požadovaného měřiče rychlosti proudění musely být stanoveny parametry, které by mělo zařízení splňovat. Požadovaný měřič by měl být citlivý i na nízké rychlosti proudění. Snímač by měl být odolný vůči vodě a funkční za běžných meteorologických podmínek.

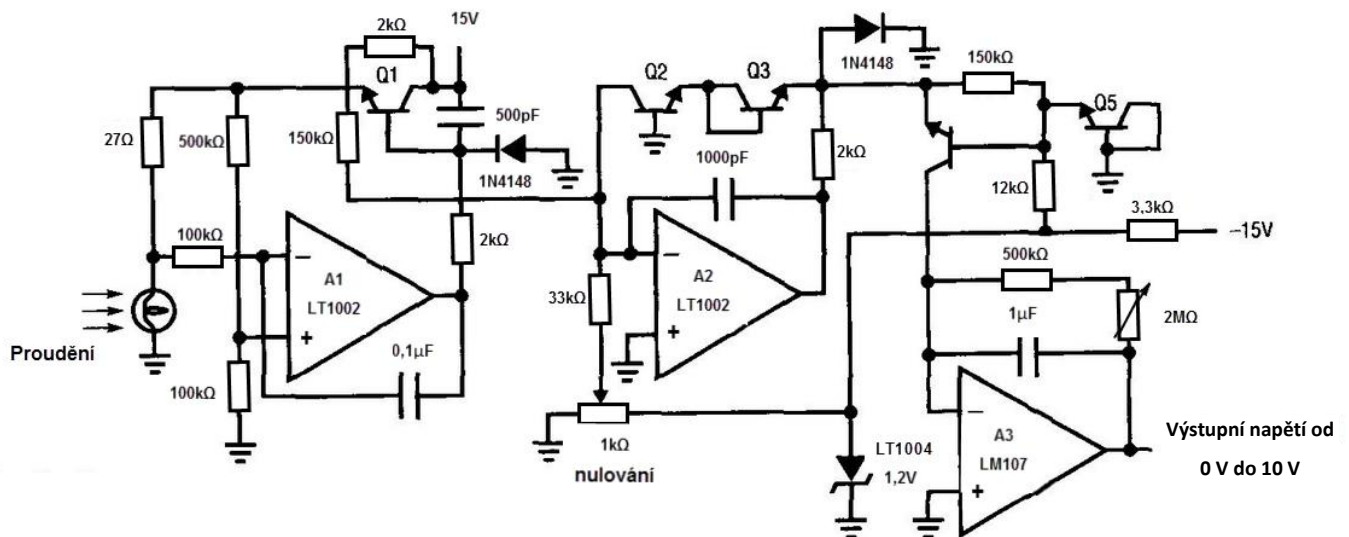
Měřič by měl umožnit měření proudění v různých hloubkách ode dna menších vodních toků a měl by být schopen měřit aktuální teplotu proudící vody.

První pokus o sestrojení takového měřiče byl založen na podobném principu, na kterém fungoval termoanemometrický průtokoměr popisovaný v kapitole 2.3.5.

3.2 Měřič rychlosti proudění inspirovaný hot wire anemometrem

3.2.1 Inspirace hot wire anemometrem

Hot wire anemometr, což je výstižný anglický výraz pro termoanemometrický anemometr s vyhříváním měrným drátkem [18], byl vzorem pro přepracování dle požadovaných vlastností konstruovaného měřiče proudění. Předpokládanou výhodou měla být schopnost měřit velmi nízké rychlosti proudění tekutiny. Inspirací byl text zveřejněný v Linear Applications Handbook, díl první, kde bylo uvedeno toto zapojení:



Obrázek 11 - Schéma hot wire anemometru. Převzato a upraveno z [19].

Jako čidlo proudění byla použita malá 6 V žárovka označená 328, která byla upravena tak, že bylo odstraněno krycí sklo – baňka. Dosáhlo se tak obnaženého měrného odporového drátku, který byl vyhříván procházejícím proudem. Proudění pak drátek ochlazovalo. Výše uvedený hot wire anemometr (obrázek 11) funguje na principu měření velikosti energie, která je potřebná k udržení odporového drátku na konstantní teplotě. Proto lze říci, že rychlost proudění je přímo úměrná velikosti energie, kterou je potřeba drátku dodat ke splnění výše uvedené podmínky [19].

Zapojení a funkce hot wire anemometru je patrná z obrázku 11. Pro zesílení výstupního napětí jsou použity tři zesilovací členy, které v konečném důsledku znamenají výstupní napětí v rozsahu (0 až 10) V, které přímo odpovídá rychlosti proudění [19].

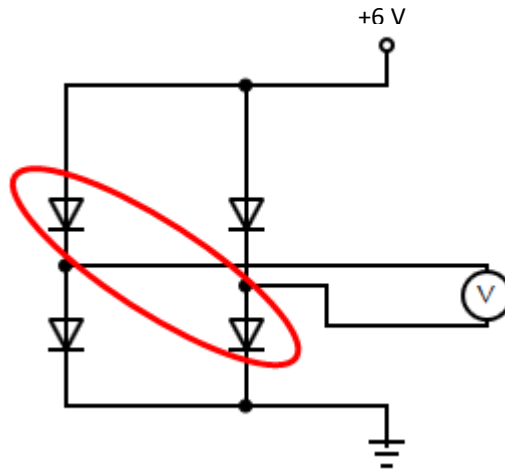
3.2.2 Konstrukce senzoru s diodami

Pro použití měřiče rychlosti proudění ve vodě není využití odporového drátku jako senzoru vhodným řešením. Jako senzoru změn teploty byly tedy použity polovodičové diody.

Polovodiče jsou teplotně závislé. Při srovnání rezistivity mědi ($1,69 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{m}$) a rezistivity křemíku ($2,5 \cdot 10^3 \text{ } \Omega/\text{m}$) [11] a teplotních součinitelů jejich rezistivity (měď: $+4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } \alpha/\text{K}^{-1}$; křemík: $-70 \cdot 10^{-3} \text{ } \alpha/\text{K}^{-1}$) [11] je patrné, že polovodiče mají oproti vodičům opačnou charakteristiku teplotní závislosti. V polovodičích se nepoužívá čistý křemík, ale křemík dotovaný příměsovými atomy, které polovodič charakterizují. Vyplyvá z toho, že zahříváním polovodičů bude klesat jejich rezistivita [11].

Této vlastnosti bylo v konstruovaném měřiči rychlosti proudění využito. Pro získání diferenčního napětí byly použity diodové můstky.

Pro výrobu byly použity čtyři běžné PN diody s malým výkonem. Dvě diody sloužily jako referenční – bez ochlazování (oteplování) proudící tekutinou. Další dvě diody byly umístěny v proudící tekutině a zajišťovaly samotný senzor proudění, viz obrázek 12.



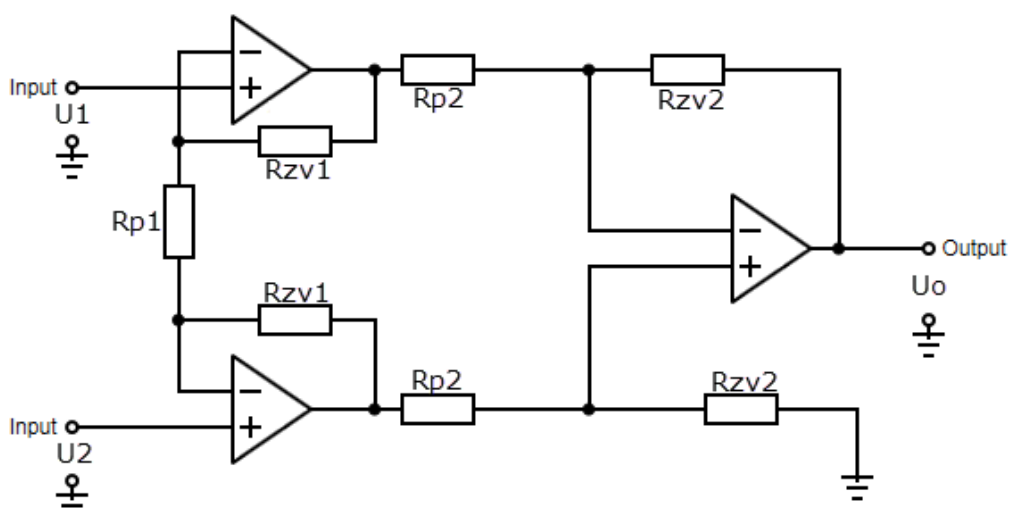
Obrázek 12 - Zapojení diodového můstku pro detekci proudění. Pro správnou funkci zařízení bylo nutné zajistit, aby diody v červeném oválu byly referenční.

Voltmetrem pak bylo měřeno diferenční napětí mezi diodami.

Představa konstrukce byla taková, že dvě diody budou umístěny přímo do proudu vody a dvě diody budou umístěny do téže kapaliny, ale budou chráněny proti proudění vody pevnou bariérou. Zároveň musela být dodržena podmínka, aby i k referenčním diodám natekla voda o stejné teplotě jako měřená kapalina. Pro zaručení mobility senzoru a současně jeho odolnosti, měly být všechny použité diody umístěny do jednoho funkčního celku.

Bylo také nutné zajistit způsob zesilování diferenčního napětí. Pro tyto potřeby se jako ideální jevil přístrojový zesilovač.

Přístrojový zesilovač je dvoustupňový diferenční zesilovač tvořený třemi monolitickými operačními zesilovači. Jelikož jsou operační zesilovače v tomto zapojení zapojeny symetricky, dosahuje přístrojový zesilovač vysokého potlačení souhlasného signálu na vstupech [20, 21]. Přístrojový zesilovač nadále umožňuje s pomocí dodatečných elektronických součástek kompenzovat vstupní napěťovou nesymetrii. Základní zjednodušené zapojení operačního zesilovače znázorňuje obrázek 13 [20, 21].



Obrázek 13 - Přístrojový zesilovač zapojený s třemi operačními zesilovači a rezistory.

Převzato a upraveno z [20].

Přenosová funkce napětí takového přístrojového zesilovače je potom vyjádřena vztahem (21) dle [20].

$$U_0 = (U_2 - U_1) \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R_{zv1}}{R_{p1}}\right) \cdot \frac{R_{zv2}}{R_{p2}} \quad (21)$$

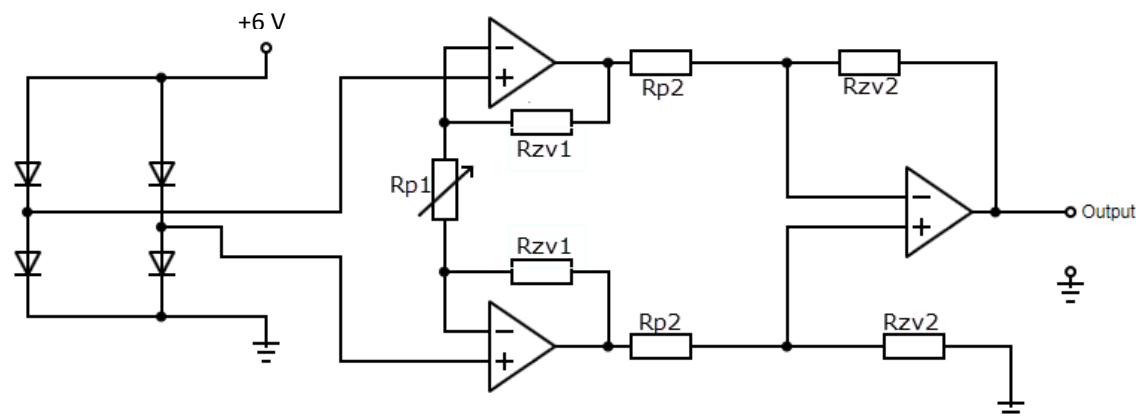
Při použití vhodných poměrů rezistorů je tak možné docílit požadovaného zesílení diferenčního signálu. Jako výhodné se zde jeví použití víceotáčkových trimrů, pomocí kterých lze měnit zesilovací poměr a kompenzovat napěťovou nesymetrii.

Pro výrobu přístrojového zesilovače byly použity součástky:

- 1) 3x operační zesilovač TL061CP
- 2) 3x víceotáčkový trimmer v hodnotách 5 kΩ, 20 kΩ a 20 kΩ
- 3) Pevné rezistory v hodnotách: 10 Ω; 470 Ω; 1 kΩ; 9,1 kΩ; 16k Ω;
- 4) Stabilizátor napětí 6 V (pro napájení senzoru): 78L06
- 5) 2x elektrolytický kondenzátor 47 μF
- 6) 6x keramický kondenzátor 100 nF

Osázená deska plošného spoje je zachycena na obrázku 20.

Celkové zjednodušené schéma zamýšleného měřiče rychlosti proudění je znázorněno na obrázku 14.



Obrázek 14 - Zjednodušené schéma konstruovaného měřiče rychlosti proudění, kdy je čidlem proudění diodový můstek.

Toto zapojení je oproti skutečnosti zjednodušené. Použité operační zesilovače obsahují celkem osm pinů, které slouží kromě vyznačených vstupů (invertující a neinvertující vstup) ke kompenzaci napěťové nesymetrie a k samotnému napájení operačního zesilovače [20, 21]. Do série s diodami je také nutné zapojit ochranné rezistory, které budou definovat maximální proud protékající diodou [22].

Pro správnou funkci přístrojového zesilovače je zapotřebí, aby byl napájen symetrickým zdrojem napětí. Po dobu vývoje měřiče rychlosti proudění byl používán vlastnoručně vyrobený zdroj symetrického napětí, který zajišťoval napětí o velikosti ± 12 V a k tomu nulové napětí.



Obrázek 15 - Vlastnoručně vyrobený zdroj symetrického napětí.

3.2.3 Realizace senzoru s diodami

Velký problém při vývoji čidla představoval způsob, jak zajistit utěsnění součástek a celého obvodu čidla vůči vodě. Samotné diody ve skleněném pouzdře by měly být pokud možno svou největší možnou plochou přímo ve vodě, ale zároveň s kontakty utěsněnými. V úvahu přicházelo několik variant. Nakonec byly použity desky plošných spojů, do kterých byly diody napevno zabudovány a v nich utěsněny.

První vyzkoušenou variantou bylo použití SMD diod. Konkrétně LL4148-MINIMELF:



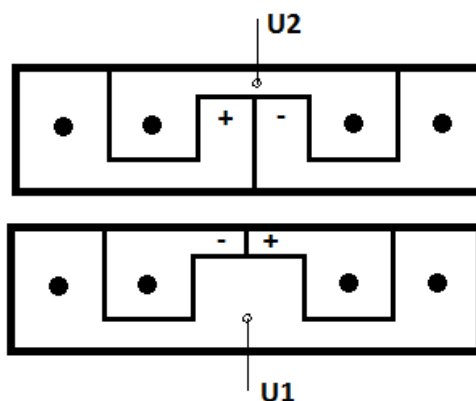
Obrázek 16 - Dioda LL4148-Minimelf. Převzato z [23].

SMD diody LL4148 byly vztyčeny mezi dvě desky plošných spojů, kam byly napájeny. Vnitřní strany desek plošných spojů tak byly vodivé. Představa o konečném provedení vypadala takto:



Obrázek 17 - Realizace senzoru měřiče rychlosti proudění s diodami. Šedá část vpravo značí bariéru, která zabraňuje proudění. Obrázky diod převzaty a upraveny z [23].

Vodivé strany desky plošných spojů pak byly provedeny následujícím způsobem:



Obrázek 18 – Vrchní a spodní deska plošných spojů senzoru hot wire flowmetru. Černé tečky znázorňují umístění diod. Pohled shora.

Na obrázku 18 je dále naznačeno, kam bylo přivedeno napájecí napětí (reprezentují znaménka plus a mínus), a dále je naznačen uzel, odkud bylo odváděno diferenční napětí – reprezentováno popisem U1 a U2. Směru zapojení diod odpovídá obrázek 17. Na obrázku není vyznačen otvor, který slouží k natečení vody do prostoru referenčních diod. Tento otvor byl vyvrtán do obou desek plošného spoje mezi poslední dvě diody kolmo na očekávaný směr měřeného proudění.

Pájení bylo prováděno z vnitřní strany senzoru. Pro pájení byla použita pájecí stanice HQ-SOLDER/30, kde bylo možné nastavit maximální teplotu pájení.

Výška diod je dle výrobce ($3,5 \pm 0,1$) mm [23]. Výsledná štěrbina mezi deskami po napájení odpovídala přibližně 4 mm. Vzhledem k obtížnosti pájení z vnitřní strany senzoru byly nakonec použity klasické diody s drátky, které byly připájeny k deskám plošných spojů z vnějšku. Tato varianta umožňovala dokonalejší kontrolu pájení a byla uskutečněna za účelem zjištění funkčnosti měřiče na vzduchu.

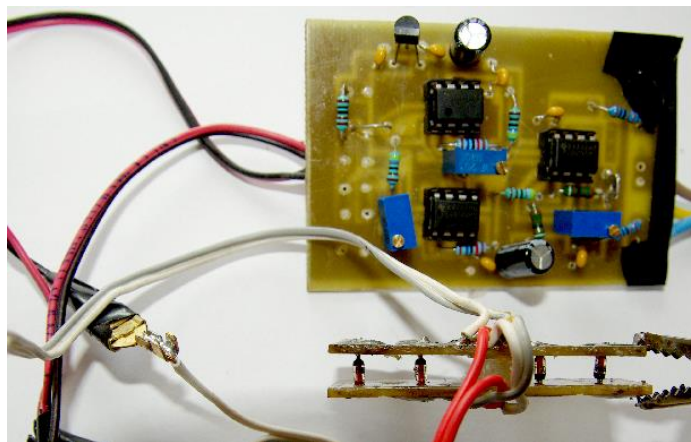
Deska plošného spoje, která byla použita pro výrobu senzoru, odpovídá stále obrázku 18. Desky jsou ale orientovány vodivou stranou zvnějšku senzoru. V deskách bylo potřeba vyvrtat úzkým 0,6 mm vrtákem otvory pro drátky diod.

Pro výrobu zdokonaleného senzoru byly použity běžné diody 1N4148.



Obrázek 19 - Dioda 1N4148. Převzato z [24].

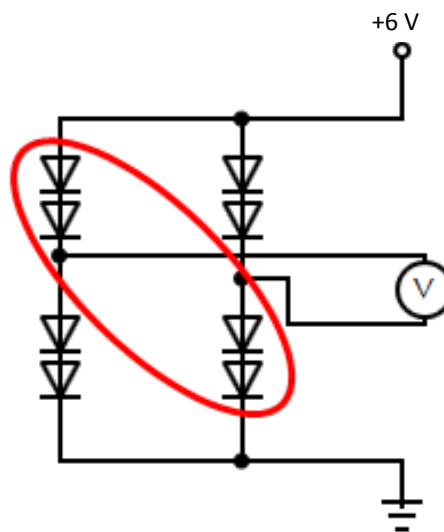
Realizovaný měřič proudění po připojení k přístrojovému zesilovači:



Obrázek 20 - Vyrobený měřič proudění připojený k přístrojovému zesilovači.

Po zakrytí referenčních diod před proudícím vzduchem bylo při fouknutí na měřicí diody dosahováno zvyšování napětí. Hodnota napětí na výstupu z přístrojového zesilovače byla přímo úměrná intenzitě foukání.

Následně bylo nutné měřič proudění zabezpečit proti vodě. Zároveň bylo třeba zvětšit štěrbinu mezi deskami tak, aby samotný senzor ovlivňoval proudění co nejmenším způsobem. Proto byl senzor upraven. Za účelem zisku vyššího diferenčního napětí byl počet diod v senzoru zdvojnásoben. Schéma zapojení:

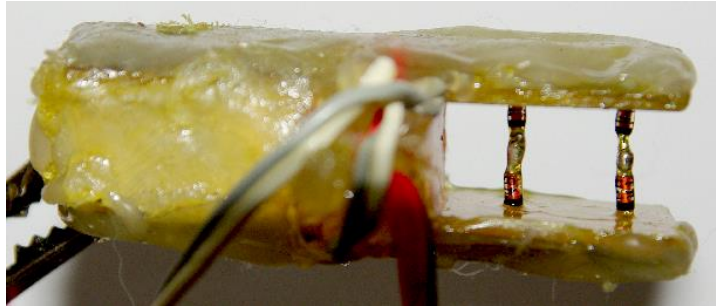


Obrázek 21 - Přepracovaný senzor měřiče proudění. Použito osm diod. Diody v červeném oválu označují diody referenční.

Zapojením patrným z obrázku 21 bylo dosaženo většího rozestupu mezi deskami plošných spojů. K sobě připájené diody byly lepidlem zabezpečeny v deskách plošných spojů a připájeny obdobným způsobem jako v předchozí variantě. K zabezpečení desky plošných spojů z vrchní strany byla použita tavná pistole. Využití tavné pistole má své výhody i nevýhody. Elektroniku dokáže bezpečně uchránit před vodou, ale zatavený senzor už lze jen velmi obtížně rozebrat. V případě chyby v zapojení je většinou nutné vyrobit senzor nový. Výhodou je, že při chladnutí je hmota tvárná, a lze ji tedy přizpůsobit okamžitým potřebám. Nevýhodou použití tavné pistole je celková nevhlednost konečného výrobku.

Samotné diody byly proti vodě zabezpečeny přelakováním lakem na nehty, a to ve třech vrstvách.

Výše uvedeným způsobem zhotovený senzor měřiče proudění je na následujícím obrázku:



Obrázek 22 - Senzor zhotovený z osmi diod.

Se senzorem vyobrazeným na obrázku 22 bylo při fouknutí dosaženo podobných výsledků jako se senzorem vyrobeným pouze ze čtyř diod.

Při zkoušce ve vodě do senzoru z osmi diod pravděpodobně vnikla voda a došlo ke zkratu. Senzor se začal chovat neočekávaným způsobem a neprojevoval žádnou závislost na velikosti rychlosti proudění. Sensory se stejným uspořádáním byly vyrobeny ještě dva, ale přese všechnu snahu se k elektronice dříve nebo později voda dostala. Lze to vysvětlit tím, že došlo k poškození krycích vrstev laku a lepidla u desek plošných spojů.

Aplikace diod jako senzorů rychlosti proudění vody se nezdařila. Nepodařilo se odizolovat diody od vodního prostředí a zabránit tak zkratu obvodu.

3.2.4 Realizace senzoru s termistorem

Termistory jsou elektrotechnické součástky, jejichž elektrický odpor je závislý na teplotě. Rozlišují se dva základní druhy termistorů PTC a NTC. Hlavní rozdíl mezi nimi je, že v případě PTC termistoru elektrický odpor při zvýšení teploty stoupá (positive), a u NTC termistoru elektrický odpor při zvýšení teploty naopak klesá (negative). Jejich hlavní využití je v čidlech teploty [26].

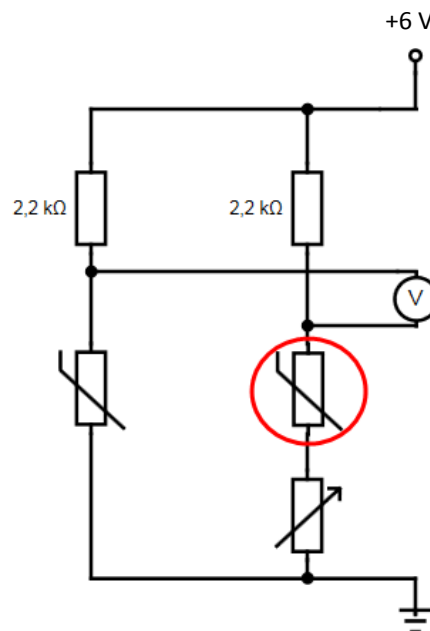
Přístrojový zesilovač použitý pro zesílení diferenčního napětí požadoval jen dílčí úpravy v zapojení. Z napájení senzoru byly odstraněny ochranné rezistory diod.

Pro výrobu byl použit termistor PTC KTY81-210. Tento typ termistoru má hodnotu odporu 2 k Ω při 25°C [26].



Obrázek 23 - PTC termistor KTY81-210. Převzato z [26].

Schéma zapojení bylo upraveno dle schématu na obrázku 24. Trimr zobrazený v témže schématu slouží k vynulování diferenčního napětí mezi termistory v případě, že jsou oba termistory umístěny mimo proudění (rychlost měřeného proudění je rovna nule). Tento víceotáčkový trimr měl hodnotu 5 k Ω a byl umístěn přímo na desce přístrojového zesilovače, aby nebyl ohrožen vodou.

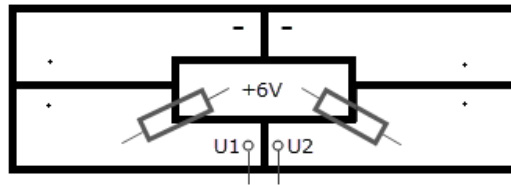


Obrázek 24 - Schéma zapojení senzoru měřiče proudění s termistory. V červeném kroužku vyznačen termistor určený do měřeného proudu vody.

Zkušebním zapojením k přístrojovému zesilovači byla ověřena funkčnost senzoru na fouknutí. Plast z tavné pistole byl použit i k samotnému utěsnění termistorů u desky plošného spoje. Díky odlišné konstrukci pouzdra termistorů od pouzdra dříve použitých diod byla pro zhotovení čidla potřeba pouze jediná deska plošného spoje.

Pro výrobu senzorů byly použity odstíněné kabely, aby se zabránilo elektromagnetickému rušení signálu z okolí.

Schéma desky plošného spoje pro výrobu senzoru měřiče rychlosti proudění s termistory je na obrázku 25.



Obrázek 25 - Schéma desky plošného spoje pro senzor s termistory. Černé tečky na obou stranách naznačují místa připojení termistorů. Šedou barvou jsou naznačeny pevné rezistory. U1 a U2 naznačují zdroj diferenčního napětí.

Princip funkce tohoto senzoru je stejný jako v případě senzoru s diodami. Jeden termistor je měřicí a druhý referenční. Referenční termistor byl izolován od proudící vody dílkem ze stavebnice Lego. Realizovaný senzor je na obrázku 26.



Obrázek 26 - Zhotovené čidlo měřiče rychlosti proudění s PTC termistory.

Během pokusů s čidlem tvořeným PTC termistory již ke zkratu ve vodě nedocházelo. Při umístění senzoru do proudící vody se začalo výstupní napětí z přístrojového zesilovače zvyšovat.

Požadovaného výstupního napětí 0 V při nulové rychlosti proudění nebylo dosaženo. Pokusy byly prováděny ve vaně s vodou obarvenou kapkou potravinářského barviva. Proudění vody tak bylo lépe pozorováno.

Během vývoje senzoru byly použity různé hodnoty rezistorů umístěných na senzoru proudění. Bylo tak dosaženo různých velikostí proudů, které termistory procházely. Pro stavbu čidla byly použity i NTC termistory. Korektní funkce senzoru však nebylo dosaženo.

Vysvětlením nefunkčnosti senzorů ve vodě by mohla být vyšší tepelná kapacita vody. Výsledná tepelná kapacita prostředí vztahovaná k hustotě je u vody asi 4000x vyšší než ve vzduchu [27].

Aplikace termistorů jako senzorů rychlosti proudění vody se nezdařila. Výstupní napětí senzoru umístěného do vody se nepodařilo ustálit. Kalibrace měřiče nebyla možná.

3.3 Měřič proudění na indukčním principu

Inspirací k výrobě senzoru byl měřič na elektromagnetickém principu, který byl popisován v kapitole 2.3.3.

Dle rovnice (14) bylo pro funkci senzoru potřeba magnetické pole o magnetické indukci B a k tomu desky elektrod. Pro získání silného magnetického pole byly použity neodymové magnety. Neodymové magnety patří mezi nejsilnější trvalé magnety dostupné na trhu.

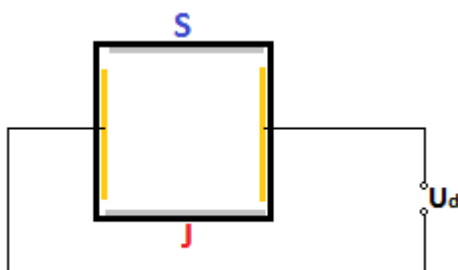
Použity byly dva neodymové magnety ve tvaru kotouče v rozměru (10 x 2) mm s přídržnou silou 11 N. Remanence použitých magnetů se dle katalogového listu pohybovala mezi (1,17 – 1,22) T [28].



Obrázek 27 - Neodymový magnet. Převzato z [28].

Vzhledem k tomu, že měřič proudění byl zamýšlen pro použití ve vodě, elektrody použité v senzoru byly vyrobeny z nerezového plechu o tloušťce 0,8 mm. Pro pájení k nerezovým elektrodám byla použita pájecí kapalina na nerez, což je roztok chloridu zinečnatého.

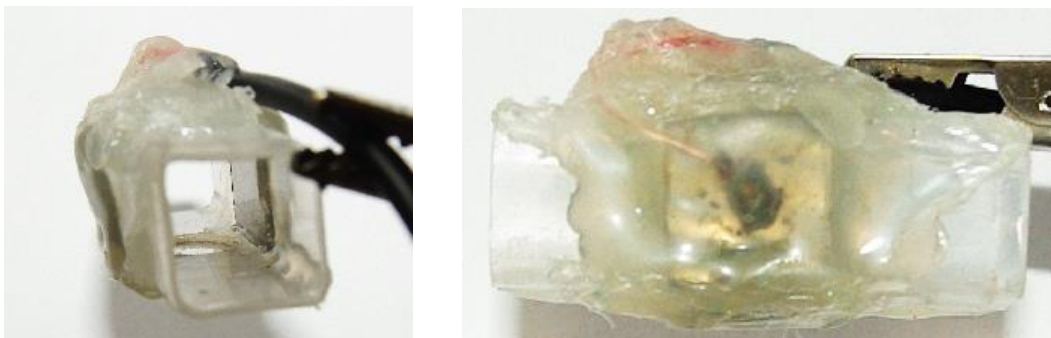
Pro nosnou kostru měřiče rychlosti proudění byl použit plastový hranol o čtvercovém průřezu a hraně cca 12 mm. Schéma zamýšleného měřiče rychlosti proudění vypadalo v průřezu dle obrázku 28.



Obrázek 28 - Průřez indukčním měřičem rychlosti proudění. S a J označují magnetické póly, žlutě jsou vyznačeny nerezové elektrody.

K propojení elektrod s přístrojovým zesilovačem, který byl použit k zesílení získaného napětí, byly použity odstíněné kabely. Bylo třeba zajistit, aby elektrody byly v kontaktu s vodou a magnety aby způsobovaly co nejsilnější magnetické pole. Magnety proto byly zabudovány přímo do stěny nosného izolantu.

Jelikož magnety k sobě musely být natočeny nesouhlasnými póly, přitahovaly se. Z toho důvodu byla práce s upevněním magnetů pomocí tavné pistole do nosné konstrukce mnohem náročnější než v případě upevnění elektrod s napájenými vodiči. Bylo dbáno na to, aby desky s magnety byly na sebe kolmé a aby desky ani magnety netvořily překážku v průtoku měřené kapaliny. Vyrobený senzor je na obrázku 29.



Obrázek 29 - Vyrobený senzor měřiče rychlosti proudění na indukčním principu.

Senzor nebyl žádným způsobem napájený. Bylo předpokládáno, že na základě rovnice (14) bude napětí vznikající na elektrodách přímo úměrné velikosti rychlosti proudění, magnetické indukci a vzdálenosti elektrod umístěných v nosné konstrukci.

Senzor ve vodě vykazoval značnou nestabilitu. Při zvýšení rychlosti proudění bylo docíleno zvýšení hodnoty napětí na elektrodách, ale při zklidnění proudění, kdy hodnota napětí měla klesat, se tak nedělo.

System se nepodařilo zkalibrovat a dosáhnout stabilní nuly. Aplikace indukčního senzoru jako měřiče rychlosti proudění se nezdařila.

3.4 Měřič proudění s rotorem

3.4.1 Vývoj měřiče proudění s rotorem

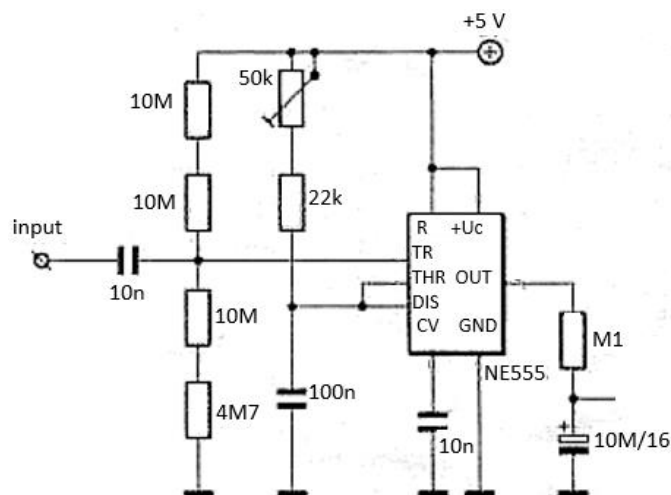
Senzor byl konstruován podobným způsobem, který je uveden v kapitole 2.3.1. K detekci otáček rotoru byl použit infračervený paprsek, který byl rotorem přerušován. Frekvence přerušování paprsku odpovídá frekvenci otáčení rotoru. Proto byl k převodu frekvence na elektrické napětí použit převodník frekvence/napětí.

Jako zdroj infračerveného záření byla použita LED dioda a jako přijímač fototranzistor. Použitá infračervená LED dioda má označení L-53F3BT. Ta má průměr 5 mm, má transparentní modrou barvu a vysílá infračervené záření o vlnové délce 940 nm [29]. Fototranzistor má označení L-53P3BT, má průměr 5 mm, transparentní modrou barvu a otevírá se při dopadu záření o vlnové délce 940 nm [30].



Obrázek 30 - Vlevo je infračervená LED dioda L53F3BT a vpravo je fototranzistor L-53P3BT. Převzato z [29, 30].

Pro výrobu převodníku frekvence/napětí byl inspirován článek Praktické elektroniky, kde byl převodník frekvence/napětí použit k sestavení otáčkoměru motocyklu [31].



Obrázek 31 - Elektrické schéma převodníku frekvence/napětí použitého pro otáčkoměr motocyklu. Převzato a upraveno z [31].

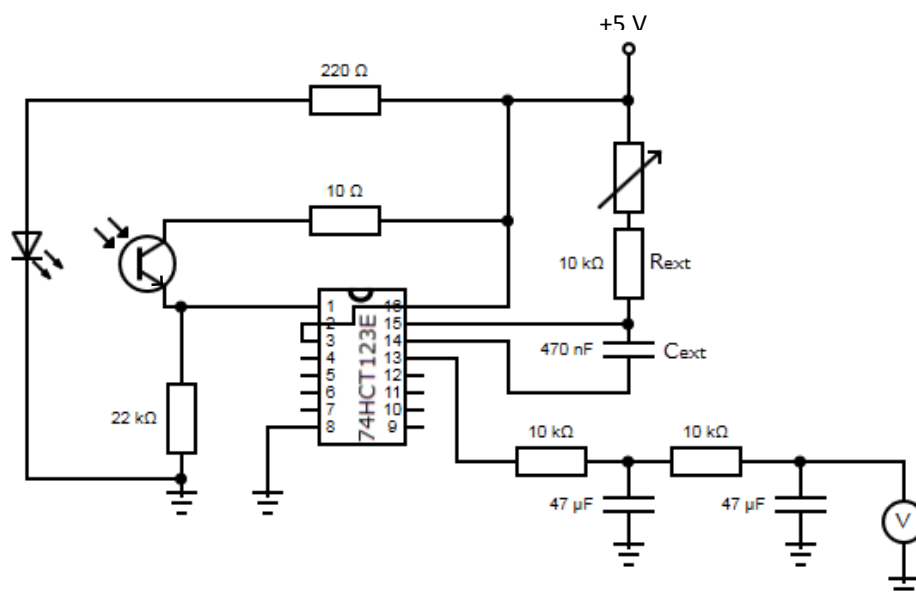
Obvod byl přizpůsoben pro monostabilní klopný obvod 74HCT123E [32].

Výstupní šířka pulzu t_w v ns je v 74HCT123E definovaná vztahem (22) dle [33].

$$t_w = K \cdot R_{ext} \cdot C_{ext}, \quad (22)$$

kde K je konstanta s hodnotou $K = 0,55$, což platí pro případ, kdy obvod je připojen ke zdroji napětí o velikosti 5 V, R_{ext} je hodnota externího rezistoru v k Ω a C_{ext} je kapacita externího kondenzátoru v pF.

Celkové schéma elektrického zapojení měřiče proudění s rotorem dle [32]:



Obrázek 32 - Elektrické schéma měřiče rychlosti proudění s rotorem.

Na obrázku 32 vlevo je zobrazen samotný snímací člen. LED dioda vysílá kontinuálně infračervený paprsek, který je přerušován otáčejícím se rotorem měřiče rychlosti proudění. Frekvence dopadajícího infračerveného záření (tedy kdy se fototranzistor otevírá) je detekována klopným obvodem 74HCT123E na pinu č. 1. Zapojením dle schématu je docíleno převodu frekvence na napětí, kde nejdůležitější roli hrají rezistor a kondenzátor, označené jako R_{ext} a C_{ext} . Tento RC člen dle rovnice (22) definuje hodnotu výstupního napětí. Víceotáčkový trimr, který je zapojený v sérii s R_{ext} , slouží ke korekci výstupního napětí na požadovanou hodnotu. Při správně nastavených hodnotách R_{ext} a C_{ext} bude na výstupu z převodníku napětí, které bude odpovídat rychlosti proudění. Kondenzátor C_{ext} byl použit svitkový, který se změnou teploty nemění svou kapacitu [33, 22].

Konstrukčně bylo nutné umístit LED diodu před snímací rotor. Takové umístění mohlo měřenou rychlost proudění negativně ovlivnit. Proto byl senzor zhotoven takovým způsobem, aby pokud možno proudění ovlivňoval co nejméně.

Jako rotor byl použit třílistý lodní šroub. Sliboval stoupání 0,53x, což je teoretický dopředný pohyb šroubu během jedné otáčky za předpokladu, že neexistuje žádné prokluzování mezi listy šroubu a vodou [34].



Obrázek 33 - Třílistý lodní šroub se závitem M4. Převzato z [35].

Po zapojení vyrobeného měřiče rychlosti proudění ke zdroji napájení se výstupní napětí převodníku ustálilo na 0 V. V případě, že bylo IR záření dopadající na fototranzistor přerušováno, výstupní napětí se zvyšovalo přímo úměrně frekvenci přerušování. Měřič rychlosti proudění byl vyzkoušen i s lodním šroubem přimontovaným k aku-šroubováku, který sliboval stabilní frekvenci otáčení. Listy otáčejícího se šroubu přerušovaly dopadající záření. Výsledky výstupního napětí byly stabilní. Při zastavení rotoru nedocházelo k přerušování dopadajícího paprsku a výstupní napětí se tak ustálilo na 0 V.

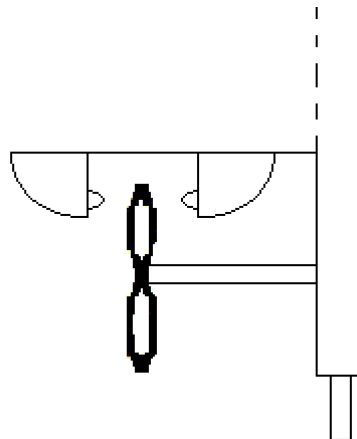
Senzor byl odzkoušen ve vodě, proti které byl zabezpečen pomocí tavné pistole. Závažný problém, který bylo nutno vyřešit, bylo tření mezi osou otáčení rotoru a základnou, kam byl rotor upevněn. Omezení tření v uložení vrtulky byla nutná podmínka k detekci i nízkých rychlostí proudění.

Použito bylo mini ložisko SMR 84 ZZ/C (4x8x3 mm) určené do RC modelu s vnitřním průměrem 4 mm. Vzhledem k tomu, že ložisko mělo být určené do vody, vybráno bylo ložisko v kombinaci materiálů nerez – keramika.

Po zabudování ložiska do pomocné nosné konstrukce se projevila vada na zakoupeném lodním šroubu. Jak se ukázalo, lodní šroub byl lehce nevyvážený a z toho důvodu docházelo k lehkému kroucení šroubu, a tím i k periodicky se opakujícímu zvyšování tření. Řešením problému bylo volné uložení vrtulky, které kroucení kompenzovalo. Pružný stahovací pásek kroucení eliminoval a vrtulka se točila s menším třením.

I když se stahovacím páskem bylo dosaženo menšího tření – lodní šroub se začal otáčet i při nižších rychlostech proudění – bylo rozhodnuto, že v rámci praktického využití měřiče proudění bude použita technologie pevného uložení rotoru.

Představa o dokončeném měřiči proudění (včetně naznačení nosné konstrukce) vypadala dle obrázku 34.



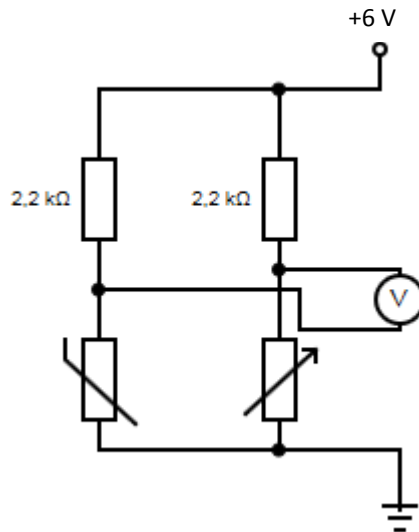
Obrázek 34 - Představa o konečné podobě měřiče rychlosti proudění.

3.4.2 Výroba mobilního měřiče proudění s rotorem

3.4.2.1 Teploměr

Před samotnou výrobou mobilního měřiče rychlosti proudění byl zkonstruován teploměr, který bude určovat teplotu v místě měření. Vzhledem k tomu, že vyrobený přístrojový zesilovač nebyl ke konečnému měřiči rychlosti proudění využit, byl použit k výrobě přesného teploměru [21, 36]. Jako čidlo byl použit PTC termistor KTY81-210 (viz kapitola 3.2.4).

Elektrické schéma teploměru (bez připojeného přístrojového zesilovače):

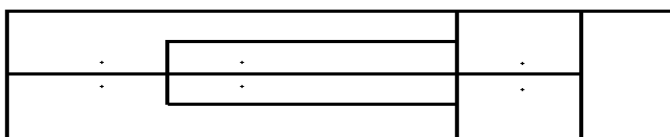


Obrázek 35 – Elektrické schéma senzoru teploměru.

Víceotáčkový trimr vyobrazený na schématu slouží k vynulování diferenčního napětí při referenční teplotě. Referenční teplota byla stanovena na 0 °C. Kromě měřicího termistoru, který bude umístěn v blízkosti měření rychlosti proudění, se podařilo všechny zbývající součástky ze schématu na obrázku 35 soustředit přímo na desku přístrojového zesilovače, představeného v kapitolách 3.2.3 a 3.2.4.

3.4.2.2 Měřič proudění

Deska plošného spoje, na kterou byla napájena LED dioda, fototranzistor a termistor, byla vyrobena dle následujícího schématu:



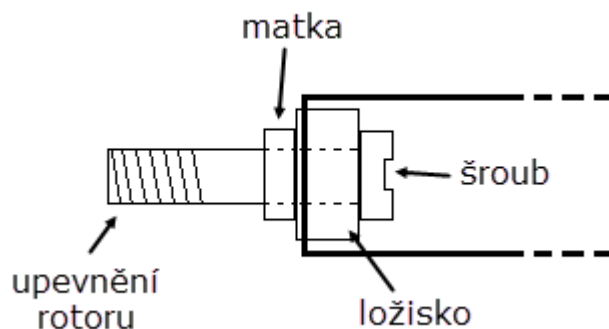
Obrázek 36 - Schéma desky plošného spoje použité k finálnímu vyhotovení měřiče rychlosti proudění. Černé tečky naznačují místa připájení součástek. Zleva: LED dioda, fototranzistor a termistor. Prostor vpravo slouží k upevnění desky k nosné konstrukci.

Čočka LED diody i fototranzistoru byla oblepena černou PVC páskou, která eliminuje rušení fototranzistoru zářením z okolí. Na fototranzistoru tak zůstala pouze úzká štěrbin, která je umístěna v ose záření LED diody. Po připájení součástek bylo možné upravit polohu LED diody i fototranzistoru tak, aby ležely v téže ose.

Optosoučástky byly zality plastem z tavné pistole. Během tvrdnutí plastu byl plast tvarován tak, aby bylo dosaženo prostorové nenáročnosti měřiče a zároveň aby svým tvarem výrazným způsobem neovlivňoval proudění.

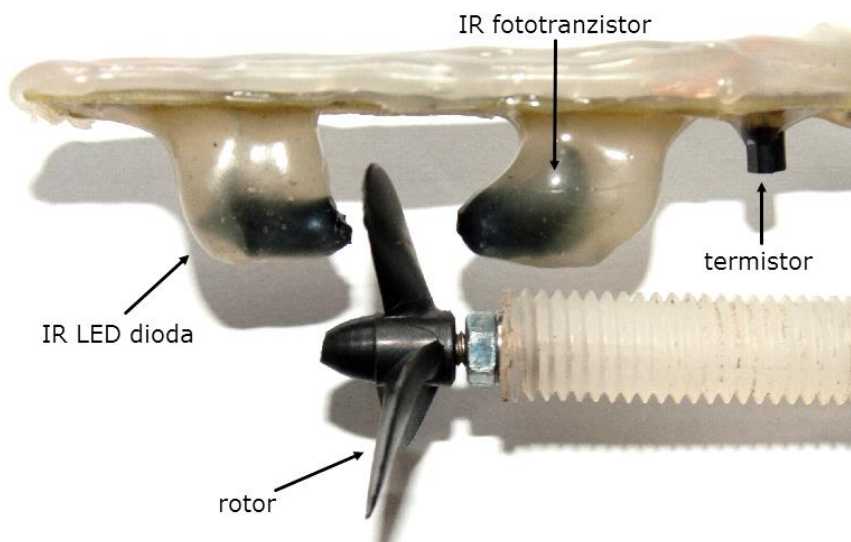
Podobným způsobem byl zabezpečen i termistor. Jako propojovací kabel mezi senzorem a převodníkem byl použit šestižilový SYKFY kabel, který je stíněný. Po úspěšné funkční zkoušce byly všechny vodivé části senzoru zality do plastu. Ke konečnému opracování byla použita horkovzdušná pistole, která plast natavila a esteticky zdokonalila.

Do plastové trubičky, která byla připevněna k nosné konstrukci, bylo vlisováno ložisko. Tímto ložiskem vedl šroub se závitem M4, který byl z druhé strany ložiska zabezpečen matkou. Šroub se tak v ložisku protáčil s velmi malým třením. Na zbytek šroubu byl pak přišroubován rotor. Celé schéma uložení rotoru je na obrázku 37.



Obrázek 37 - Schéma uložení rotoru.

Výsledek výroby senzoru měřiče rychlosti proudění a teploměru je zachycen na níže uvedené fotografii:



Obrázek 38 - Vyrobený senzor měřiče proudění a teploty.

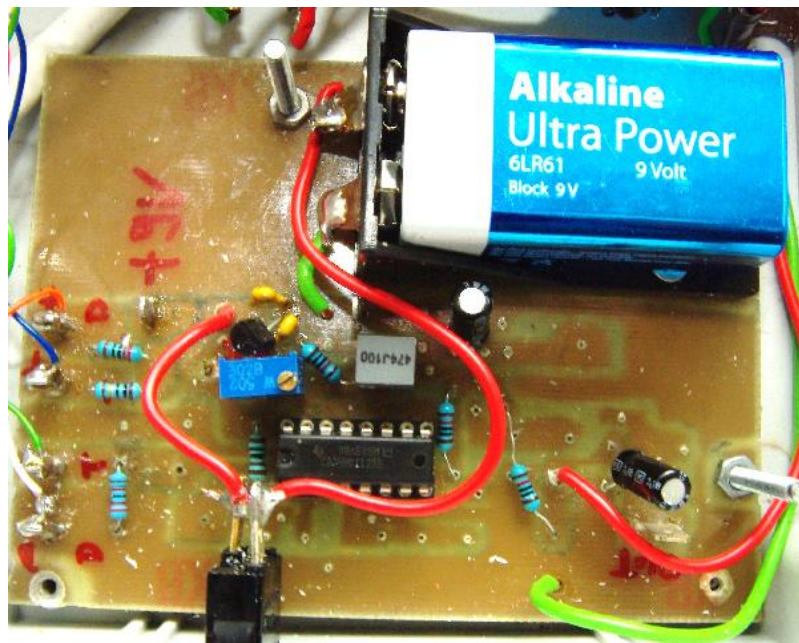
Jako nosná konstrukce byla použita dutá PEX vodovodní trubka, která má hliníkovou vložku zatavenou v plastu. Do této trubky byl vyvrtán závit, do kterého byla našroubována plastová trubička s uloženým rotorem. Díky tomuto řešení lze korigovat uložení rotoru do středu mezi optočlen. Toto řešení umožňuje i demontáž celého mechanického uložení a přístup k ložisku za účelem promazání.

Propojovací vodiče byly vedeny vnitřkem trubky, aby bylo eliminováno jejich poškození během používání. Uvnitř nosné trubky se nachází také rozříznutá PEX trubka s užším průměrem, která slouží k nastavení výšky měření rychlosti proudění. Tato trubka

je opatřena samolepícím metrem, který slouží k odečtení výšky měření ode dna. Tento hloubkoměr lze zajistit samořezným vrutem s otupenou špičkou.

Vyhodnocovací elektronika byla umístěna do plastové krabičky o rozměrech (112,5 x 111,5 x 60) mm. V této krabičce se nachází převodník frekvence/napětí, jehož výstupem je elektrické napětí odpovídající měřené rychlosti proudění (obrázek 39), a dále přístrojový zesilovač, jehož výstupem je elektrické napětí odpovídající měřené teplotě v místě senzoru. Převodník frekvence napětí je napájen jednou 9 V baterií, přístrojový zesilovač je napájen dvěma 9 V bateriemi. Pro stabilizaci napětí na 5 V pro potřeby napájení převodníku frekvence/napětí byl použit stabilizátor napětí 78L05.

Na krabičku byl umístěn vypínač pro měřič rychlosti proudění a vypínač pro teploměr. Na krabičku s elektronikou je připevněn i multimetr, který je vodivě propojen s výstupy vyhodnocovací elektroniky. Krabička je proto opatřena i přepínačem, kterým lze přepnout výstup z teploměru, nebo z měřiče rychlosti proudění. Kompletní výsledek zpracování je zachycen na následujících fotografiích:



Obrázek 39 - Zhotovený mobilní měřič proudění - elektronika.



Obrázek 40 - Boční pohledy na zhotovenou krabičku mobilního měřiče. Vlevo vypínač teploměru a přepínač výstupu k multimetru, vpravo vypínač měřiče proudění.



Obrázek 41 - Celkový pohled na kompletní výrobek.

Na obrázku 41 je zachycen kompletní výrobek včetně hloubkoměru, rotoru, krabičky s elektronikou a připojeným multimetrem. Veškeré kalibrace zařízení probíhaly s takto dokončeným měřičem rychlosti proudění a teploty.

4 Kalibrace zařízení a jeho upotřebitelnost

4.1 Kalibrace měřiče rychlosti proudění

Pro kalibraci měřiče rychlosti proudění byla použita experimentální metoda. Jako referenční měřič byl použit laboratorní datalogger LabQuest 2 od firmy Vernier® s připojenou sondou FLO-BTA – Flow Rate Sensor. Technické parametry použitého měřiče proudění dle výrobce jsou [37]:

- Rozsah: $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $4,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Citlivost: $0,0012 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Přesnost: $\pm 1 \%$ celého rozsahu ($\pm 0,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Čidlo umožňuje měřit a zaznamenávat rychlost v metrech za sekundu nebo ve stopách za sekundu.
- Čidlo lze používat v teplotním rozsahu $0 \text{ }^\circ\text{C}$ až $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Je vybaveno kabelem o délce 5 m.



Obrázek 42 - Referenční měřič rychlosti proudění a vyhodnocovací jednotka.

Převzato z [37, 38].

Pro zachování totožných podmínek pro obě zařízení byla na kalibrovaném měřiči rychlosti proudění nastavena hloubka měření tak, aby osy otáčení rotorů obou měřičů

byly ve stejné výšce ode dna. Zároveň byla upravována pozice nosné konstrukce tak, aby byla zachována totožná pozice rotoru v horizontálním směru.

Kalibrace probíhala v přírodním toku, u výpusti ze skruže, která je vedlejším odtokem rybníka. Vzhledem k faktu, že bylo nutné zachovat výšku měření, byl použit upravený plastový truhlík tak, aby tvořil zúžené koryto s vodorovným dnem. Za těchto podmínek začala kalibrace.

Kalibrace probíhala v upraveném truhlíku s usměrněným tokem, kam byl vložen referenční měřič rychlosti proudění. Výstup z referenčního měřiče se pohyboval v rozmezí $(0,053 \pm 0,006)$ m/s. Tato hodnota byla požadována na výstupu z kalibrovaného měřiče proudění.



Obrázek 43 - Kalibrace měřiče rychlosti proudění v upraveném truhlíku.

Do upraveného truhlíku byl vložen kalibrovaný měřič rychlosti proudění. Výstupní hodnota, která se na voltmetru s rozsahem 2 V ukázala, byla (38 ± 7) mV. Víceotáčkovým trimrem bylo upraveno výstupní napětí na hodnotu (53 ± 7) mV. Hodnota 53 mV se obtížně nastavovala, jelikož výstup kolísal. Měření bylo zopakováno 5x s každým měřičem. Výstupní hodnoty se výrazně neměnily.

S takto zkalibrovaným měřičem proběhlo měření v rychlejším proudu potoka. Opět byl použit upravený truhlík. Referenční měřič ukázal rychlost proudění $(0,114 \pm 0,006)$ m/s. Kalibrovaný měřič ve stejném místě ukazoval výstupní napětí (112 ± 7) mV. Byla provedena malá korekce na trimru převodníku a výstupní napětí bylo zvýšeno na hodnotu (114 ± 7) mV.

Dále bylo provedeno přeměření na původní pozici kalibrace pro ověření, zdali nedošlo k zásadnímu posunu na výstupních hodnotách. Příští měření probíhalo již při vysoké rychlosti proudění. Na toto měření musel být přepnut rozsah voltmetru na 20 V. Kalibrovaný měřič proudění ukázal napětí 0,46 V, což odpovídá rychlosti 0,46 m/s. Výstup z konstruovaného měřiče byl stabilní, patrně z důvodu, že použitý voltmetr měří v tomto rozsahu pouze na setiny voltů. Měření referenčním měřičem rychlosti proudění potvrdily rychlost vodního proudu ($0,462 \pm 0,006$) m/s.



Obrázek 44 - Hodnoty naměřené oběma měřiči po kalibraci.

4.2 Kalibrace teploměru

Jako referenční teplota byla zvolena teplota o velikosti $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aby bylo této teploty dosaženo, byl v misce smíchán led s vodou. Teplota vody v misce byla přeměřena venkovním teploměrem.

Po důkladném promíchání byl do vody s ledem umístěn měřič rychlosti proudění i s měřícím termistorem. Trimrem (obrázek 35) bylo nastaveno nulové diferenční napětí mezi větvemi měřícího obvodu.

Po opětovném promíchání vody s ledem a kontrole, že diferenční napětí odpovídá 0 V, byla provedena korekce výstupního napětí z přístrojového zesilovače. Poté, co bylo dosaženo hodnoty 0 V i na voltmetru, byl celý měřič přemístěn do mísy

s teplotou vody 40 °C. Tato teplota byla měřena dvěma lékařskými digitálními teploměry s přesností 0,1 °C

Trimrem R_{p1} (vyznačen na obrázku 14) bylo zvyšováno zesílení diferenčního signálu na takovou hodnotu, aby bylo dosaženo výstupního napětí 4 V.

Kalibrací bylo dosaženo, že při rozsahu voltmetru 20 V teplota 21,8 °C odpovídá hodnotě výstupního napětí 2,18 V.

4.3 Upotřebitelnost zařízení a jeho parametry

Realizovaný mechanický měřič rychlosti proudění splňuje téměř všechny požadavky, které byly na začátku vývoje stanoveny. Experimentálně bylo zjištěno, že vyrobený měřič proudění začíná měřit od rychlosti proudění 0,025 m/s. Tato rychlost odpovídá stavu, kdy se ponořený rotor samovolně roztočí vlivem proudění vody. To je nižší minimální měřená rychlost, než které reálně dosahoval zapůjčený referenční měřič FLO-BTA. Ten se podařilo uvést do pohybu až při rychlosti proudění 0,054 m/s.

Teoretická maximální rychlost, kterou realizovaný měřič rychlosti proudění může měřit, je necelých 5 m/s (Odpovídá napájecímu napětí 5 V). Tato hodnota ale nebyla experimentálně potvrzena.

Nevýhodou vyrobeného měřiče rychlosti proudění může být rušení čidel z okolního IR záření. Během práce s měřičem ale problémy s rušením nebyly pozorovány. Malým omezením může být měření ve velmi znečištěné vodě, kde by záření mohlo být přerušováno nečistotami.

Vyrobenný mobilní měřič rychlosti proudění obsahuje navíc přesný teploměr, který jednoduchým přepnutím výstupu voltmetru změří teplotu v místě měření rychlosti proudění. Rozsah teploměru svými parametry daleko přesahuje své určení.

Měřič navíc obsahuje i jednoduchý hloubkoměr, na kterém lze nastavit výšku měření ode dna. To značným způsobem zjednodušuje práci s měřičem, neboť měřič lze opřít o dno a docílit tak stabilní pozice.

Měřič rychlosti proudění může být použit ve škole, kde by mohl sloužit jako učební pomůcka. Dalším odvětvím, kde by měřič mohl získat uplatnění, je badatelská činnost v oblasti hydrometrie. Měřič slouží ke zjištění okamžité rychlosti proudění malých vodních toků, čehož může být využito i ve výzkumu migrace živočichů, kteří v takových vodách žijí.

Technické parametry zařízení:

- Rozsah měření rychlosti proudění: $0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $4,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (zdola omezené konstrukcí měřiče, shora omezeno napájecím napětím)
- Přesnost měřiče rychlosti (při rozsahu voltmetru 20 V): $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Rozsah teploměru: $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ až $80 \text{ }^\circ\text{C}$ (zdola omezené parametry termistoru, shora omezené napájecím napětím).
- Přesnost teploměru (při rozsahu voltmetru 20 V): $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ (odpovídá 0,01 V)
- Výška měření (ode dna): 45 mm až 650 mm
- Napájení:
 - Měřič rychlosti proudění: 1x 9V alkalická baterie
 - Teploměr: 2x alkalická 9V baterie
 - Multimetr: 1x alkalická 9V baterie

4.4 Návod k použití:

Mobilní měřič rychlosti proudění je určen pro měření ve vodě. Do styku s vodou smějí přijít pouze čidla. Krabice s elektronikou není chráněna proti vodě, proto je nutné dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci s měřičem.

Zapneme měřič rychlosti proudění přepnutím vypínače do polohy ZAP. Pokud bude požadováno i měření teploty, zapneme teploměr přepnutím vypínače do polohy ZAP.

Měřič rychlosti proudění:

1. Pootočením **!proti směru!** hodinových ručiček nastavte na multimetru měřicí rozsah 20 V, v případě nízké rychlosti proudění můžete snížit na rozsah 2 V.
2. Přepínačem zvolíte požadovaný výstup z multimetru: rychlost proudění.
3. V případě, že je nastaven rozsah 20 V, je výstupem rychlost v m/s. Při rozsahu 2 V je výstupní hodnota v mm/s.
4. Měřič proudění držte svisle, opřený o dno. Rotor měřiče nasměrujte kolmo na směr proudění.

Teploměr:

1. Pootočením **!proti směru!** hodinových ručiček nastavte na multimetru měřicí rozsah 20 V.
2. Přepínačem zvolte požadovaný výstup z multimetru: Teploměr
3. Výstup z **multimetru je třeba vynásobit 10x** pro hodnotu v °C.
4. Teploměr se může použít i pro měření teploty vzduchu v rozsahu -55 °C až 80 °C

Po skončení měření přepněte všechny vypínače do polohy VYP, respektive 0.

V případě, že již nebude možné měřičem naměřit minimální měřitelnou rychlost proudění (0,025 m/s), doporučuje se rozebrat rotor a promazat ložisko mazivem s přídavkem PTFE určeným na ložiska.

Výměna baterií je možná po demontáži čtyř vrchních rohových šroubů. V případě výměny baterie v multimetru je pak potřeba povolit i tři šrouby umístěné na něm.

5 Závěr

V úvodu práce byly představeny tyto metody a principy měření rychlosti proudění:

- a) Měřič proudění s rotorem.
- b) Pitotova trubice.
- c) Měřič proudění na elektromagnetickém principu.
- d) Ultrazvukový měřič proudění.
- e) Termoanemometry.

Tyto metody a principy byly využity pro potřeby vývoje mobilního měřiče rychlosti proudění.

Během vývoje mobilního měřiče rychlosti proudění byly zhotoveny a odzkoušeny celkem čtyři varianty senzorů rychlosti proudění:

- i) Princip termoanemometrů:
 - (a) Senzor s diodami.
 - (b) Senzor s termistory.
- ii) Senzor na elektromagnetickém principu.
- iii) Mechanický měřič s rotorem a IR senzorem.

Finálně realizovaný mechanický měřič rychlosti proudění byl kalibrován referenčním měřičem firmy Vernier[®] se senzorem FLO-BTA připojeným k dataloggeru LabQuest 2.

Oproti referenčnímu měřiči realizovaný měřič rychlosti proudění dosahuje nižší minimální měřitelné rychlosti, a to o 0,029 m/s (téměř 3 cm/s).

Navíc realizovaný měřič rychlosti proudění obsahuje přesný teploměr, který měří teplotu v místě měření rychlosti proudění.

Teploměr dosahuje těchto parametrů:

- Minimální měřitelná teplota: -55 °C (omezeno konstrukcí termistoru)
- Maximální měřitelná teplota: +80 °C (omezeno napájecím napětím)
- Přesnost teploměru (při rozsahu voltmetru 20 V): 0,1 °C (odpovídá 0,01 V)

Realizovaný měřič rychlosti proudění obsahuje hloubkoměr, který umožňuje nastavení přesné výšky měření ode dna.

Vyrobený měřič rychlosti proudění dosahuje těchto parametrů:

- Minimální měřitelná rychlost proudění: 0,025 m/s (odpovídá 2,5 cm/s)
- Maximální měřitelná rychlost proudění: 4,5 m/s (omezeno napájecím napětím)
- Přesnost měřiče rychlosti proudění (při rozsahu voltmetru 20 V): 0,01 m·s⁻¹
- Minimální výška měření ode dna: 45 mm
- Maximální výška měření ode dna: 650 mm

V závěru práce bylo provedeno měření a stanovení dosažených parametrů zařízení. Práce obsahuje krátký návod k obsluze vyrobeného měřiče. Text práce může sloužit jako literatura k výuce principů měřičů rychlosti proudění.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] Circuit Diagram 2.1, Dostupný z: <http://www.circuit-diagram.org/downloads>
- [2] http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html#_Měření_rychlosti_proudění, 6. 8. 2014.
- [3] ĎAĎO, S., BEJČEK, L., PLATIL, A. Měření průtoku a výšky hladiny. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005.
- [4] KEMEL, M. Klimatologie, meteorologie, hydrologie. Praha: ČVUT, 1996.
- [5] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Stream_Flow_leminar_and_turbulent.jpg, 2. 8. 2014.
- [6] http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Reynoldsovo_%C4%8D%C3%ADslo&oldid=11983018, 3. 08. 2014.
- [7] ŠEDIVÝ, V. Převodníky základních fyzikálních veličin, COP Sezimovo Ústí, Verze 3.1, 2005, Dostupné z: <http://ing.vaclav.sedivy.sweb.cz/vyuka/skripta/automatizace/prevodniky.pdf>.
- [8] <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm>, 8. 8. 2014.
- [9] ĎAĎO, S., KREIDL M. Měřicí převodníky fyzikálních veličin. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1980.
- [10] <http://www2.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/flowmetering/types-of-steam-flowmeter.asp>, 4. 9. 2014.
- [11] HALLIDAY, D., RESNICK R., WALKER J. Fyzika. 2. přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2013
- [12] http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Rovnice_kontinuity&oldid=11983014, 13. 09. 2015.
- [13] https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Pitotova_trubice&oldid=11981258, 4. 09. 2014.

- [14] <http://www.flowcontrolnetwork.com/articles/magmeter-basics>, 2. 2. 2015.
- [15] <http://www.indiamart.com/brinstrumentation/electromagnetic-flow-meter.html>, 2. 2. 2015.
- [16] <http://www.tutorhelpdesk.com/homeworkhelp/Fluid-Mechanics-/Hot-Wire-Anemometer-Assignment-Help.html>, 6. 2. 2015.
- [17] AUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku. Praha: FCC public, 2003, číslo 12, strana 65.
- [18] <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Anemometer&oldid=650154016>, 6. 03. 2015.
- [19] WILIAMS, M. and collective. 1990 Linear Applications Handbook Volume I: A Guide to Linear Circuit Design, LINEAR TECHNOLOGY, Milpitas: 1989.
- [20] ADÁMEK, P. Obvody a části měřicích přístrojů. 1. vyd. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, 2010.
- [21] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektronice. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1996.
- [22] VOBECKÝ, J., ZÁHLAVA, V. Elektronika - Součástky a obvody, principy a příklady. Praha: GRADA, 2005.
- [23] <http://www.gme.cz/dioda-ll4148-minimelf-p917-001>, 21. 3. 2015.
- [24] <http://ecx.images-amazon.com/images/I/21eavExRD9L.jpg>, 21. 3. 2015.
- [25] <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Termistor&oldid=10531064>, 22. 04. 2015.
- [26] <http://www.gme.cz/termistor-ptc-kty81-210-p530-019>, 22. 04. 2015.
- [27] MIKULČÁK, J. Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2007.
- [28] <http://www.magnety.eu/neodym-disk-anizotrop/>, 01. 05. 2015.

- [29] <http://www.ges.cz/cz/l-53f3bt-GES05100185.html>, 15. 5. 2015.
- [30] <http://www.ges.cz/cz/l-53p3bt-GES05100355.html>, 15. 5. 2015.
- [31] Praktická elektronika C: stavebnice a konstrukce. Praha, sešit: 6, strana 12, 1998.
- [32] Amatérské rádio: časopis pro radiotechniku a amatérské vysílání. Praha: Naše vojsko, ročník 27, číslo 5, strana 190, 1978.
- [33] Data sheet 74HCT123, dostupný z <http://www.gme.cz/74hc123-dip16-texas-instruments-p425-029>, 15. 5. 2015.
- [34] <http://www.vrtule.org/prilohy/Základní%20vysvětlivky%20vrtulí.pdf>, 20. 5. 2015.
- [35] <http://www.pkmodelar.cz/prislusenstvi-lode-lodni-srouby-triliste/lodni-sroub-3-listy-m4-40-mm-pravy-2308-40>, 20. 5. 2015.
- [36] RIPKA, P., PLATIL, A. Senzory a převodníky. Praha: Vyd. ČVUT, 2006.
- [37] <http://www.vernier.cz/produkty/podrobne-informace/kod/flo-bta/>, 15. 6. 2015
- [38] <http://www.vernier.cz/produkty/podrobne-informace/kod/LABQ2>, 15. 6. 2015