

# Elektrochemické senzory pro kapaliny a plyny

Electro-chemical sensors for liquids and gasses

Petr Halamka

---

Bakalářská práce  
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr HALAMKA**  
Osobní číslo: **A06244**  
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**

Téma práce: **Elektrochemické senzory pro kapaliny a plyny**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte literární rešerši k danému tématu.
2. Zpracujte přehled možností měření parametrů roztoků a koncentrací směsí plynů pomocí moderních senzorů.
3. Zpracujte komplexní souhrn a třídění podle fyzikálně chemických principů.
4. V praktické části ověřte nový způsob měření vodivosti kapalin a parametrů pH.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **ĎAĎO, S.-KREIDL, M.:** Senzory a měřicí obvody. Praha: ČVUT, 1996.
2. **Tumanski, S.** Principles of electrical measurement. Taylor & Francis, Boca Raton, s. 472, ISBN 0-7503-1038-3.
3. **CHUDÝ, V. a kol.** Meranie technických veličin. Bratislava: STU, 1999. ISBN 80-227-1275-2.
4. **HRUŠKA, F.** Technické prostředky informatiky a automatizace. Učební texty. 1.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, duben 2007, s.193. ISBN 978-80-7318-535-0.
5. **HRUŠKA, F.** Senzory pro systémy informatiky a automatizace. Učební texty. 1.vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, prosinec 2007, s.177. ISBN 978-80-7318-630-2.

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. František Hruška, Ph.D.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

**5. března 2010**

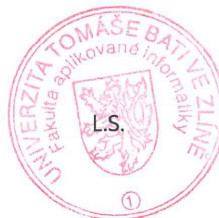
Termín odevzdání bakalářské práce:

**1. června 2010**

Ve Zlíně dne 5. března 2010



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá problematikou senzorů. Jejich významem a určením v neustále se rozvíjejících oblastech průmyslu, zdravotnictví a domácností. V práci se klade důraz především na principy činnosti senzorů a jejich širokých možností využití v praxi.

První polovina teoretické části se věnuje využitím senzorů v kapalinách. Sensory zde byly rozděleny podle měřené veličiny.

Druhá polovina teoretické části se věnuje senzorům, vhodných pro měření plynných směsí.

V praktické části měříme vlastnosti vody pocházející z různých zdrojů jako prameny, studánky, zásobárny pitné vody a nápoje s velkým obsahem cukru

Klíčová slova: Elektrochemické senzory, měření.

## ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the sensors issue, mainly their importance and determination in the constantly developing industry, health service and household areas. Principles of sensors activity and their wide range of practical usage possibilities are of the primary interest in the thesis.

The first part of the theoretical part is devoted to the sensor usage in terms of liquids. The sensors have been distinguished according to the measured quantity.

The second part concerns sensors suitable for measuring the gaseous fusion.

The practical part is aimed at measuring qualities of water occurring in forms of springs of water, wells, drinking water source and drinks containing a great deal of sugar.

Keywords: Electro-chemical sensors, measuring

Poděkování:

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Františku Hruškovi, Ph.D., za odborné vedení, připomínky a čas věnovaný mé práci. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za jejich podporu při studiu.

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- § že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- § že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 VÝZNAM SENZORŮ</b> .....	<b>11</b>
1.1 VÝZNAM A URČENÍ SENZORŮ .....	11
1.2 PRINCIPY ČINNOSTI SENZORŮ .....	13
1.3 BEZPEČNOSTNÍ APLIKACE SENZORŮ .....	14
1.4 POŽADAVKY NA SENZORY .....	14
1.5 TECHNICKÉ PARAMETRY SENZORŮ .....	15
<b>2 ROZDĚLENÍ SENZORŮ PODLE MĚŘENÉ VELIČINY</b> .....	<b>16</b>
2.1 MĚŘENÍ ELEKTROLYTICKÉ VODIVOSTI.....	16
2.1.1 Základní vztahy a rovnice pro měření elektrolytické vodivosti .....	16
2.1.2 Měřicí sondy .....	18
2.1.3 Základní vztahy pro bezelektrodové vodivostní měření.....	21
2.1.4 Aplikační možnosti vodivostních senzorů .....	22
2.1.5 Vybrané senzory pro měření vodivosti vody .....	22
2.1.5.1 Dvouelektrodový konduktometr .....	22
2.1.5.2 Čtyřelektrodový senzor .....	23
2.2 MĚŘENÍ PH .....	24
2.2.1 Vybrané senzory pro měření pH .....	30
2.3 MĚŘENÍ ROZPUŠTĚNÉHO KYSLÍKU VE VODĚ.....	31
2.3.1 Elektrochemická metoda měření kyslíku rozpuštěného ve vodě .....	33
2.3.1.1 Vybraný senzor pro měření koncentrace kyslíku ve vodě ampérometrickou metodou.....	34
2.3.2 Luminiscenční metoda měření kyslíku rozpuštěného ve vodě.....	35
2.3.2.1 Vybraný senzor pro měření koncentrace kyslíku ve vodě luminiscenční metodou .....	36
2.3.3 Fluorescenční metoda měření kyslíku .....	37
2.3.3.1 Vybraný senzor pro měření koncentrace kyslíku ve vodě fluorescenční metodou .....	38
2.4 MĚŘENÍ INDEXU LOMU POMOCÍ REFRAKTOMETRU.....	39
<b>3 VHODNÉ SENZORY PRO MĚŘENÍ PLYNNÝCH SMĚSÍ</b> .....	<b>41</b>
3.1 TEPelně-VODIVOSTNÍ SENZORY .....	41
3.2 KATALYTICKÉ SENZORY .....	43
3.3 POLOVODIČOVÉ SENZORY .....	44
3.4 ELEKTROCHEMICKÉ SENZORY.....	45
3.4.1 Elektrochemické ampérometrické senzory.....	45
3.4.2 Elektrochemické potenciometrické senzory .....	46

3.5	INFRAČERVENÉ ANALYZÁTORY .....	47
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>51</b>
4.1	POPIS SOUSTAVY PRO MĚŘENÍ ELEKTROLYTICKÉ VODIVOSTI, PH A KONCENTRACI ROZPUŠTĚNÉHO KYSLÍKU .....	51
4.1.1	Popis multimetru ALMEMO 2590-4S.....	52
4.2	MĚŘENÍ ELEKTROLYTICKÉ VODIVOSTI, PH A MNOŽSTVÍ ROZPUŠTĚNÉHO KYSLÍKU .....	54
4.2.1	Prameny.....	54
4.2.2	Studánky.....	55
4.2.3	Zdroje pitné vody.....	56
4.2.4	Nápoje.....	57
4.2.5	Destilovaná voda a voda z potoka.....	58
4.3	POPIS OPTICKÉHO REFRAKTOMETRU PRO MĚŘENÍ OBSAHU CUKRU. ....	59
4.4	NAMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY .....	60
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>61</b>
	<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>72</b>



## ÚVOD

Neustálou snahou člověka je poznání různých přírodních, fyzikálních, chemických a dalších zákonitostí. Na základě získaných výsledků dochází ke zpřesňování a zkvalitňování výrobních technologií. Nejprudší vývoj probíhá za několik posledních desetiletí na poli elektroniky, která dnes ovlivňuje všechny dalších vědních obory a pomáhá člověku svými principy, technologiemi a aplikacemi k dalšímu poznávání okolního světa. Ke zjišťování informací o stavu okolního světa byly stanoveny člověkem různé fyzikální a chemické veličiny a jednotky (geometrických, mechanických, tepelných, chemických, biologických, pro měření elektrostatických a magnetických polí, intenzit záření, atd.). Významné postavení při jejich získávání a dalším zpracování má sensorová technika.

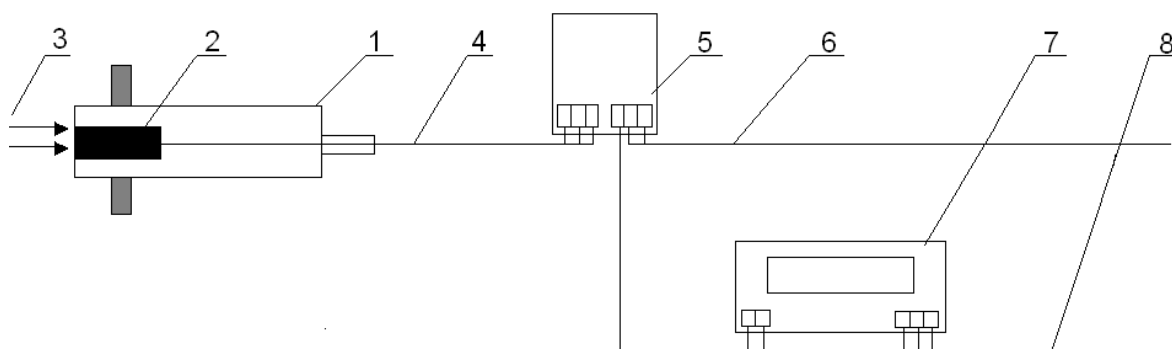
Když vyhledáme slovo sensor v naučném slovníku, najdeme často stručné vysvětlení: „zařízení k přeměně fyzikální veličiny v elektrický signál, snímač, čidlo“ nebo výstižnější vysvětlení: „snímač popudů, zařízení jímž se libovolná fyzikální veličina snímá a transformuje na veličinu jinou, snáze měřitelnou (obvykle elektrickou)“. Obecně je sensor definován jako zařízení reagující na podmět, stav prostředí (měřenou veličinu) a převádějící jej na výslednou odezvu nebo informaci (výstupní veličinu). Pojem sensor je v obecné rovině ekvivalentní pojmu snímač, převodník nebo detektor. V technické praxi je pod pojmem sensor chápáno zařízení, které snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a dle určitého definovaného principu ji transformuje na měřicí veličinu. Stav sledované veličiny snímá citlivá část senzoru občas označovaná jako čidlo a zpracovává vyhodnocovací obvod senzoru. Výstupní informací z vyhodnocovacího obvodu senzoru je kvantitativní, obvykle elektrický signál, který lze zpracovat dalšími řídicími obvody.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 VÝZNAM SENZORŮ

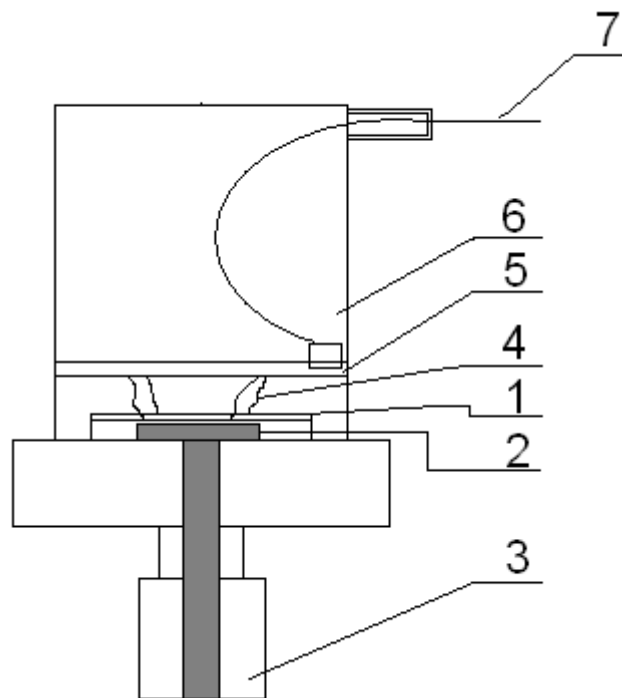
### 1.1 Význam a určení senzorů

System informatiky a automatizace se neustále rozvíjí v průmyslu, ve službách, v zdravotnictví i v domácnosti. Tyto systémy mají své funkce založené na kvalitních vstupních informacích, na kvalitním podsystemu měření. Měřicí okruh v obecném pohledu tvoří snímač – převodník – případně vyhodnocovací jednotka. Schéma na Obr. 1. Základním prvkem snímače (1) je senzor(2), kde se uskutečňuje indikace nebo převod vnějšího fyzikálního podnětu (3) na měronosný signál (4). Senzor tvoří vlastně primární rozhraní mezi vnějším podnětem sledovaného objektu a obvodu dalšího zpracování informace. Další částí snímače je mechanická případně elektronická konstrukce. Převodník (5) zpracuje primární signál senzoru na unifikovaný signál (6) měřené veličiny. V případech dalšího zpracování signálů měřené veličiny, např. vyhodnocení množství integrací, se používá vyhodnocovací jednotka (7) s výstupem(8).



Obr. 1 Schéma měřicího řetězce

Senzor je významná část řetězce. Je to element, který je ovlivňován měřenou veličinou, která generuje v senzoru měřitelnou změnu mechanickou, elektrickou, optickou nebo chemickou. Snímač dále obsahuje mechanické uchycení senzoru, tvoří kostru snímače, elektrické a elektronické prvky. Příklad pozice senzoru ve snímači je na Obr. 2.



*Obr. 2 Umístění senzoru ve snímači tlaku( 1-senzor,2 měřící komora,3-šroubení,4- propojení senzoru s elektronikou, 5- elektronika převodníku,6 – kryt snímače, 7 – vývod kabelu)*

Obdobnou funkci, postavení a principy zastávají senzory u zařízení pro získávání dat a údajů v systémech informatiky.

Měřící obvod nebo sestava pro snímání je obdoba čidel nebo receptorů u živých tvorů na Zemi, kteří mají jako snímače oči, uši, nos atd. a jejich buňky jako senzory jsou citlivé na světlo, zvuk, vůni, a vyhodnocovací jednotkou je mozek.

## 1.2 Principy činnosti senzorů

Senzory pracují podle různých mechanických, fyzikálních nebo fyzikálně chemických principů. Pochopení prostředků senzorů znamená získat interdisciplinární znalosti s fyziky, elektroniky, chemie, mechaniky. Mezi základní principy používané u senzorů lze zařadit:

- mechanické efekty
- hydraulické účinky proudění tekutin
- elektrický odpor
- elektrické pole, náboj a kapacitance
- piezoelektrický efekt
- pyrometrický efekt
- indukce a magnetismus
- Hallův efekt
- Seebeckův a Peltierův efekt
- přenos elektromagnetického záření
- optické vlastnosti materiálů
- radioaktivní záření
- polovodičový efekt
- fyzikálně chemické reakce

Názorný přehled fyzikálních principů, typů senzorů a jejich aplikace je uveden v příloze P I, jako Tab. 11.

### 1.3 Bezpečnostní aplikace senzorů

- Požární ochrana
  - v budovách
  - – v otevřených prostorech
  - – v dopravních prostředcích a tunelech
- Bezpečnost obyvatelstva
  - – Bezpečnost konstrukcí budov mostů a jiných objektů
  - – Systémy včasného varování proti přírodním katastrofám
  - – Protiteroristická opatření
  - – Detekce toxických látek a výbušnin ve vzduchu a ve vodě
  - – Detekce výbušnin a min
  - – Pracovní bezpečnost
  - – Ochrana hranic a vstupní systémy
- Vojenské systémy
  - – Systémy rozpoznávání osob a vozidel (radar nebo IR)
  - – Biometrické senzory
  - – Detekce vetřelců
  - – Minohledačky a detekce nevybuchlé munice (UXO -
- Ochrana zdraví obyvatelstva
  - – Monitory životních funkcí
  - – Diagnostika

### 1.4 Požadavky na senzory

- spolehlivost
- citlivost (vysoká pravděpodobnost detekce)
- selektivita (detekce konkrétního podnětu)
- odolnost proti přetížení
- odolnost proti úmyslnému poškození

- schopnost adaptace (např. Vzhledem k proměnnému pozadí užitečného signálu)
- funkce autotestu
- odolnost proti vlivům prostředí
- cena (není důležitá pro vojenské aplikace ale je kritická pro domácnosti a běžné spotřebitele)

### 1.5 Technické parametry senzorů

Statické parametry	Dynamické parametry
citlivost	parametry časové odezvy
práh citlivosti	časová konstanta
dynamický rozsah	šíře frekvenčního pásma
reproduktovatelnost	frekvenční rozsah
rozšiřitelnost	rychlost číslicového převodu
aditivní a multiplikační chyby	parametry šumu
linearita	
parametry výstupu	

Tab. 1 Technické parametry senzorů

## 2 ROZDĚLENÍ SENZORŮ PODLE MĚŘENÉ VELIČINY

### 2.1 Měření elektrolytické vodivosti

Měření elektrolytické vodivosti, nazývaná také konduktometrie, je analytická metoda, která využívá ke zjišťování koncentrací (ale někdy i k identifikaci látek) elektrickou vodivost roztoků.

Odpor  $R$  je přímo úměrný délce vodiče Elektrická vodivost  $G$  je obecně převrácenou hodnotou odporu  $R$  a její jednotkou je Siemens (S). Abychom mohli naměřené hodnoty navzájem lépe porovnávat, vztahujeme vodivost k jednotkovým rozměrům měřeného vzorku a nazýváme ji měrnou elektrickou vodivostí (konduktivitou)  $g$ , obvykle vyjádřenou v jednotkách S/cm, mS/cm nebo mS/cm. Elektrolytická vodivost, neboli elektrická vodivost roztoku, je závislá na koncentraci iontů rozpuštěných látek v roztoku [2]. Měří se zpravidla dvěma elektrodami ponořenými do roztoku a je nepřímo úměrná vzdálenosti elektrod  $L$  a přímo úměrná jejich ploše a měrné elektrické vodivosti  $g$  podle vztahu  $G = \gamma A/L$ . Čím větší je vodivost, tím větší proud mezi elektrodami protéká. Ze změřené hodnoty  $G$  lze stanovit měrnou elektrickou vodivost  $\gamma$ , která je funkcí aktivity a koncentrace rozpuštěných složek, teploty a dielektrického stupně. Pro malé koncentrace rozpuštěných látek je elektrická vodivost u většiny roztoků lineárně závislá na koncentraci.

Při průmyslovém měření elektrické vodivosti  $g$  je třeba počítat s hodnotami v rozsahu osmi dekadických řádů od ultračisté vody s hodnotou  $g$  přibližně 0,04  $\mu\text{S/cm}$  až po silně koncentrované chemické roztoky hodnotou přes 2 500 mS/cm. Pro měření elektrické vodivosti v tak širokém rozmezí, navíc roztoků s různým stupněm znečištění a chemické agresivity, se používají dva typy snímačů vodivosti, neboli měřicích sond, které pracují na kontaktním nebo induktivním principu.

#### 2.1.1 Základní vztahy a rovnice pro měření elektrolytické vodivosti

(vzdálenosti elektrod v elektrolytu) a nepřímo úměrný plošnému kolmému průřezu vodiče (v případě elektrolytu plošné velikosti elektrod):

$$R = r \cdot l / S \quad (1)$$



kde  $R$  ... odpor ( $\Omega$  - "omega", Ohm)

$r$  ... měrný odpor ("ró",  $\Omega \cdot \text{cm}$ )

$l$  ... délka vodiče-vzdálenost elektrod (cm)

$S$  ... průřez vodiče - plošná velikost elektrod ( $\text{cm}^2$ )

Protože použitá konduktometrická nádobka má pevné rozměry, je poměr  $l/S$  pro měření v ní prováděná konstantní a nejnáze jej lze zjistit měřením odporu látky (např. destilované vody) a použitím tabelovaného měrného odporu (vody).

Vodivost  $G$  je převrácená hodnota odporu

$$G = 1/R \text{ (Siemens neboli } 1/\Omega \text{ )} \quad (2)$$

Převrátíme-li celý vztah (2), dostaneme

$$G = 1/R = (1/r) \cdot (S/l) = k \cdot C \quad (3)$$

kde  $k$  .... měrná vodivost ("kapa",  $S/\text{cm}$ )

$$C = S/l \quad (4)$$

konstanta konduktometrické nádoby ( $\text{cm}^2/\text{cm} = \text{cm}$ )

přičemž se ještě setkáme s pojmem odporová kapacita konduktometrické nádoby.

Pokud pracujeme s tabulkovými hodnotami, mohou místo "cm" používat odpovídající veličiny důsledně v SI, tedy v "m", což musíme při výpočtech vzít v úvahu !

Měrná vodivost vodných roztoků je součtem měrné vodivosti destilované vody a měrné vodivosti rozpuštěné látky.

$$k(\text{roztoku}) = k(\text{H}_2\text{O}) + k(\text{rozpuštěná látka}) \quad (5)$$

Měrná vodivost vztahovaná na jednotkovou molovou koncentraci se nazývá molová vodivost  $L$  (v jednotkách  $\text{S}\cdot\text{cm}^2/\text{mol}$ )

Má význam například pro výpočty koncentrace iontů ve vodném roztoku, protože platí vztah:

$$k(\text{rozpuštěná látka}) = c(\text{kation})\cdot L(\text{kation})/1000 + c(\text{anion})\cdot L(\text{anion})/1000 \quad (6)$$

nebo v případě, že koncentrace aniontů a kationtů jsou stejné ( $L = \text{"lamda"}$ )

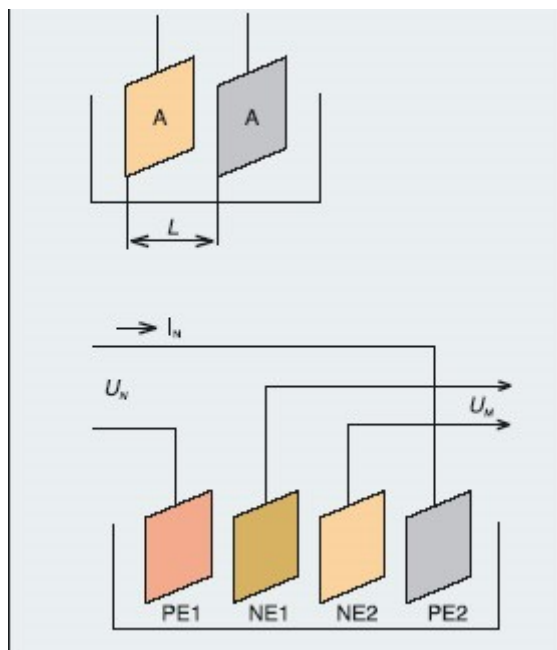
$$k(\text{rozpuštěná látka}) = c \cdot (L(\text{kation}) + L(\text{anion}))/1000$$

kde  $c$  ... koncentrace ( $\text{mol/l}$ )

Molové vodivosti běžných iontů lze nalézt v tabulkách (případně v zadání příkladů)

### 2.1.2 Měřicí sondy

Kontaktní měřicí sondy mají dvě nebo čtyři elektrody zasahující přímo do měřeného roztoku (obr. 3). Protože jsou elektrody často smáčeny agresivním roztokem, musí být vyrobeny z materiálu vysoce odolného vůči korozi. Důležitou charakteristikou měřicí sondy je tzv. elektrická odporová konstanta měřicí cely  $K$ , daná poměrem vzdálenosti elektrod a jejich smáčené plochy, která definuje objem „cely“, ve kterém se vodivost média měří. Konstanta  $K$  je určena konstrukcí sondy a prakticky se pohybuje od hodnoty 0,01 do 10, výjimečně i do  $100 \text{ cm}^{-1}$  a pro konkrétní aplikaci se volí podle očekávaného rozsahu měrné vodivosti (tab. 3). K měření vodivosti se používá pro potlačení vlivu polarizace střídavý proud o kmitočtu 50 až 5 000 Hz s malou amplitudou, aby nedocházelo k elektrolyze roztoku.

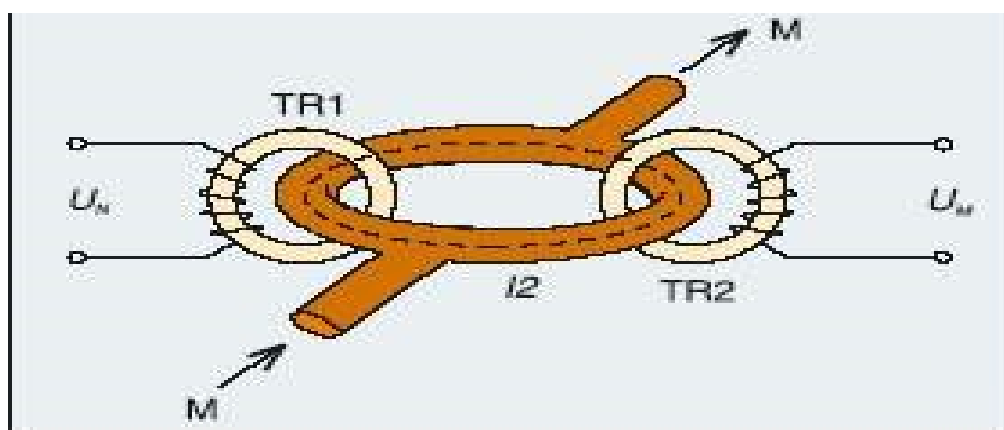


Obr. 3 Kontaktní sonda pro měření elektrolytické vodivosti s deskovými elektrodami: a) dvouelektrodová, b) čtyřelektrodová; PE1, PE2 – proudové elektrody, NE1, NE2 – měřicí napě\_ové elektrody, UN – napájecí napětí, IN – proud protékající roztokem, UM – napětí úměrné vodivosti

Dvouelektrodové měřicí sondy s deskovými, soustřednými nebo kolíkovými elektrodami (obr. 3) se používají pro měření elektrické vodivosti čisté vody nebo silně zředěných vodných roztoků s měrnou vodivostí od 0,04  $\mu\text{S}/\text{cm}$  do 25  $\text{mS}/\text{cm}$ . Při vodivostech nad 5  $\text{mS}/\text{cm}$  však dochází u dvouelektrodových soustav často k polarizačním jevům a tím i k možným chybám měření. Pro měření roztoků se středně velkou měrnou vodivostí asi od 0,01  $\text{mS}/\text{cm}$  do 500  $\text{mS}/\text{cm}$  se proto používají čtyřelektrodové měřicí sondy (obr. 3). Zde prochází napájecí proud  $I_N$  roztokem přes dvě proudové elektrody a potenciálový úbytek na roztoku se snímá dvěma měřicími napěťovými elektrodami. Napětí na měřicích elektrodách  $U_M$ , úměrné vodivosti, se vyhodnocuje obvodem s vysokou vstupní impedancí, aby byl minimalizován procházející proud a tím i polarizace měřicích elektrod. Polarizace, která vzniká na proudových elektrodách, výsledek měření neovlivňuje. Společným nedostatkem kontaktních měřicích sond

je možnost znečištění elektrod vyloučenými či usazenými látkami z roztoku a nutnost přizpůsobení snímače vodivosti pro daný měřený roztok.

Uvedené nedostatky nemají induktivní měřicí sondy, které jsou bezelektrodové a jejich princip je patrný z obr. 4. Do trubice z elektricky nevodivého materiálu je přivedena měřená vodivá kapalina tvořící uzavřený proudový okruh. Trubice je provlečena jádrem dvou toroidních transformátorů TR1 a TR2, takže vodivá kapalina v trubici vlastně představuje jednozávitové sekundární vinutí budicího transformátoru TR1 a současně jednozávitové primární vinutí měřicího transformátoru TR2. Jestliže se primární vinutí transformátoru TR1 napájí konstantním nízko- frekvenčním napětím  $U_N$ , indukuje se v kapalném okruhu měřené kapaliny proud úměrný její vodivosti. Jeho působením se v sekundárním vinutí měřicího transformátoru TR2 indukuje napětí  $U_M$ , které je úměrné proudu procházejícího měřenou kapalinou, a tedy její měrné vodivosti. Snadno lze dokázat, že napětí  $U_M$  je nezávislé na frekvenci budicího napětí  $U_N$ , která ovlivňuje pouze velikost obou transformátorů. Aktivní části induktivní měřicí sondy nepřicházejí do přímého styku s měřeným médiem, a sondy jsou proto vhodné zejména pro měření korozivních roztoků s velkou vodivostí. Jedinou sondou lze měřit vodivost v rozpětí větším než 6 dekad, např. od  $0,5 \mu\text{S/cm}$  přibližně do  $2500 \text{ mS/cm}$ , přičemž ani nevádí, jestliže jsou v médiu obsaženy nečistoty, které u kontaktních systémů způsobují pokrytí elektrod nevodivým povlakem.



Obr. 4 Princip induktivní (bezelektrodové) sondy pro měření vodivosti: TR1 – budicí transformátor, TR2 – měřicí transformátor, MT – trubice z nevodivého materiálu, M – měřená kapalina,  $U_N$  – konstantní budicí napětí,  $U_M$  – napětí úměrné vodivosti,  $I_2$  – proud indukovaný v kapalném okruhu

### 2.1.3 Základní vztahy pro bezelektrodové vodivostní měření

Proud závitem nakrátko:

$$I = \frac{E_1}{R} \dots E_1 = k_1 * U \quad (7)$$

Výstupní napětí je úměrné protékajícímu proudu:

$$U_M = k_2 * I = k_2 * \frac{E_1}{R} \quad (8)$$

Výstupní napětí je úměrné i vodivosti měřené kapaliny:

$$U_M = k_1 * k_2 = \frac{U_N}{R} = K * \frac{1}{R} \quad (9)$$

Elektrická vodivost roztoků je teplotně velmi závislá, zejména při nízkých hodnotách vodivosti. Teplotní koeficient měrné elektrické vodivosti  $\rho$  se pohybuje mezi 2 až 6 % °C a může výrazně ovlivnit přesnost měření. Proto je součástí měřicích sond standardně teplotní čidlo (odporový teploměr, termistor), jehož signál se využívá v měřicím převodníku k automatické kompenzaci vlivu teploty na přesnost měření. Měřicí sondy se vyrábějí s velkou mechanickou a korozivní odolností pro průtočné nebo ponorné použití s různou formou připojení k technologickému procesu (příruba, šroubení, závit s převlečnou maticí aj.).

Orientační vztah mezi měrnou vodivostí a konstantou K	
Rozsah měrné vodivosti	Doporučená konstanta měřicí cely K
0,001 mS/cm až 10 mS/cm	0,01 cm <sup>-1</sup>
0,01 mS/cm až 100 mS/cm	0,1 cm <sup>-1</sup>
0,01 mS/cm až 200 mS/cm	1 cm <sup>-1</sup>
0,1 mS/cm až 500 mS/cm	10 cm <sup>-1</sup>
1 mS/cm až > 1 000 mS/cm	100 cm <sup>-1</sup>

Tab. 2 Orientační vztahy

#### 2.1.4 Aplikační možnosti vodivostních senzorů

- stanovení obsahu kyselin, louhů a solí v jednoduchých roztocích na základě kalibračních křivek
- kontrola čistoty vod (napájení kotlů, kondenzát, odpadní vody)
- kontrola různých technologických postupů v chemickém průmyslu
  - výroba kyselin, čpavku a dalších
  - \_ kontrola pracích vod
- kontrola výroby v potravinářském průmyslu
  - \_ řízení rafinačních procesů
  - \_ měření v cukrovarnictví, mlékárenství a pivovarnictví
- elektrická vodivost je vlastností aditivní, proto snímače neumožňují selektivně stanovit určitou látku
- ve složitějších roztocích lze měřením vodivosti určit pouze celkovou koncentraci iontů
- výhodou metody je její velká citlivost, snímače umožňují měřit i stopové koncentrace elektrolytů v roztoku

#### 2.1.5 Vybrané senzory pro měření vodivosti vody

##### 2.1.5.1 Dvouelektrodový konduktometr

- ESV11 od výrobce Fiedler
- Snímač vodivosti a teploty vody pro otevřené toky, vrty a nádrže
- Možnost přímého připojení snímače k jednotce M4016 přes rozhraní RS485
- Odolné mechanické provedení
- Nižší cena proti sestavě M2001-EV, kalibrace z jednotky M4016 nebo z PC

- Možné připojení více snímačů k jedné stanici M4016 po jedné sběrnici RS485



*Obr. 5 Dvouelektrodový snímač pro měření vodivosti a teploty vody*

#### **2.1.5.2 Čtyřelektrodový senzor**

- od společnosti Ohnút
- senzor pracující ve všech vodivostních rozsazích
- některé aplikace s rozsahem 0,055 uS/cm a\_ 1000mS/cm
- celkový rozsah měření 0 - 2000 mS/cm
- teplota média do 200 °C, tlak do 2000 kPa
- provedení a propojovací možnosti jako u měření pH
- provedení "PEEK" - sendvičové

- převodníky SMART, jednoduchá kalibrace, automatická teplotní kompenzace,
- diagnostika senzoru
- galvanicky oddělený analogový výstup



Obr. 6 Čtyřelektrokový senzor

## 2.2 Měření pH

Hodnota pH (power of hydrogen) jako kvantitativní míra kyselosti/zásaditosti roztoků je definována jako záporný dekadický logaritmus číselné hodnoty koncentrace vodíkových iontů v roztoku. Je to veličina bezrozměrná, která dosahuje hodnot 0 až 14. Hodnota pH = 7 odpovídá neutrálnímu roztoku, roztoky s pH < 7 jsou kyselé, roztoky s pH > 7 jsou zásadité

Voda, protože má velkou relativní permitivitu, způsobuje jednak disociaci rozpuštěné látky na ionty, jednak se sama se štěpí na hydroxoniové a hydroxylové ionty.

Čistá voda je disociovaná na hydroxoniové ( $H_3O^+$ ) a na hydroxylové ( $OH^-$ ) ionty podle rovnice:





V neutrálním prostředí je stejný počet iontů hydroxoniových a hydroxilových. Probíhají zde dva děje: disociace (štěpení) a rekombinace (spojování). Rychlost disociace  $v_1$  je úměrná hmotnosti nerozštěpených molekul vody podle vztahu:

$$v_1 = k_1 \cdot (H_2O) \quad (11)$$

kde je  $k_1$  konstanta štěpení.

Rychlost rekombinace je úměrná součinu koncentrací působících hmotnosti iontů  $[H^+]$  a  $[OH^-]$ . Jednotkou jsou gramionty v litru. Platí obdobný vztah:

$$v_2 = k_2 \cdot [H^+] \cdot [OH^-] \quad (12)$$

kde je  $k_2$  konstanta rekombinace.

Při rovnováze obou dějů, kdy jsou rychlosti stejné, platí rovnice definující disociační konstantu:

$$k_d = \frac{k_1}{k_2} = \frac{[H^+] \cdot [OH^-]}{[H_2O]} \quad (13)$$

kde je  $k_d$  konstanta disociace.

V roztoku o objemu 1 litr při teplotě 25 °C je podle měření počet gramiontů roven hodnotě  $1,008 \cdot 10^{-7}$ . Dále platí, že součin koncentrací obou iontů se rovná konstantě.

$$[H^+] \cdot [OH^-] = k_v = k_d \cdot [H_2O]$$

kde je  $k_v = 1,008 \cdot 10^{-14}$  iontový součinitel vody pro hmotnost vody  $[H_2O] = 1$ . Protože při štěpení čisté vody je vždy stejná koncentrace obou iontů platí:

$$[H^+] \cdot [OH^-] = \sqrt{1,008 \cdot 10^{-14}} = 10^{-7}$$

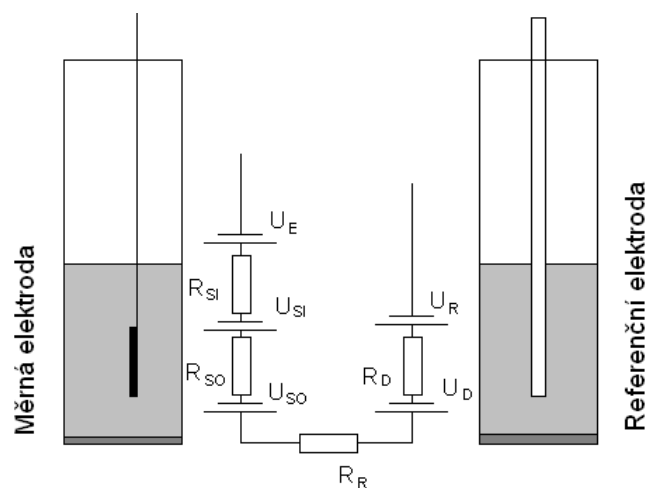
Jestliže při přítomnosti kyseliny ve vodě probíhá disociace a vznikla více iontů  $[H^+]$ , zmenšuje se koncentrace iontů  $[OH^-]$ , protože součin koncentrací musí být konstantní. Naopak při disociaci zásady ve vodě vzniká větší koncentrace iontů  $[OH^-]$  a aby součin koncentrací byl konstantní, snižuje se koncentrace iontů  $[H^+]$ . Koncentrace iontů  $[H^+]$  je obecnou mírou kyselosti a zásaditosti roztoků. Místo koncentrace iontů  $[H^+]$ , někdy se uvádí koncentrace  $C_{H^+}$ .

Pro udávání stupně kyselosti nebo zásaditosti bylo zavedeno používání tzv. vodíkového exponentu pH podle vztahu  $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$

Výše uvedené vztahy znamenají, že při zvýšení vodíkových iontů se zmenší koncentrace hydroxylových iontů. Na základě dohody se rozděluje prostředí na neutrální ( $\text{pH} = 7$ ), na kyselé ( $\text{pH} < 7$  až 1) a na zásadité ( $\text{pH} > 7$  až 15).

Jako potenciometrické senzory pH slouží elektrodové články, na jejichž rozhraní elektroda roztok vzniká elektrický potenciál. Při měření se používají elektrody dvě: měrná a referenční.

Měrná elektroda dává elektrický potenciál závislý na koncentraci vodíkových iontů. Druhá elektroda – referenční má potenciál nezávislý na hodnotě na této koncentraci.



Obr. 7 Schéma potenciometrického měření pH

Schéma obvodu pro měření pH je na Obr. 7. Elektrody při ponoření do elektrolytu vytváří elektrický článek s potenciálem na obou elektrodách. Měrná elektroda má mezi vnitřní elektrodou a měřeným roztokem elektrický potenciál závislý na pH. Jeho velikost je dána součtem napětí vnitřní elektrody ( $U_E$ ), napětí vnitřní plochy membrány ( $U_{SI}$ ), napětí vnější plochy membrány ( $U_{SO}$ ). Srovnávací elektroda není citlivá na pH a obsahuje roztok (buffer) o určité hodnotě pH. Elektrický potenciál referenční elektrody je dán součtem potenciálu vnitřní elektrody ( $U_R$ ) a difúzního potenciálu ( $U_D$ ). Celkové napětí na elektrodách obsahuje hodnoty desítek mV a měří se při proudovém zatížení pod  $10^{-12}$  A, tj. vnitřní odpor měřícího

zesilovače musí být velmi vysoký ( $R \gg 10^{12}$  Ohm). Pro potenciál  $E$  kovové elektrody v roztoku byl odvozen Nerosten vztah:

$$E = E_0 + \frac{R_k \cdot T}{n_i \cdot F_n} \cdot \ln C_i \quad (14)$$

kde je  $E_0$  potenciál kovu při jednotkové koncentraci iontů

$R_k$  plynová konstanta

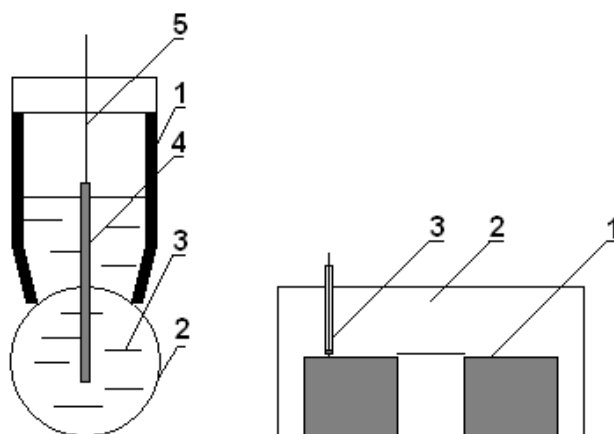
$T$  absolutní teplota

$n_i$  mocenství iontu

$F_n$  Faradayův náboj

$C_i$  koncentrace kovových iontů

Při zapojení měrné a referenční elektrody vzniká elektrické napětí jako rozdíl potenciálů. Jako měrné elektrody se používají: skleněné s ústojným roztokem nebo kovové antimonové nebo vizmutové. Elektrody referenční jsou: kalomelová s KCl nebo chlorido stříbrné s roztokem KCl.



Obr. 8 Měrné elektrody senzorů pH

Provedení měrných elektrod je na Obr. 8. Senzor v provedení skleněné elektrody je zobrazen na pozici a). Elektrodu tvoří těleso (1) z pevného skla a vysokým přechodovým odporem. V dolní části je z elektrodovaného skla vytvořena baňka (2), která je ve funkci

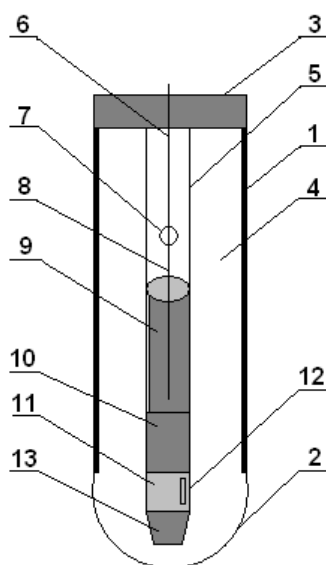
tenkostěnné membrány. Uvnitř elektrody je ústojný roztok (3), tj. roztok, který nemění své pH při přidání malého množství kyseliny nebo zásady. Do roztoku je ponořená elektroda (5) chlorido stříbrná nebo kalomelová. Vývod tvoří stíněný vodič (6). Skleněná elektroda získává potenciál difúzním způsobem při styku s vodíkovými ionty v okolním roztoku. Potenciální rozdíl vzniká mezi vnitřní stěnou elektrody, která je ve styku s ústojným roztokem o známém pH a vnější stěnou elektrody, která je ve styku s měřeným roztokem.

Skleněná elektroda má velký vnitřní odpor nad 100 MOhm. Základní charakteristika je lineární v rozsahu od pH = 0,5 až pH = 12. Citlivost je 58,1 mV/pH. Malá chyba vzniká pro kyselé roztoky pro pH < 1. Nad pH > 9 vzniká tzv. alkalická chyba. Potenciál je silně závislý na teplotě. Zvětšuje se o 0,2 mV/ °C při pH = 1. Nulový bod měření je dán hodnotou pH ústojného roztoku a potenciál je nulový. V praxi je to hodnota pH = 4,62, pH = 7,0 nebo 7,62

Konstrukce antimonové elektrody je uveden na pozici b) Kovový kroužek (1) má na čelní ploše nanesen čistý antimon a je uložen v pryžové hmotě (2). Při přímém styku s roztokem vzniká potenciál, který je vyveden kabelem (3). Potenciál je závislý na čistotě povrchu a vzniká redukčně oxidačním pochodem. Pracovní rozsah je od 2 do 12 pH.

Jako referenční elektroda se používá elektroda kalomelová nebo chlorido stříbrná. Konstrukční řešení kalomelové elektrody, která se v praxi nejvíce používá, je uvedeno na Obr. 9

Těleso elektrody má v dolní části elektrolyticky vodivou průlinčivou stěnu (2). Náplň tělesa je nasycený roztok KCl (4) s přebytkem krystalů v roztoku. Těleso je nahoře utěsněno ucpávkou (3) s průchodem pro vývod vnitřní kalomelové elektrody (5). Tato vnitřní elektroda se uvnitř skládá ze stříbrného vodiče (6) spojené z vláknem z platiny (8). Náplň rtuti (9) je nahoře oddělena ucpávkou a dole sousedí s kalomelovou náplní (10). Papírová ucpávka (11) má okénko (12) pro spojení s roztokem KCl. V dolní části je ucpávka (13) z umělé hmoty.

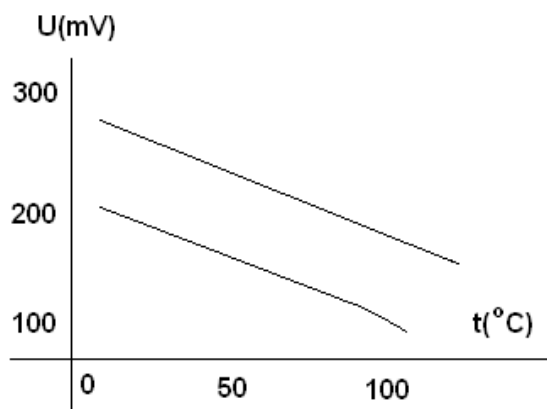


*Obr. 9 Referenční kalomelová elektroda pH*

Stálost potenciálu kalomelové elektrody je dána vlastnostmi chloridu draselného vůči koncentraci iontů rtuti v nasyceném roztoku kalomelu. Její potenciál je při 25 °C 241 mV. Používá se pro měření v rozsahu 0 až 14 pH při teplotě roztoku 0 až 70 °C. Elektrický okruh vzniká propojením referenční elektrody s měrnou elektrodou přes průlinčivou stěnu a měřený roztok. Elektrický odpor tohoto propojení musí být menší o 1000 Ohmů. Průlinčivá stěna je vyrobena ze skla, keramiky nebo azbestového vlákna ve skle.

Chlorida stříbrná kompenzační elektroda je obdobné konstrukce jako kalomelová. Rozdíl je pouze u vnitřní elektrody. Platinový vodič je prodloužen stříbrným vodičem potaženým vrstvou chloridu stříbrného.

Obě referenční elektrody se vyznačují stálostí potenciálu a malým difúzním součinitelem elektrolytické stěny. Negativně působí teplota, která snižuje potenciál elektrod. Závislost potenciálu obou popisovaných referenčních elektrod je ukázána na Obr. 10 kde křivka (1) je pro kalomelovou a křivka (2) pro chlorido stříbrnou.



Obr. 10 Závislost potenciálu na teplotě u referenčních elektrod pH

### 2.2.1 Vybrané senzory pro měření pH

pH elektroda P11 od výrobce Sentek Limited UK

- určená pro použití v odpadních vodách
- Skleněná, plnicí, mechanicky odolná
- Rozsah pH 0 – 14
- Pracovní teplota 0 - 80 $^{\circ}\text{C}$
- Typ reference AgCl
- Typ můstku Keramický prstenec
- Ref.elektrolyt 3M KCl/AgCl
- Rozměr (mm) 120 x 12



Obr. 11 pH elektroda P11

IONcheck 10, přenosný pH-metr od výrobce Scanlab Systémes

- Široké možnosti využití
- 1 až 3 bodová kalibrace, automatické rozpoznávání pufferů, rozlišení 0,1; 0,01; 0,001 pH; 0,2mV; 0,1°C; indikátor stability.
- mb. elektroda) a 5 pinový (pH kombi. elektroda s tepl. senzorem) a referenční 1 pinový vstup



Obr. 12 IONcheck 10

### 2.3 Měření rozpuštěného kyslíku ve vodě

Koncentrace rozpuštěného kyslíku ve vodě je jedním z hlavních ukazatelů kvality vody, biologického znečištění povrchových vod a důležitým parametrem aktivačního, nitrifikačního a denitrifikačního procesu v biologických čistírnách odpadních vod. V potravinářském průmyslu koncentrace kyslíku ovlivňuje průběh kvasných procesu při výrobě potravin.

Pro obsah kyslíku  $G(\text{kg} / \text{m}^3)$  ve vodě platí Henryho zákon:

$$G = a * r * p_i \quad (15)$$

kde je  $a$  Bunsenův absorpční koeficient,  $r$  hustota plynu pro  $0^\circ\text{C}$  a  $101\text{kPa}$ ,  $p_i$  parciální tlak kyslíku nad roztokem ( bez vodní páry)

Bunsenův absorpční koeficient je silně závislý na teplotě a má hodnotu pro  $20^\circ\text{C}$   $a_{O_2} = 0,031$ .

Pro  $20^\circ\text{C}$  je obsah kyslíku ve vodě ve výši  $9,009\text{ kg} / \text{m}^3$

Z pohledu fyziky je závislost absorpce kyslíku do vody dána parciálním tlakem kyslíku, atmosférickým tlakem a tlakem vodních par podle vztahu:

$$P_{(O_2)} = P_{(O_2),s} * (P_{(vz)} - P_{(Ovp)}), \quad (16)$$

kde je  $P_{(O_2)}$  parciální tlak kyslíku

$P_{(O_2),s}$  parciální tlak kyslíku v suchém atmosférickém vzduchu (=20,95%)

$P_{(vz)}$  tlak atmosférický

$P_{(vp)}$  tlak vodní páry

Koncentrace kyslíku ve vodě je funkcí parciálního tlaku:

$$C_{(O_2)} = P_{(O_2)} * \frac{k_a * M_{O_2}}{V_m}, \quad (17)$$

kde je  $C_{(O_2)}$  koncentrace kyslíku (mg/l)

$P_{(O_2)}$  parciální tlak kyslíku (bar)

$k_a$  absorpční koeficient (1/bar)

$M_{O_2}$  molekulová hmotnost kyslíku (32g)

$V_m$  molární objem kyslíku (22,4 l)

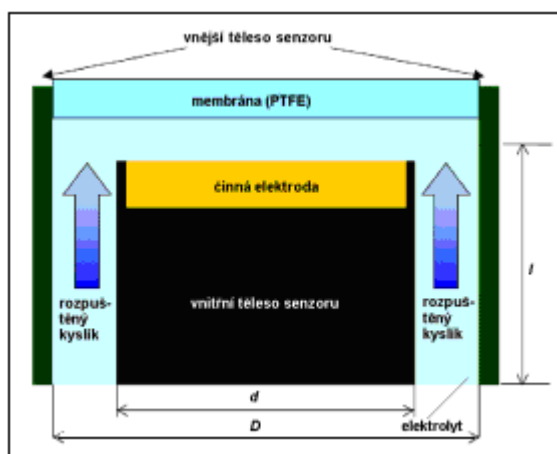
Koncentrace kyslíku velmi silně ovlivňuje vedle tlaku vzduchu i teplota roztoku. Proto při vyhodnocování je nutná kompenzace podle této teploty.



### 2.3.1 Elektrochemická metoda měření kyslíku rozpuštěného ve vodě

Pro měření kyslíku se využívá různých typů elektrod založených na ampérometrických procesech.

Základní uspořádání ampérometrického senzoru koncentrace rozpuštěného kyslíku je schematicky znázorněno na obr. 13. V základním tělese senzoru je uzavřena válcová elektrochemická cela. Činnou (měřicí) elektrodou je katoda ve tvaru plochého disku z ušlechtilého kovu (zlato, platina). Jejím protějškem je stříbrná anoda (na obr. 13 nezakreslená). Polopropustná membrána z teflonu (PTFE) překrývá povrch katody a odděluje od měřeného média vnitřní prostor cely, vyplněný elektrolytem gelové konzistence obsahujícím vodný roztok, např. KCl.

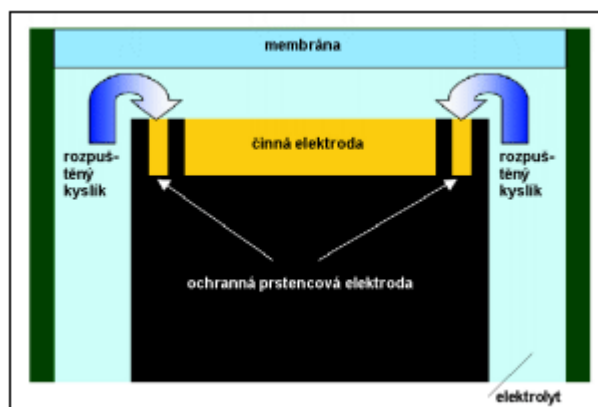


*Obr. 13 Schematické základní uspořádání senzoru rozpuštěného kyslíku a jeho charakter. rozměry*

Senzor pracuje tak, že kyslík rozpuštěný v kapalném médiu difunduje polopropustnou membránou do elektrolytu a je redukován na katodě. V důsledku oxidačně-redukčních reakcí na obou elektrodách (viz např. [1]) vzniká v elektrickém obvodu senzoru elektrický proud, jehož velikost je přímo úměrná obsahu kyslíku v elektrolytu, a tudíž, protože se předpokládá jeho průchod membránou bez zkreslení, i v měřeném médiu.

Senzor popsané základní konstrukce podle obr. 13 ale nedosahuje přesnosti, která by umožnila měřit koncentrace rozpuštěného kyslíku na úrovni pouhých několika ppb. Je tomu tak proto, že senzor schopný dosahovat potřebné přesnosti musí mít především velmi malý

zbytkový proud, jehož hlavním zdrojem je ale „rušivý“ kyslík rozpuštěný v elektrolytu obsaženém v senzoru. Řešení bylo nalezeno v přidání ochranné prstencové elektrody, obkružující činnou elektrodu senzoru (obr. 14). Prstencová elektroda pracuje na redukčním potenciálu kyslíku a brání tak jeho nežádoucímu přísunu z okolního elektrolytu k činné elektrodě. Toto zdokonalení, zavedené v polovině 80. let, umožnilo zkonstruovat senzor měřící s přesností řádu  $\pm 1$  ppb při dostatečně krátké tzv. době návratu (come-down time; doba, za kterou začne znovu měřit s přesností  $\pm 1$  ppb poté, co byl vystaven koncentraci kyslíku ve vzduchu).



Obr. 14 Schéma zdokonaleného senzoru s ochrannou prstencovou elektrodou

Ochranná prstencová elektroda vyřešila problém přesnosti, avšak je původcem složitější konstrukce i výroby senzoru i celého přístroje a svou blízkostí k činné elektrodě se sama stala příčinou nového typu poruchy – přemostování stříbrem. Zůstal tedy otevřen prostor i pro jiná řešení

### 2.3.1.1 Vybraný senzor pro měření koncentrace kyslíku ve vodě ampérometrickou metodou

Senzor Dissolved Oxygen Probe od výrobce Verner (viz. Obr.15)

Čidlo umožňuje měřit koncentraci kyslíku rozpuštěného ve vodě a vodných roztocích

Princip použití: Čidlo pracuje na principu elektrolýzy – senzor je tvořen elektrolytem (KCl), katodou (Pt) a anodou (Ag/AgCl), přičemž vše je od zkoumaného vzorku odděleno pro

plyny propustnou membránou. Na katodu je přiváděno stálé napětí, částice kyslíku procházejí cestou ke katodě membránou a redukuje se, na anodě probíhá oxidace. Proud procházející obvodem je úměrný koncentraci kyslíku ve zkoumaném vzorku.

- Rozsah: 0 - 15 mg/l
- Citlivost: 0,014 mg/l
- Přesnost: 0,2 mg/l



*Obr. 15 Senzor Dissolved Oxygen Probe*

### 2.3.2 Luminiscenční metoda měření kyslíku rozpuštěného ve vodě

Pro měření kyslíku se využívá různých typů elektrod založených na elektrochemických procesech. Kyslík přechází z měřené kapaliny přes iontové selektivní membránu z teflonu do vnitřního elektrolytu elektrody.

Tato metoda má radu nevýhod. Kvůli malým elektrodám je zapotřebí určitý polarizační čas. Prostup kyslíku membránou je ovlivněn teplotou, rychlostí proudění měřené kapaliny a znečištěním membrány.

V současné době nastupuje nová generace kyslíkových sond LDO (Luminescent Dissolved Oxygen) a RDO (Rugged Dissolved Oxygen) založená na luminiscenční technologii. Optická metoda využívá schopnosti kyslíku zhaset luminiscenci, která vzniká na povrchu senzoru opatřeného luminiscenční vrstvou, ozářením modrým světlem. Při přechodu molekul z vybuzeného do základního stavu se emituje červené světlo. Časový interval od okamžiku osvětlení modrým světlem do okamžiku vyzáření červeného světla je úměrný koncentraci rozpuštěného kyslíku ve vodě. Neměří se intenzita vyzářeného červeného světla, ale doba trvání luminiscence.

Optická metoda má proti elektrochemickým radu výhod. Měření je stabilní, velmi rychlé a přesné, není rušeno interferencemi těžkými kovy, změnami pH ani případnou přítomností

H<sub>2</sub>S .Sonda nevyžaduje čištění elektrod, ani výměnu vnitřního elektrolytu. Jedinou údržbou je roční výměna hlavice s luminiscenční vrstvou senzoru.

### **2.3.2.1 Vybraný senzor pro měření koncentrace kyslíku ve vodě luminiscenční metodou**

Oximetr Orion 3 Star RDO od výrobce Thermo Scientific ( viz. Obr. 16)

Přenosný, terénní, využívající nejnovější luminiscenční technologii, pro měření rozpuštěného kyslíku(RDO).

Vhodné pro pitné, podzemní, povrchové a odpadní vody. Využití v procesní technologii a biotechnologii. Dále čistírny odpadních vod.

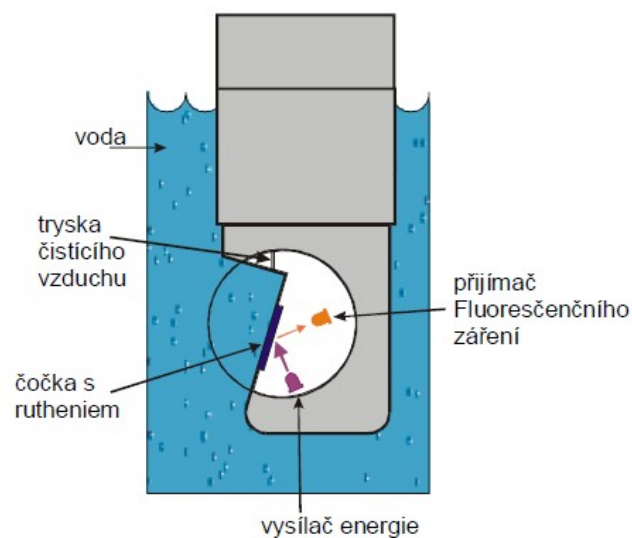
- Rozsah 0,00...20,0 mg/l
- Rozlišení 0,01 / 0,1 mg/l
- Relativní přesnost  $\pm 0,1$  mg/l do 8 mg/l
- % saturace 0,0 do 200%
- Rozlišení 0,1 / 1%
- Rozsah 0...50°C
- Rozlišení 0,1°C Teplota
- Relativní přesnost  $\pm 0,3$ °C



Obr. 16 Oximetr Orion 3 Star

### 2.3.3 Fluorescenční metoda měření kyslíku

Tato metoda je založena na vlastnostech kovu ruthenium, který je zalitý do polymerové čočky. Na tuto čočku z jedné strany působí voda s rozpuštěným kyslíkem, na druhé straně je ozařována světlem. Toto světlo je z části pohlceno a z části se opět vyzáří v podobě fluorescenčního záření. Intenzita tohoto záření je úměrná rozpuštěnému kyslíku. K zajištění stability měření je možné sondu připojit k tlakovému vzduchu, který zajistí dostatečné čištění čočky od usazených nečistot v pravidelných intervalech



Obr. 17 Princip měření pomocí fluorescence

### 2.3.3.1 Vybraný senzor pro měření koncentrace kyslíku ve vodě fluorescenční metodou

Senzor nepotřebuje žádné náhradní díly, elektrody, membrány a pod. po dobu až sedmi let. Přesnost optického senzoru je  $\pm 0.05$  ppm. Posun kalibrace je menší jak 1% za rok, proto je doporučena kalibrace jednou za rok. Senzor při svém provozu nespotřebovává kyslík jako je tomu u membránových a elektrodových senzorů a proto nevyžaduje žádnou rychlost proudění vody.



Obr. 18 Optický senzor

Pravidelné osychání senzoru nevádí, nemá vliv na kalibraci ani citlivost senzoru. Senzor je možné použít pro měření velmi malých koncentrací rozpuštěného kyslíku, například v anaerobní zóně. Metoda měření je velmi přesná v extrémně nízkých rozsazích. Byly provedeny testy při hodnotách 0.03 ppm a 0.08 ppm, ve kterých senzor uspěl velmi dobře.

Senzor může být vystaven slunečnímu záření, slunce nemá vliv na jeho citlivost ani životnost, jako je tomu některých jiných optických senzorů, kde dochází vlivem záření ze slunce k postupnému znečitlivění a následnému poškození snímací optiky již po méně jak jedné hodině a to i při nepřímém slunečním záření

## 2.4 Měření indexu lomu pomocí refraktometru

Index lomu je obecně funkcí kvalitativního i kvantitativního složení prostředí. Výsledný index lomu kapalin, u nichž nenastávají žádné chemické ani fyzikální změny má aditivní charakter. Pro roztoky kapalin, u nichž dochází buď k chemickým reakcím nebo k vzájemnému ovlivňování, vznikají výraznější odchylky od aditivnosti.

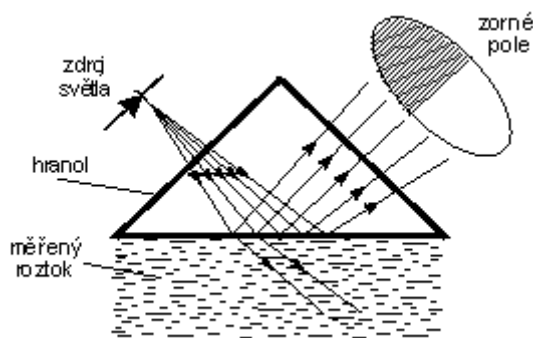
Mezi hustotou  $\rho$  a indexem lomu  $n$  platí vztah, který odvodili Lorentz a Lorenz:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = r\rho \quad (18)$$

Kde  $r$  je specifická refrakce.

Specifická refrakce je charakteristickou veličinou pro danou látku a této skutečnosti je možno využít pro kontinuální měření koncentrace látek v řadě chemických a potravinářských výrobních (petrochemie, výroba lihu, cukru apod.)

Pro provozní účely se využívá jednak měření změn úhlu lomu při průchodu paprsku rozhraním dvou prostředí, jednak měření mezního úhlu. Princip refraktometru pracujícího na principu měření mezního úhlu je znázorněn na obr. 19. U refraktometrických snímačů tohoto typu se vyhodnocuje světlo odražené od rozhraní mezi hranolem a měřeným médiem. Svazek paprsků světla od zdroje je směřován k rozhraní mezi hranolem a měřeným roztokem. Paprsky světla dopadají na rozhraní pod různými úhly. V závislosti na velikostech úhlu dopadu a mezního úhlu projde část světla do kapalného média a část se odrazí od rozhraní. V případě, že úhel dopadu je větší než mezní úhel, dochází k úplnému odrazu.



Obr. 19 Schéma refraktometru

Pozorované zorné pole je rozděleno na světlou a tmavou oblast. Poloha rozhraní mezi světlou a tmavou oblastí závisí na velikosti mezního úhlu a tedy na hodnotě indexu lomu kapalného média. U roztoků, jejichž koncentrace se mění, dochází i ke změně indexu lomu. S rostoucí koncentrací se index lomu zvětšuje, mění se poloha rozhraní a zvětšuje se tmavá oblast. Poloha rozhraní mezi světlou a tmavou oblastí se vyhodnocuje pomocí fotoelektrických detektorů. Elektronické obvody řízené mikroprocesorem zajišťují i automatickou teplotní kompenzaci, případně linearizaci závislosti výstupního signálu na koncentraci.



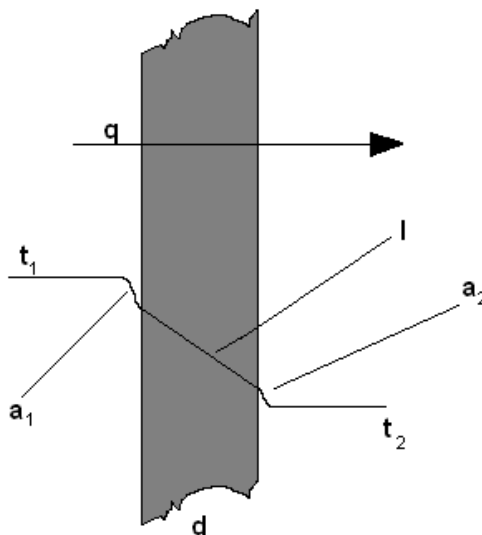
### 3 VHODNÉ SENZORY PRO MĚŘENÍ PLYNNÝCH SMĚSÍ

#### 3.1 Tepelně-vodivostní senzory

Odporový senzor tepelné vodivosti reaguje na změny tepelné vodivosti směsi plynů při změnách její koncentrace. Pro obecný tepelný proces přenosu tepla přes plochu platí.

$$q = \left( a_1 + \frac{l}{d} + a_2 \right) (t_1 - t_2) \quad (19)$$

kde je  $q$  tepelný tok přes vrstvu plynu  $a_1$ , součinitel přestupu tepla prouděním na rozhraní (1),  $l$  součinitel tepelné vodivosti,  $d$  tloušťka vrstvy,  $a_2$  součinitel přestupu tepla prouděním na rozhraní (2),  $t_1$  teplota před rozhraním (1),  $t_2$  teplota před rozhraním (2). Při konstantních hodnotách  $a_1, a_2, d, t_1, t_2$  ovlivňuje měrný tepelný tok jen vodivost vrstvy, je uvedena její hodnota pro vybrané plyny.



Obr. 20 Princip tepelné vodivosti

Plyn	$\lambda \cdot 10^7$ (W/m <sup>2</sup> /K)	$\lambda$ plynu $\lambda$ vzduchu
Vodík H <sub>2</sub>	416	7,15
Helium He	340	5,84
Neon Ne	110	1,89
Metan CH <sub>4</sub>	72	1,24
Acetylén (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	71,8	1,23
Kyslík O <sub>2</sub>	58,9	1,1
vzduch	58,3	1
Dusík N <sub>2</sub>	58,1	0,99
Oxid uhelnatý CO	56	0,96
Oxid uhličitý CO <sub>2</sub>	34	0,58
Sirovodík H <sub>2</sub> S	31	0,53
Oxid siřičitý SO <sub>2</sub>	20	0,34

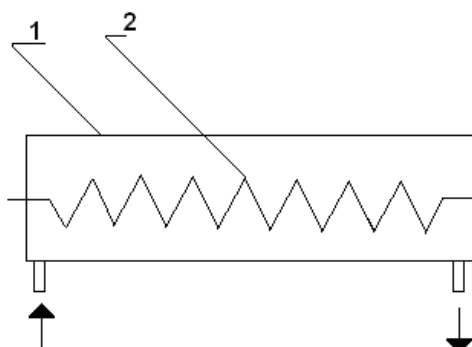
Tab. 3 Závislost tepelné vodivosti pro některé plyny

Tepelná vodivost je závislá na teplotě. Závislost může být lineární vzrůstající ( např. metan) nebo lineární a klesající ( např. acetylén). U směsi plynů platí, že celková výsledná tepelná vodivost směsi se stanovuje směšovacími pravidly a je rovna:

$$I = \sum_1^n c_{mi} I_i \quad (20)$$

kde je  $c_{mi}$  molární koncentrace složky  $I_i$ , tepelná vodivost.

Schéma odporového senzoru využívající princip tepelné vodivosti je na Obr. 21. Měřená směs plynů proudí o konstantní rychlosti měřící komoru (1), kde se ohřívá od žhavého vodiče (2) podle Schleimachera na teplotu 100 až 150 °C.



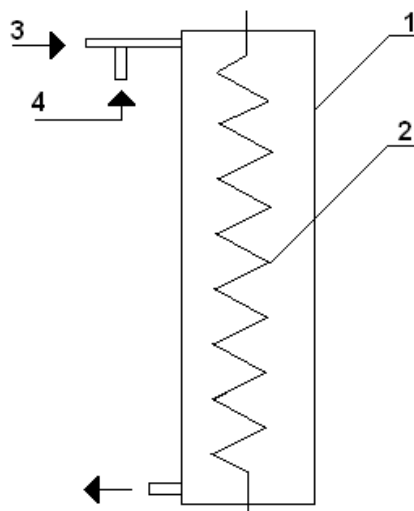
Obr. 21 Schéma senzoru tepelné vodivosti

### 3.2 Katalytické senzory

Senzor termochemický, někdy nazývaná jako katalytický, využívá ovlivňování teploty žhavého vodiče od tepla vzniklého z katalytické reakce složek plynu. Schéma senzoru je na obr. 22. Do komory (1), kde se nachází žhavený vodič (2) s katalytickými účinky, vstupuje měřený plyn (3) a okysličovadlo (4), např. vzduch. Žhaveným vodičem a současně i snímačem teploty je platinový drát nebo různé slitiny platiny a kovů podle druhu měřeného plynu. Teploty žhavení jsou dané druhem měřeného plynu, např. pro metan 800 °C, pro vodík postačí 200 °C. Senzor se používá pouze pro spalitelné plyny, např. uhlovodíky, CO.

V praxi se pro zvýšení citlivosti a přesnosti měření používají diferenční zapojení, tj. komora měřící a komora s referenčním plynem. Důležitou podmínkou je konstantní průtok měřeného i oxidačního plynu, konstantní teplota okolí nebo její kompenzace. Negativně působí plyny skupiny tzv. katalytických jedů (např. sirovodík, fosforovodík).

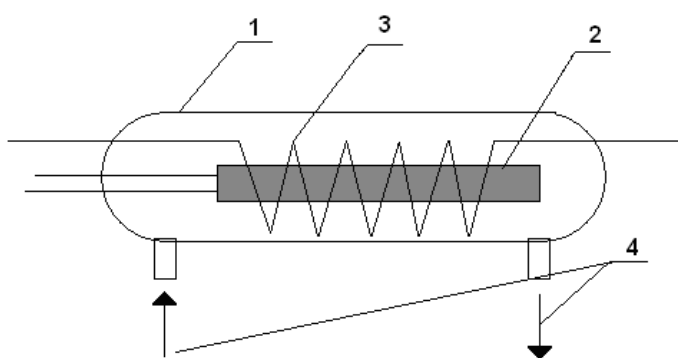
Senzor se v praxi používá ve snímačích pro testování spalovacího procesu u automobilů, pro měření obsahu rozpouštědel v ovzduší v gumárenském průmyslu apod.



Obr. 22 Schéma katalytického senzoru

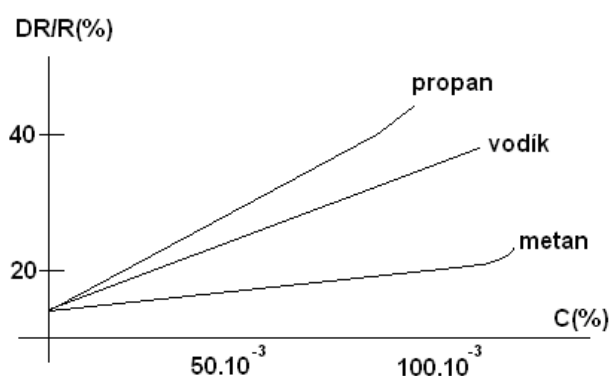
### 3.3 Polovodičové senzory

Aktivní látkou senzoru je polykrystalický polovodič, např. slinutý oxid cínu, zinku nebo železa. Tento senzor při styku s chemicky redukováným plynem jeho malé množství pohlcuje, přitom dochází k chemické reakci a mění se odpor senzoru. Tento proces je závislý na teplotě. Při teplotách od 60 do 340 °C se také snižuje časová konstanta děje na senzoru. Proto je senzor doplněn topnou spirálou z platiny.



Obr. 23 Schéma polovodičového fyzikálně chemického senzoru

Schéma senzoru je na Obr. 23 V tělese je uložen odporový fyzikálně chemický senzor (2) a žhavé vlákno (3). Směs plynu (4) proudí přes těleso vstupním a výstupním odporem. Závislost změny elektrického odporu senzoru je na obrázku současně zobrazena pro některé plyny. (Obr. 24)



Obr. 24 Změna elektrického odporu senzoru pro jednotlivé plyny

### 3.4 Elektrochemické senzory

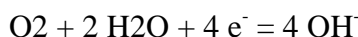
Elektrochemické metody využívá mnoho senzorů složení. Pro analýzu plynů jsou to zejména senzory ampérometrické a galvanometrické (potenciometrické). Elektrochemické senzory se uplatňují především při měření koncentrace kyslíku a při měření nízkých koncentrací některých toxických plynů.

#### 3.4.1 Elektrochemické ampérometrické senzory

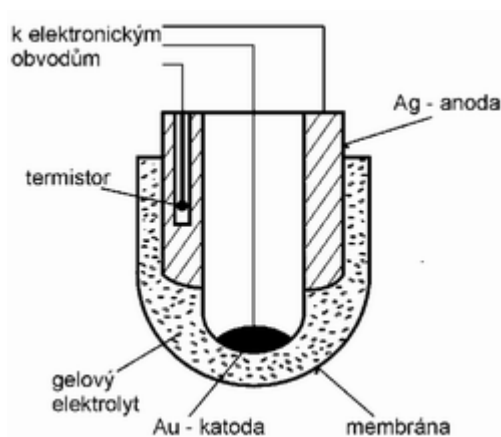
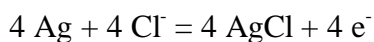
Ampérometrický senzor plynu jsou založeny na měření proudu procházejícího mezi dvěma elektrodami ponořenými do roztoku elektrolytu. Do měřicího obvodu je zapojen zdroj stejnosměrného napětí, tzv. vložené napětí, jehož hodnota musí odpovídat tzv. limitnímu proudu určované složky v měřeném médiu. Velikost limitního proudu je pak funkcí koncentrace měřené složky.

Kyslík difunduje přes polopropustnou polymerní membránu do elektrolytu (vodný roztok KCl nebo KBr) a na katodě se redukuje za přispění volných elektronů vzniklé na styku stříbrné anody a elektrolytu. Velikost elektrického proudu je tak přímo úměrná obsahu kyslíku. Pro funkci celého senzoru je nutné na elektrody přiložit napětí tzv. polarizační napětí elektrod, cca 0.8 V.

kyslík difunduje polopropustnou membránou a na katodě se redukuje



na stříbrné anodě probíhá reakce



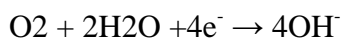
Obr. 25 Ampérometrický senzor plynu

### 3.4.2 Elektrochemické potenciometrické senzory

Senzory elektrochemické reagují na vnější fyzikálně chemické podněty vznikem elektrického potenciálu případně změnou elektrického proudu. Základem potenciometrických senzorů je vznik elektrického potenciálu na fázové rozhraní. Při styku dvou kovů, kovu a roztoku, dvou roztoků apod. vytváří se v místě styku na elektrické dvojvrstvě potenciálový rozdíl, který se nazývá potenciál fázového rozhraní.

Elektrické potenciály kovů se uvádí vůči vodíkové elektrodě (viz. Tab. 5). Vodíková elektroda je platinová destička pokrytá platinovou černí s pohlceným vodíkem a ponořená do roztoku obsahující  $1,008 \text{ kg/m}^3$  vodíkových iontů. Např. Voltův článek je elektroda Cu a Zn ponořená do zředěné kyseliny sírové. Vznikne zde potenciál:  $0,34 - (-0,76\text{V}) = 1,1\text{V}$ .

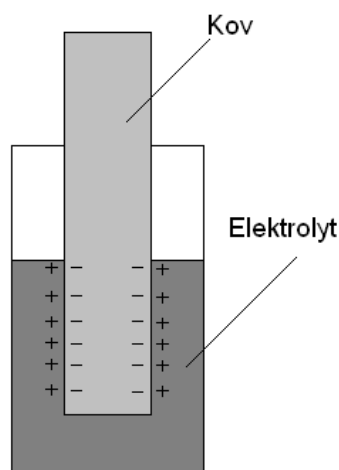
Kyslíkové molekuly jsou redukovány na Au-katodě



Reakce na Pb-anodě: materiál Pb-elektrody se oxiduje



Podobný princip lze použít pro vysvětlení funkce elektrochemických senzorů. Zde se vytváří a mění elektrický potenciál dvouvrstvy kovu a elektrolytu ještě působením dalších iontů z měřeného roztoku podle jejich koncentrace.



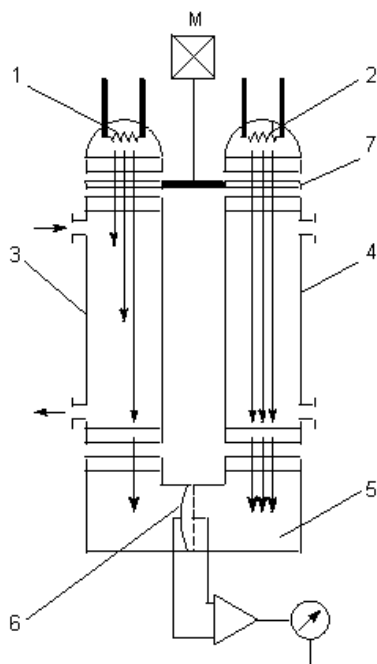
Obr. 26 Elektrická dvouvrstva kovu

Kov elektrody	Napětí(V)	Kov elektrody	Napětí(V)
Li	-3,02	Ni	-0,25
K	-2,92	Pb	-0,126
Na	-2,71	H <sub>2</sub>	0
Mg	-2,25	Cu	0,34
Zn	-0,762	Ag	0,81
Fe	-0,44	Hg	-0,86
Cd	-0,402	Au	1,5

*Tab. 4 Relativní napětí kovů k vodíkové elektrodě.*

### 3.5 Infračervené analyzátory

V automatické analýze plynů se využívá absorpční spektrofotometrie jak v ultrafialové, tak i viditelné oblasti, zejména však v infračervené oblasti spektra. Jako provozních přístrojů se nejčastěji využívá analyzátorů bezdisperzních. Bezdisperzní přístroje pracují bez rozkladu světla a využívají absorpce ve značně široké oblasti spektra. U provozních přístrojů se používá vlnových délek od 0,7 mm do 10 mm. Bezdisperzní analyzátory jsou mnohem jednodušší, levnější a mechanicky odolnější než přístroje disperzní, a proto jsou v provozním měřítku mnohem více rozšířeny. Při měření infračervené absorpce se využívá té skutečnosti, že v infračervené oblasti absorbují molekuly, které vykazují trvalý dipólmoment, tj. plyny složené nejméně ze dvou druhů atomů. Molekuly H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, které jsou souměrné, infračervené záření neabsorbují. U bezdisperzních analyzátorů, které pracují s neselektivním zdrojem záření se dosahuje selektivity nejčastěji použitím selektivního detektoru, a v tom případě hovoříme o tzv. přístrojích s pozitivní filtrací. Na obr. 27 je nakresleno schéma bezdisperzního infračerveného analyzátoru s pozitivní filtrací.



Obr. 27 *Infračervený analyzátor s pozitivní filtrací*

Infračervené záření vychází ze dvou zářičů 1 a 2 a je usměrňováno pomocí parabolických zrcadel. Svazky paprsků procházejí měřicí kvyetou 3 a srovnávací kvyetou 4 do detektoru 5. Vnitřní povrch kvyet bývá pozlacený, okénka jsou zhotovena z materiálu propouštějícího infračervené záření (slída, KCl, NaCl). Srovnávací kvyeta 4 je naplněna plynem, jež neabsorbuje infračervené záření. Měřicí kvyetou 3 protéká analyzovaný plyn. V případě, že obsahuje látku absorbující v infračervené oblasti, dochází k pohlcení záření příslušných vlnových délek a na detektor dopadá záření, zeslabené úměrně ke koncentraci vzorku. Detektor 5 je tvořen dvěma komorami naplněnými měřeným plynem.

V komorách detektoru se absorbuje infračervené záření těch vlnových délek, které odpovídají měřené látce. Tímto uspořádáním se dosahuje selektivity měření. Při absorpci infračerveného záření se ohřívá náplň komory detektoru, a tím dochází i ke změně tlaku. Komory jsou od sebe odděleny membránovým kondenzátorem 6. Jedna elektroda kondenzátoru je tvořena pevnou děrovanou přepážkou, druhou elektrodou je membrána z kovové fólie. Na elektrodách kondenzátoru je při měření určitý náboj. Při změně tlaku v některé z komor se membrána vychýlí, což způsobí změnu kapacity kondenzátoru. Oba svazky paprsků jsou periodicky přerušovány rotační kotoučovou clonou 7, poháněnou



elektromotorkem M. Při přerušování paprsků dochází k periodickým změnám teploty a tedy i tlaku v komorách detektoru. Pokud jsou zářivé toky v obou optických drahách stejné, nedochází k vychylování membrány kondenzátoru. Je-li záření v měřicí kyvetou zeslabeno absorpcí měřenou látkou, dochází k nestejnému ohřátí náplně obou komor detektoru.

Periodické změny tlaku pak vyvolávají kmity membrány kondenzátoru. Amplituda kmitů je úměrná rozdílu zářivých toků charakteristických vlnových délek, a tím i koncentraci měřené složky. Obsahuje-li analyzovaná směs plyny, které částečně absorbují ve stejných oblastech vlnových délek jako měřená látka, zařazují se do obou optických drah selektivní filtry, realizované jako kyvety naplněné interferujícími plyny. Ve filtračních kyvetách dochází potom k pohlcení záření těch vlnových délek, které přísluší interferujícímu plynu.

Velkou předností infračervených analyzátorů je široké rozmezí měřicích rozsahů v objemových koncentracích řádově od desítek až stovek ppm až po 100 %. Infračervené analyzátory se obecně vyznačují vysokou selektivitou. Jejich použití co do počtu látek i dosažitelných rozsahů je značné. Typickým příkladem je např. sledování oxidu uhelnatého a dalších látek ve vzduchu v koncentracích okolo hranice toxicity či hranice předepsané hygienickými normami.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 ÚVOD

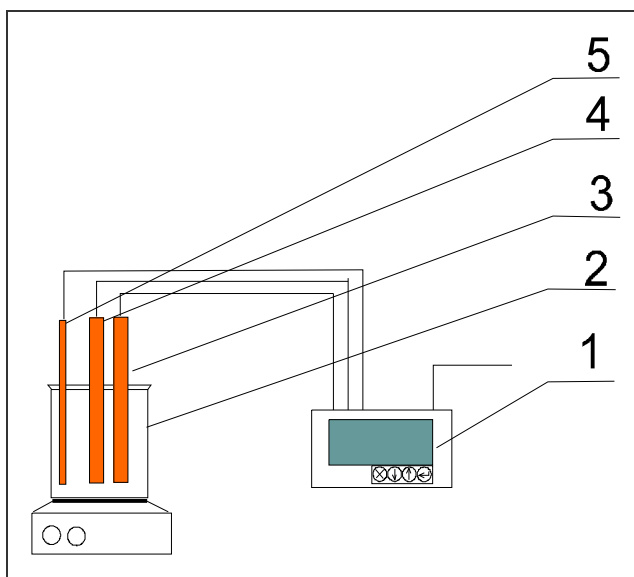
Praktická část bakalářské práce se zabývá měřením vlastností vody. Vlastnost je konkrétně zastoupena elektrolytickou vodivostí, pH, koncentrací rozpuštěného kyslíku ve vodě a obsahem cukru.

Byli vybrány tyto vzorky:

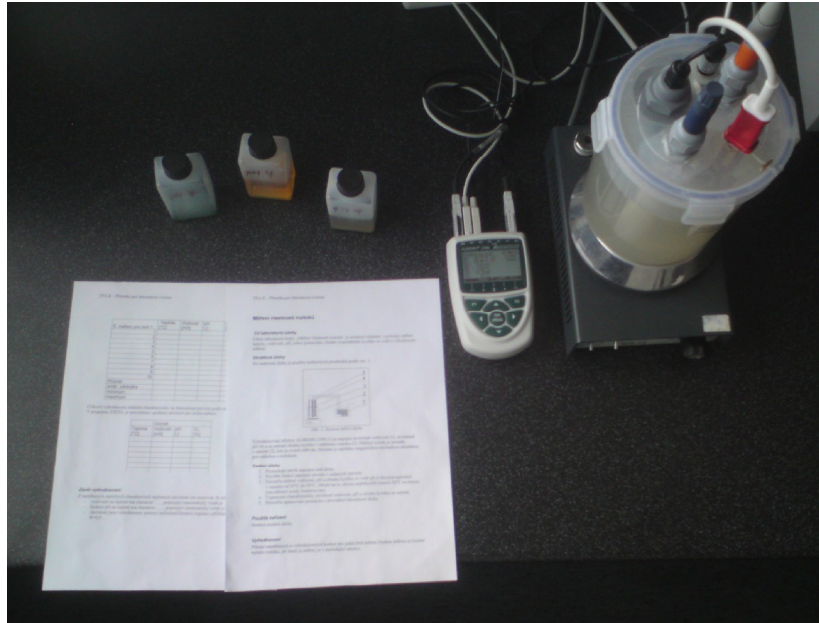
- Luhačovické prameny, které jsou po celém světě známé svými léčivými účinky.
- Studánky, vyvěrající z různých míst zlínského kraje.
- Zásobárny pitné vody ze Zlína, okolí Vsetínska a Českomoravské vrchoviny.
- Nápoje
- Destilovaná voda a voda ze zlínského potoka.

### 4.1 Popis soustavy pro měření elektrolytické vodivosti, pH a koncentraci rozpuštěného kyslíku

Vyhodnocovací přístroj ALMEMO 2590 (viz. kapitola 4.2) (1) je napojen na snímač vodivosti (3), na snímač pH (4) a na snímač obsahu kyslíku v měřeném roztoku (5). Měřený roztok je umístěn v nádobě (2).



Obr. 28 Měřicí soustava



*Obr. 29 Měřicí soustava v laboratoři*

#### 4.1.1 Popis multimetru ALMEMO 2590-4S

Univerzální měřicí přístroj pro měření elektrolytické vodivosti, pH, množství rozpuštěného kyslíku, dále pro měření teploty, vlhkosti, proudění vzduchu, průtoku kapalin, tlaku, síly, dráhy, intenzity záření, koncentrace plynů, meteorologických a dalších fyzikálních, chemických a elektrických veličin.

- 2 až 4 galv.oddělené vstupy pro čidla
- 2 výst.zásuvky pro digit.rozhraní,analog.výstup,paměť.kartu,alarm-kontakty apod.
- AD-převodník s vysokým rozlišením 16 bit
- četnost měření až 10 za sekundu
- grafický displej bíle podsvícení, ovládání silikonovými tlačítky
- menu v češtině, němčině a angličtině

- funkce: max., min., průměrování, nulování, kalibrace, výpočet průtoku, paměť pro 99 hodnot, tlumení, korekce
- programování čidel: rozsah, jednotka, komentář, korekční a limitní hodnoty  
EEPROM lineární nebo kruhová
- paměť. konektor s MMC-kartou až 128MB
- sleep-mód pro dlouhodobá měření
- přehledný systém menu:  
3 měřicí menu -1 menu volitelné z 50 funkcí  
zobrazení číselně 1 až 12 hodnot sloupcovým grafem



Obr. 30 ALMEMO 2590-4S

## 4.2 Měření elektrolytické vodivosti, pH a množství rozpuštěného kyslíku

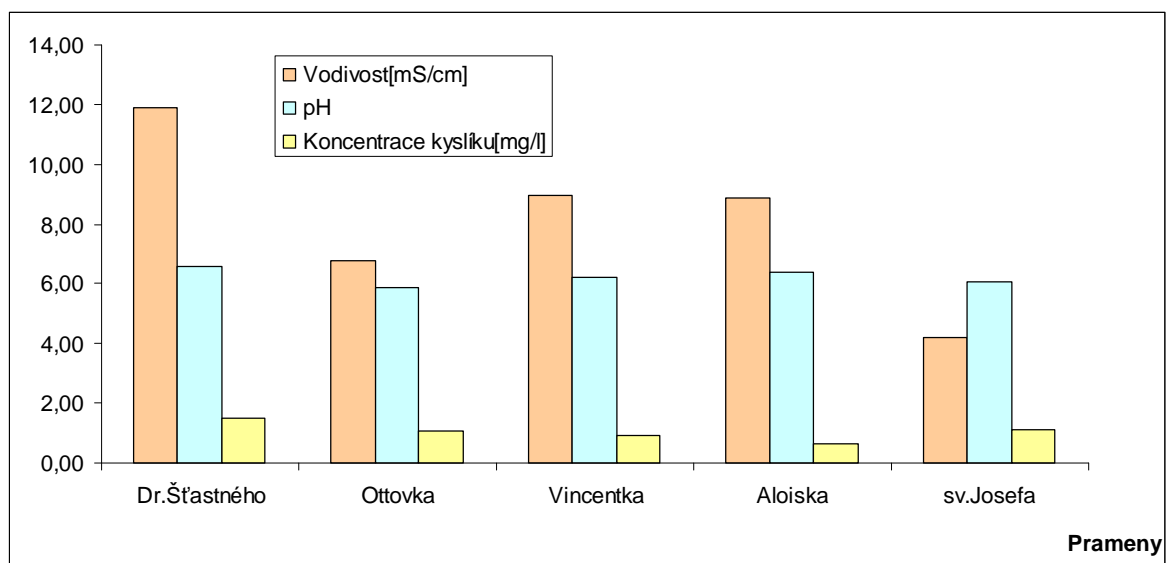
### 4.2.1 Prameny

Místo odebrání vzorků:

- Město Luhačovice, okres Zlín, kraj Zlínský

Náz. pramene	Vodivost	Sm.odch.	pH	Sm.odch.	Koncentrace O <sub>2</sub>		Sm.odch.	
	mS/cm				mg/l	%		
<b>Dr.Šťastného</b>	11,89	0,13556	6,60	0,00894	1,48	18,20	0,14000	1,77764
<b>Ottovka</b>	6,76	0,11828	5,89	0,06116	1,06	12,60	0,04899	0,48990
<b>Vincentka</b>	8,94	0,00700	6,21	0,03534	0,93	11,30	0,18466	1,84662
<b>Aloiska</b>	8,87	0,01792	6,39	0,89091	0,64	7,60	0,30397	3,38231
<b>sv.Josefa</b>	4,19	0,02182	6,07	0,00900	1,11	13,20	0,18138	2,08806

Tab. 5 Naměřené a zpracované hodnoty



Obr. 31 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot

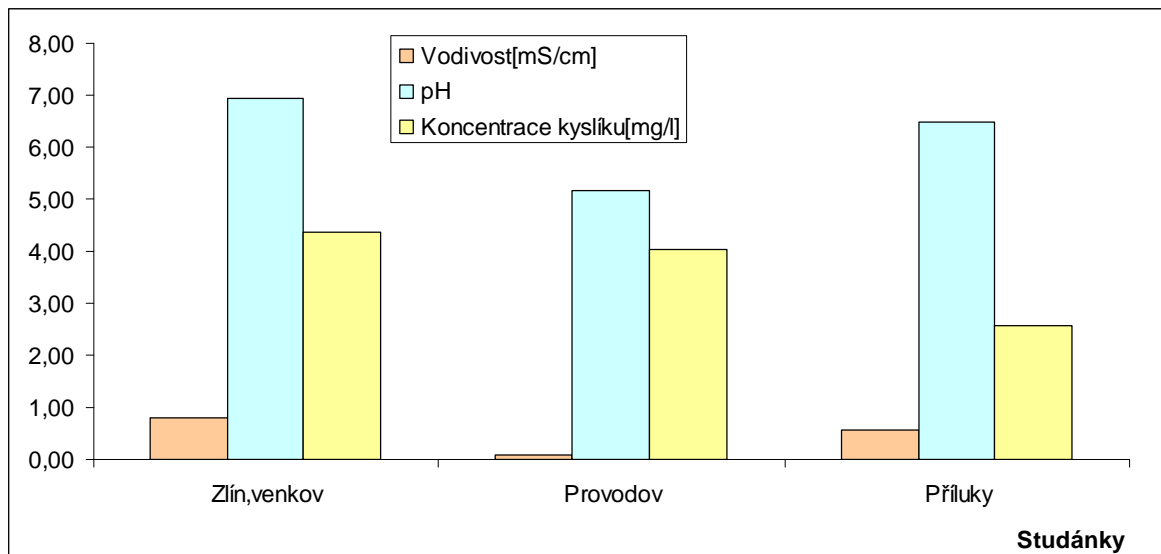
#### 4.2.2 Studánky

Místo odebrání vzorků:

- Město Zlín , okres Zlín, kraj Zlínský
- Obec Provodov, okres Zlín, kraj Zlínský
- Příluky, městská část Zlína, okres Zlín, kraj Zlínský

Studánky	Vodivost	Sm.odch.	pH	Sm.odch.	Koncentrace O <sub>2</sub>		Sm.odch.	
	mS/cm				mg/l	%		
Zlín,venkov	0,80	0,00000	6,95	0,02615	4,36	48,60	0,06633	0,66332
Provodov	0,09	0,00490	5,16	0,32030	4,02	46,40	0,37094	4,05463
Příluky	0,58	0,00000	6,49	0,01897	2,57	29,80	0,12689	1,53623

Tab. 6 Naměřené a zpracované hodnoty



Obr. 32 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot

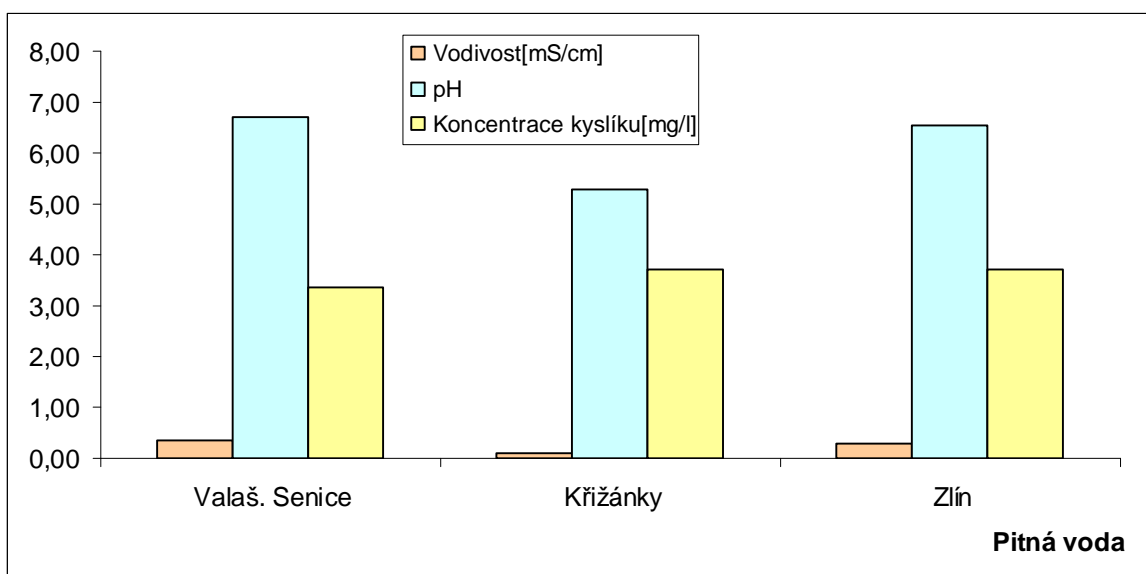
### 4.2.3 Zdroje pitné vody

Místo odebrání vzorků:

- Obec Valašská Senice, okres Vsetín, kraj Zlínský, zdroj: studna
- Obec Křižánky, okres Žďár nad Sázavou, kraj Vysočina, zdroj: studna
- Město Zlín, okres Zlín, kraj Zlínský, zdroj:

Pit. Voda	Vodivost	Sm.odch.	pH	Sm.odch.	Koncentrace O <sub>2</sub>		Sm.odch.	
	mS/cm				mg/l	%		
Valaš. Senice	0,34	0,01249	6,71	0,23762	3,35	36,70	0,36125	3,97618
Křižánky	0,11	0,00000	5,29	0,33371	3,70	41,40	0,40988	4,47661
Zlín	0,29	0,00400	6,56	0,07043	3,72	42,20	0,23580	2,35797

Tab. 7 Naměřené a zpracované hodnoty



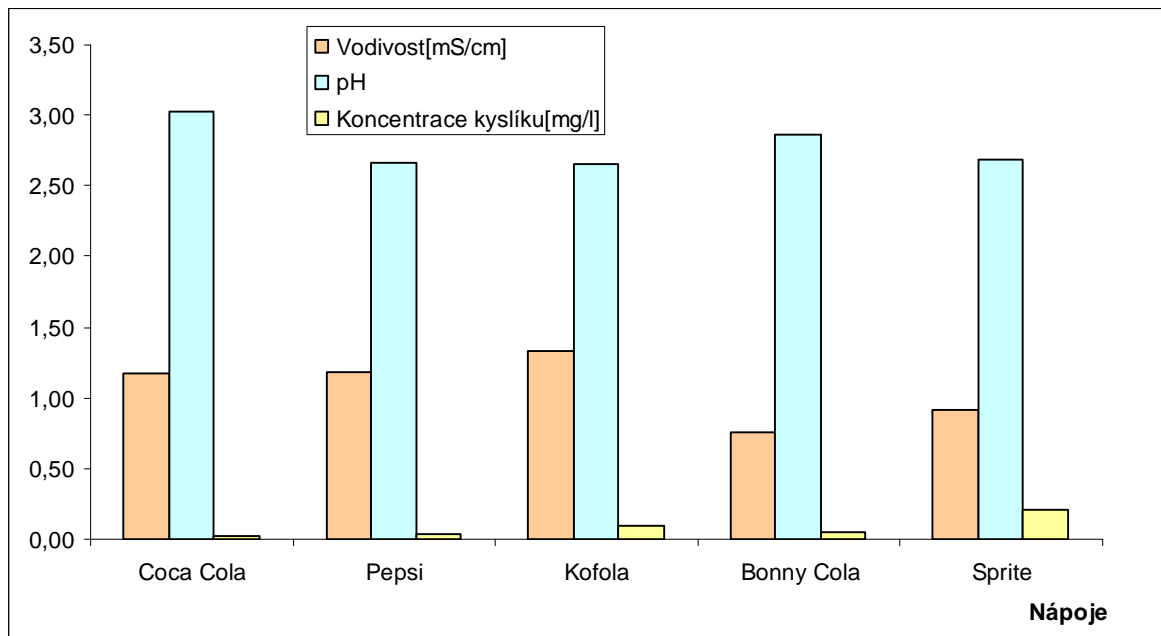
Obr. 33 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot



## 4.2.4 Nápoje

Náz. nápoje	Vodivost	Sm.odch.	pH	Sm.odch.	Koncentrace O <sub>2</sub>		Sm.odch.	
	mS/cm				mg/l	%		
Coca Cola	1,17	0,01187	3,03	0,32840	0,02	0,50	0,04000	0,80623
Pepsi	1,18	0,02166	2,67	0,00400	0,03	0,70	0,06403	1,00499
Kofola	1,33	0,00300	2,66	0,01536	0,09	1,30	0,16401	1,84662
Bonny Cola	0,76	0,00800	2,86	0,00900	0,05	0,80	0,10247	1,40000
Sprite	0,91	0,00000	2,69	0,00500	0,21	3,10	0,21190	2,11896

Tab. 8 Naměřené a zpracované hodnoty



Obr. 34 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot

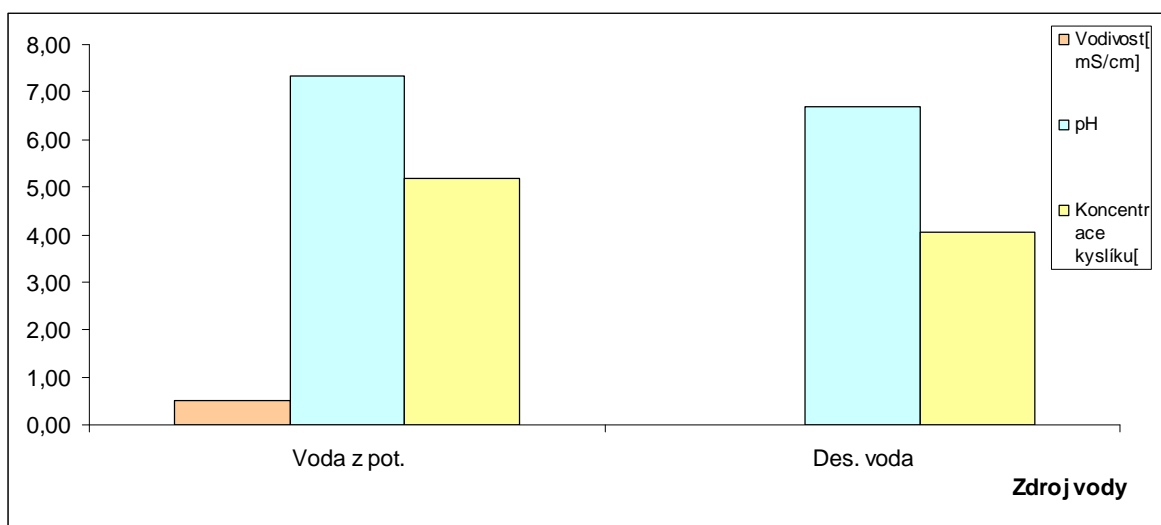
#### 4.2.5 Destilovaná voda a voda z potoka

Místo odebrání vzorků:

- Voda z potoka: Město Zlín , okres Zlín, kraj Zlínský
- Destilovaná voda: Město Zlín , okres Zlín, kraj Zlínský, Fakulta aplikované informatiky

Zdroj vody	Vodivost	Sm.odch.	pH	Sm.odch.	Koncentrace O <sub>2</sub>		Sm.odch.	
	mS/cm				mg/l	%		
Voda z pot.	0,51	0,01735	7,34	0,06589	5,18	49,30	0,50951	4,69148
Des. voda	0,00	0,00000	6,69	0,38993	4,05	45,70	0,49649	4,96085

Tab. 9 Naměřené a zpracované hodnoty



Obr. 35 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot

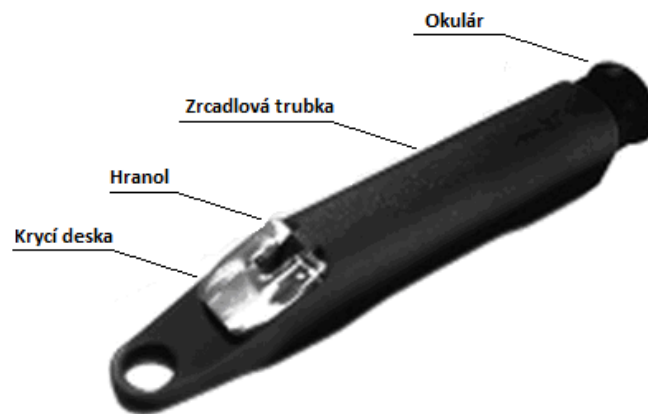
### 4.3 Popis optického refraktometru pro měření obsahu cukru.

Jedná se o přístroj REICHERT IFT 40(viz. Obr. 36)

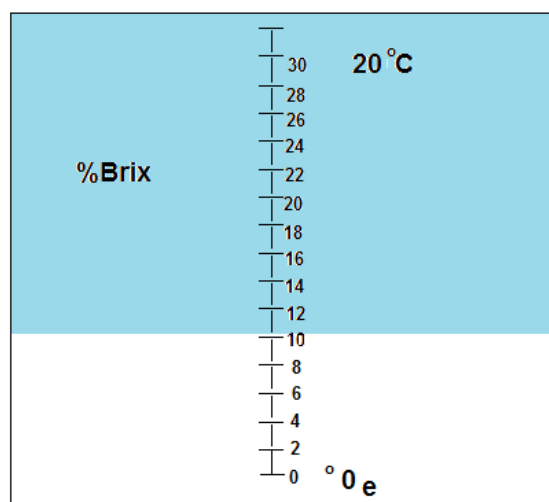
- Stupnice indexu lomu 1.3330 - 1.3860
- Rozsah: 0 – 30 °Bx

Přístroj měří index lomu vzorku. Měření je zobrazeno v % Brix.

Stupň Brix (°Bx) je celková koncentrace všech rozpuštěných látek v procentech



Obr. 36 Ref. Reichert IFT 40



Obr. 37 Zorné pole

#### 4.4 Naměřené a vypočítané hodnoty

Tabulka byla sestavena pomocí mezinárodní Brix % měřítka.

Název vzorku	% Brix	Index lomu
Voda	0	1,333
Coca Cola	10	1,3478
Nestea	7	1,3433
Sprite	6	1,3418
Kofola	8	1,3448
Pepsi	10	1,3478
Bonny Cola	8	1,3448

*Tab. 10 Převodní tabulka Brix a Indexu lomu*

Příklad vypočtu: Množství cukru obsaženého v nápoji Coca Cola:

10% Brix.....ve 100g roztoku odpovídá 10g cukru a 90g vody, jinými slovy v 1l Coca Coly je 100g cukru. (22 kostek cukru)

## ZÁVĚR

Předmětem této bakalářské práce bylo zpracovat téma elektrochemických senzorů. Celá práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V úvodu teoretické části se zabývám senzory obecně. Jejich významem v rozvíjejících se oblastech průmyslu, zdravotnictví a domácností. Jako příklad jsou uvedeny bezpečnostní aplikace, mezi něž patří např. požární ochrana nebo v našem případě sledování životního prostředí. Dále jsou uvedeny nároky na senzory, které jsou od nich v praxi vyžadovány. Mezi nejdůležitější patří spolehlivost a odolnost proti vlivům prostředí.

Ve druhé kapitole teoretické části jsem se zaměřil na rozdělení senzorů podle měřené veličiny. Konkrétně se jedná o veličiny pro měření vlastnosti vody a vodních roztoků.

Nejprve je z nich popsána elektrolytická vodivost. Jsou zde uvedeny všechny důležité aspekty, např. základní vztahy pro měření bezelektrodové vodivosti. Dále je popsáno měření pH, měření indexu lomu pomocí refraktometru a měření koncentrace kyslíku rozpuštěného ve vodě, elektrochemickou, luminiscenční a fluorescenční metodou.

Závěr kapitoly se věnuje senzorům, které se používají pro měření plyných směsí. Zde jsou popsány např. tepelně vodivostní senzory nebo infračervené analyzátoři.

V praktické části bakalářské práce jsem měřil vlastnosti vody z různých zdrojů. Zdrojem byly prameny, studánky, zásobárny pitné vody, nápoje a destilovaná voda.

Měření probíhalo v laboratoři na Fakultě aplikované informatiky ve Zlíně. Pro větší přesnost se měření provádělo nejméně desetkrát, v časových intervalech 60 sekund u všech vzorků.

Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulek a určen aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Z vypracovaných tabulek byly pro lepší přehled vytvořeny sloupcové grafy.

Z naměřených hodnot vyplývá že největší vodivost, která je závislá na koncentraci iontů rozpuštěných látek, má pramen Dr. Šťastného. (viz Tab. 5) Dále je tento roztok ze všech vzorků nejméně kyselý a má největší koncentraci rozpuštěného kyslíku. Největší kyselost má pramen Ottovka a nejmenší koncentraci vyčteme u pramene Aloiska.

Velmi zajímavý pohled nabízí tabulka ze vzorky vody ze studánek. (viz Tab. 6) Všechny byly odebrány ve vzdálenosti od sebe 15 km, ale přitom jsou zde velké rozdíly. Především v množství rozpuštěného kyslíku vodivosti.

Graf zpracovaných hodnot pro pitnou vodu ukazuje především rozdíly kyselosti a vodivosti mezi vodou odebranou ve Zlínském kraji a na Vysočině. (viz Obr. 33)

Od ostatních měření se liší tabulka s nápoji. (viz Tab. 8) Je to dáno hodnotami koncentrací kyslíku, které jsou velmi malé, téměř zanedbatelné. Tyto nápoje obsahují velké množství oxidu uhličitého, proto je zde zastoupení kyslíku tak malé.

Jediným zástupcem naměřené zásadité vody je zlínský potok. U destilované vody nepřekvapí nulová vodivost. (viz Tab. 9)

Posledním kapitolou praktické části bylo měření obsahu rozpuštěného cukru, pomocí indexu lomu. (viz Tab.10) Z tabulky lze vyčíst který z nápojů obsahuje nejméně a nejvíce cukru. “Nejlépe” je na tom voda, která neobsahuje cukr žádný.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim of this bachelor thesis was to work out the theme of electro-chemical sensors.

The entire task is split into the theoretical and practical parts.

In introduction of the theoretical part there is concerned with sensors rather in general. That means with their significance in developing fields of industry, health and households. For example there are stated safety applications like fire protection or in our case observing of the Environment. Furthermore there are presented the requirements for sensors that are required in practise. The reliability and immunity to environment influences belong to the most important criteria.

The second part of theoretical part is focused on classification of sensors in term of measured variable. Concretely it is mentioned quantities for measuring water properties and water solutions.

Firstly there is described electrolytic conduction. All important aspects are listed there, e.g. basic relations for measuring of electrodeless conduction. Furthermore there is described the pH recording, measuring of the refraction index by the help of the refractometer and measuring of quantity of dissolving oxygen in water by electro-chemical, luminescence and fluorescence technique.

The end of chapter is dedicated to sensors using for measuring of gaseous mixture. In this place there are described e.g. heat-conductive sensors or infrared analyzers.

In practical part of bachelor thesis there was measured water properties from different sources. Wells, rills, drinking water sources, drinks and distilled water served like sources.

The measuring was undertaken in the lab of Faculty of applied informatics in Zlin. The measurement was undertaken at least ten times for better accuracy, for time intervals in range of 60 seconds for each sample.

Measured values were recording into tables and stated arithmetic averages and standard deviations. From carried out tables there were created columns graphs for better overview.

From received values it comes out that the well Dr. Stastny has the highest conduction depending on concentration of dissolved substances(see Table 5). Furthermore this solution is the least acid one from all samples and it has the highest concentration of dissolved oxygen. The well Ottovka is the most acid one and the least concentration is possible to come out from Aloiska.

The table with samples of water from pools offer pretty interesting view(see Table 6). All ones were taken 15 kms far from themselves but nevertheless there are huge differences. Above all it is in term of amount of dissolved oxygen of conduction.

The chart of figured out values for drinking water demonstrates mainly the differences in term of acidity and conduction between water from Zlin district and Vysocina(see Figures 33).

The table of drinks is different in contrast to the others ones. It is caused by values of concentration of oxygen that are very small, almost negligible. These drinks contain huge amount of carbon dioxide therefore the representation of oxygen is such small(see Table 8) .

The stream in Zlin is once representative of measured alkaline water. There is no surprise with zero conduction of distilled water(see Table 9).

The measuring of content of sugar, by the help of refraction index, was the last chapter of practical part(see Table 10). There is possible to find out which one of drinks contains least and most amount of sugar. The best resulting is water with no sugar.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] HRUŠKA, František. *Senzory v systémech informatiky a automatizace*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. 180 s.
- [2] HRUŠKA, František. *Technické prostředky automatizace*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2004. Příručka pro laboratorní cvičení, s. 83.
- [3] *Základní pojmy* [online]. 2000 [cit. 2010-05-26]. Základní pojmy. Dostupné z WWW: <[http://147.229.68.118/~adamek/uceb/DATA/s\\_1\\_1.htm](http://147.229.68.118/~adamek/uceb/DATA/s_1_1.htm)>.
- [4] RIPKA, Pavel. *Y38PSZ Průmyslová sensorika | Katedra měření* [online]. 2007 [cit. 2010-05-26]. Katedra měření . Dostupné z WWW: <<https://measure.feld.cvut.cz/cs/vyuka/predmety/y38psz>>.
- [5] ŠŤASTNÝ, František. *ZPRACOVÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT* [online]. 1997 [cit. 2010-05-26]. 15 Senzor. Dostupné z WWW: <[http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html\\_tree/node16.html#SECTION000162200000000000000000](http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node16.html#SECTION000162200000000000000000)>.
- [6] *ANALYTICKÁ CHEMIE – Konduktometrie* [online]. 23.09.2007 [cit. 2010-05-26]. ANALYTICKÁ CHEMIE – Konduktometrie. Dostupné z WWW: <[http://www.zshk.cz/safra/SBIRKA\\_PRIKLADU/Konduktometrie.htm](http://www.zshk.cz/safra/SBIRKA_PRIKLADU/Konduktometrie.htm)>.
- [7] KADLEC, Karel; KABEŠ, Karel. *Automatizace : Články* [online]. 1999 [cit. 2010-05-26]. Přístroje pro měření elektrolytické vodivosti – přehled trhu. Dostupné z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=597>>.
- [8] KADLEC, Karel. *Elektronické pomůcky : Měřicí technika(K.Kadlec)* [online]. 28.09.2009 [cit. 2010-05-26]. Měřicí a řídicí technika. Dostupné z WWW: <<http://web.vscht.cz/kadleck/aktual/mrt.html>>.
- [9] KADLEC, Karel; KMÍNEK, Miloš. *Obsah : MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA* [online]. 2005 [cit. 2010-05-26]. 4.6 Měření složení. Dostupné z WWW: <<http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4-ram.htm>>.

- [10] FIEDLEREM, Jindřich; MÁGR, Zdeněk. *Přístroje pro měření vodivosti vody* [online]. 2002 [cit. 2010-05-26]. ESV11 - snímač pro měření vodivosti a teploty vody. Dostupné z WWW: <<http://www.fiedler-magr.cz/cs/produkty/elektrochemicka-mereni/konduktometry>>.
- [11] Ohnút, spalovací technika. *Ohnút, spalovací technika* [online]. 1990 [cit. 2010-05-26]. Prodej měřicí, regulační a automatizační techniky. Dostupné z WWW: <[http://www.ohnut.cz/katalogy/Katalog\\_MRT.pdf](http://www.ohnut.cz/katalogy/Katalog_MRT.pdf)>.
- [12] KABEŠ, Karel; KADLEC, Karel; BABEL, W. *Automatizace : Články* [online]. 2005 [cit. 2010-05-26]. Elektrochemické snímače a převodníky – přehled trhu. Dostupné z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=598>>.
- [13] Sentek Limited UK. *Elektrochemie - senzory* [online]. 1998 [cit. 2010-05-26]. PH elektrody. Dostupné z WWW: <<http://www.labtechnik.cz/sentek.htm>>.
- [14] Scanlab Systems. *PH/ION METRY* [online]. 2005 [cit. 2010-05-26]. pH/ION METRY - přenosné. Dostupné z WWW: <<http://www.escanlab.cz/?p=productsList&iCategory=26&sName=prenosne>>.
- [15] NEOTEC, spol. s r.o. *NOVINKY* [online]. 2009 [cit. 2010-05-26]. RDO sonda pro měření rozpuštěného kyslíku. Dostupné z WWW: <<http://www.neotec.cz/orion/novinky.php>>.
- [16] KADLEC, Karel; FENG, Ch.-D; PAYNE, R. A. Úsporná konstrukce senzoru malých koncentrací rozpuštěného kyslíku . *Úsporná konstrukce senzoru malých koncentrací rozpuštěného kyslíku* [online]. 2001, 10/2001, [cit. 2010-05-26]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=33688](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33688)>.
- [17] Vernier. *Produkty : Senzory* [online]. 2010 [cit. 2010-05-26]. Čidlo ve vodě rozpuštěného kyslíku. Dostupné z WWW: <<http://vernier.cz/produkty/podrobne-informace/kod/DO-BTA>>.

- [18] SCHULZ , Robert. *Optické měření kyslíku* [online]. 2006 [cit. 2010-05-26]. BEZÚDRŽBOVÉ OPTICKÉ MĚŘENÍ ROZPUŠTĚNÉHO KYSLÍKU FLUORESCENČNÍ METODOU. Dostupné z WWW: <<http://www.schulzep.cz/>>.
- [19] KADLEC, Karel; FIŠER, L. *Elektronické pomůcky : Měřicí technika* [online]. 2006/2007 [cit. 2010-05-26]. Měřicí technika pro chemické inženýry. Dostupné z WWW: <[http://web.vscht.cz/kadleck/archiv/a\\_mt.html](http://web.vscht.cz/kadleck/archiv/a_mt.html)>.
- [20] KADLEC, Karel, et al. Provozní analyzátory plynů . *Provozní analyzátory plynů* [online]. 2001, 10/2001, [cit. 2010-05-26]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=33683](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33683)>.
- [21] Ahlborn. *Kategorie/Výrobci* [online]. 2010-05-26 [cit. 2010-05-26]. DATA LOGERY. Dostupné z WWW: <<http://www.ahlborn.cz/cs/produkt/dataloger-univerzalni-almemo-2590-4s/>>.
- [22] Reichert. *IFT* [online]. 2009 [cit. 2010-05-27]. Industrial Fluid Testers. Dostupné z WWW: <<http://www.reichertai.com/products.html?productID=25>>.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Sm.odch. Směrodatná odchylka

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Schéma měřicího řetězce .....</i>	11
<i>Obr. 2 Umístění senzoru ve snímači tlaku( 1-senzor,2 měřící komora,3-šroubení,4- propojení senzoru s elektronikou, 5- elektronika převodníku,6 – kryt snímače, 7 – vývod kabelu) .....</i>	12
<i>Obr. 3 Kontaktní sonda pro měření elektrolytické vodivosti s deskovými elektrodami: a) dvouelektrodová, b) čtyřelektrodová; PE1, PE2 – proudové elektrody, NE1, NE2 – měřicí napě_ové elektrody, UN – napájecí napětí, IN – proud protékající roztokem, UM – napětí úměrné vodivosti .....</i>	19
<i>Obr. 4 Princip induktivní (bezelektrodové) sondy pro měření vodivosti: TR1 – budicí transformátor, TR2 – měřící transformátor, MT – trubice z nevodivého materiálu, M – měřená kapalina, UN – konstantní budicí napětí, UM – napětí úměrné vodivosti, I2 – proud indukovaný v kapalném okruhu.....</i>	20
<i>Obr. 5 Dvouelektrodový snímač pro měření vodivosti a teploty vody .....</i>	23
<i>Obr. 6 Čtyřelektrodový senzor .....</i>	24
<i>Obr. 7 Schéma potenciometrického měření pH .....</i>	26
<i>Obr. 8 Měrné elektrody senzorů pH.....</i>	27
<i>Obr. 9 Referenční kalomelová elektroda pH .....</i>	29
<i>Obr. 10 Závislost potenciálu na teplotě u referenčních elektrod pH.....</i>	30
<i>Obr. 11 pH elektroda P11 .....</i>	30
<i>Obr. 12 IONcheck 10 .....</i>	31
<i>Obr. 13 Schematické základní uspořádání senzoru rozpuštěného kyslíku a jeho charakter. rozměry .....</i>	33
<i>Obr. 14 Schéma zdokonaleného senzoru s ochrannou prstencovou elektrodou.....</i>	34
<i>Obr. 15 Senzor Dissolved Oxygen Probe .....</i>	35
<i>Obr. 16 Oximetr Orion 3 Star.....</i>	37
<i>Obr. 17 Princip měření pomocí fluorescence.....</i>	37
<i>Obr. 18 Optický senzor.....</i>	38
<i>Obr. 19 Schéma refraktometru .....</i>	39
<i>Obr. 20 Princip tepelné vodivosti .....</i>	41
<i>Obr. 21 Schéma senzoru tepelné vodivosti.....</i>	42
<i>Obr. 22 Schéma katalytického senzoru .....</i>	43

---

<i>Obr. 23 Schéma polovodičového fyzikálně chemického senzoru.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 24 Změna elektrického odporu senzoru pro jednotlivé plyny.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 25 Ampérometrický senzor plynu.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 26 Elektrická dvouvrstva kovu.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 27 Infračervený analyzátor s pozitivní filtrací.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 28 Měřicí soustava.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 29 Měřicí soustava v laboratoři.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 30 ALMEMO 2590-4S.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 31 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 32 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 33 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 34 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 35 Porovnání naměřených a zpracovaných hodnot.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 36 Ref. Reichert IFT 40.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 37 Zorné pole.....</i>	<i>59</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Technické parametry senzorů .....</i>	15
<i>Tab. 2 Orientační vztahy .....</i>	21
<i>Tab. 3 Závislost tepelné vodivosti pro některé plyny .....</i>	42
<i>Tab. 4 Relativní napětí kovů k vodíkové elektrodě. ....</i>	47
<i>Tab. 5 Naměřené a zpracované hodnoty .....</i>	54
<i>Tab. 6 Naměřené a zpracované hodnoty .....</i>	55
<i>Tab. 7 Naměřené a zpracované hodnoty .....</i>	56
<i>Tab. 8 Naměřené a zpracované hodnoty .....</i>	57
<i>Tab. 9 Naměřené a zpracované hodnoty .....</i>	58
<i>Tab. 10 Převodní tabulka Brix a Indexu lomu.....</i>	60
<i>Tab. 11 Fyzikální principy, typy a aplikace senzorů.....</i>	74

## SEZNAM PŘÍLOH

P I Tab.11 Fyzikální principy, typy a aplikace senzorů.



**PŘÍLOHA P I: TAB.11 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY, TYPY A APLIKACE SENZORŮ.**

<b>Fyzikální princip</b>	<b>Typ senzoru</b>	<b>Aplikace v SIA</b>
Mechanický - tepelná roztažnost - setrvačnost osy	Bimetal, tyčové provedení rozt. Gyroskop	Snímač teploty, termostat Snímač polohy a její změny
Tekutinový - změna rychlosti proudění - vírový - změna tlaku při výtoku	Průřezový senzor průtoku, . Pitotova trubice Vírový průtokoměr Tryska-klapka	Měření průtoku a rychlosti průtoku Měření průtoku Měření polohy, posuvu, délky
Elektrická resistance (Ohmův zák.) - kovový - polykristalický polovodičový - monokristalický polovodičový - polovodičový s přechodem	Pt, Ni, Mo teploměr Tenzometr Termistor NTC, PTC Si senzor monokrystal Polovodič s přechodem P nebo N Tenzometr	Měření polohy dotykově Mechanické napětí Měření teploty dotykově Měření teploty dotykově Měření teploty dotykově, magnetická indukce, světla Mechanické napětí, tlak, síla, hmot.
Elektrické pole a náboj - pyroelektrický - kapacitní - piezoelektrický	Pyroelektrický Kondenzátor jako senzor Piezoelektrický nebo ultrazvukový	Měření teploty bezdotykově Posuv, poloha, vlhkost, hladina Tlak, síla, hmotnost Ultrazvuk, poloha, vzdálenost, hladina
Indukce a magnetismus - indukčnost cívky - magnetostrikce - paramagnetismus	Indukční senzor Magnetostrikční senzor Paramagnetický senzor	Měření polohy, posuvu Měření polohy, posuvu Měření obsahu O <sub>2</sub> , NO
Magnetická indukce	Tachogenerator magnetodynamický senzor	
Hallův efekt	Hallův senzor	Měření magnetické indukce, proudu
Seebeckův a Peltierův efekt	Termočlánek	Teplota
Přenos elektromagnetic. záření	Emisní senzor Elektroluniscence	Intenzita světla Koncentrace látek

Optické vlastnosti materiálů	Fotonásobič Absorbe elektromagnetického záření Rozptyl elektromagnetického záření Anemometrický senzor Refraktometrický senzor Optické vlákno	Kvantové měření světla  Turbidimetrie Nefelometrie Rychlost proudění tekutiny, průtok Koncentrace organických látek Poloha, posuv
Radioaktivní záření	Ionizační soubor	
Polovodičový efekt	Diodový senzor Tranzistorový senzor Integrovaný obvod CCD senzor	Měření intenzity světla, teploty Měření teploty, ISFET, ChemFET CMOS obrazový snímač, PSD Obrazový snímač
Chemické reakce	Termokatalický senzor Pt, polovodičový (pellistor) Plamenoinizační senzor (FID Flame ionisation detector)	Koncentrace spalitelných plynů  Koncentrace spalitelných plynů

*Tab. 11 Fyzikální principy, typy a aplikace senzorů*