

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

NEDESTRUKTIVNÍ MĚŘENÍ TLOUŠŤKY LEDU

Katedra elektrotechniky a automatizace

Disertační práce

ING. TOMÁŠ PÍCHA

2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele a uvedl jsem veškerou použitou literaturu. Tištěná a elektronická verze práce se doslovně shodují.

TOMÁŠ PÍCHA

DATUM:

PODPIS:

Poděkování

Rád bych především a na prvním místě poděkoval mé školitelce doc. Ing. Stanislavě Papežové, CSc. Pomáhala mi nejen s výběrem tématu práce, ale byla mi po celou dobu nápomocna jak při zpracovávání teoretické rozvahy, tak u návrhu a rozpracování experimentů. Přispěla radami k vyhodnocování pokusů a nemenší díl odborného vedení mi věnovala při přípravě publikací i závěrečné doktorské práce. Její pomoc byla nejen odborná, ale vážím si i jejího lidského přístupu.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jakubu Lvovi, Ph.D., který mi dal řadu odborných rad a zapůjčil laboratorní prostory i vybavení pro některá měření. Velmi též děkuji panu prof. Ing. Jaromíru Volfovi, DrSc. Ten mi poskytl odborné konzultace, zejména pokud se týká vyhodnocování a stanovování nejistoty měření, což mělo vzhledem k povaze práce značný význam pro shrnutí výsledků.

Abstrakt

Disertační práce na téma nedestruktivní měření tloušťky ledu je zaměřena na návrh a ověření jednoduché, rychlé a spolehlivé metody vhodné pro průběžné lokální měření tloušťky ledu na vodních plochách, včetně návrhu a realizace vlastního senzoru a měřicí jednotky.

Úvodní část práce je zaměřena na literární rešerši z oblasti problematiky měření tloušťky ledu. Na jejím základě byla navržena vlastní měřicí metoda využívající kapacitního principu, kde vyhodnocování tloušťky ledu spočívá ve využití významného rozdílu relativní permitivity ledu a vody. Tato prostředí v průběhu zámrazu a tání mění své poměrové zastoupení, což se projevuje změnou kapacity na výstupu senzoru. Pro tuto metodu byla navržena a realizována vhodná kapacitní sonda a měřicí jednotka, založená na principu, při kterém je míra tloušťky ledu převedena na změnu frekvence oscilátoru, do jehož obvodu je sonda zapojena a přímo určuje jeho frekvenci kmitů.

Pro výsledný měřicí systém proběhlo ověření jeho funkčnosti a reprodukovatelnosti dosažených výsledků v laboratorních podmínkách. Pro tento systém byla určena standardní kombinovaná nejistota typu C, jejíž velikost byla pro daný měřicí rozsah sondy 0-180 mm stanovena v intervalu 7,8 – 8,8 mm tloušťky ledu.

Klíčová slova: kapacitní senzor; měření tloušťky ledu; nedestruktivní měření; relativní permitivita

Abstract

The thesis on topic non-destructive measurement of ice thickness is focused on design and verification of simple, fast and reliable method suitable for continuous local measurement of ice thickness on water surfaces, including design and performance of its own sensor and measuring unit.

The initial part of the thesis is focused on literature research in field of ice thickness measurement. On this study, new method of measurement was designed based on capacitance principle, in which evaluation of ice thickness is based on significant difference between relative permittivity of ice and water. These media change their proportional distribution during freezing and melting, which is expressed by change of capacitance at sensor output. The suitable capacitive probe and measuring unit for this method was designed and performed, based on principle where ice thickness measure is converted to change in frequency of oscillator into whose circuit the probe is connected and directly determines its oscillation frequency.

Final measurement system was verified in terms of functionality and reproducibility of results in laboratory conditions. For this system, standard combined uncertainty of type C was determined, its value was determined in interval of 7,8 – 8,8 mm of ice thickness for the probe measurement range (0-180 mm).

Key words: capacitive probe; ice thickness measurement; non-destructive measurement; relative permittivity

Obsah

Prohlášení	i
Poděkování.....	ii
Abstrakt	iii
Abstract.....	iv
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	xii
Seznam zkratek	xiii
1 Úvod	1
2 Současný stav poznání.....	2
2.1 Sondáž zamrzlé vodní plochy	2
2.2 Metody založené na elektromagnetickém principu	3
2.3 Georadar.....	5
2.4 Sonar	8
2.5 Laserové a radarové výškoměry	11
2.6 Kapacitní metody	14
3 Závěry ze současného stavu poznání	18
4 Cíle disertační práce a vědecké hypotézy	22
5 Materiály a metody.....	24
6 Měřicí metoda	26
6.1 Měřicí metoda – princip	26
6.2 Měřicí sonda – návrh konstrukce	28
6.2.1 Výběr konstrukčních materiálů pro realizaci pláště a ochranného dielektrika vnější elektrody a stanovení jeho dielektrických vlastností.....	28

6.2.2	Konstrukční materiál pro realizaci ochranného dielektrika vnitřní elektrody	34
6.2.3	Náhradní schéma sondy - optimalizace rozměrů sondy	35
6.2.4	Simulace sondy v průběhu zámrazu pomocí metody konečných prvků (MKP)	40
6.3	Měřicí sonda – konstrukční uspořádání	43
6.4	Měřicí sonda – testování vlastních parametrů	47
6.4.1	Testování vlastních parametrů sondy – výsledky	51
6.5	Návrh měřicí a vyhodnocovací elektroniky	52
6.6	Měřicí a vyhodnocovací jednotka – stanovení parametrů obvodu	56
6.7	Měřicí a vyhodnocovací jednotka – stanovení převodní charakteristiky indikované frekvence oscilátoru na tloušťku ledu	58
6.8	Měřicí a vyhodnocovací jednotka – návrh software	63
7	Testování funkčnosti kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky	65
7.1	Výchozí podmínky pro testování funkčnosti kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky	65
7.2	Výsledky testování funkčnosti kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky	67
8	Stanovení standardní nejistoty měřicí kapacitní sondy	70
8.1	Stanovení standardní nejistoty typu A měřicí kapacitní sondy	70
8.2	Stanovení standardní nejistoty typu A měřicí a vyhodnocovací jednotky	73
8.3	Stanovení standardní nejistoty typu B měřicí a vyhodnocovací jednotky	77
8.4	Stanovení kombinované standardní nejistoty typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky	79
8.5	Stanovení standardní nejistoty typu B a kombinované standardní nejistoty typu C měřicí kapacitní sondy	82
9	Diskuse	85

9.1 Stanovení vhodné měřicí metody.....	85
9.2 Princip měření	86
9.3 Návrh kapacitního senzoru.....	86
9.3.1 Stanovení vhodného tvaru sondy a konstrukčních materiálů.....	87
9.3.2 Optimalizace rozměrů sondy.....	88
9.3.3 Simulace kapacity sondy v průběhu zámrazu pomocí metody konečných prvků	89
9.4 Konstrukce měřicí sondy	89
9.5 Stanovení reálných parametrů senzoru	90
9.6 Měřicí a vyhodnocovací elektronika.....	90
9.7 Převodní charakteristika indikované frekvence oscilátoru na tloušťku ledu	91
9.8 Testování funkčnosti měřicího systému	92
9.9 Stanovení standardní nejistoty výsledného měřicího systému.....	92
9.10 Porovnání kapacitních metod.....	94
9.11 Zhodnocení položených hypotéz.....	95
10 Závěr	96
11 Použitá literatura	100

Seznam obrázků

Obr. 1 Sondáž zamrzlé vodní plochy [14]	3
Obr. 2 Princip měření tloušťky ledu pomocí měřicího zařízení EM31/ICE [6]	4
Obr. 3 Základní princip měření systémem EM bird [18].....	5
Obr. 4 Základní princip měření tloušťky ledu pomocí GPR [23].....	6
Obr. 5 Měřicí aparatura pro sledování mocnosti ledu na ledových cestách [22].....	7
Obr. 6 Princip měření a výpočtu tloušťky ledu sonarem instalovaným na AUV [29]	9
Obr. 7 Princip funkce sonarových systémů IPS a ADCP [31].....	10
Obr. 8 Popis měřicího systému IMB [34]	11
Obr. 9 Princip měření tloušťky ledu pomocí radarových a laserových výškoměrů [40]	13
Obr. 10 Princip funkce koplánárních kapacitních čidel [45]	15
Obr. 11 Model koplánárního multi-elektrodového kapacitního senzoru [46].....	16
Obr. 12 Náhradní schéma koplánárního multi-elektrodového kapacitního senzoru [46]	16
Obr. 13 Schéma měřicí aparatury koplánárního multi-elektrodového kapacitního senzoru [43].....	17
Obr. 14 Nedestruktivní metody měření tloušťky ledu – shrnutí [3]	19
Obr. 15 Princip kapacitního senzoru s proměnou dielektrickou konstantou	27
Obr. 16 Rozměry testovaných vzorků s detailem tloušťky vzorku [55].....	29
Obr. 17 Blokové schéma měření dielektrických parametrů 3D tištěných materiálů pomocí analyzátoru Agilent E4991A [55]	31
Obr. 18 Měřicí pracoviště pro testování dielektrických parametrů 3D vytištěných materiálů [55]	31

Obr. 19 Závislost ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ [%] materiálů (PLA, ABS, PETG a ASA) na měřicí frekvenci [MHz] [55].....	33
Obr. 20 Závislost ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ [%] materiálů (PLA, PLA-Silver a PLA-Metallic green) na měřicí frekvenci [MHz] [55].....	33
Obr. 21 Náhradní schéma kapacitní sondy	37
Obr. 22 Schématické zobrazení kapacitní sondy	38
Obr. 23 Měřicí rozsahy simulovaných sond, měřicí rozsah v závislosti na průměru vnější elektrody	39
Obr. 24 Simulovaný průběh zámrazu sondy s průměrem vnější elektrody 39 mm	40
Obr. 25 Diskretizace modelu simulace	41
Obr. 26 Rozložení skalárního potenciálu (φ) v modelu	41
Obr. 27 Detail rozložení skalárního potenciálu (φ) uvnitř kapacitní sondy.....	42
Obr. 28 Simulovaný průběh zámrazu sondy s průměrem vnější elektrody 39 mm – simulace metodou MKP	43
Obr. 29 Struktura kapacitní sondy	44
Obr. 30 Kapacitní sonda – popis vnitřní struktury.....	45
Obr. 31 Schematické zobrazení kapacitní sondy v průběhu zámrazu s detailním zobrazením jednotlivých dielektrických prostředí	46
Obr. 32 Kapacitní sonda.....	47
Obr. 33 Kapacitní sonda v ochranném izolačním obalu	47
Obr. 34 Měřicí aparatura	48
Obr. 35 Aparatura pro měření teplot prostředí	48
Obr. 36 Frekvenční závislost komplexní permitivity vody a ledu ϵ [60].....	49
Obr. 37 Blokové schéma měření kapacity sondy pomocí LCR-můstku.....	50
Obr. 38 Struktura měřicího pracoviště – testování vlastních parametrů kapacitní sondy	50
Obr. 39 Měřicí pracoviště - testování vlastních parametrů kapacitní sondy.....	51

Obr. 40 Kapacita sondy v průběhu zámrazu	52
Obr. 41 Kapacita sondy v průběhu tání.....	52
Obr. 42 Blokové schéma měřicí a vyhodnocovací jednotky	53
Obr. 43 Schéma zapojení oscilátoru	55
Obr. 44 Měřicí a vyhodnocovací jednotka s kapacitní sondou v ochranném obalu a modulem pro bezdrátovou komunikaci	55
Obr. 45 Vnitřní struktura měřicí a vyhodnocovací jednotky	56
Obr. 46. Struktura měřicího pracoviště – stanovení převodní charakteristiky.....	58
Obr. 47 Měřicí pracoviště – stanovení převodní charakteristiky	58
Obr. 48 Schematické zobrazení kapacitní sondy v průběhu měření	60
Obr. 49 Indikovaná frekvence oscilátoru v průběhu zámrazu	61
Obr. 50 Závislost tloušťky ledu na měřené frekvenci – odvozena pomocí aproximačního polynomu	62
Obr. 51 Vývojový diagram softwaru řídicí a vyhodnocovací jednotky.....	64
Obr. 52 Kapacitní sonda v pokusné tepelně izolované nádrži umístěné v mrazícím boxu	65
Obr. 53 Struktura měřicího pracoviště – testování kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky	66
Obr. 54 Měřicí pracoviště – testování kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky.....	66
Obr. 55 Tloušťka ledu v průběhu zámrazu	68
Obr. 56 Tloušťka ledu v průběhu tání	69
Obr. 57 Kapacitní sonda ve fixačním přípravku	71
Obr. 58 Měřicí pracoviště - stanovení standardní nejistoty typu A kapacitní sondy	71
Obr. 59 Tloušťka ledu v závislosti na měřené frekvence oscilátoru v průběhu měření standardní nejistoty typu A kapacitní sondy	72

Obr. 60 Závislost frekvence oscilátoru na kapacitě testovacích kondenzátorů a kapacitní sondě v průběhu testů standardní nejistoty typu A	75
Obr. 61 Závislost frekvence oscilátoru na kapacitě testovacích kondenzátorů (aproximováno na identické kapacity měřené při testování kapacitní sondy) a kapacitní sondě v průběhu testů standardní nejistoty typu A	76
Obr. 62 Závislost frekvence oscilátoru na vstupní kapacitě – standardní kombinovaná nejistota typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky	80
Obr. 63 Statická charakteristika měřicí a vyhodnocovací jednotky (Závislost tloušťky ledu na frekvenci oscilátoru)	81
Obr. 64 Závislost frekvence oscilátoru kapacitní sondy – standardní kombinovaná nejistota typu C kapacitní sondy	83
Obr. 65 Závislost tloušťky ledu na kapacitě sondy – standardní kombinovaná nejistota typu C kapacitní sondy	84
Obr. 66 Statická charakteristika kapacitní sondy	84

Seznam tabulek

Tab. 1 Statistické vyhodnocení naměřených dat relativní permitivity (ϵ_r) [55]	32
Tab. 2 Statistické vyhodnocení naměřených dat ztrátového činitele ($\text{tg}\delta$) ve frekvenčním rozsahu 1-2 MHz.....	34
Tab. 3 Konstrukční parametry kapacitní sondy	45
Tab. 4 Frekvence oscilátoru a skutečná tloušťka ledu měřená v průběhu pokusného zámrazu sondy.....	61
Tab. 5 Souhrn výsledků měření standardní nejistoty typu A kapacitní sondy	73
Tab. 6 Přepočtená frekvence oscilátoru indikovaná v průběhu měření standardní nejistoty typu A kapacitní sondy na kapacitu sondy při daných tloušťkách ledu.....	74
Tab. 7 Ocejchované kapacity testovacích kondenzátorů	74
Tab. 8 Souhrn výsledků měření standardní nejistoty typu A vyhodnocovací a měřicí jednotky.....	77
Tab. 9 Souhrn výsledků měření standardní nejistoty typu B vyhodnocovací a měřicí jednotky.....	79
Tab. 10 Souhrn výsledků měření standardní kombinované nejistoty typu C vyhodnocovací a měřicí jednotky.....	81
Tab. 11 Souhrn výsledků měření standardní kombinované nejistoty typu C kapacitní sondy	83

Seznam zkratek

ABS	akrylonitril-butadien-styren
AC	zdroj sinusového signálu
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ASA	akrylonitril akrylát styren
AUV	Autonomous Underwater Vehilces (podvodní autonomní sondy)
GPR	Ground Penetrating Radar (georadar)
GPS	Global Positioning System (globální poziční systém)
IMB	Ice Mass-balance Buoy
IPS	Upward-looking Ice Profiling Sonar
J-FET	Junction Field Effect Transistor
MF	měřič frekvence (DIY Kits RF 1 Hz-50 MHz Crystal Oscillator Frequency Counter Meter Digital LED tester meter)
MKP	metoda konečných prvků
PC	vzdálený měřicí počítač
PETG	polyethylene tetra ftalát glykol
PLA	kyselina polyléčná
PLA-Metallic green	kyselina polyléčná – barva metalická zelená
PLA-Silver	kyselina polyléčná – barva stříbrná
PVC	polyvinylchlorid

1 Úvod

Měření tloušťky ledu na vodní hladině je jedním ze základních ukazatelů pro zajištění větší bezpečnosti při pohybu po ledové ploše nebo z hlediska zajištění přívodu kyslíku pro vodní živočichy. V dnešní době je též sledována tloušťka ledu v polárních oblastech v souvislosti s monitorováním klimatických změn [1]. Dále je tento parametr sledován v severních oblastech v průběhu zimní sezóny, kdy zamrzlé vodní plochy řek a jezer slouží jako tzv. ledové cesty a mosty k přepravě nákladů [2]. Též jsou tyto zamrzlé plochy využívány pro řadu dalších činností, jako je např. hledání ložisek nerostných surovin, především ropy [3, 4].

V dnešní době lze tloušťku ledu měřit řadou způsobů. Mezi ty nejčastěji používané řadíme měření tloušťky pomocí metru po vyvrtání otvoru v ledu, metody založené na principu elektromagnetické indukce, sonaru, radiolokační či laserové výškoměry a zemní radary [5–7]. Méně využívané jsou metody založené na kapacitním principu. S těmi se můžeme setkat především v leteckém průmyslu, kde je takto měřena tloušťka námrazy na křídlech letadel [8, 9].

Práce je zaměřena na návrh vhodné nedestruktivní metody pro přímé, průběžné a lokální měření tloušťky ledu na vodních plochách, včetně teoretického rozboru a návrhu vlastního čidla.

2 Současný stav poznání

Metody měření je možné v podstatě rozdělit na destruktivní a nedestruktivní. Často využívanou destruktivní metodou pro měření tloušťky ledu je sondáž zamrzlé vodní plochy. Mezi nedestruktivní metody měření řadíme metody založené na principu elektromagnetické indukce, sonaru, zemní radary, radiolokační a laserové výškoměry [3, 5–7, 10–12]. Méně využívané jsou metody založené na kapacitním principu.

2.1 Sondáž zamrzlé vodní plochy

Pro měření tloušťky ledu se v České republice nejčastěji používá sondáž zamrzlé vodní plochy. Tato metoda spočívá v měření tloušťky délkovým měřidlem po vyvrtání otvoru v ledu (Obr. 1). Jedná se o destruktivní, velice spolehlivou a přesnou metodu, nicméně jejími velkými nevýhodami jsou časová náročnost a malé plošné rozlišení. Další podstatnou nevýhodou je i potenciálně vysoké riziko proboření se tenkou ledovou vrstvou pro osobu vykonávající měření [6].

V současné době je pomocí této metody policisty pořičního oddělení v Ústí nad Labem, již od roku 2009, prováděn monitoring vytipovaných vodních lokalit okresů: Ústí nad Labem, Litoměřice, Teplice, Děčín a od sezony 2010/2011 i v okrese Most. Jedná se o lokality, které bývají v období zimních měsíců využívány lidmi pro zimní aktivity. Měření tloušťky ledu probíhá sondáží ve vzdálenosti 1 m, 5 m a 20 m od břehu. Výsledky těchto měření jsou následně k dispozici na webových stránkách Policie ČR [13].



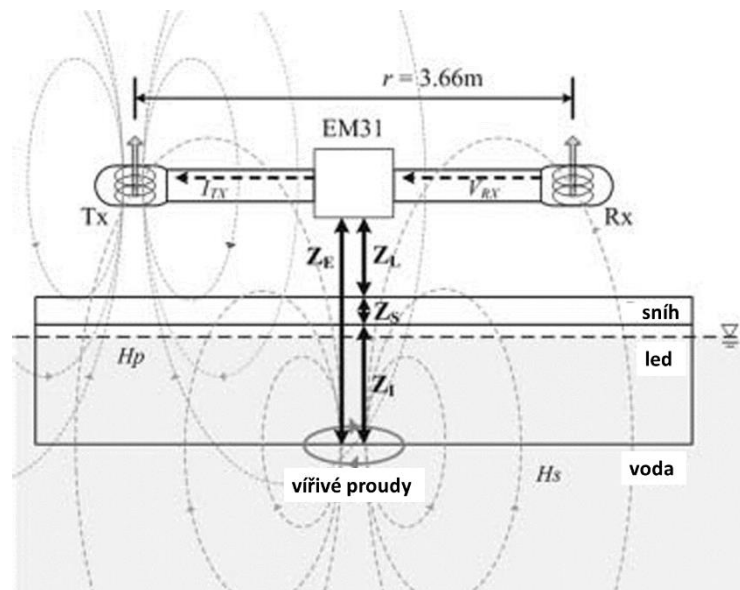
Obr. 1 Sondáž zamrzlé vodní plochy [14]

2.2 Metody založené na elektromagnetickém principu

Z oblasti nedestruktivního měření tloušťky ledu, jsou široce rozšířené metody založené na principu elektromagnetické indukce. Tyto metody jsou převážně používány k měření tloušťky ledu z paluby letadla či lodi [12]. První pokusy o využití elektromagnetických senzorů pro měření tloušťky ledu sahají do 70. let, kdy byl poprvé použit systém na bázi elektromagnetické indukce pro tyto účely [15] a byla prokázána využitelnost tohoto principu. Ve vývoji platforem na této bázi se pokračovalo a jeho výsledkem byl systém založený na měření zemní vodivosti EM-31 Geonics [16, 17].

Nejčastěji používaný systém, pracující na této bázi, je EM31 Geonics. Princip činnosti tohoto zařízení je uveden na Obr. 2. Aparatura se skládá z dvojice cívek, ze které je jedna určena pro generování primárního elektromagnetického pole (ve schématu označena jako Tx) a druhé pro příjem sekundárního pole (Rx). V průběhu měření generuje cívka Tx primární elektromagnetické pole. Toto pole indukuje ve vodě pod ledovým povrchem vířivé proudy. Vířivé proudy generují sekundární elektromagnetické pole [6]. Intenzita tohoto pole je závislá jednak na vzdálenosti měřicí aparatury od rozhraní led/voda (Z_E) tak též na elektrické vodivosti vody [11]. Bohužel při měření touto metodou lze změřit pouze tloušťku ledu a sněhu dohromady. Tyto dvě vrstvy nelze vzájemně

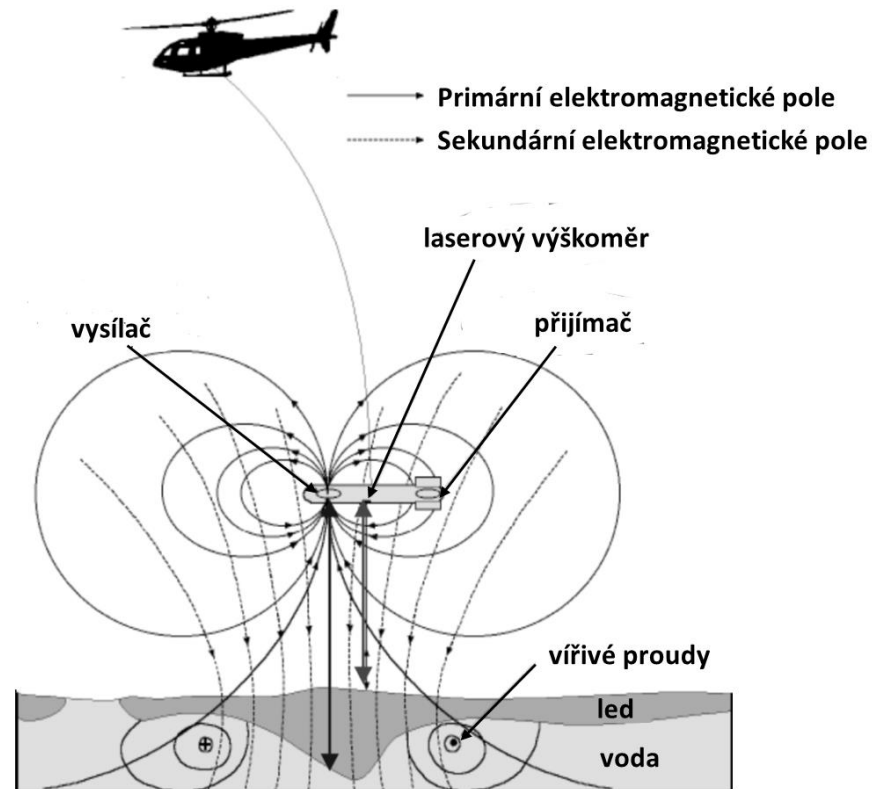
diferencovat z důvodu jejich velmi malého vodivostního rozdílu [6]. Výsledná vzdálenost Z_E je následně stanovena jako poměr intenzit sekundárního (H_s) a primárního (H_p) elektromagnetického pole. Měřicí aparatura EM31 pracuje s měřicí frekvencí 9,8 kHz [6].



Obr. 2 Princip měření tloušťky ledu pomocí měřicího zařízení EM31/ICE: Z_E [m] - vzdálenost mezi měřicí aparaturou a spodní hranicí ledu, Z_L [m] - vzdálenost mezi měřicí aparaturou a sněhovým povrchem, Z_S [m]- hloubka sněhové pokrývky, Z_I [m]- tloušťka samotného ledu, H_p - primární elektromagnetické pole, H_s - sekundární elektromagnetické pole [6] - upraveno

Dalším často používaným zařízením je EM bird. Tento systém využívá stejného principu měření jako výše zmíněný EM 31 Geonics. EM bird je systém určený pro měření tloušťky ledu z paluby vrtulníku. Tudiž umožňuje rychlý monitoring rozsáhlých oblastí. Samotná sonda včetně měřicí elektroniky je uložena ve válcovitém pouzdře, které je zavěšeno pod vrtulníkem. Sonda je vybavena dvojicí cívek Tx a Rx, celkový proces měření je stejný jako v případě EM 31. EM bird oproti EM 31 umožňuje měření na dvou frekvencích a to 3,68 kHz a 112 kHz. Těž je vybaven laserovým výškoměrem pro stanovení výšky sondy nad snímaným povrchem. Informace o výšce sondy je dále využívána pro výsledné stanovení tloušťky ledu [18]. Nutnost současného měření výšky sondy nad povrchem vyplývá s fyzikálního principu samotné měřicí metody, kdy indukční snímač EM bird snímá vzdálenost sonda – rozhraní voda/led. Ostatní prostřední, tedy vzduch, sněhová vrstva a samotný měřený led nelze díky jejich nízkému vodivostnímu

rozdílu rozeznat [11]. Výškoměr tedy umožňuje tuto nejistotu snížit a vzájemně nerozeznatelná prostředí zůstávají sněhová a ledová vrstva. Schématické vyjádření samotného měření je uvedeno na Obr. 3 [18].



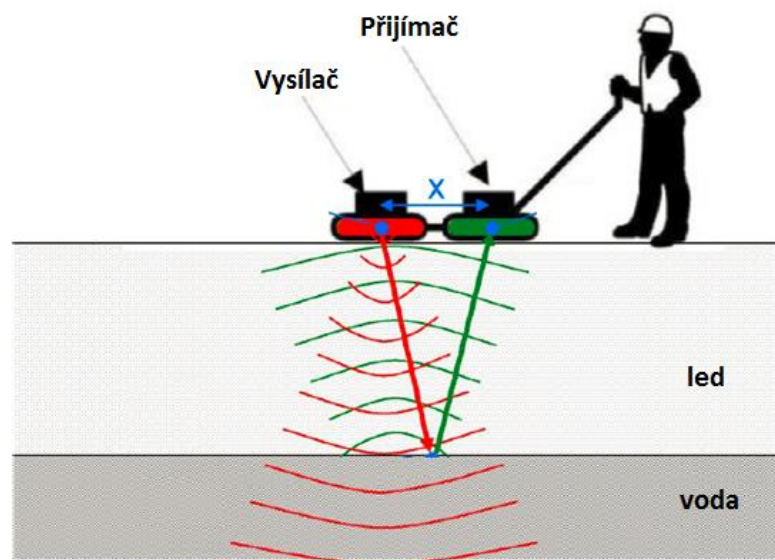
Obr. 3 Základní princip měření systémem EM bird: Primární elektromagnetické pole – pole generované vysílačem, Sekundární elektromagnetické pole – měřené pole [18] – upraveno

2.3 Georadar

Georadar (GPR – Ground Penetrating Radar) je dnes velice rozšířenou technologií, jejíž princip je založen na rozdílné rychlosti šíření elektromagnetických vln prostředími s rozdílnými dielektrickými vlastnostmi. První, kdo se zabýval využitím tohoto principu pro detekci podpovrchových struktur, byl německý vědec Hülsenbeck a to již v roce 1926 [19]. Postupně následovaly další aplikace, mezi které řadíme hledání solných depozic, zdrojů pitné vody a v neposlední řadě též stanovení mocnosti ledu. V průběhu sedmdesátých let s rozvíjejícími se vesmírnými programy rostl zájem o tuto technologii a to především pro lunární průzkum [20]. V dnešní době nalezlo GPR své uplatnění v řadě

rozdílných odvětví jako jsou stavebnictví, silniční provoz, geotechnika, kriminalistika, letectví, lodní doprava [21] a v neposlední řadě též nedestruktivní měření tloušťky ledu, kde její význam roste s častým využíváním tzv. ledových cest a mostů, které jsou čím dál více využívány v severních oblastech Kanady, Aljašky, severní Evropy a Asie k přepravě materiálu [22].

GPR pracuje na bázi běžného radaru, tedy k detekci podpovrchových struktur využívá odrazů vysokofrekvenčních rádiových vln, které sám emituje. Tyto vlny se na rozhraních dvou prostředí s rozdílnými dielektrickými vlastnostmi částečně odrážejí. Odrazy jsou registrovány přijímací anténou a následně vyhodnoceny. Sledovanými parametry jsou doba mezi vysláním elektromagnetické vlny a přijetím jejího odrazu a relativní permitivita podloží, která má zásadní vliv na rychlost šíření a útlum elektromagnetické vlny. Z těchto parametrů je následně stanovena hloubka rozhraní, které odraz zapříčinilo [21]. Princip měření je uveden na Obr. 4.



Obr. 4 Základní princip měření tloušťky ledu pomocí GPR: x – označuje vzdálenost mezi vysílací a přijímací anténou [23] – upraveno

Georadary dnes pracují ve frekvenčním rozsahu 10 MHz až 2,6 GHz [24]. Samotná volba frekvenčního rozsahu má zásadní vliv na požadovanou hloubku průzkumu a rozlišení měření. Obecně platí, že nižší frekvence umožňují větší hloubkový průzkum s nižším rozlišením. Vyšší frekvence poskytují větší vertikální rozlišení obrazu na úkor hloubkového rozsahu průzkumu [24]. Dalším faktorem majícím zásadní vliv na hloubku

průzkumu jsou dielektrické vlastnosti podloží, z nichž má dominantní vliv především elektrická vodivost. Rostoucí elektromagnetická vodivost podloží způsobuje slábnutí procházejících elektromagnetických vln, čímž je omezena penetrační hloubka [24].

GPR je v současné době často používán pro sledování mocnosti ledu. Je to především pro jeho schopnost vzájemně diferencovat a samostatně měřit tloušťky vrstev sněhu a ledu. To je možné díky dostatečným dielektrickým rozdílům jednotlivých prostředí [3]. Další kladnou vlastností GPR je možnost postihnout i relativně velké oblasti díky možnosti provádět mobilní měření, kdy samotná aparatura je tažena za dopravním prostředkem. Tyto přednosti dnes umožňují využívání GPR pro účely zajištění bezpečnosti při provozu ledových cest a mostů, kde poskytují odpovědi na otázky, jako jsou: kudy je vhodné cesty vést; stanovení termínů pro bezpečný provoz cest, stanovení bezpečných rychlostních a váhových limitů [22]. Příklad takového nasazení GPR je uveden na Obr. 5.



Obr. 5 Měřicí aparatura pro sledování mocnosti ledu na ledových cestách, na obrázku je uveden detail jak na samotnou GPR jednotku (pravý dolní roh), tak na monitor výsledků měření (levý dolní roh) [22]

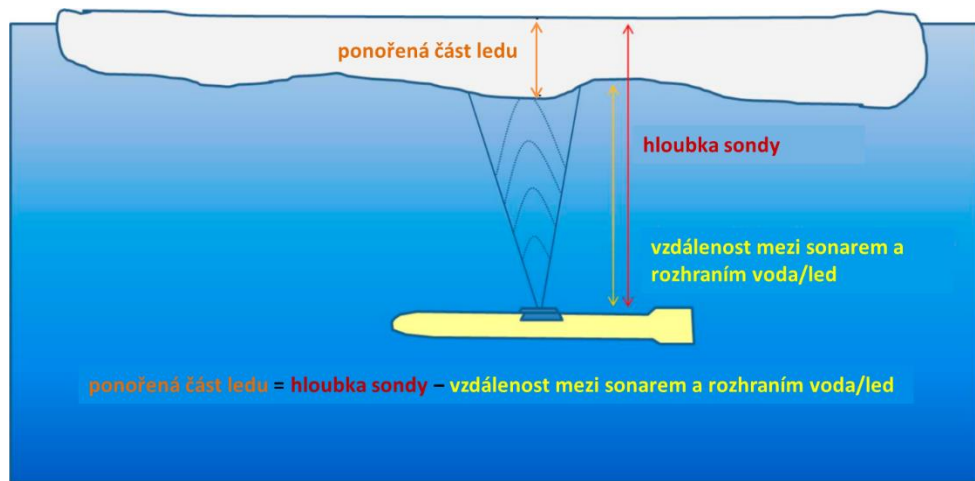
GPR se používají i pro účely sledování změny tloušťky horských ledovců. Ty jsou dnes objektem zájmu intenzivního studia z důvodu probíhajících klimatických změn. Pro průzkumy horských ledovců se používají georadary s nižšími operačními frekvencemi v rozsahu 12,5 MHz [25] až 70 MHz [26], které umožňují proniknout do značných

hloubek. GPR umožňují vedle měření tloušťky ledové masy též poskytnout informace o její struktuře a morfologii dna [26].

2.4 Sonar

Sonary jsou senzory využívající odrazů akustických vln pro stanovení vzdálenosti a tvaru překážky, která je vyvolala. Z pohledu zdroje akustického signálu je možné sonary rozdělit do dvou skupin, na aktivní a pasivní. Pasivní sonary negenerují žádný akustický signál, jedná se pouze o soustavu mikrofonů, které monitorují okolní akustický signál, z něhož je následně možné stanovit jeho směr a zdroj [27]. Druhá skupina sonarů je vybavena vedle přijímače též vysílačem (projektorem) akustického signálu. Princip funkce aktivních sonarů lze popsat následovně: vysílač vyzařuje pod vodní hladinou akustický signál. Tento signál se po nárazu na předmět odrazí a je následně zachycen přijímačem. Z doby, která uplynula mezi vysláním a přijetím odražené vlny a ze známé rychlosti šíření akustických vln ve vodě je následně stanovena vzdálenost předmětu, který byl příčinou odrazu [27].

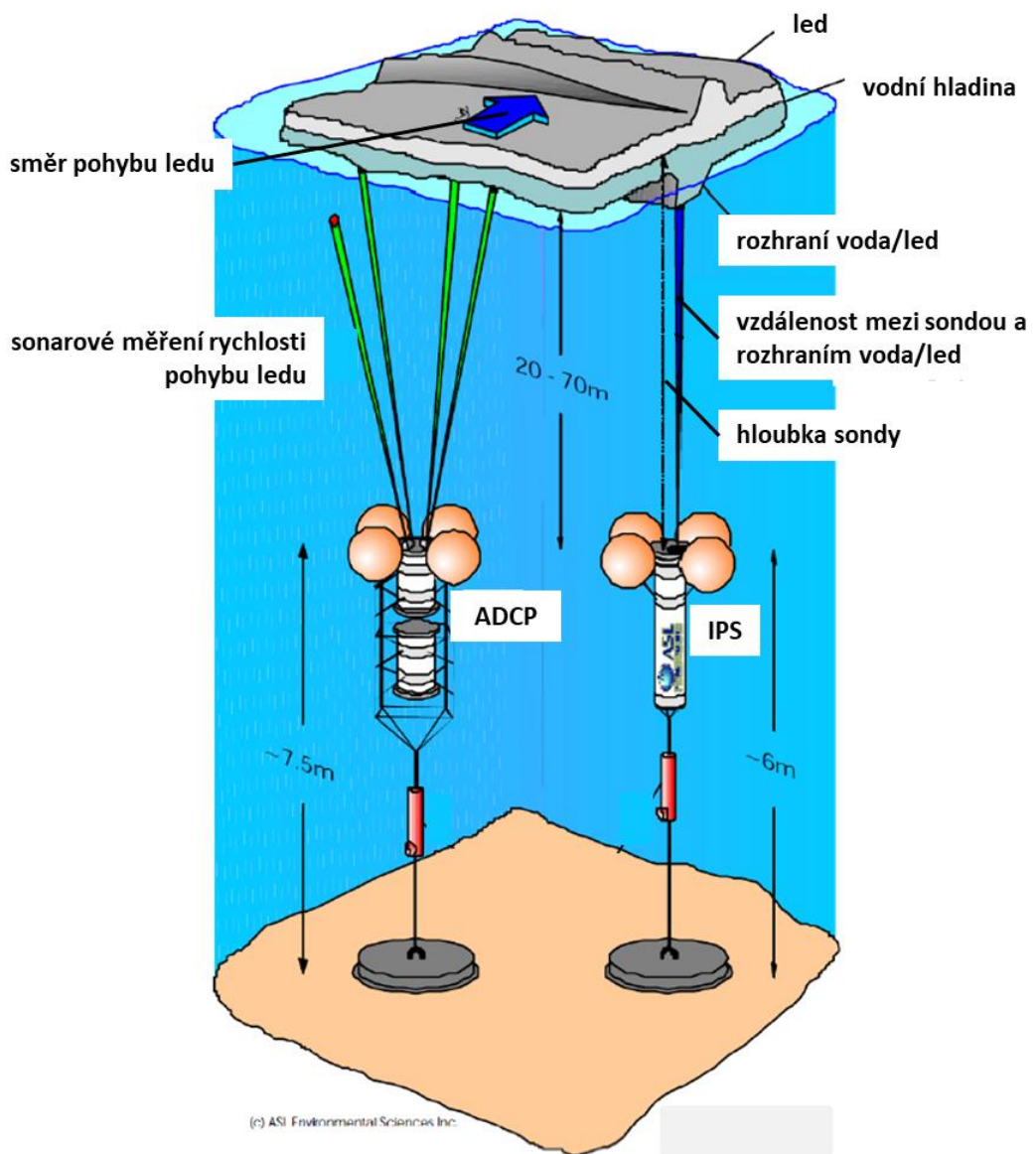
Aktivní sonary jsou pro účely měření mocnosti ledu často využívány. Pomocí sonaru je možné měřit tloušťku té části ledu, která je ponořena pod hladinou. Samotné stanovení tloušťky vychází z rozdílu vzdáleností mezi sonarem - ponořenou částí ledu a hloubkou, ve které se sonar nachází [7]. Systémy využívající sonar pro měření tloušťky ledu lze rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří systémy, pracující na principu ponořené bóje, kdy sonar je umístěn na fixním místě pod hladinou a z této pozice měří tloušťku ledu v daném místě. Druhou skupinu tvoří měření, uskutečněná z pohyblivých podvodních platforem, kterými bývají ponorky či podvodní autonomní sondy (AUV - Autonomous Underwater Vehicles). Mohou tedy mapovat mocnost ledu na trase plavidla. [28]. Princip stanovení mocnosti ponořené části ledu lze popsat následovně: pomocí sonaru je změřena vzdálenost plavidla od spodní strany ledu. Hloubka plavidla se stanoví z tlaku okolní vody. Výsledná mocnost ledu v daném místě je tedy rovna rozdílu obou hodnot [29]. Princip měření a výpočtu je uveden na Obr. 6.



Obr. 6 Princip měření a výpočtu tloušťky ledu sonarem instalovaným na AUV (Autonomous Underwater Vehicles), ponořená část ledu – výsledná tloušťka ponořené části ledu [m] [29] - upraveno

Systémy kategorie stacionárních měřicích sonarových platform jsou často využívány v oblastech, jako jsou Ochotské moře, Kaspické moře, Baffinův záliv a Labradorské moře pro sledování jednak mocnosti, ale též rychlosti a směru pohybu ledových mas z důvodu zajištění větší bezpečnosti lodní dopravy [30]. Tyto měřicí platformy se obvykle skládají ze dvou samostatných systémů. Těmi jsou: IPS (Upward-looking Ice Profiling Sonar), který slouží k měření mocnosti ledu a ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), což je systém využívaný ke sledování rychlosti a směru pohybu ledových mas. IPS systém se skládá ze sonaru, který je ukotven k mořskému dnu a pomocí bójí udržován v dané hloubce. Sonar generuje akustické pulsy o frekvenci 430 kHz, ty jsou směřovány k ledu. Z doby, která uplyne od vyslání pulsu k zachycení echa, je stanovena vzdálenost senzoru od spodní hranice ledové masy. K stanovení tloušťky ponořené části ledu je následně nutná znalost přesné hloubky sonaru. K tomuto účelu je IPS systém vybaven senzorem tlaku, který umožní stanovit hloubku pod hladinou vody, ve které se senzor nachází a která se v průběhu dne důsledkem střídání přílivu a odlivu mění [31]. ADCP systém využívá Dopplerova jevu ke stanovení rychlosti a směru proudění vody a ledové masy. ADCP systém je opět ukotven k mořskému dnu a vybalancován ve stanovené hloubce pomocí bójí. Samotný systém pro měření rychlosti proudění se skládá ze čtyř sonarových senzorů, které jsou rovnoměrně čtvercovitě rozmístěny. Tyto sonary generují akustické vlny pod úhlem 20°. Na základě rozdílů frekvencí generovaných a snímaných odražených vln jsou

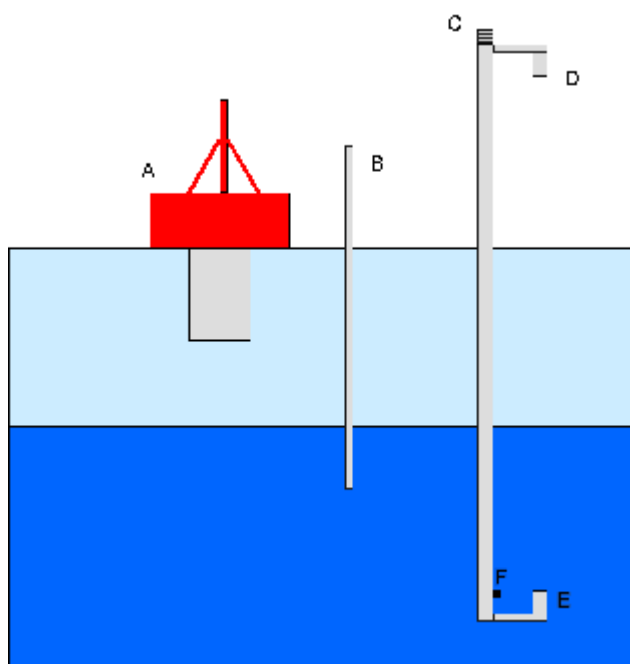
podle Dopplerova jevu stanoveny výsledné rychlosti [31]. Princip systémů IPS a ADCP je demonstrován na Obr. 7.



Obr. 7 Princip funkce sonarových systémů IPS a ADCP [31] - upraveno

Dalším systémem, který se používá pro monitoring mocnosti ledu a využívající akustických senzorů je tzv. IMB (Ice Mass-balance Buoy). Jedná se o hybridní systém, který je vybaven kombinací akustických senzorů a termistorových teploměrů. Samotná konstrukce se skládá z dvojice akustických senzorů, které jsou umístěny nad a pod ledem. Svrchní senzor slouží ke sledování tloušťky sněhové vrstvy a sonar pod vodní hladinou sleduje stav ponořené části ledu. V celé tloušťce ledu je dále umístěn pás termistorových

teploměrů, díky kterým je možné stanovit tloušťku té části ledu, vyčnívající nad hladinu [32]. Pomocí kombinace těchto metod je možné v daném místě sledovat mocnost jednotlivých vrstev tedy vzájemně separovat vrstvu sněhu a ledu v daném místě. Systém je dále vybaven systémem GPS, pro možnost sledování aktuální polohy bóje a systémem pro satelitní komunikaci, který zajišťuje průběžný přístup k měřeným datům. IMB je určen pro instalaci na již vytvořené ledové mase, a nedisponuje systémem, který by mu umožňoval plout po hladině, z tohoto důvodu je vhodný pro instalaci v oblastech, kde nedochází k úplnému tání ledu v období letních měsíců [33]. Princip měření pomocí systému IMB je uveden na Obr. 8.



Obr. 8 Popis měřicího systému IMB: A – centrální část systému, zde jsou umístěny systémy pro sběr dat, systém satelitní komunikace, GPS systém, baterie a barometr. B – pás termistorových teploměrů. C – senzor pro měření teploty vzduchu. D, E – akustické senzory pro měření tloušťky sněhu a ponořené části ledu. F – senzor pro měření teploty vody [34] - upraveno

2.5 Laserové a radarové výškoměry

Pro účely monitorování mocnosti ledu jsou v dnešní době často používány laserové a radarové výškoměry. Jako nosičů těchto měřicích systémů bývá využíváno letadel a satelitů, díky čemuž umožňují sledování rozsáhlých oblastí. Obě metody pracují na

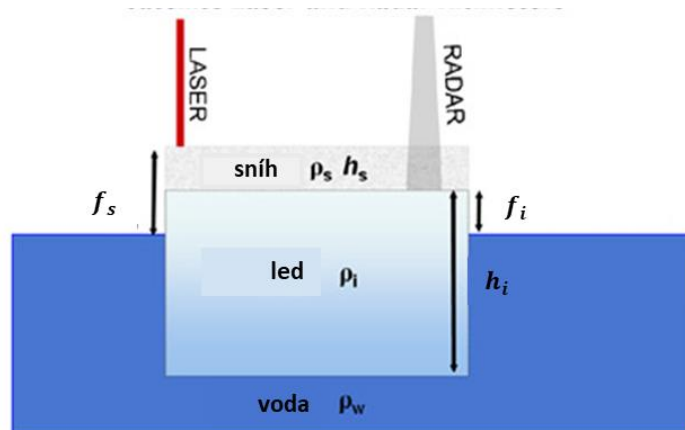
podobném principu, který spočívá v měření doby příjmu odražených elektromagnetických vln, od měřeného povrchu. Z této doby se následně staví výsledná vzdálenost od měřené plochy [35]. Radarové výškoměry operují ve frekvenčním rozsahu 0,4 – 44 GHz, volba konkrétní frekvence emitovaných vln vždy záleží na aplikaci, tedy zdali bude měření probíhat z paluby letadla či satelitu a z jaké výšky bude měřeno [35]. Konkrétně satelitní radarové výškoměry operují na frekvencích 2 – 18 GHz [36]. Řada laserových výškoměrů využívá měřících laserových pulsů o vlnových délkách 532 [37], 900 [38], 904 [39] a 1 064 nm [38].

Stanovení tloušťky ledu pomocí výškoměrů se skládá ze dvou základních kroků. Prvním krokem je výpočet výšky tzv. Snow/Ice Freeboardu, který vyjadřuje vzdálenost mezi hladinou a svrchní stranou sněhové/ledové vrstvy. V druhém kroku je dopočítána ponořená část ledu a tak stanovena celková mocnost ledu.

S využitím laserového výškoměru jsme schopni stanovit pouze souhrnnou tloušťku vynořené části ledu a sněhové vrstvy, z důvodu neprostupnosti sněhové vrstvy pro laserový paprsek. Pomocí radarového výškoměru lze měřit samostatnou tloušťku vynořené části ledu, jelikož měřicí signál proniká sněhovou vrstvou [36]. Princip měření je uveden na Obr. 9. Tloušťku vynořené části ledu a sněhu lze z naměřených dat stanovit pomocí vztahu (2.1) [39]:

$$F = h_{GPS} - H_{laser/radar} - N \quad (2.1)$$

kde F [m] vyjadřuje tloušťku sněhové vrstvy a vynořené části ledu (měřeno laserovým výškoměrem) případně pouze vynořené části ledu, pokud bylo měření uskutečněno radarovým výškoměrem, h_{GPS} [m] výšku měřicí aparatury stanovenou dle GPS, $H_{laser/radar}$ [m] vzdálenost aparatury od sněhového/ledového povrchu změřenou výškoměrem, N [m] výšku hladiny stanovenou na základě fyzikálního modelu povrchu Země (geoid) [39].



Obr. 9 Princip měření tloušťky ledu pomocí radarových a laserových výškoměrů: ρ_s [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – hustota sněhu, ρ_i [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – hustota ledu, ρ_w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – hustota vody, h_s [m] – tloušťka sněhové vrstvy, f_i [m] – označuje tloušťku vynořené části ledu, h_i [m] – celková tloušťka ledu, f_s [m] – označuje celkovou tloušťku sněhové vrstvy a vynořené části ledu [40] - upraveno

Dalším krokem je kombinace dat získaných pomocí laserového a radarového výškoměru a stanovení tak samotné tloušťky sněhové vrstvy a vynořené části ledu v dané oblasti. Na základě měření laserovým výškoměrem jsme stanovili celkovou tloušťku vynořené části ledu a sněhové vrstvy. Po odečtení tloušťky vynořené části ledu, která je výsledkem měření radarovým výškoměrem, jsme schopni stanovit tloušťku sněhové vrstvy. Pomocí známé tloušťky sněhové vrstvy a vynořené části ledu jsme schopni na základně rovnice hydrostatické rovnováhy stanovit tloušťku ponořené části ledu a následně tedy i celkovou mocnost ledu [41]. Samotný výpočet výsledné tloušťky ledu lze uskutečnit na základě vztahu (2.2) [41]:

$$h_i = \frac{f_s \cdot \rho_w}{(\rho_w - \rho_i)} + \frac{h_s \cdot (\rho_s - \rho_w)}{(\rho_w - \rho_i)} \quad (2.2)$$

kde h_i [m], h_s [m], f_s [m] postupně vyjadřují výslednou tloušťku ledu, sněhové vrstvy a souhrnnou výšku vynořené části ledu a sněhové vrstvy. ρ_w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], ρ_i [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], ρ_s [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] vyjadřují známou hustotu vody, ledu a sněhu [41].

Stanovení mocnosti ledu na základě výškoměrů nese řadu potenciálních nepřesností. Řada z nich je spojena se samotným měřením, kde se projevují rušivé vlivy atmosféry, nepřesnosti související se změnou výšky hladiny v důsledku střídání přílivu a odlivu, které

nelze zcela spolehlivě potlačit. Další rušivé vlivy jsou spojeny s výsledným výpočtem, kde zásadní vliv hustoty ledu a sněhu, které nejsou ještě pro všechny sledované oblasti známy a na jejichž velikost má zásadní vliv i tloušťka těchto vrstev a v případě sněhu i jeho stáří [42]. Výhodou těchto metod však je možnost snadného sledování tloušťky ledu a sněhové vrstvy pro rozsáhlé oblasti.

2.6 Kapacitní metody

Základní princip kapacitních metod vychází z rozdílných dielektrických vlastností jednotlivých měřených médií, ke kterým dochází v průběhu zámrazu a tání. Zvláště sledovaným parametrem citlivým na tyto změny je relativní permitivita materiálu. Proces měření tloušťky ledu ovlivňují prostředí vzduch voda a led. Vzájemné rozdíly permitivit těchto tří prostředí jsou markantní a tedy dobře měřitelné. Zvláště rozdíl mezi vodou a ledem. Tyto změny prostředí vyvolávají změnu kapacity na výstupu senzoru. Základní princip funkce těchto metod lze pospat pomocí vztahu (2.3):

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (2.3)$$

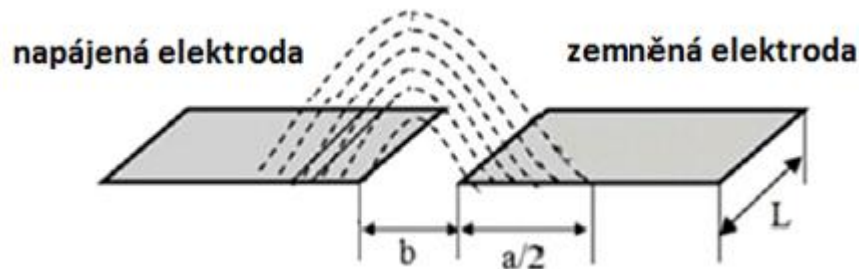
kde C [F] vyjadřuje výslednou kapacitu senzoru. S [m²] a d [m] vyjadřují velikost společné plochy elektrod senzoru a jejich vzájemnou vzdálenost. ε_0 označuje permitivitu vakua ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F·m⁻¹). ε_r [-] značí relativní permitivitu prostředí. Vztah (2.3) platí za předpokladu, že vzdálenost desek elektrod je zanedbatelná oproti jejich ploše. V průběhu měření zůstávají ε_0 , S a d konstantní, podle vztahu (2.3) závisí tedy výsledná kapacita na velikosti ε_r , které se v důsledku zámrazu a tání vody značně mění.

Kapacitní senzory nejsou v současné době ve větším měřítku používány pro sledování mocnosti ledu na přírodních vodních plochách. Avšak se již z této oblasti začínají aplikovat první systémy. Takovým systémem, který již byl v rámci testování nasazen ve východní Antarktidě, je koplanární multi-elektrodový kapacitní senzor [43]. Jedná se o systém, který je určen pro dlouhodobé monitorování tloušťky ledu v daném místě. Koplanární kapacitní senzory se v posledních letech široce rozšířily a dnes se hojně používají pro účely měření vlhkosti a tloušťky materiálů [44].

Princip koplanárních kapacitních senzorů popisuje Obr. 10, zde jsou dvě elektrody umístěné ve stejné rovině o šířce a , délce L o zanedbatelné tloušťce a ve vzájemné vzdálenosti b . Levá elektroda je připojena ke zdroji sinusového signálu a pravá je uzemněná. Mezi takto situovanými elektrodami se vygeneruje elektromagnetické pole, které lze aproximovat do tvaru přibližného půlkruhu [45]. Celková kapacita takového kondenzátoru lze vyjádřit pomocí vztahu (2.4) [45]:

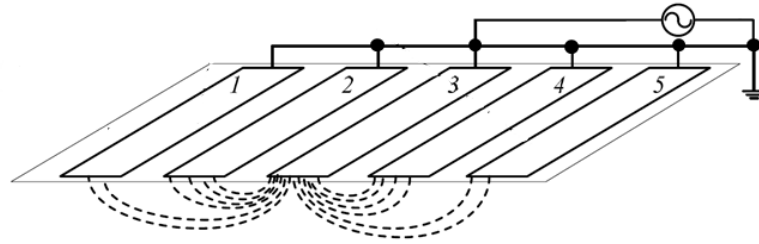
$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot L}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{a+b}{b}\right) \quad (2.4)$$

kde vzájemná vzdálenost elektrod b [m], délka L [m] a šířka a [m] jsou v průběhu měření konstantní. Poté výsledná velikost kapacity C [F] je závislá na proměnné velikosti permitivity ε_r [-] prostředí obklopujícím elektrody.



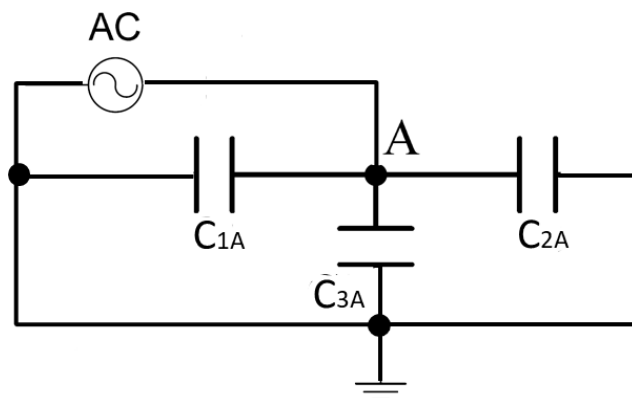
Obr. 10 Princip funkce koplanárních kapacitních čidel: b – vzájemná vzdálenost elektrod, a – šířka elektrod, L – délka elektrod [45] - upraveno

Výsledný senzor se skládá z většího počtu výše popsaných elektrod, kde každá elektroda reprezentuje 10 mm měřeného rozsahu. Výsledný počet elektrod tedy odpovídá maximální požadované měřené tloušťce. V průběhu vlastního měření je vždy jedna elektroda připojena ke zdroji sinusového signálu a zbývající elektrody jsou uzemněny. Po proměření je ke zdroji připojena následující elektroda a ostatní jsou opět uzemněny, celý proces je opakován, dokud nedojde k prostřídání všech elektrod [46]. Tento systém je demonstrován na Obr. 11, kde je pro ukázkou uvedeno 5 koplanárních elektrod. Elektroda č. 3 je napájena a zbývající elektrody jsou uzemněny.

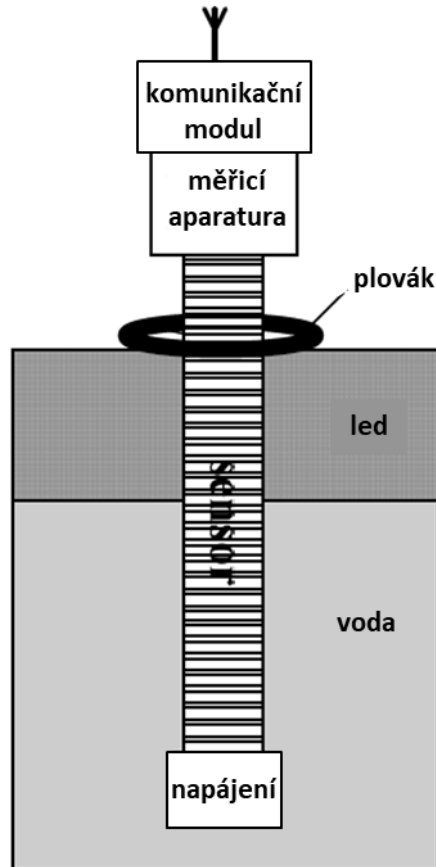


Obr. 11 Model koplanárního multi-elektrodového kapacitního senzoru [46] – upraveno

Náhradní schéma, kterým lze tento systém charakterizovat, je uvedeno na Obr. 12. Systém lze popsat třemi paralelně zapojenými kondenzátory. Kapacity C_{1A} [F] a C_{2A} [F] představují ekvivalentní kapacitu mezi napájenou elektrodou a zemněnými elektrodami, které ji z obou stran obklopují, C_{3A} [F] vyjadřuje kapacitu napájené elektrody vůči zemi. Celková kapacita, tohoto ekvivalentního obvodu se tedy stanoví jako součet dílčích kapacit $C_{1A} - C_{3A}$ [46]. V bodě A je měřena velikost napětí, které závisí na celkové kapacitě. Tento signál je následně dále zpracováván. Samotné měření je postupně provedeno u všech elektrod a na základě velikosti dílčích napětí je stanovena výsledná tloušťka ledu [43]. Schéma výsledné měřicí aparatury je uvedeno na Obr. 13.



Obr. 12 Náhradní schéma koplanárního multi-elektrodového kapacitního senzoru: AC – zdroj sinusového signálu, A – uzel, kde je sledována velikost napětí, $C_{1A} - C_{3A}$ – dílčí kapacity [46] - upraveno



Obr. 13 Schéma měřicí aparatury koplánárního multi-elektrodového kapacitního senzoru: komunikační modul – modul pro bezdrátovou komunikaci, umožňující vzdálený sběr dat; plovák – plovák, který stabilizuje senzor na měřeném místě; senzor – soustava měřících koplánárních elektrod; napájení – zdroj energie (olověný akumulátor 12 V 80 Ah) – zajišťuje provoz aparatury po dobu 1 roku [43] - upraveno

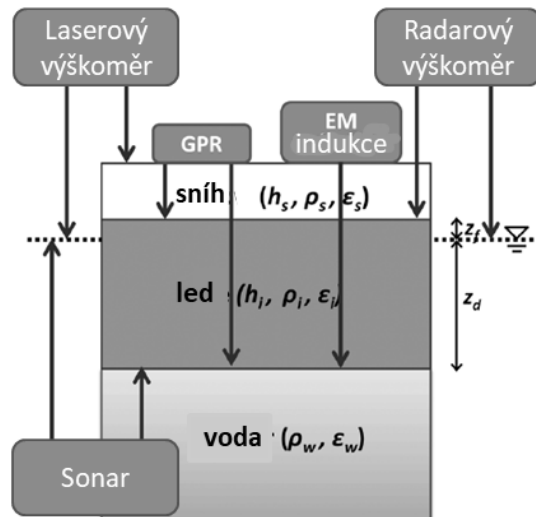
Kapacitní senzory nejsou dosud ve větší míře používány pro účely měření tloušťky ledu na přírodních vodních plochách, své uplatnění našly především v průmyslu a letecké dopravě, kde se užívají k detekci a měření velikosti námrazy. Právě v oblasti letecké dopravy se používají k měření tloušťky námrazy v palivovém potrubí [47] a na křídlech letadel [48, 49], kde je sledování těchto parametrů důležité k zajištění bezpečnosti provozu letadla. Kapacitní senzory jsou též využívány pro detekci námrazy na vozovkách [50].

3 Závěry ze současného stavu poznání

Sledování tloušťky ledu je dnes aktuální problematikou. Tloušťka ledu je sledována z řady důvodů, kterými jsou zajištění větší bezpečnosti při pohybu po ledové ploše, monitorování klimatických změn [1], provoz ledových cest a mostů [2] a zajištění větší bezpečnosti lodní dopravy [30]. Metody užívané pro tato měření lze rozdělit do dvou skupin, na destruktivní a nedestruktivní.

Sondáž zamrzlé vodní plochy je řazena mezi destruktivní metody. Jedná se o metodu velice spolehlivou a přesnou, nicméně má malé plošné rozlišení, neumožňuje automatizovat proces měření a též představuje potenciálně vysoké riziko úrazu pro osobu vykonávající měření [6]. Nicméně se jedná o velice rozšířenou metodu na území ČR, kde ji využívá Policie ČR pro monitoring zamrzlých vodních ploch [13].

Mezi nedestruktivní metody řadíme metody založené na principu elektromagnetické indukce, georadary, sonarové metody, radiolokační a laserové výškoměry a kapacitní metody [5–7, 43]. Tyto metody jsou shrnuty na Obr. 14.



Obr. 14 Nedeštruktivní metody měření tloušťky ledu – shrnutí: Laserový/Radarový výškoměr – měření pomocí laserového/radarového výškoměru, GPR – georadar; EM indukce – metody založené na principu elektromagnetické indukce; Sonar – sonarové metody; sníh (h_s [m], ρ_s [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], ϵ_s [-]) – výška, hustota a relativní permitivita sněhu; led (h_i [m], ρ_i [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], ϵ_i [-]) – výška, hustota a relativní permitivita ledu; voda (ρ_w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], ϵ_w [-]) – hustota a relativní permitivita vody; Z_f [m] – tloušťka vyořené části ledu; Z_d [m] – tloušťka ponořené části ledu [3] - upraveno

Metody založené na principu elektromagnetické indukce jsou využívány především pro možnost sledování relativně rozsáhlých oblastí z paluby lodi či letadla [12]. Bohužel, jejich zásadním nedostatkem je neschopnost vzájemně diferencovat sněhovou a ledovou vrstvu z důvodu jejich nízkého vodivostního rozdílu [6].

Georadary představují ze skupiny nedeštruktivních metod nejpreciznější metodu, která díky dostatečným dielektrickým rozdílům jednotlivých vrstev umožňuje navíc rozlišit a samostatně změřit výšku sněhové a ledové vrstvy [3]. Těž umožňují i mapování vnitřní struktury ledu. Díky těmto vlastnostem jsou georadary velice rozšířené pro účely zajištění provozu ledových cest a mostů [22] a v oblasti glaciologie k průzkumu horských ledovců [25]. Nevýhodou GPR je nutnost chůze/pojezdu po ledové vrstvě v průběhu měření, což představuje potenciální riziko úrazu pro obsluhu.

Sonarové systémy se používají pro sledování tloušťky ledu již dlouhou dobu. Ze své podstaty se dají tyto systémy rozdělit do tří základních skupin. První skupinu tvoří měření pořízená ze sonarů instalovaných na ponorkách či AUV, které poskytují data z rozsáhlých

oblastí [28]. Druhou skupinu tvoří ponorné stacionární platformy, které slouží k monitoringu tloušťky (IPS platforma) a směru pohybu ledových mas (ADCP platforma). Tyto systémy se často používají pro zajištění větší bezpečnosti lodní dopravy [30]. Nevýhodou obou těchto systémů je možnost měřit tloušťku pouze ponořené části ledu. Tuto nevýhodu odstraňuje třetí skupina. Jedná se o hybridní systém, nazvaný IMB, který slučuje akustický senzor pro měření tloušťky ponořené části ledu a sněhové vrstvy a termistorové teplotní senzory, které umožňují měřit tloušťku vynořené části ledu. Sloučením těchto dat je možné stanovit samostatně celkovou tloušťku ledu a sněhové vrstvy [32]. Bohužel tento systém je určen pouze k měření ledu, který v letních měsících zcela neroztaje, z důvodu své konstrukce, což omezuje jeho aplikovatelnost pouze na polární oblasti [33]. Výhodou systému z druhé a třetí skupiny je i možnost automatizace měřicího procesu.

Laserové a radarové výškoměry měřící tloušťku ledu z paluby letadla či satelitu jsou dnes velice rozšířené systémy, jelikož umožňují sledování rozsáhlých oblastí. Pomocí laserových výškoměrů jsme schopni změřit pouze souhrnnou tloušťku vynořené části ledu a sněhu, z důvodu nepropustnosti sněhové vrstvy laserovým paprskům. Radarovým výškoměrem jsme schopni změřit pouze výšku vynořené části ledu [36]. Po kombinaci výsledků z obou měření a s využitím znalostí o hustotě vody, ledu a sněhu jsme schopni na základě rovnice hydrostatické rovnováhy stanovit celkovou tloušťku ledu [41]. Bohužel je tato výsledná tloušťka zatížena jistou nepřesností, která je způsobena rušivými vlivy atmosféry, nepřesností související se změnou výšky hladiny v důsledku střídání přílivu a odlivu, které nelze zcela spolehlivě potlačit a vliv hustoty ledu a sněhu, které nejsou ještě pro všechny sledované oblasti známy [42].

Kapacitní senzory nejsou v současné době ve větším měřítku používány pro sledování mocnosti ledu na přírodních vodních plochách. Doposud se využívají především v oblasti leteckého průmyslu pro účely měření tloušťky námrazy v palivovém potrubí [47] a na křídlech letadel [48, 49]. Dále se též využívají k detekci námrazy na vozovkách [50]. Pro účely sledování tloušťky ledu na přírodních vodních plochách je v současné době vyvíjen a testován systém pod názvem Koplanární multi-elektroodový kapacitní senzor [43]. Tento systém je určen pro monitoring mocnosti ledu v daném místě a umožňuje měřit celkovou tloušťku ledu bez zkraslení způsobené sněhovou vrstvou.

Na základě literární rešerše lze říci, že kapacitní senzory představují po stránce měření tloušťky ledu na přírodních vodních plochách zatím poněkud málo prozkoumanou oblast. Dále poskytují možnost vývoje senzorových systémů, které by umožnily levný, dlouhodobý, automatizovaný monitoring tloušťky ledu v daných lokalitách. Tyto systémy by též umožňovaly měřit celkovou tloušťku ledu přesně bez zkreslení způsobené sněhovou vrstvou.

4 Cíle disertační práce a vědecké hypotézy

Sledování tloušťky ledu je dnes aktuální problematikou. Tloušťka ledu je sledována z řady důvodů, kterými jsou zajištění větší bezpečnosti při pohybu po ledové ploše, sledování klimatických změn, provoz ledových cest a mostů a zajištění větší bezpečnosti lodní dopravy. Z tohoto důvodu je cílem disertační práce navrhnout, realizovat a ověřit novou metodu měření, která by umožňovala jednoduše a automaticky indikovat tloušťku ledu.

Na základě literární rešerše dosud publikovaných informací bude navržena vhodná metoda vyhodnocování tloušťky ledu včetně teoretického rozboru návrhu vlastního čidla, jeho uspořádání, bude provedena analýza rozložení elektromagnetického pole a budou zpracovány teoretické závislosti vyhodnocované veličiny na tloušťce ledu. Čidlo bude dále dle návrhu zkonstruováno a testováno včetně ověření jeho funkčnosti. Bude preferována jednoduchá, rychlá a spolehlivá metoda, použitelná pro nedestruktivní měření tloušťky ledu na přírodních vodních plochách.

Dílčí cíle disertační práce:

1. Na základě dostupných literárních zdrojů navrhnout vhodnou metodu umožňující nedestruktivní, přímé, průběžné a lokální měření tloušťky ledu na vodních plochách.
2. Pro zvolenou metodu měření navrhnout a realizovat měřicí sondu a vyhodnocovací jednotku, které by umožňovaly nedestruktivní, automatizované a lokální měření tloušťky ledu na vodních plochách.
3. V rámci návrhu měřicí sondy provést simulaci jejího chování v průběhu zámrazu.
4. Pro realizovaný měřicí systém stanovit závislosti sledovaných veličin na snímané tloušťce ledu.
5. Otestovat a ověřit funkčnost v laboratorních podmínkách výsledného měřicího systému.
6. Stanovit nejistoty měření výsledného měřicího systému.

V práci jsou položeny následující hypotézy:

H₁: Poměr výšky sloupce vody a ledu jako dielektrika v uzavřeném válcovém kondenzátoru lze stanovit dle jeho celkové kapacity.

H₂: Kapacitu kondenzátoru sondy lze v celém jeho rozsahu změn skupenství dielektrika voda/led vyhodnocovat podle frekvence oscilátoru, v jehož rezonančním obvodu je zapojen.

H₃: Výpočet hledané tloušťky ledu je možno provést vyhodnocením výstupního signálu oscilátoru číslicově s využitím mikrokontroleru.

5 Materiály a metody

Pro členění disertační práce je zvolen metodický postup, který chronologicky odpovídá vývoji výsledného měřicího systému od literární rešerše a návrhu vhodné měřicí metody přes návrh a realizaci měřicí sondy a vyhodnocovací jednotky po jejich testování a stanovení přesnosti.

Pro dosažení cílů disertační práce je předpokládán následující postup:

Literární rešerše je vypracována na základě dostupných tuzemských i zahraničních odborných publikací z oblasti problematiky měření tloušťky ledu. Na jejím základě budou identifikovány a zhodnoceny jednotlivé přístupy k měření tloušťky ledu z hlediska jejich použití a potenciálních omezení.

Předpokládáno je použití kapacitní měřicí metody využívající pro vyhodnocování tloušťky ledu významného rozdílu relativní permitivity ledu a vody. Pro tuto měřicí metodu bude dále navržena a realizována vhodná kapacitní měřicí sonda. Optimalizace rozměrů sondy bude provedeno na základě náhradního schématu sondy, které bude využito i pro předpokládané stanovení měřicího rozsahu sondy a též závislosti její kapacity na indikované tloušťce ledu.

Pro výsledný návrh sondy bude provedena simulace chování sondy v průběhu zámrazu pomocí metody konečných prvků (MKP). Na základě této simulace budou upřesněny předpokládané parametry sondy a bude analyzováno rozložení skalárního potenciálu uvnitř sondy v průběhu zámrazu.

Realizovaná sonda bude testována v laboratorních podmínkách cyklickým zamrzáním a táním vody v nádobě, ve které bude umístěna. Během cyklů bude měřena kapacita sondy ve frekvenčním rozsahu 100 kHz – 2 MHz. Na základě měření budou stanoveny reálné parametry sondy a optimální měřicí frekvence, které mohou být použity pro návrh vlastní měřicí a vyhodnocovací jednotky.

Na základě zjištěných parametrů sondy bude realizována měřicí a vyhodnocovací jednotka. Vyhodnocování kapacity sondy je předpokládáno dle kmitočtu oscilátoru, v jehož rezonančním obvodu bude sonda zapojena. Vyhodnocení frekvence výstupního signálu

oscilátoru a výpočet hledané tloušťky ledu je předpokládáno číslíkovým způsobem pomocí mikrokontroleru.

Převodní funkce závislosti tloušťky ledu na frekvenci oscilátoru bude stanovena na základě experimentálního zámrazu sondy v laboratorních podmínkách. V jeho průběhu budou vždy měřeny přesně definované přírůstky ledu měřeny pomocí posuvného měřítka a odečtena jim odpovídající aktuální frekvence oscilátoru. Na základě takto získaných dat bude stanovena výsledná převodní funkce mezi indikovanou frekvencí oscilátoru a aktuální tloušťkou ledu metodou polynomiální regrese.

Testování celého systému sondy s vyhodnocovací jednotkou bude provedeno následně vcelku, opět cyklickým zamrznáním a táním vody v testovací nádobě, ve které bude sonda vložena a tloušťka ledu bude sledována pomocí vyhodnocovací jednotky. Během testu budou celkem uskutečněny tři měřicí cykly, během kterých dojde k úplnému zámrazu a roztání vody ve sledované nádobě.

Stanovení nejistoty měření výsledného měřicího systému bude provedeno statistickým rozbohem dříve naměřených dat.

6 Měřicí metoda

Na základě literární rešerše se pro daný účel jeví nejvhodněji kapacitní metody, které jsou doposud jen omezeně využívány pro účely měření na přírodních vodních plochách a poskytují možnost levného, dlouhodobého a automatizovaného sledování tloušťky ledu. U kapacitních metod vyhodnocování tloušťky ledu lze dále využít významného rozdílu relativní permitivity ledu a vody. Výslednou tloušťku ledové vrstvy lze určovat ze změny kapacity, která je vyvolána změnou poměru jednotlivých dielektrických prostředí (voda/led), ke kterému dochází v důsledku zámrazu/tání. Dále je uveden a popsán princip měření, návrh, konstrukce a testování vlastního senzoru.

6.1 Měřicí metoda – princip

Navržený systém je založen na kapacitním principu, kdy je měřicí sonda umístěna svisle do měřené vodní nádrže, a to ještě před zahájením zámrazu. Sonda je ponořena do hloubky, která je omezena její délkou měřících elektrod, která též limituje maximální měřitelnou tloušťku ledu. V takovémto případě výslednou kapacitu sondy ovlivňují prostředí: vzduch, voda a led, které mají rozdílné dielektrické vlastnosti a které v průběhu zámrazu a tání mění své poměrové zastoupení. Jedná se tedy o problematiku kondenzátoru s proměnnou dielektrickou konstantou.

Princip lze demonstrovat pomocí deskového kondenzátoru na Obr. 15. Z obrázku je patrné, že se jedná o paralelně zapojenou trojici kondenzátorů C_1 [F] až C_3 [F], jejichž dielektrika se liší jejich relativní permitivitou ε_r [-], která odpovídá jednotlivým prostředím vzduch, led a voda. Celková kapacita kondenzátoru C [F] tedy odpovídá součtu těchto tří kapacit - rovnice (6.1). Vlastní kapacitu kondenzátorů C_1 až C_3 lze vyjádřit vztahy (6.2) - (6.4). Z nich je patrné, že vlivem zámrazu a tání vody se mění účinné plochy elektrod, což přímo ovlivňuje velikost kapacit C_2 a C_3 . Za předpokladu konstantní tloušťky vzduchové vrstvy ($C_1 = \text{konst.}$) je změna celkové kapacity kondenzátoru závislá na poměru ploch dílčích kondenzátorů s dielektrikem z vody a ledu. Relativní permitivita vody dosahuje při teplotě 0°C hodnoty 87,74 [-]. Relativní permitivita ledu při -2°C dosahuje pouze hodnoty

3,2 [-]. Vzniká zde tedy markantní rozdíl mezi oběma prostředími, který se projeví snižováním výsledné kapacity při postupném zámrazu.

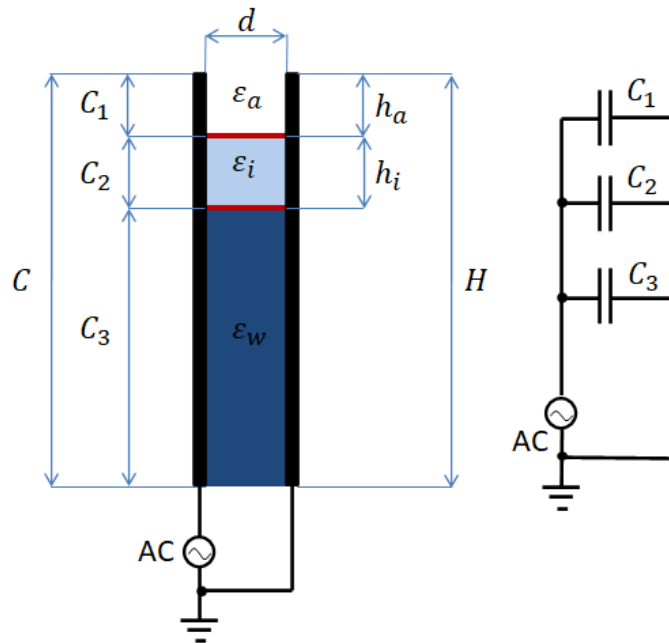
$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (6.1)$$

$$C_1 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_a \cdot \frac{a \cdot h_a}{d} \quad (6.2)$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_i \cdot \frac{a \cdot h_i}{d} \quad (6.3)$$

$$C_3 = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_w \cdot \frac{a \cdot (H - (h_a + h_i))}{d} \quad (6.4)$$

kde C [F] představuje celkovou kapacitu kondenzátoru; C_1 [F] označuje kapacitu kondenzátoru se vzduchovým dielektrikem, C_2 [F] vyjadřuje kapacitu kondenzátoru s dielektrikem tvořeným ledem, C_3 [F] označuje kapacitu kondenzátoru s dielektrikem tvořeným vodou; relativní permitivity těchto jednotlivých prostředí jsou označeny: ε_a [-] (vzduch), ε_i [-] (led), ε_w [-] (voda); H [m] vyjadřuje celkovou výšku elektrod; h_a [m], h_i [m], jsou výšky vrstev vzduch a led; d [m] označují vzájemnou vzdálenost obou elektrod, a [m] je šířka jedné elektrody. Vztah platí pro deskový kondenzátor.



Obr. 15 Princip kapacitního senzoru s proměnou dielektrickou konstantou

Způsob měření tloušťky ledu touto metodou spočívá v umístění kapacitní sondy ve vertikální poloze do sledované vodní nádrže před zahájením zámrazu. Sonda je ponořena do hloubky omezené délkou jejích elektrod. Tato délka limituje maximální měřitelnou tloušťku ledu. Při následném zamrznání vodní plochy dojde k úměrnému zámrazu sondy a změně celkové kapacity sondy způsobené změnou poměrového zastoupení jednotlivých dielektrických prostředí voda/led. Na základě změny kapacity je možné stanovit tloušťku ledu. V případě tání je princip měření tloušťky ledu obdobný.

6.2 Měřicí sonda – návrh konstrukce

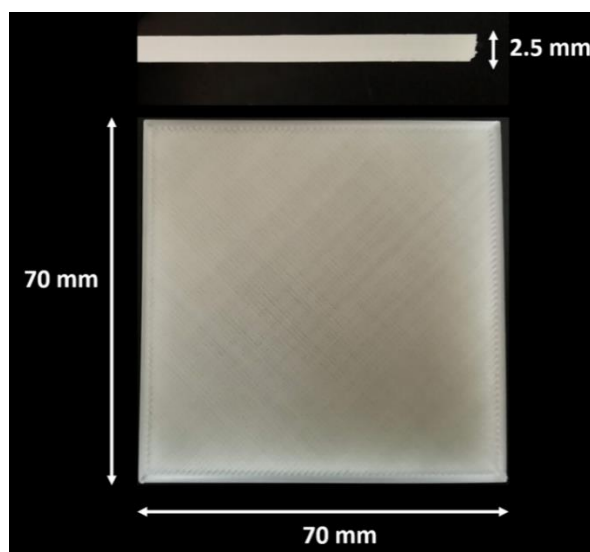
Měřicí sonda je založena na principu popsaném v kapitole 6.1. Deskový kondenzátor, na kterém byl demonstrován princip, byl nahrazen kondenzátorem s koncentrickými válcovými elektrodami. Válcové elektrody vykazují vždy větší stabilitu tvaru a mechanickou pevnost než elektrody ve tvaru rovinných desek, které jsou vyrobeny ze stejného materiálu a se stejnou tloušťkou stěn. Též lze u válcových elektrod v porovnání s elektrodami tvaru rovinných desek snadněji zajistit vzájemnou rovnoběžnost elektrod, jejíž případné nedodržení by ovlivnilo linearitu výsledné kapacitní závislosti na tloušťce ledu. V rámci návrhu bylo odvozeno náhradní schéma sondy a následně s jeho pomocí byl na základě optimalizace, s ohledem na maximální měřicí citlivost a běžně dostupné materiály, stanoven průměr vnější elektrody.

6.2.1 Výběr konstrukčních materiálů pro realizaci pláště a ochranného dielektrika vnější elektrody a stanovení jeho dielektrických vlastností

Z důvodu použití válcového tvaru sondy bylo pro účely vyhotovení pláště a ochranného dielektrika vnější elektrody využito 3D tisku. 3D tisk dovoľoval vytvořit tyto části sondy, v takové podobě, která umožňovala se maximálně přizpůsobit tvaru vnější elektrody, bez nutnosti se omezovat na standardně vyráběné komponenty, které nebylo možné obstarat v odpovídajících rozměrech. Bohužel dielektrické vlastnosti materiálů používaných pro 3D tisk nejsou dostatečně popsány v operačním frekvenčním rozsahu sondy [51]. Většina publikovaných studií z této oblasti je zaměřena na popis mechanických [52, 53] a tepelných vlastností [54] těchto materiálů. Z tohoto důvodu bylo nutné tyto vlastnosti stanovit experimentálně. Tato problematika byla předmětem publikací [51, 55].

Testovanými vlastnostmi byla relativní permitivita a ztrátový činitel potenciálních materiálů. Zvažovanými materiály byly PETG (polyethylene tetra ftalát glykol), PLA (kyselina polyléčná), ABS (akrylonitril-butadien-styren) a ASA (akrylonitril akrylát styren), což jsou nejčastěji využívané materiály z oblasti 3D tisku [56, 57]. V případě materiálu PLA byl také testován vliv pigmentačních barviv na dielektrické vlastnosti daného materiálu.

Testované vzorky byly desky čtvercového tvaru se stranou o délce 70 mm a tloušťce 2,5 mm (Obr. 16). Pro výrobu vzorků byla použita 3D tiskárna Prusa i3 MK3S+ (Prusa Research). Vzorky byly vytištěny při nastavení tiskárny na rozlišení 50 μm a hustotu výplně 100 %. Tato tisková nastavení by měla zajistit maximální možnou homogenitu a hustotu vnitřní struktury vzorků. Parametr úhel vyplnění byl ponechán ve výchozím nastavení 45°. Pro tisk byl použit filament 1,75 mm společnosti FilamentPM. Vzorky materiálu PLA byly vyrobeny ve třech barevných modifikacích: bezbarvé, silver a metallic green. Důvodem testování těchto barevných modifikací bylo stanovit vliv přísad pigmentačních barviv na dielektrické vlastnosti materiálů. Vzorky PETG, ABS a ASA byly připraveny pouze v bezbarvém provedení.



Obr. 16 Rozměry testovaných vzorků s detailem tloušťky vzorku (tloušťka 2,5 mm) [55]

Testované vlastnosti materiálů byly vyhodnocovány ve frekvenčním pásmu 1-100 MHz. Měření bylo prováděno RF impedance/material analyzerem Agilent E4991A. Náhradní schéma měřicího obvodu je uvedeno na Obr. 17, fotografie měřicího pracoviště je uvedena na Obr. 18. Pro hledané parametry vzorku platí vztahy (6.5) a (6.6).

$$Q = \omega \cdot C_p \cdot R \quad (6.5)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q} = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R} \quad (6.6)$$

kde R [Ω], C_p [F] jsou paralelní náhradní kapacita a ztrátový odpor vzorku, $\operatorname{tg} \delta$ [-] ztrátový činitel a Q [-] činitel jakosti obvodu.

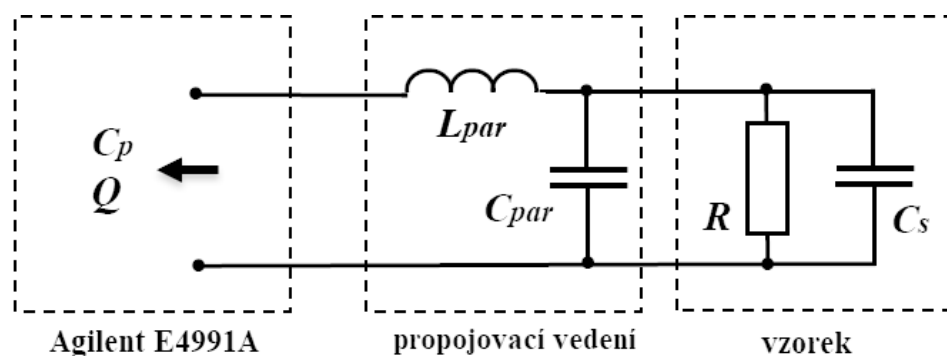
Hodnota relativní permitivity byla určena proporcionálně z kapacity zkoumaného vzorku a kapacity teflonového etalonu. Přepoččet byl proveden pomocí rovnice (6.7):

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t \cdot \frac{C_p \cdot t_s}{C_t \cdot t_t} \quad (6.7)$$

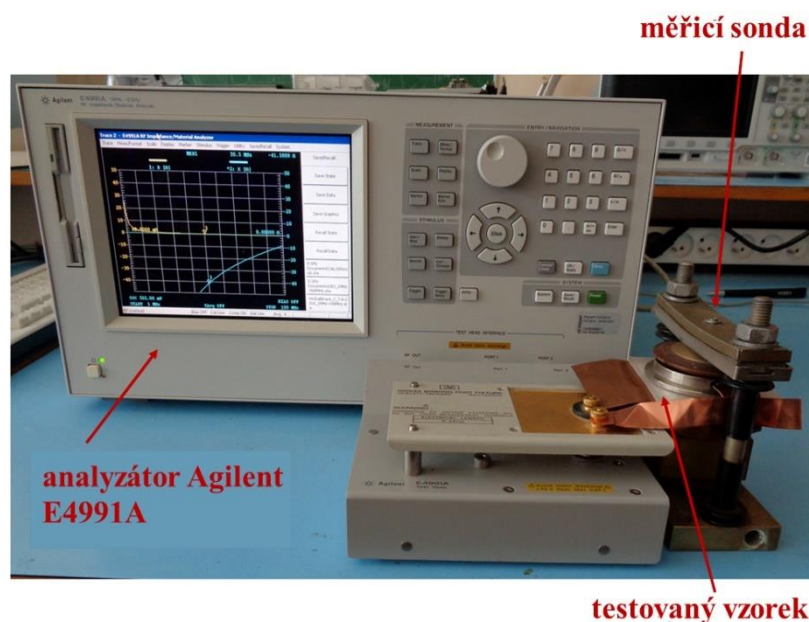
kde: C_t [F] – kapacita teflonového kontrolního vzorku, ε_r [-] – relativní permitivita měřeného vzorku, ε_t – relativní permitivita teflonu (2,1 [-]), t_s [mm] – tloušťka vzorku a t_t – standardní tloušťka teflonu (1 mm).

V reálném měřicím obvodu nejsou ale parametry měřeného vzorku připojeným analyzátozem přímo indikovány, indikovaná impedance nebo admitance odpovídá impedanci nebo admitanci vzorku, která je transformována na vstup analyzátozu propojovacím vedením, reprezentovaným v nejjednodušším případě paralelní kapacitou a sériovou indukčností.

Parametry vzorku lze stanovit analýzou náhradního obvodu, nebo modifikací kalibrace analyzátozu přesunutím kalibrační roviny na konec spojovacího vedení. Zpětná transformace měřené impedance propojovacím vedením je potom analyzátozem prováděna automaticky a analyzátoz indikuje přímo impedanci nebo admitanci vzorku [58].



Obr. 17 Blokové schéma měření dielektrických parametrů 3D tištěných materiálů pomocí analyzátoru Agilent E4991A: C_p [F] – celková kapacita měřeného obvodu; C_{par} [F] – parazitní kapacita propojovacího vodiče; L_{par} [H] – parazitní indukčnost propojovacího vodiče; R [Ω] – ztrátový odpor sondy; C_s [F] – kapacita vzorku [55] - upraveno



Obr. 18 Měřicí pracoviště pro testování dielektrických parametrů 3D vytištěných materiálů vybavené analyzátozem Agilent E4991A, měřicí sondou a testovaným vzorkem [55] - upraveno

Stanovené průměrné hodnoty relativní permitivity testovaných materiálů v testovaném frekvenčním rozsahu jsou shrnuty v Tab. 1. Přímě naměřené údaje byly statisticky zpracovány (průměr a směrodatná odchylka). Ve frekvenčním rozsahu 1 – 100 MHz byly průměrné hodnoty relativní permitivity stanoveny v intervalu 2,99 [-]

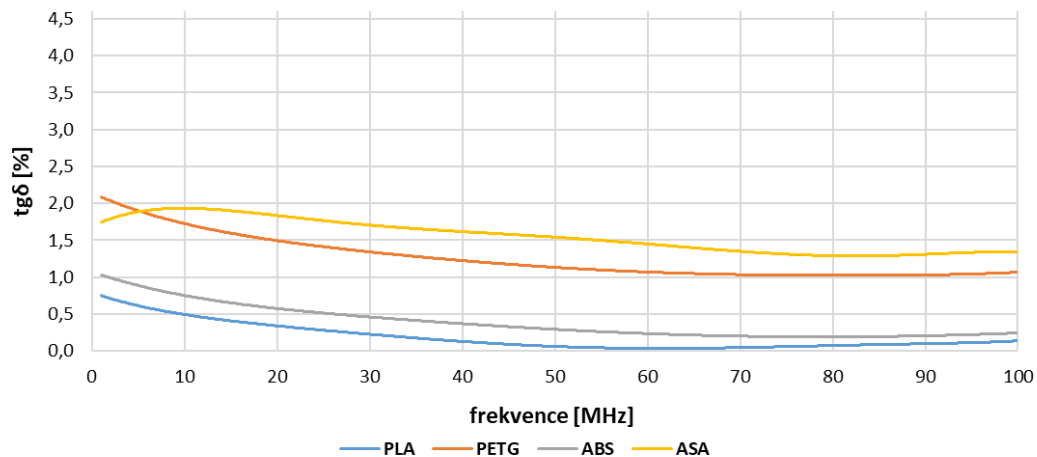
(PLA-silver) až 3,36 [-] (PLA-metallic green). Hodnoty relativní permitivity PLA a PLA-silver byly téměř identické (Tab. 1) a rozdíl mezi PLA (bezbarvý materiál) a PLA-metallic green byl stanoven na 0,36 [-] [55]. Všechny testované materiály projeví, ve sledovaném rozsahu, minimální frekvenční závislost, jak je patrné z velmi nízkých hodnot směrodatné odchylky, které se pohybovaly v rozsahu 0,04 – 0,07 [-] (Tab. 1).

Tab. 1 Statistické vyhodnocení naměřených dat relativní permitivity (ϵ_r) [55] - upraveno

Označení vzorku	1–100 MHz	
	ϵ_r	
	aver. [-] ¹	st. dev. [-] ²
PLA	3,00	0,05
PLA-Silver	2,99	0,07
PLA-Metallic green	3,36	0,05
PETG	3,30	0,05
ABS	2,95	0,04
ASA	3,19	0,06

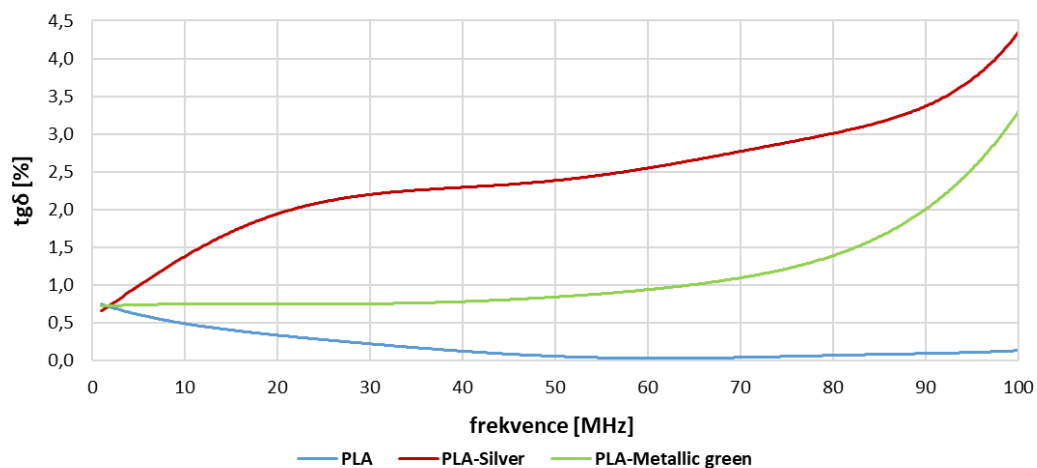
¹ aver. [-] označuje průměrnou hodnotu relativní permitivity. ² st.dev. [-] označuje standardní směrodatnou odchylku relativní permitivity.

Frekvenční závislost ztrátového činitele testovaných materiálů je shrnuta v grafech (Obr. 19 a Obr. 20). Graf na Obr. 19 popisuje frekvenční závislost ztrátového činitele materiálů PLA, PETG, ABS a ASA. Jak je z grafu patrné ztrátový činitel se pohyboval v intervalu 0,03-2,21 %. Křivky PLA a ABS měly prakticky shodný průběh v celém frekvenčním rozsahu, přičemž jejich rozdíly absolutních hodnot přibližně činily pouze 0,2 % [55]. U obou těchto materiálů byl sledován pomalý pokles hodnot ztrátového faktoru s rostoucí frekvencí. Materiály PETG a ASA vzájemně vykazovaly velmi podobnou frekvenční závislost ztrátového činitele. Rozdílné chování mezi těmito dvěma materiály bylo pozorováno ve frekvenčním rozsahu 1-10 MHz, kde křivka materiálu ASA vykazovala mírný pokles ve srovnání s PETG. Ve zbytku frekvenčního rozsahu byla však závislost u obou materiálů klesající s rostoucí frekvencí. Rozdíly v absolutních hodnotách mezi PETG a ASA byly stanoveny na 0,32 % [55].



Obr. 19 Závislost ztrátového činitele $tg\delta$ [%] materiálů (PLA, ABS, PETG a ASA) na měřicí frekvenci [MHz] [55] - upraveno

Graf na Obr. 20 porovnává frekvenční závislost ztrátového faktoru materiálů PLA, PLA-Silver a PLA-Metallic green. Hodnoty ztrátového faktoru se v testovaném frekvenčním rozsahu pohybovaly v rozmezí od 0,03 do 4,31 % [55]. Křivky PLA-Silver a PLA-Metallic green vykazovaly vzájemně podobnou frekvenční závislost s mírně rostoucí absolutní hodnotou ztrátového faktoru s rostoucí frekvencí. Maximální nárůst byl pozorován v rozsahu 70-100 MHz. V případě materiálu PLA vykazovala frekvenční závislost pokles ztrátového činitele s rostoucí frekvencí [55].



Obr. 20 Závislost ztrátového činitele $tg\delta$ [%] materiálů (PLA, PLA-Silver a PLA-Metallic green) na měřicí frekvenci [MHz] [55] - upraveno

Z důvodu významné frekvenční závislosti ztrátového činitele ve sledované frekvenční oblasti byla podrobněji statisticky zpracována frekvenční oblast 1-2 MHz, která byla uvažovanou pracovní oblastí navrhované sondy. V tabulce Tab. 2 je uvedeno statistické vyhodnocení naměřených dat ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ testovaných materiálů ve frekvenčním rozsahu 1-2 MHz. Z tabulky je patrné, že v daném frekvenčním rozsahu se ztrátový činitel pohyboval v intervalu 0,74 % (PLA-Silver) – 2,11 % (PETG).

Tab. 2 Statistické vyhodnocení naměřených dat ztrátového činitele ($\text{tg}\delta$) ve frekvenčním rozsahu 1-2 MHz

Označení vzorku	1-2 MHz	
	$\text{tg}\delta$	
	aver. [%] ¹	st.dev. [%] ²
PLA	0,77	0,06
PLA-Silver	0,74	0,03
PLA-Metallic green	0,75	0,02
PETG	2,11	0,07
ABS	1,06	0,02
ASA	1,75	0,02

¹ aver. [%] označuje průměrnou hodnotu ztrátového činitele.

² st.dev. [%] označuje standardní směrodatnou odchylku ztrátového činitele.

Z výše testovaných materiálů se v předpokládaném operačním frekvenčním rozsahu 1-2 MHz z hlediska dielektrických parametrů pro účely konstrukce pláště a ochranného dielektrika vnější elektrody jeví jako nejvhodnějšími konstrukčními materiály PLA-Silver a ABS. Oba tyto materiály dosahovaly velmi nízkých hodnot relativní permitivity (PLA-Silver (2,99 [-]); ABS (2,95 [-]) a ztrátového činitele (PLA-Silver (0,74 %); ABS (1,06 %)). Z těchto dvou materiálů byl pro účely realizace zvolen PLA-Silver z důvodu výrazně lepších tiskových vlastností v porovnání s materiálem ABS. ABS se tiskne při vyšších teplotách (250 °C) [59], což se během tisku projevuje výraznými objemovými změnami tištěného materiálu. Tyto objemové změny následně způsobují časté výrazné deformace výsledného objektu.

6.2.2 Konstrukční materiál pro realizaci ochranného dielektrika vnitřní elektrody

Pro účely ochranného dielektrika vnitřní elektrody bylo, z důvodu konstrukčního uspořádání sondy, možné uvažovat standardní materiály využívané jako dielektrika.

S ohledem na komerčně dostupné materiály a uvažovaný tvar a dimenze vnitřní elektrody sondy byl zvolen teflon ve formě trubičky, který má též výborné dielektrické vlastnosti relativní permitivita: 2,1 [-]; ztrátový činitel: 0,028 %.

6.2.3 Náhradní schéma sondy - optimalizace rozměrů sondy

Výslednou měřicí sondu popisuje náhradní schéma na Obr. 21, které popisuje idealizovaný model sondy. Při reálné aplikaci je třeba zohlednit další faktory, kterými jsou především vlivy okolního prostředí. Schématické zobrazení kapacitní sondy je uvedeno na Obr. 22. Celkovou kapacitu sondy lze vyjádřit jako sérioparalelní zapojení dílčích kapacit představující jednotlivá dielektrická prostředí. Kondenzátory C_A [F], C_B [F] a C_C [F], představují po řadě jednotlivá prostředí vzduch, led a vodu. Stejně jako kondenzátory C_1 [F], C_2 [F], C_3 [F] v kapitole 6.1. Kapacitu těchto kondenzátorů lze vyjádřit vztahy (6.9) - (6.11). Sériově řazenými kondenzátory lze nahradit kombinací dielektrických prostředí tvořenou materiály teflon, vzduch/voda/led, PLA. Jedná se tedy o horizontální řez sondou, který lze matematicky vyjádřit rovnicemi (6.12) - (6.20). Celkovou kapacitu měřicí sondy popisuje rovnice (6.8).

$$C = C_A + C_B + C_C \quad (6.8)$$

$$C_A = \frac{1}{\frac{1}{C_{1A}} + \frac{1}{C_{5A}} + \frac{1}{C_{3A}}} \quad (6.9)$$

$$C_B = \frac{1}{\frac{1}{C_{1B}} + \frac{1}{C_{2B}} + \frac{1}{C_{3B}}} \quad (6.10)$$

$$C_C = \frac{1}{\frac{1}{C_{1C}} + \frac{1}{C_{4C}} + \frac{1}{C_{3C}}} \quad (6.11)$$

$$C_{1A} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot h_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (6.12)$$

$$C_{5A} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_5 \cdot h_1}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \quad (6.13)$$

$$C_{3A} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_3 \cdot h_1}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \quad (6.14)$$

$$C_{1B} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot h_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (6.15)$$

$$C_{2B} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot h_2}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \quad (6.16)$$

$$C_{3B} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_3 \cdot h_2}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \quad (6.17)$$

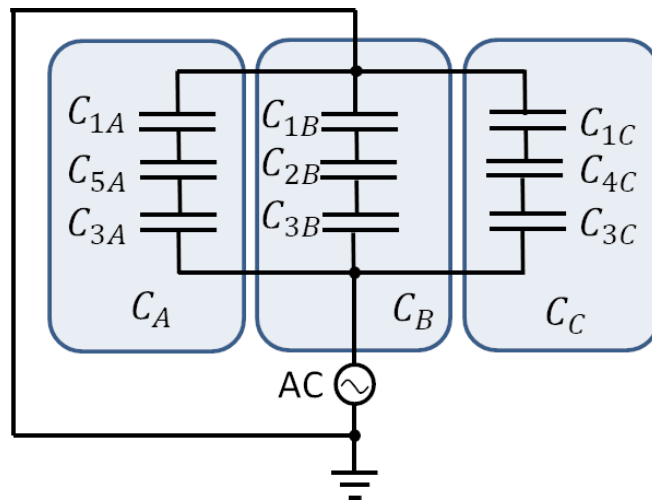
$$C_{1C} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot (H - (h_1 + h_2))}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (6.18)$$

$$C_{4C} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_4 \cdot (H - (h_1 + h_2))}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \quad (6.19)$$

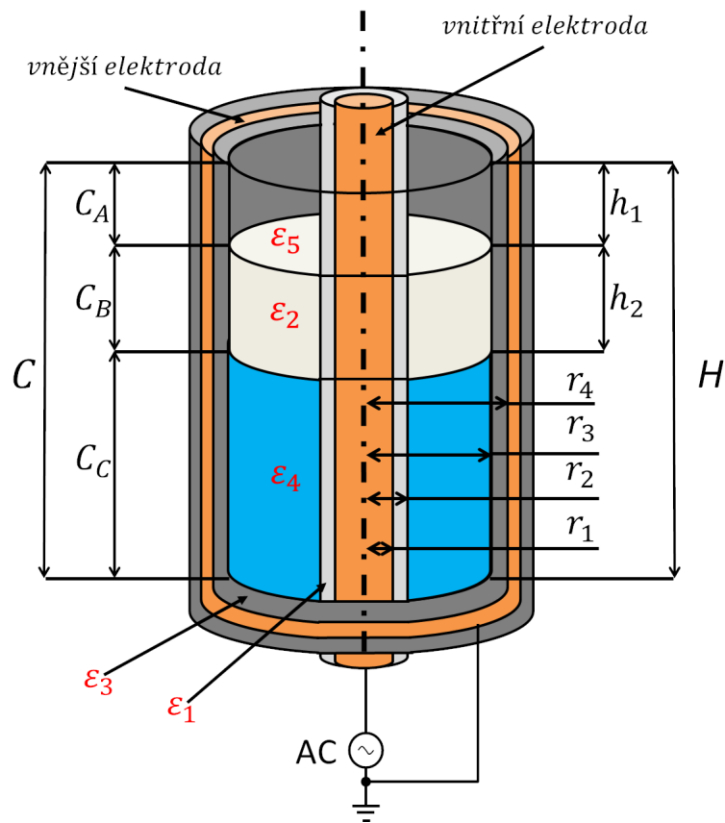
$$C_{3C} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_3 \cdot (H - (h_1 + h_2))}{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \quad (6.20)$$

kde C [F] značí celkovou kapacitu kondenzátoru, C_A [F], C_B [F], C_C [F] – jsou dílčí paralelní kapacity, které popisují vertikální řez sondy, C_{1A} [F], C_{3A} [F], C_{5A} [F], C_{1B} [F], C_{2B} [F], C_{3B} [F], C_{1C} [F], C_{3C} [F], C_{4C} [F] – označují dílčí sériové kapacity, které popisují horizontální řez sondy, H ($2 \cdot 10^{-1}$ m), h_1 ($2 \cdot 10^{-2}$ m), h_2 [m] – postupně vyjadřují celkovou výšku vnější elektrody sondy, výška vzduchové vrstvy a tloušťku ledu. r_1 ($4 \cdot 10^{-3}$ m) – označuje poloměr vnitřní elektrody, r_2 ($5 \cdot 10^{-3}$ m) – značí vnější poloměr dielektrika vnitřní elektrody, r_3 [m] – je vnitřní poloměr dielektrika vnější elektrody, tento rozměr byl předmětem optimalizace, která je blíže uvedena dále, r_4 [m] -vnitřní poloměr vnější

elektrody, tento rozměr byl předmětem optimalizace, která je blíže uvedena dále. ε_0 [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$], ε_1 [-], ε_2 [-], ε_3 [-], ε_4 [-], ε_5 [-] postupně označují permitivitu vakua ($8,854\cdot 10^{-12}$ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$), relativní permitivity jednotlivých prostředí: teflon (2,1 [-]), led (3,1 [-]), PLA (2,99 [-]), destilovaná voda (78,2 [-]) a vzduch (1 [-]).



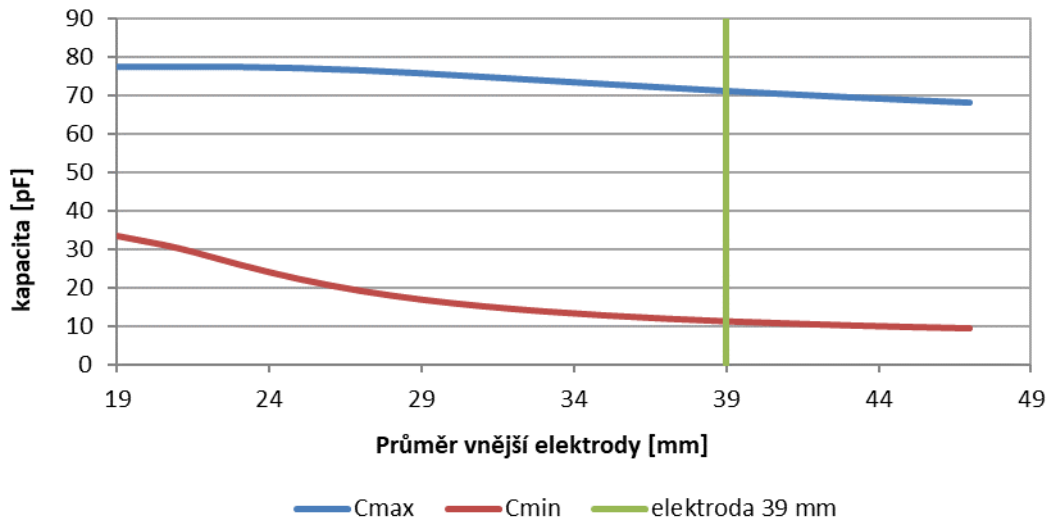
Obr. 21 Náhradní schéma kapacitní sondy



Obr. 22 Schématické zobrazení kapacitní sondy: C – celková kapacita sondy; C_A , C_B , C_C – představují dílčí kapacity jednotlivých prostředí vzduch, led a voda; H – výška aktivní části sondy; h_1 – tloušťka vzduchové vrstvy; h_2 – tloušťka ledové vrstvy; ε_1 , ε_2 , ε_3 , ε_4 , ε_5 postupně označují relativní permitivity jednotlivých prostředí: teflon, led, PLA, destilovaná voda a vzduch; r_1 – poloměr vnitřní elektrody; r_2 – vnější poloměr dielektrika vnitřní elektrody; r_3 – vnitřní poloměr dielektrika vnější elektrody; r_4 – vnitřní poloměr vnější elektrody

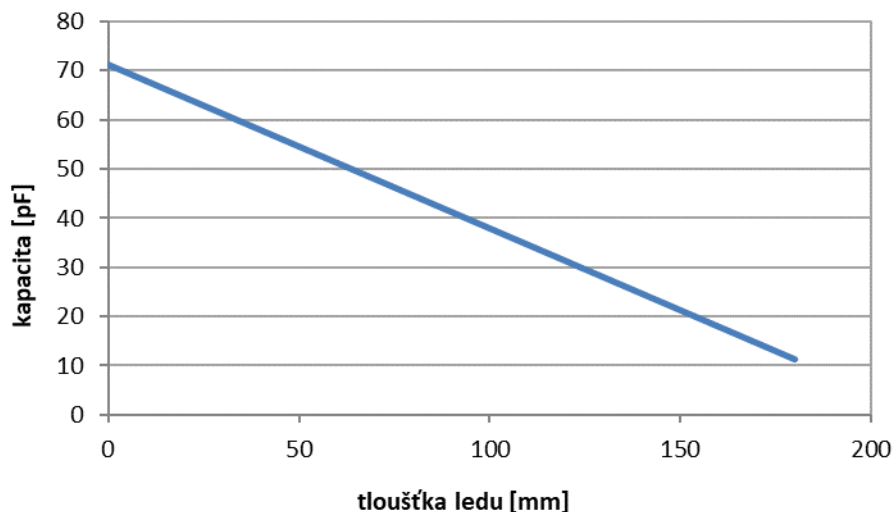
Na základě idealizovaného modelu sondy a parametrů uvedených výše, byly provedeny výpočty pro stanovení ideálních parametrů sondy tak, aby byla dosažena, pokud možno v maximální míře, lineární závislost kapacity na tloušťce ledu a též, aby byla zajištěna dostatečná citlivost při měření. Tuto citlivost udává rozdíl kapacit pro sondu bez přítomnosti ledu (voda) a sondu plně zamrzlou (led). V rámci výpočtů byla vyhodnocována výsledná kapacita sondy při uvažování různých hodnot vnějšího průměru sondy v rozsahu 19 – 45 mm a pro zvolený vnitřní průměr elektrody r_1 (4 mm). Výsledky výpočtů jsou uvedeny v grafu Obr. 23. Na základě těchto výpočtů a s ohledem na dostupné rozměry použitých konstrukčních dílů byl zvolen průměr vnější elektrody 39 mm, v grafu

je označena zelenou přímkou. Jak je z grafu patrné, při volbě menšího průměru by byla citlivost sondy menší, pro zvolený a vyšší průměr sondy se již citlivost sondy prakticky nemění.



Obr. 23 Měřicí rozsahy simulovaných sond, měřicí rozsah v závislosti na průměru vnější elektrody – modrá křivka označuje maximální hodnotu kapacity sondy zvoleného průměru vnější elektrody a červená křivka jejich minimální hodnoty, zelená přímkou označuje zvolenou kombinaci

Výpočet byl zahájen plně rozmrzlým stavem a v každém následujícím kroku byla tloušťka ledu navýšena o 1 mm. Pro každý krok byla pomocí rovnic rov. (6.8) - (6.20) vypočítána kapacita sondy, která odpovídala aktuální simulované tloušťce ledu. Simulovaný průběh změny kapacity sondy v průběhu postupného narůstání tloušťky ledu pro zvolenou elektrodu 39 mm je uveden v grafu na Obr. 24. Z grafu je patrné, že charakteristika sondy má pro simulovaný zámraz za ideálních podmínek lineární klesající průběh. Kapacita sondy se během simulace pohybovala v intervalu 11,17 pF (zamrzlý stav) až 71,20 pF (rozmrzlý stav). Měřicí rozsah sondy byl stanoven na 60,03 pF.



Obr. 24 Simulovaný průběh zámrazu sondy s průměrem vnější elektrody 39 mm

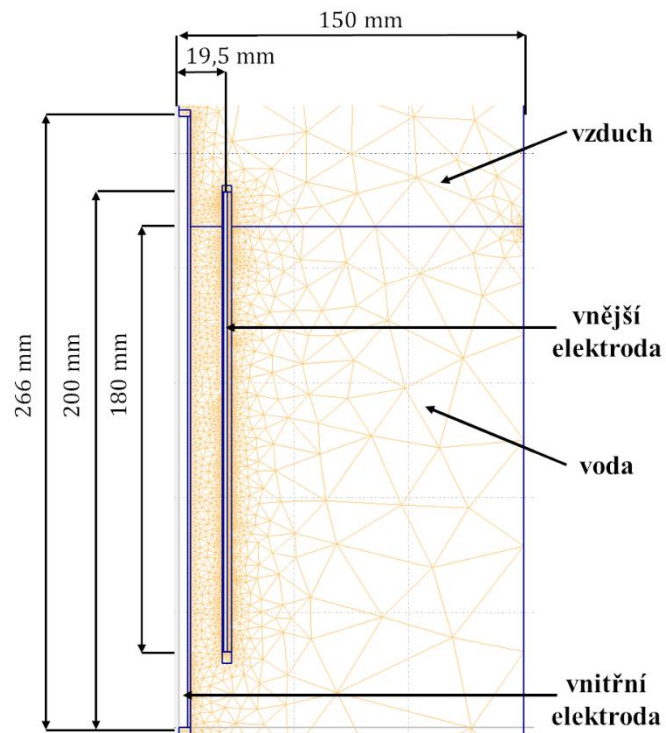
6.2.4 Simulace sondy v průběhu zámrazu pomocí metody konečných prvků (MKP)

Pro ověření výsledného návrhu sondy byla uskutečněna simulace funkce sondy v průběhu zámrazu pomocí MKP v programu Agros 2D. S pomocí MKP lze lépe zohlednit vliv okolního prostředí, tvar elektrod, okrajový efekt a horizontální rozložení jednotlivých dielektrických prostředí sondy.

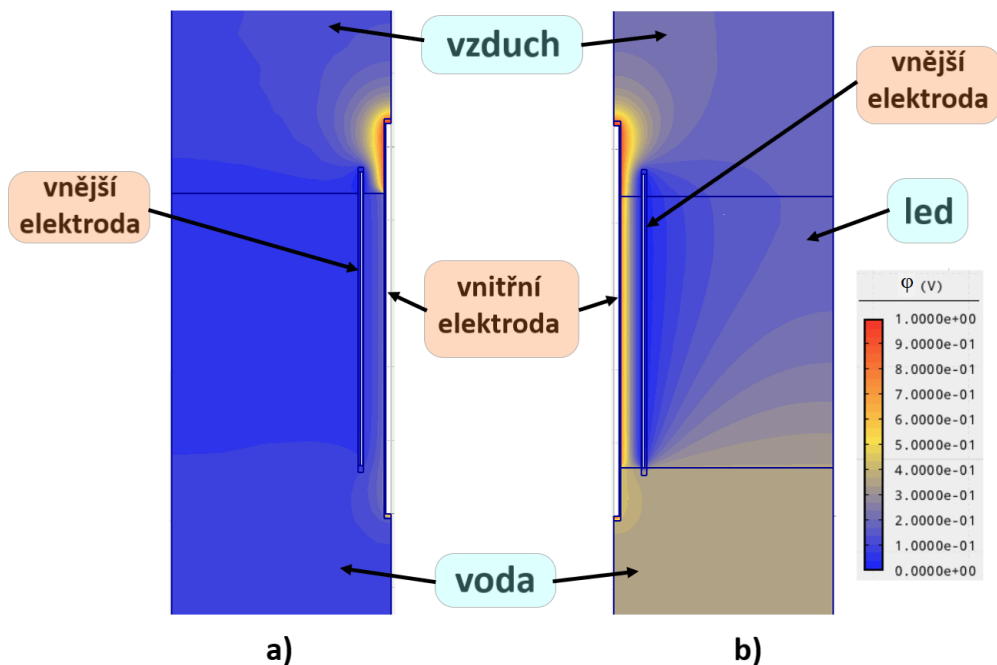
Výchozí parametry simulace jako jsou: rozměry sondy, rozložení jednotlivých dielektrik a jejich konstanty byly nastaveny shodně s předešlou simulací uvedenou v kapitole (6.2.3). Pro diskretizaci oblasti modelu byla použita automaticky generovaná trojúhelníková síť Obr. 25. Okrajové podmínky v modelu byly stanoveny následovně: pevné napětí pro vnitřní 1 V a vnější 0 V elektrodu, plošná hustota náboje σ o velikosti $0 \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$ pro zbylé hrany modelu. Simulace byly opět zahájeny plně rozmrzlým stavem a v každém dalším kroku byla tloušťka ledu navýšena o 1 mm. Na Obr. 26 jsou uvedeny modely pro počáteční a koncový (zamrzlý) stav sondy. Na obrázku je patrné rozložení elektrod, jednotlivých prostředí a skalárního elektrického potenciálu φ [V]. Na základě rozložení φ je stanovena velikost energie elektrického pole W_e [J] a následně pomocí vztahu (6.21) vypočtena celková kapacita C [F] v každém kroku.

$$C = \frac{2 \cdot W_e}{U^2} \quad (6.21)$$

kde U [V] je napětí vnitřní elektrody ($U = 1 \text{ V}$).

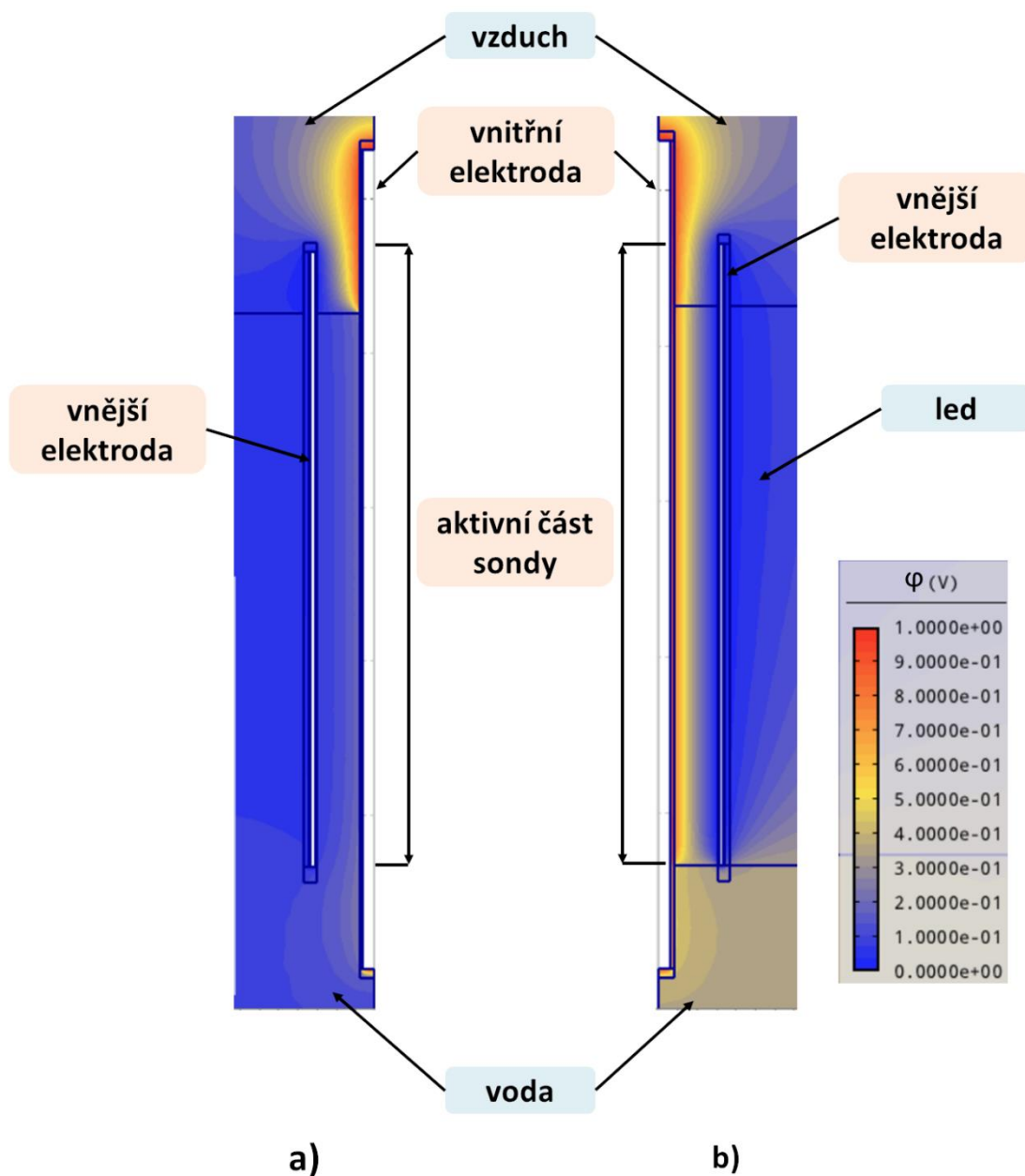


Obr. 25 Diskretizace modelu simulace - vnitřní elektroda: $\varphi = 1 V$, vnější elektroda: $\varphi = 0 V$



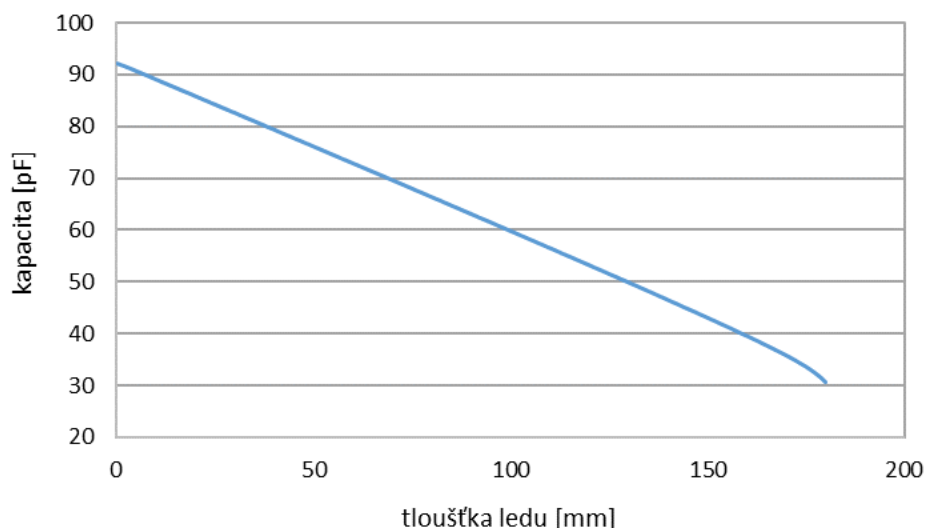
Obr. 26 Rozložení skalárního potenciálu (φ) v modelu pro počáteční rozmrzlý stav (obr. a) a koncový zamrzlý stav (obr. b). – vnitřní elektroda: $\varphi = 1 V$, vnější elektroda: $\varphi = 0 V$

Na Obr. 27 jsou uvedeny modely pro počáteční a koncový (zamrzlý) stav s detailním zobrazením rozložení skalárního elektrického potenciálu (φ [V]) v aktivní části sondy. Jak je z obrázku patrné, rozložení skalárního potenciálu v aktivní části sondy je v obou uvažovaných případech lineární.



Obr. 27 Detail rozložení skalárního potenciálu (φ) uvnitř kapacitní sondy: v modelu pro počáteční rozmrzlý stav (obr. a) a koncový zamrzlý stav (obr. b). – vnitřní elektroda: $\varphi = 1$ V, vnější elektroda: $\varphi = 0$ V

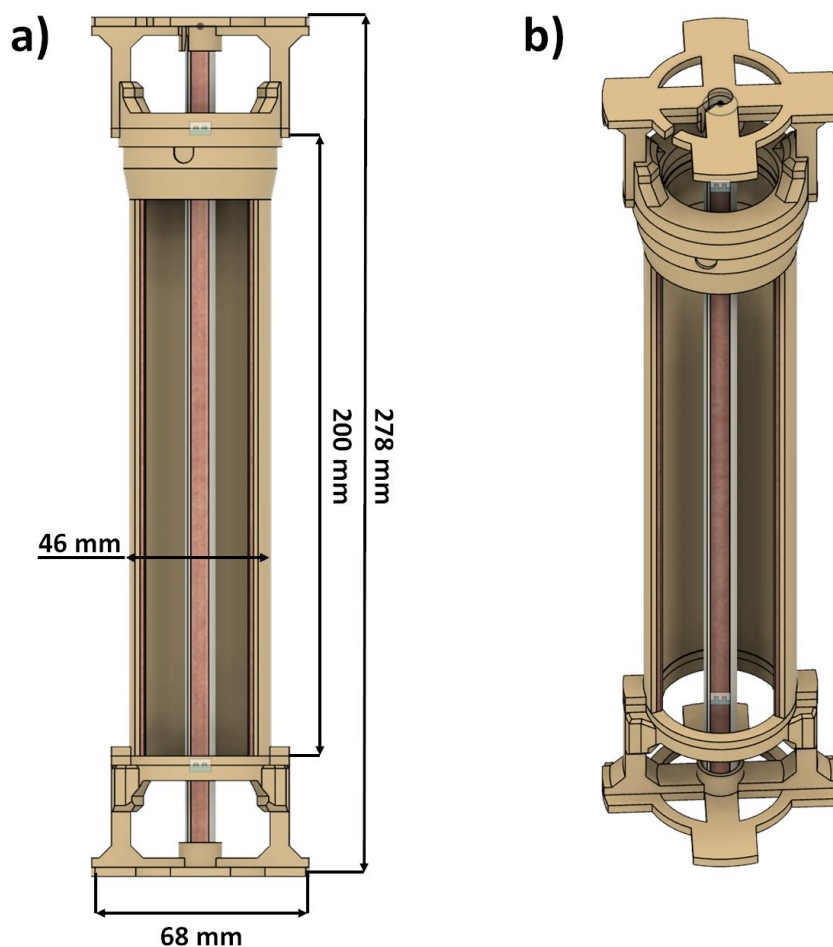
Simulovaný průběh zámrazu je uveden v grafu na Obr. 28. Závislost kapacity sondy na tloušťce ledu je i v tomto případě lineární. Kapacita sondy se během simulace pohybovala v intervalu 30,61 pF (zamrzlý stav) až 92,08 pF (rozmrzlý stav). Měřicí rozsah sondy byl touto metodou stanoven na 61,47 pF.



Obr. 28 Simulovaný průběh zámrazu sondy s průměrem vnější elektrody 39 mm – simulace metodou MKP

6.3 Měřicí sonda – konstrukční uspořádání

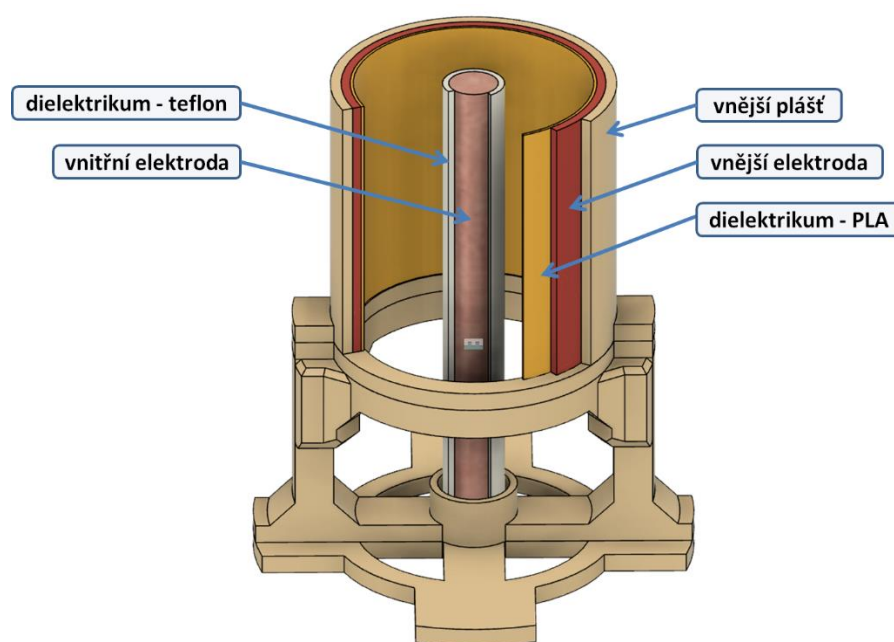
Pro účely indikace tloušťky ledu bylo zvoleno válcové uspořádání sondy. Sonda Obr. 29 se skládá z vnitřní a vnější elektrody, které jsou umístěny v ochranném dielektriku, aby nedocházelo k jejich korozi. Prostor mezi těmito elektrodami je vyplněn vodou, která v důsledku změny skupenství v průběhu změn teploty mění svoji relativní permitivitu, což ovlivní výslednou celkovou kapacitu sondy.



Obr. 29 Struktura kapacitní sondy – a) vertikální řez sondou, b) vertikální řez sondou – pohled z boku při náklonu v horizontální ose o 30°

Jako izolační materiál pro vnitřní elektrodu byl použit teflon s relativní permitivitou 2,1 [-]. Plášť vnější elektrody je zhotoven pomocí technologie 3D tisku a v souvislosti s tím byl jako tiskový materiál použit PLA Silver (výrobce: FilamentPM). Dielektrické vlastnosti tohoto materiálu byly stanoveny experimentálně ($\epsilon_r = 2,99$ [-]). Tento materiál byl především zvolen pro své dobré tiskové a dielektrické vlastnosti. Též se v průběhu testování ukázal jako dobře použitelný při nízkých teplotách. Pro výrobu tištěných dílů sondy (pláště a ochranného dielektrika vnější elektrody) byla použita 3D tiskárna Prusa i3 MK3S+ (Prusa Research). Pro tisk jednotlivých dílů bylo použito stejné tiskové nastavení a průměr filamentu jako v případě přípravy vzorků pro účely testování dielektrických vlastností jednotlivých materiálů (kapitola 6.2.1). Konstrukční parametry sondy jsou shrnuty v tabulce Tab. 3. Vnější elektroda je zhotovena ze silnostěnné měděné trubky (jejíž

síla stěny je 1,5 mm) s vnitřním průměrem 39 mm. Tato trubka byla vybrána s ohledem na snížení rizika deformace vlivem působení ledu v průběhu zámrazu. Vnější elektroda je umístěna do vytištěného obalu z PLA materiálu, který současně tvoří pouzdro sondy. Síla tohoto pláště je na vnitřní straně sondy 0,5 mm (tloušťka dielektrika vnější elektrody). Vnitřní elektroda je zhotovena z měděné tyče válcovitého tvaru o průměru 8 mm. Její dielektrikum je z teflonového materiálu o síle 1 mm. Vzdálenost mezi dielektriky obou elektrod je 13,5 mm. Prostor mezi elektrodami je vyplněn v horní části vzduchem (vrchních 20 mm) a zbylých 180 mm vodou, která v průběhu měření mění svoje skupenství. Popis vnitřní struktury sondy je uveden na Obr. 30.



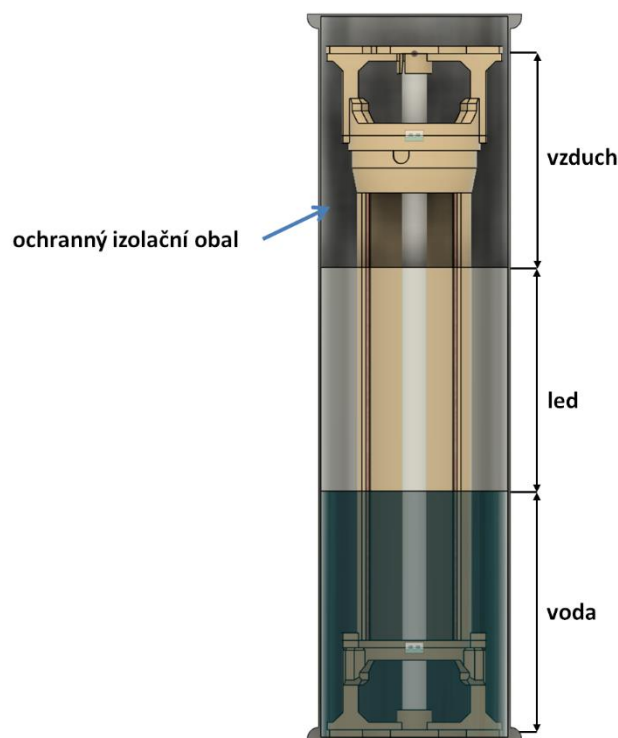
Obr. 30 Kapacitní sonda – popis vnitřní struktury

Tab. 3 Konstrukční parametry kapacitní sondy

Elektrody				Dielektrikum		
Elektroda	Materiál	Průměr [mm]	Délka [mm]	materiál	ϵ_r [-]	Tloušťka [mm]
Vnitřní	měď	8	266	Teflon	2,1	1
Vnější		*39/42	200	PLA	2,9	0,5

* vnitřní/vnější

Samotná sonda je následně umístěna do ochranného obalu z PVC trubky, který sondu chrání jak po mechanické stránce, tak též proti znečištění, které by ovlivnilo výsledné měření. Výsledná struktura měřicí aparatury zahrnuje vnější (krycí) obal sondy, ve kterém je umístěna vlastní sonda, zbývající prostor pouzdra je vyplněn do výšky 180 mm destilovanou vodou. Celá měřicí aparatura je následně umístěna do sledované nádrže. Sonda je v této nádrži ponořena do hloubky 180 mm tak, aby hladiny vody uvnitř a vně pouzdra byly srovnány. Touto izolací prostředí zamezíme kontaminaci měřeného prostředí okolní vodou, jejíž permitivita se v průběhu měření může měnit v důsledku znečištění. Touto separací prostředí tedy zajistíme, že jediná změna permitivity prostředí mezi elektrodami senzoru je způsobena změnou skupenství vody. Schematické zobrazení kapacitní sondy v průběhu zámrazu/tání s detailním popisem rozložení jednotlivých dielektrických prostředí je uvedeno na Obr. 31. Výsledná podoba kapacitní sondy je uvedena na Obr. 32, celková podoba kapacitní sondy v ochranném izolačním obalu na Obr. 33.



Obr. 31 Schematické zobrazení kapacitní sondy v průběhu zámrazu s detailním zobrazením jednotlivých dielektrických prostředí



Obr. 32 Kapacitní sonda



Obr. 33 Kapacitní sonda v ochranném izolačním obalu

Princip měření tímto kapacitním senzorem lze popsat následovně: do měřené nádrže se před zahájením zámrazu umístí senzor. V průběhu měření sonda postupně zamrzá, jak zamrzá okolní vodní plocha. Zámraz způsobuje snižování permitivity prostředí, a tedy i kapacity na výstupu senzoru. Během tání ledu dochází opět k nárůstu kapacity z obdobného důvodu.

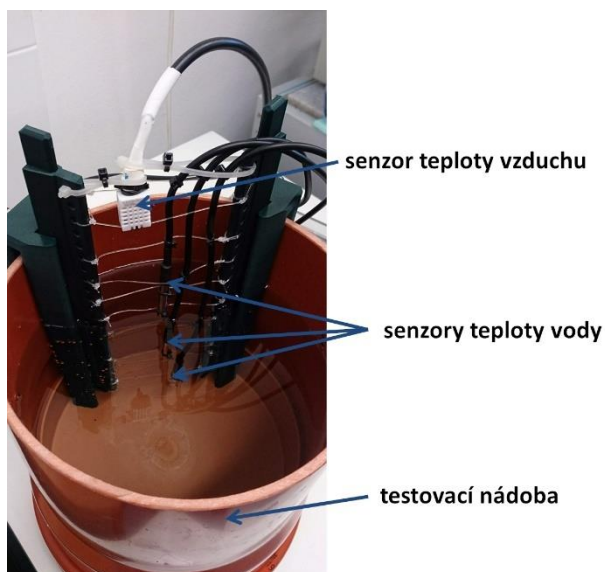
6.4 Měřicí sonda – testování vlastních parametrů

Skutečné parametry navržené sondy byly testovány v laboratorních podmínkách. V rámci měření byla sonda umístěna do nádoby s vodou, která byla tepelně izolována od okolního prostředí minerální vatou. Toto opatření bylo zavedeno pro zajištění promrzání ve směru od hladiny ke dnu nádoby tak, aby se zajistilo věrné napodobení přírodních podmínek. Do této nádoby byly též umístěny senzory pro sledování teploty vody. Výška hladiny vody v nádobě byla dorovnána do stejné výšky, jaké dosahovala hladina destilované vody v pouzdru měřené sondy, tedy 180 mm. Nádoba byla následně umístěna do mrazicího boxu, kde proběhlo vlastní měření, viz Obr. 34.



Obr. 34 Měřicí aparatura

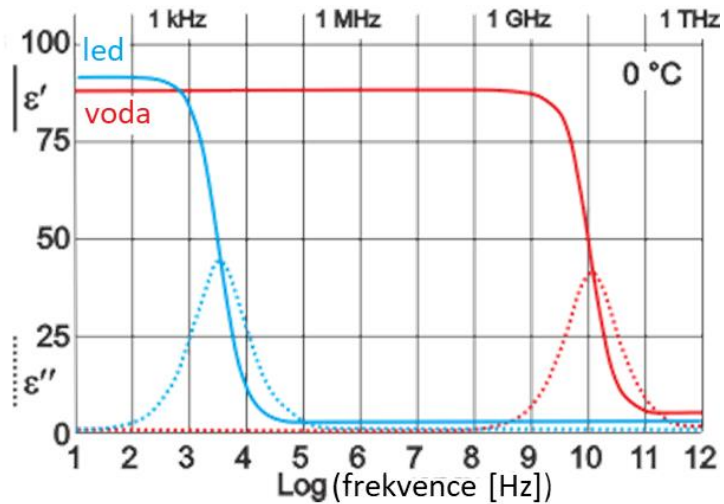
Senzory teploty vody byly rovnoměrně rozmístěny po celé délce sondy. Vzájemná vzdálenost mezi jednotlivými teplotními čidly byla 30 mm. Pro tato měření byla zvolena teplotní čidla DS18B20 (rozsah měření: -55 až 125 °C, přesnost: +/- 0,5 °C). Aparatura byla též doplněna o senzor pro měření teploty vzduchu uvnitř mrazicího boxu. Výsledný systém je uveden na Obr. 35. Tato data o teplotách obou prostředí byla využívána pro sledování průběhu testu.



Obr. 35 Aparatura pro měření teplot prostředí

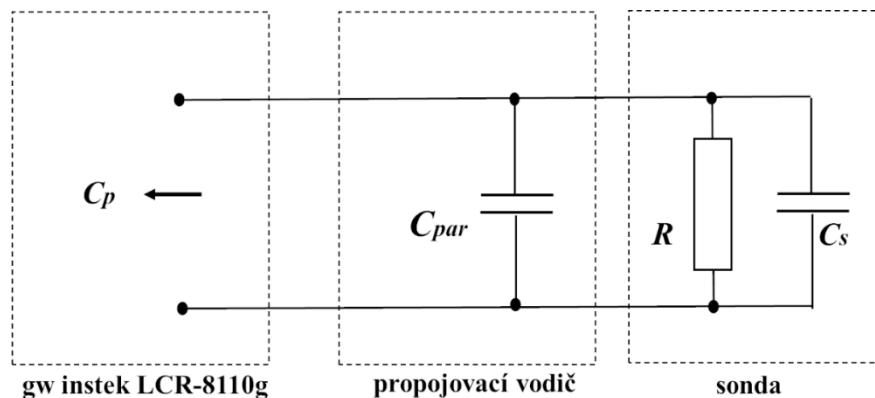
Měření spočívalo v cyklickém zamrznání a tání vody v sondě, při současném sledování kapacity sondy, která byla vyhodnocována na frekvencích 100 kHz, 200 kHz, 500 kHz, 1 a 2 MHz pomocí RLC-můstku GW Instek LCR-8110g. Pro vyhodnocování kapacity

sondy musí být vybrán frekvenční rozsah, ve kterém se reálné části permitivity vody a ledu výrazně liší a zároveň voda i led mají minimální hodnotu ztrátového činitele. Podle Obr. 36 splňuje tuto podmínku širší frekvenční rozsah, přibližně 100 kHz až 1 GHz. V rámci této oblasti byl uvažován testovaný kmitočtový rozsah 0,1 až 2 MHz.



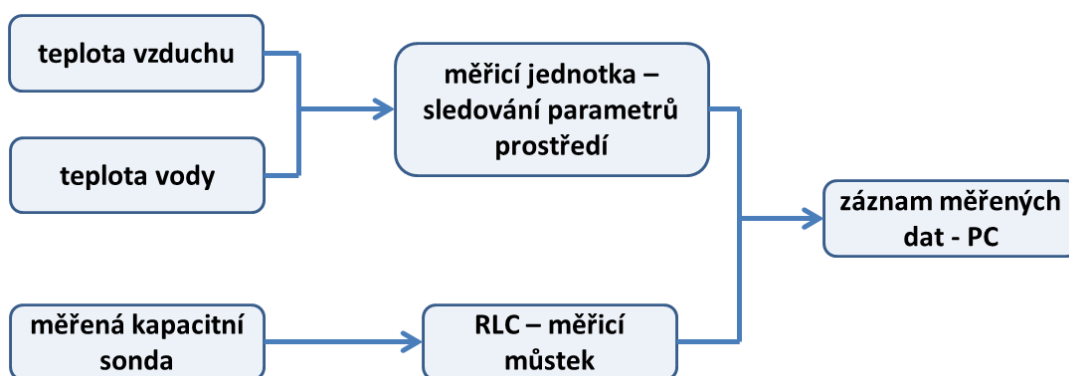
Obr. 36 Frekvenční závislost komplexní permitivity vody a ledu ϵ ,
kde $\epsilon = \epsilon_0 \cdot (\epsilon' + j \cdot \epsilon'')$ [60] - upraveno

Kapacita sondy byla měřena dle blokového schématu (Obr. 37). Zde celková kapacita měřeného obvodu byla přímo měřena LCR-můstkem GW Instek LCR-8110g. Tato celková kapacita zahrnovala vlastní kapacitu měřené sondy C_s [F] a parazitní kapacitu propojovacího vodiče C_{par} [F]. Jak je ze schématu patrné, pro účely měření byl uvažován model paralelního zapojení ztrátového odporu sondy R [Ω] a vlastní kapacity sondy C_s . Měření kapacity na každé frekvenci probíhalo v intervalu 92 s.

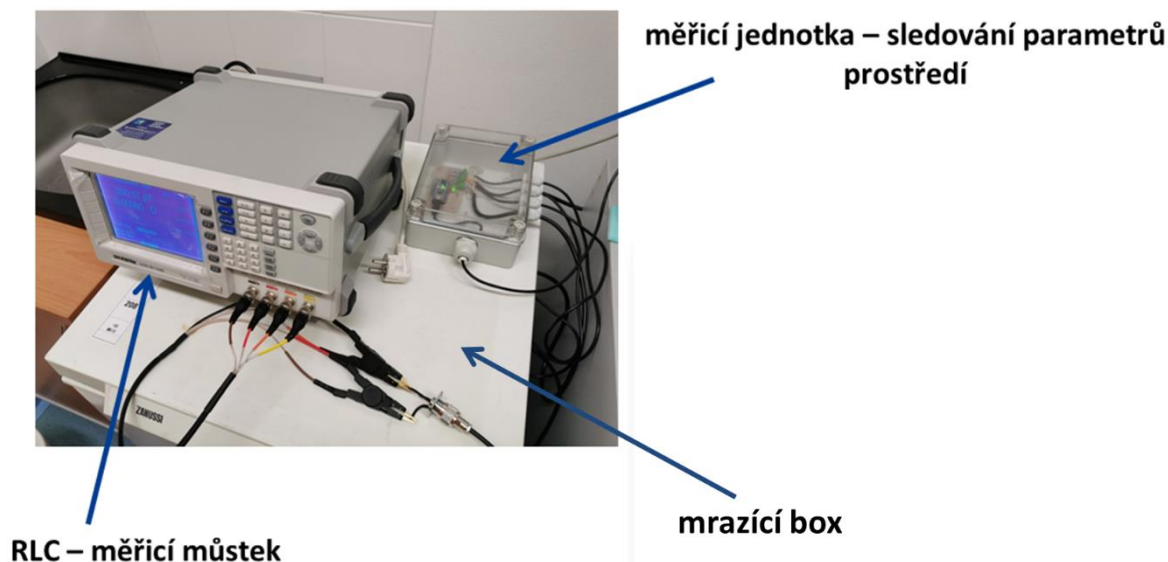


Obr. 37 Blokové schéma měření kapacity sondy pomocí LCR-můstku GW Instek LCR-8110g: C_p [F] – celková kapacita měřeného obvodu; C_{par} [F] – parazitní kapacita propojovacího vodiče; R [Ω] – ztrátový odpor sondy; C_s [F] – kapacita sondy

Strukturu měřicího pracoviště, jak je uvedena na Obr. 38, lze popsat následovně: kapacita sondy byla průběžně vyhodnocována RLC-můstkem, teploty vzduchu a vody byly indikovány pomocí navržené jednotky pro sledování parametrů prostředí. Naměřená data byla průběžně ukládána na počítač. Fotografie měřicího pracoviště je uvedeno na Obr. 39.



Obr. 38 Struktura měřicího pracoviště – testování vlastních parametrů kapacitní sondy



Obr. 39 Měřicí pracoviště - testování vlastních parametrů kapacitní sondy

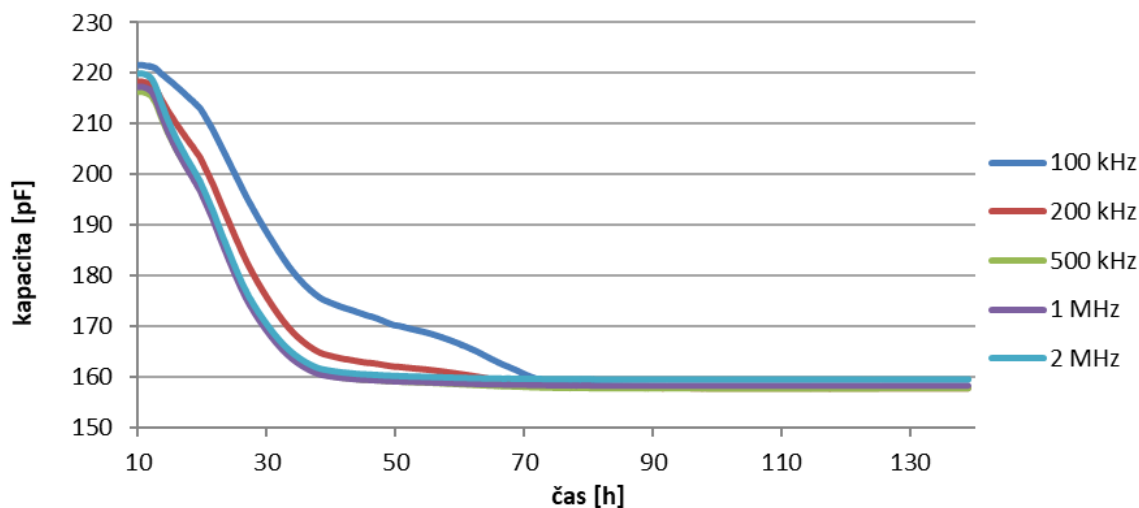
6.4.1 Testování vlastních parametrů sondy – výsledky

V rámci laboratorního testování navržené sondy byly stanoveny její provozní parametry. Výsledky testování frekvenční závislosti kapacity sondy v procesu zamrzání a rozmrzání jsou shrnuty v grafech na Obr. 40 a Obr. 41. Graf na Obr. 40 vyjadřuje indikovanou kapacitu sondy v průběhu jejího postupného zamrzání, graf na Obr. 41 v průběhu jejího rozmrzání.

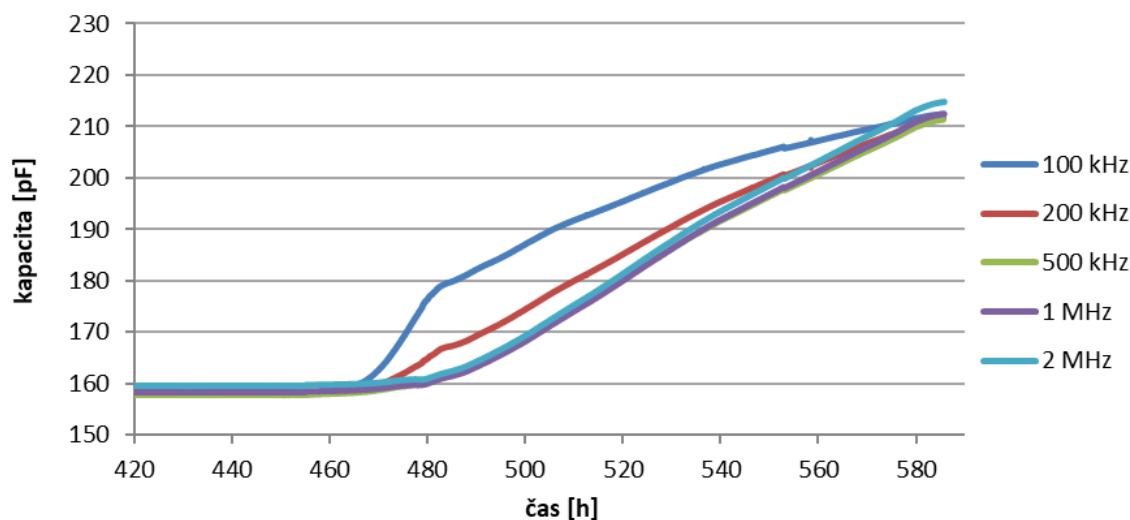
Na základě výsledků těchto měření byl stanoven optimální pracovní kmitočet, na kterém by se kapacita sondy vyhodnocovala a který byl využit pro další návrh obvodů vyhodnocovací elektroniky. Jak je i z grafů na Obr. 40 a Obr. 41 patrné, vhodným rozsahem měřících frekvencí se ukázala oblast od 500 kHz do 2 MHz, kde průběhy měly v oblasti zámrazu a tání lineární průběhy.

Maximální kapacita sondy byla stanovena pro měřicí frekvenci 1 MHz na hodnotu 217 pF. Minimální kapacita dosáhla hodnoty 158 pF a odpovídala plně zamrzlému stavu. Průběh kapacity během rozmrzání (Obr. 41) měl obdobný charakter.

Po odečtení parazitní kapacity přívodního vodiče 131 pF lze stanovit mezní hodnoty kapacity pro samotnou sondu. Maximální kapacita sondy byla tedy stanovena na 86 pF a minimální kapacita na 27 pF. Měřicí rozsah tedy dosahuje velikosti 59 pF.



Obr. 40 Kapacita sondy v průběhu zámrazu



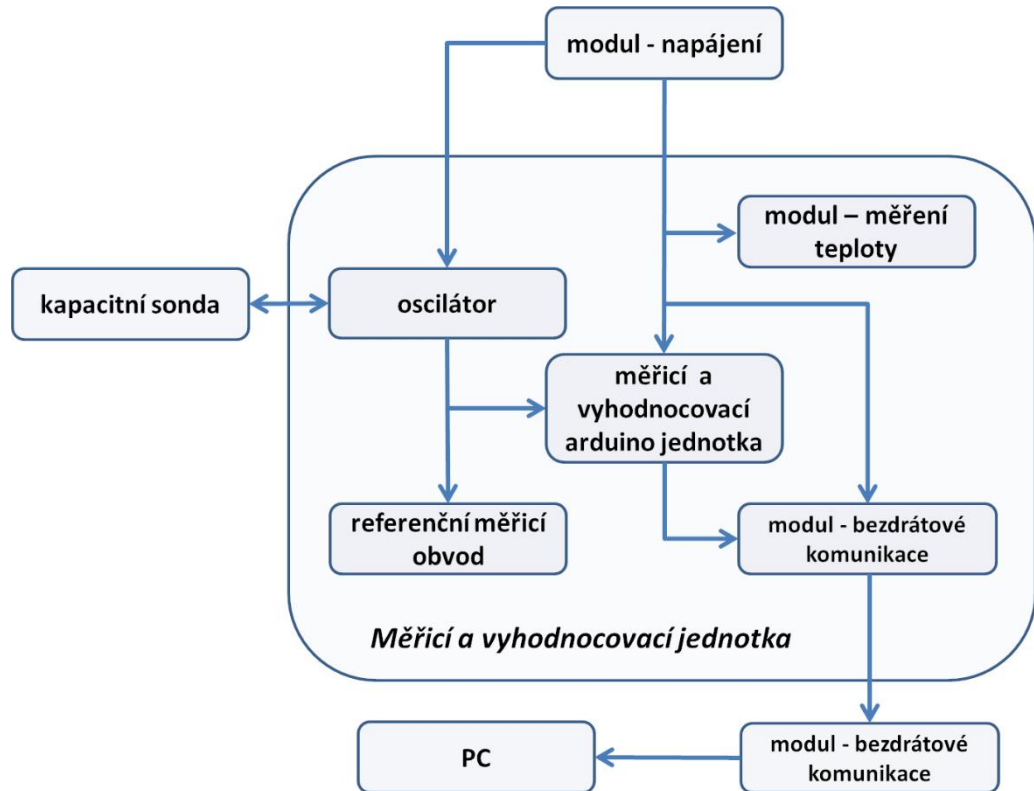
Obr. 41 Kapacita sondy v průběhu tání

6.5 Návrh měřicí a vyhodnocovací elektroniky

Na základě výsledků měření frekvenční závislosti kapacity sondy na teplotě byla stanovena optimální měřicí frekvence 1 MHz a určen pokles kapacity při jejím plném zamrznutí.

Okamžitou hodnotu kapacity sondy, která je mírou tloušťky vrstvy ledu, je možné vyhodnocovat pomocí změny frekvence oscilátoru. Měřicí sonda je zapojena do laděného obvodu oscilátoru a přímo určuje frekvenci jeho kmitů. Na tomto principu byla navržena

a realizována vlastní měřicí a vyhodnocovací jednotka, jejíž blokové schéma je uvedeno na Obr. 42.



Obr. 42 Blokové schéma měřicí a vyhodnocovací jednotky

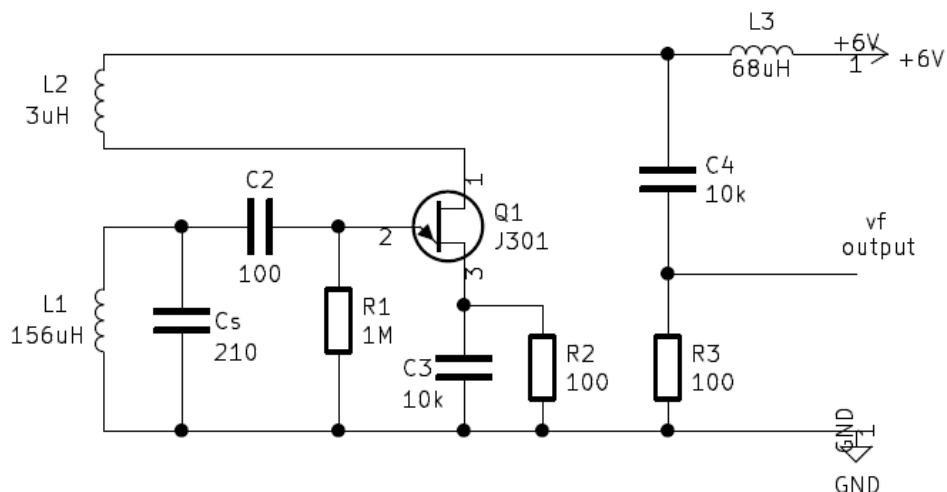
Hlavní částí jednotky je oscilátor, který při kapacitě sondy 217 pF odpovídající stavu sondy s nulovou výškou ledu, generuje harmonický signál o frekvenci 834 kHz. Při následném zámrazu dochází k postupnému snižování kapacity, což má za následek postupně se zvyšující frekvenci oscilátoru až na hodnotu 997 kHz, která odpovídá plně zamrzlému stavu. Tato frekvence je dále měřena pomocí měřiče frekvence MF (DIY Kits RF 1 Hz-50 MHz Crystal Oscillator Frequency Counter Meter Digital LED tester meter), který je ve schématu označen jako referenční měřicí obvod a pomocí vlastní navržené měřicí jednotky, označené jako měřicí a vyhodnocovací arduino jednotka. Měřič frekvence MF umožňuje pouze indikaci měřené frekvence na 5-místném 7-mi segmentovém displeji, neumožňuje ale žádný způsob elektronického předání a záznamu naměřených dat, jediná možná prezentace dat je vizuální. Z tohoto důvodu zde byl tento obvod (MF) použit pouze jako referenční měřicí člen pro kalibraci jednotky. Pro účely automatizovaného záznamu dat byla navržena a realizována vlastní měřicí a vyhodnocovací jednotka na platformě

Arduino Nano, která umožňuje automatizované měření a záznam dat. Data jsou dále zálohována na SD kartu a odesílána do vzdáleného počítače k dalšímu zpracování. Samotný princip měření frekvence je založen na čítání pulsů generovaných oscilátorem po danou dobu. Z počtu pulsů a známé doby měření je následně stanovena frekvence. Výsledná závislost velikosti frekvence na tloušťce ledu je odvozena pomocí výpočtů uvedených dále.

Schéma zapojení oscilátoru měřicí a vyhodnocovací jednotky je uvedeno na Obr. 43, kde je použito třibodové zapojení oscilátoru s induktivní zpětnou vazbou s aktivním prvkem tvořeným tranzistorem J-FET. Tato koncepce umožňuje snadnou optimalizaci konstrukce jednoduchého LC oscilátoru:

- Tranzistor J-FET vykazuje v oblasti používaných frekvencí velmi vysokou impedanci, což umožňuje jeho přímé připojení k rezonančnímu obvodu L_1 , C_s , bez rizika jeho tlumení.
- PN přechod hradla tranzistoru je využit spolu s C_2 , R_1 jako špičkový usměrňovač vstupního signálu ke generování předpětí hradla tranzistoru, kterým je řízen pracovní bod tranzistoru v režimu oscilátoru a stabilizována úroveň generovaného signálu.
- Stejnoseměrný pracovní bod tranzistoru je stabilizován odporem R_2 v obvodu source tranzistoru, který je z hlediska střídavého signálu blokován kondenzátorem C_3 .
- Výstupní signál lze, vzhledem k velké strmosti y_{21S} tranzistoru odebrat přímo z drainu tranzistoru, kde je snímán z malého zatěžovacího odporu R_3 .
- Zpětná vazba oscilátoru byla nastavena experimentálně vzájemnou indukčností cívek L_1 a L_2 tak, aby výstupní napětí oscilátoru (rozkmit špička - špička) bylo 1 V.

Energetická spotřeba oscilátoru byla na základě měření stanovena na 60,83 mW.

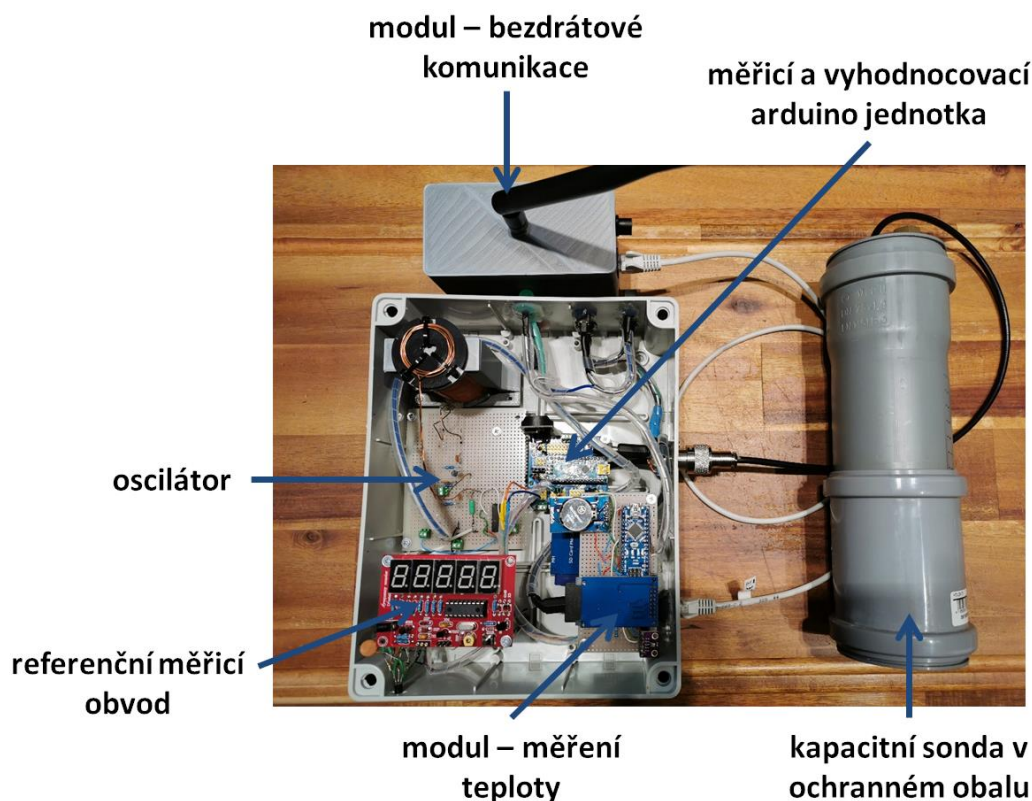


Obr. 43 Schéma zapojení oscilátoru – C_s – označení kapacitní sondy; Q_1 - tranzistor J-FET; L_1 - cívka oscilátoru rezonančního obvodu s kapacitní sondou C_s ; L_2 – cívka kladné zpětné vazby oscilátoru

Celý měřicí systém včetně kapacitní měřicí sondy a modulu pro bezdrátovou komunikaci je uveden na Obr. 44 a Obr. 45, kde je též patrná vnitřní struktura jednotky.



Obr. 44 Měřicí a vyhodnocovací jednotka s kapacitní sondou v ochranném obalu a modulem pro bezdrátovou komunikaci



Obr. 45 Vnitřní struktura měřicí a vyhodnocovací jednotky

6.6 Měřicí a vyhodnocovací jednotka – stanovení parametrů obvodu

Po realizaci měřicí a vyhodnocovací jednotky bylo nutné stanovit reálné základní parametry obvodu. Těmito parametry jsou: parazitní kapacita konektoru a přívodních vodičů k cívce oscilátoru C_k , skutečná impedance cívky oscilátoru L_1 . Pro dále uvedené vztahy platí: C_1 a C_2 jsou hodnoty kapacit testovaných kondenzátorů, které byly zapojeny do obvodu oscilátoru namísto měřené sondy, za účelem identifikace již výše zmíněných parametrů obvodu. Velikosti C_1 a C_2 byly zvoleny s ohledem na mezní parametry sondy, které byly změřeny dříve (kapitola 6.4.1) a které odpovídají minimální a maximální kapacitě sondy indikované v průběhu výše uvedeného pokusného zámrazu. Samotné měření spočívalo v postupném připojení kondenzátorů C_1 a C_2 na vstup měřicí jednotky a následného odečtení indikovaných frekvencí f_1 a f_2 . Výsledné frekvence f_1 a f_2 byly postupně stanoveny na 0,997 a 0,834 MHz. Na základě indikovaných frekvencí oscilátoru f_1 a f_2 byla stanovena podle vztahu (6.22) parazitní kapacita C_k vstupního konektoru měřicí

jednotky a vodiče, který propojuje tento konektor a vlastní desku plošných spojů s obvodem oscilátoru.

Výpočet parametrů obvodu parazitní kapacita konektoru C_k

$$\frac{C_k + C_1}{C_k + C_2} = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \Rightarrow C_k = \frac{C_1(-1 + \frac{C_2}{C_1} \cdot (\frac{f_2}{f_1})^2)}{1 - (\frac{f_2}{f_1})^2} = 13,1 \text{ pF} \quad (6.22)$$

kde: je $f_1 = 0,997 \text{ MHz}$ frekvence oscilátoru příslušející zamrzlému stavu $C_1 = 150 \text{ pF}$ a kapacitě sondy $C_2 = 220 \text{ pF}$ (rozmrzlý stav) odpovídá frekvence $f_2 = 0,834 \text{ MHz}$. Tato parazitní kapacita C_k byla stanovena na $13,1 \text{ pF}$.

Na základě stanovené parazitní kapacity C_k byla následně stanovena indukčnost cívky oscilátoru L_1 podle vztahu (6.23) na $156 \mu\text{H}$.

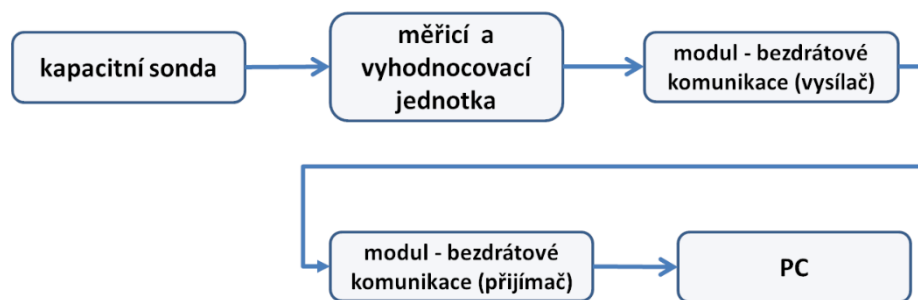
Výpočet indukčnosti cívky oscilátoru L_1

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_1(C_1 + C_k)}} \Rightarrow L_1 = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_1)^2 \cdot (C_k + C_1)} = 156 \mu\text{H} \quad (6.23)$$

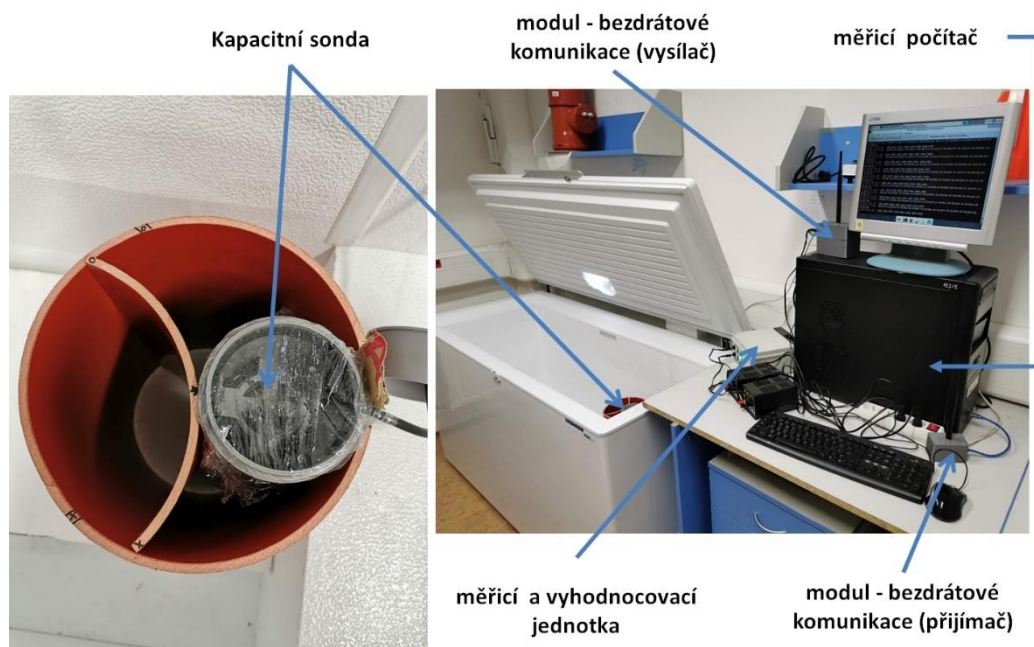
kde: $f_1 = 0,997 \text{ MHz}$, $C_k = 13,1 \text{ pF}$, $C_1 = 150 \text{ pF}$

6.7 Měřicí a vyhodnocovací jednotka – stanovení převodní charakteristiky indikované frekvence oscilátoru na tloušťku ledu

Převodní charakteristika byla stanovena na základě experimentálního zámrazu sondy v laboratorních podmínkách. Měření spočívalo v zámrazu samostatné kapacitní sondy. Naměřená data o stavu tloušťky ledu byla ukládána na SD kartu, která byla součástí jednotky, a dále pak na vzdálený měřicí počítač (PC). Blokové schéma měření je uvedeno na Obr. 46. Foto reálného měřicího pracoviště je uvedeno na Obr. 47.

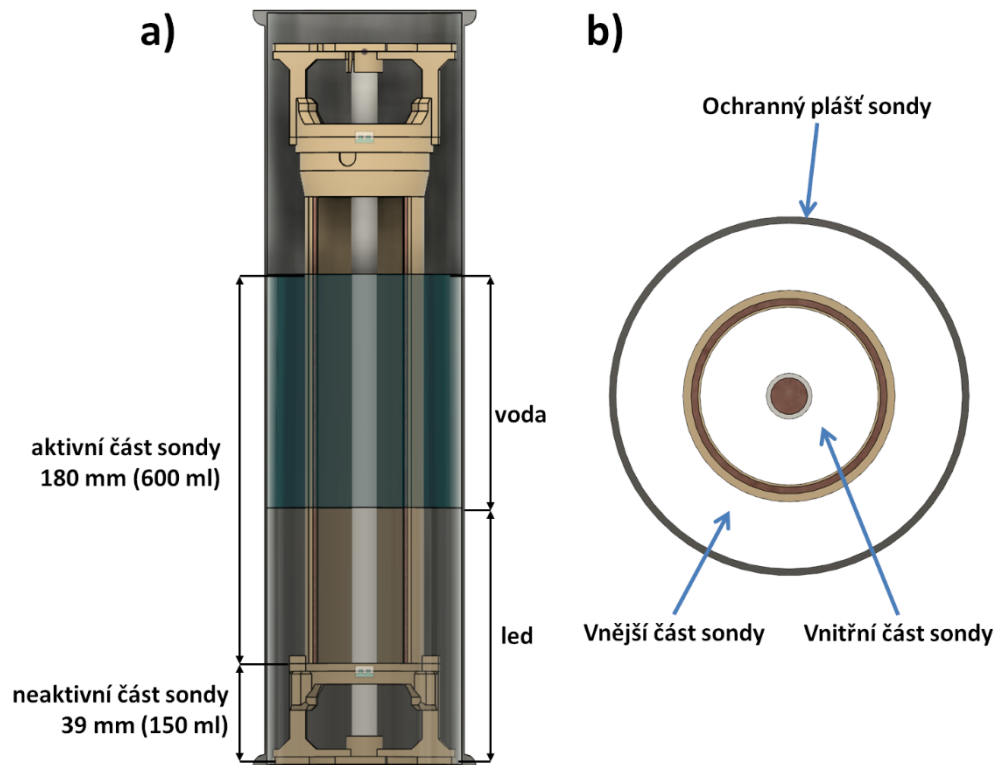


Obr. 46. Struktura měřicího pracoviště – stanovení převodní charakteristiky



Obr. 47 Měřicí pracoviště – stanovení převodní charakteristiky s detailem na testovanou kapacitní sondu umístěnou ve fixačním přípravku a ochranném pouzdru

Měření bylo koncipováno způsobem, aby bylo možné měřit přesně definované přírůstky ledu a též, aby bylo možné tyto přírůstky kontrolně měřit pomocí posuvného měřítka. Z tohoto důvodu bylo využito horizontální symetričnosti sondy. Tedy v průběhu měření bylo vždy do pláště sondy doplněno definované množství destilované vody, která byla následně ponechána zamrznout. Po jejím zámrazu byla pomocí posuvného měřítka změřena vzdálenost mezi svrchní částí ledu a horní částí sondy. Ze známých rozměrů sondy byla následně stanovena tloušťka ledu. Po odečtení tloušťky ledu byla dolita destilovaná voda uvnitř sondy do výšky odpovídající 180 mm (maximální měřicí rozsah sondy) a po ustálení byla odečtena frekvence oscilátoru měřicí jednotky, která odpovídala dané tloušťce ledu. Po odečtení frekvence byla tato voda vylita. Následně byl, pro opětovný zámraz, dolit definovaný objem destilované vody, čímž bylo simulováno zvýšení ledové vrstvy. Celý proces byl osmkrát opakován, tak aby byl pokryt celý měřicí rozsah sondy (0 – 180 mm). S výjimkou první iterace, byl vždy na zámraz dolit stejný objem vody. Do vnitřní části sondy, tedy do prostoru mezi dielektriky vnitřní a vnější elektrody bylo vždy dolito 21 ml. Do vnější části sondy, tedy do prostoru mezi dielektrikem vnější elektrody a pláštěm sondy bylo vždy přilito 45 ml. V případě prvního zámrazu byl dolit objem 150 ml, který odpovídá neaktivní části sondy. Schematické zobrazení kapacitní sondy v průběhu měření je uvedeno na Obr. 48.

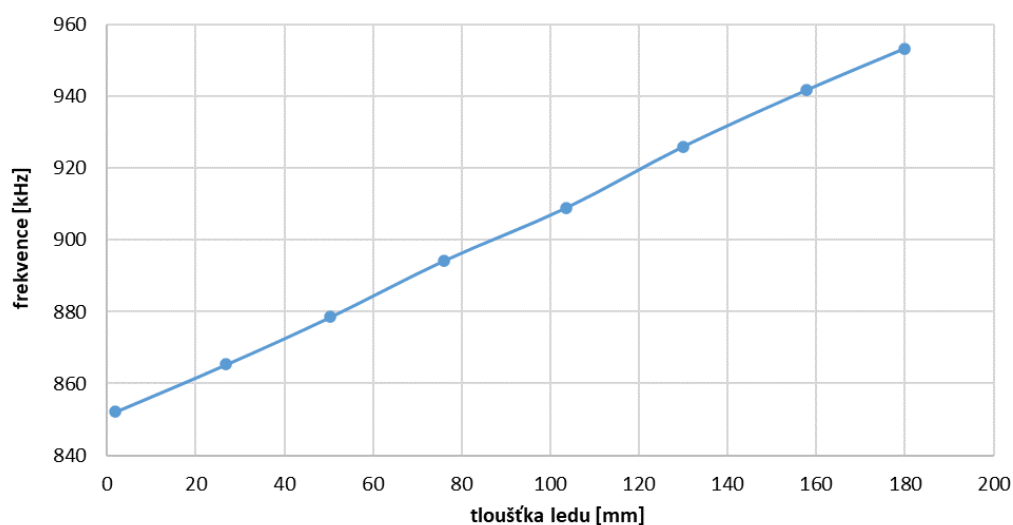


Obr. 48 Schematické zobrazení kapacitní sondy v průběhu měření. a) Bokorys kapacitní sondy se schematickým vyjádřením průběhu měření. b) Půdorysné zobrazení kapacitní sondy

Výsledky měření jsou shrnuty v tabulce (Tab. 4) a grafu na Obr. 49. Dle Tab. 4 se tloušťka ledu pohybovala v rozsahu 1,9 – 180,0 mm. Při těchto tloušťkách ledu byla indikována frekvence oscilátoru v rozsahu 852,17 – 953,36 kHz. Uvedené výsledky jsou vyneseny do grafu (Obr. 49), kde vyjádřena závislost frekvence oscilátoru na tloušťce ledu. Z grafu je patrná lineární závislost frekvence oscilátoru na tloušťce ledu.

Tab. 4 Frekvence oscilátoru a skutečná tloušťka ledu měřená v průběhu pokusného zámrazu sondy

Skutečná tloušťka ledu [mm]	Indikovaná frekvence [kHz]
1,9	852,17
26,8	865,31
50,4	878,56
76,0	894,23
103,6	909,00
129,9	925,99
157,9	941,78
180,0	953,36



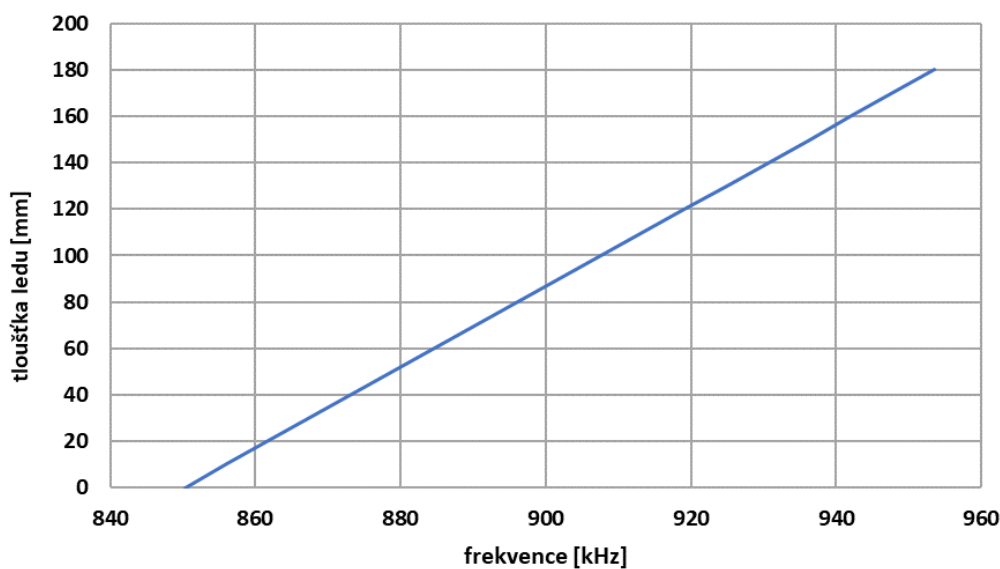
Obr. 49 Indikovaná frekvence oscilátoru v průběhu zámrazu

Inverzní převodní charakteristika, vyjadřující závislost tloušťky ledu na měřené frekvenci, byla stanovena pomocí polynomiální regrese. Jako vstupní data pro výpočet aproximačního polynomu byly použity hodnoty uvedené v Tab. 4. Výslednou závislost tloušťky ledu na indikované frekvenci oscilátoru vyjadřuje polynom 1. řádu (6.24).

$$H_l = 0,001743 \cdot f_{osc} - 1482 \quad (6.24)$$

Kde H_l [mm] vyjadřuje výslednou tloušťku ledu v závislosti na velikosti indikované frekvence oscilátoru f_{osc} [Hz]. Pro výsledný aproximační polynom (6.24) byl stanoven koeficient determinace (R^2) v hodnotě 99,96 %, což vyjadřuje velmi vysokou úroveň predikce hodnot závislé proměnné H_l na indikované frekvenci oscilátoru f_{osc} .

Na základě vztahu (6.24) byla sestaveno grafické zobrazení převodní charakteristiky mezi velikostí indikované frekvence oscilátoru a výsledné tloušťky ledu. Ta je uvedena v grafu na Obr. 50. Zde měřicímu rozsahu sondy (0 – 180 mm) odpovídá frekvenční rozsah mezi 850,26 – 953,53 kHz. Tedy výsledné rozlišení bylo stanoveno na $0,57 \text{ kHz} \cdot \text{mm}^{-1}$. Z grafu je patrné, že výsledná převodní charakteristika je lineární.



Obr. 50 Závislost tloušťky ledu na měřené frekvenci – odvozena pomocí aproximačního polynomu

6.8 Měřicí a vyhodnocovací jednotka – návrh software

Měření a vyhodnocování tloušťky ledu bylo realizováno pomocí mikropočítače Arduino Nano V3.0. Pomocí tohoto mikropočítače byla měřena frekvence oscilátoru, v jehož rezonančním obvodu, určujícím kmitočet oscilátoru, byla měřicí kapacitní sonda součástí. Z frekvence oscilátoru byla následně stanovena tloušťka ledu dle převodní charakteristiky, viz. vztah (6.24).

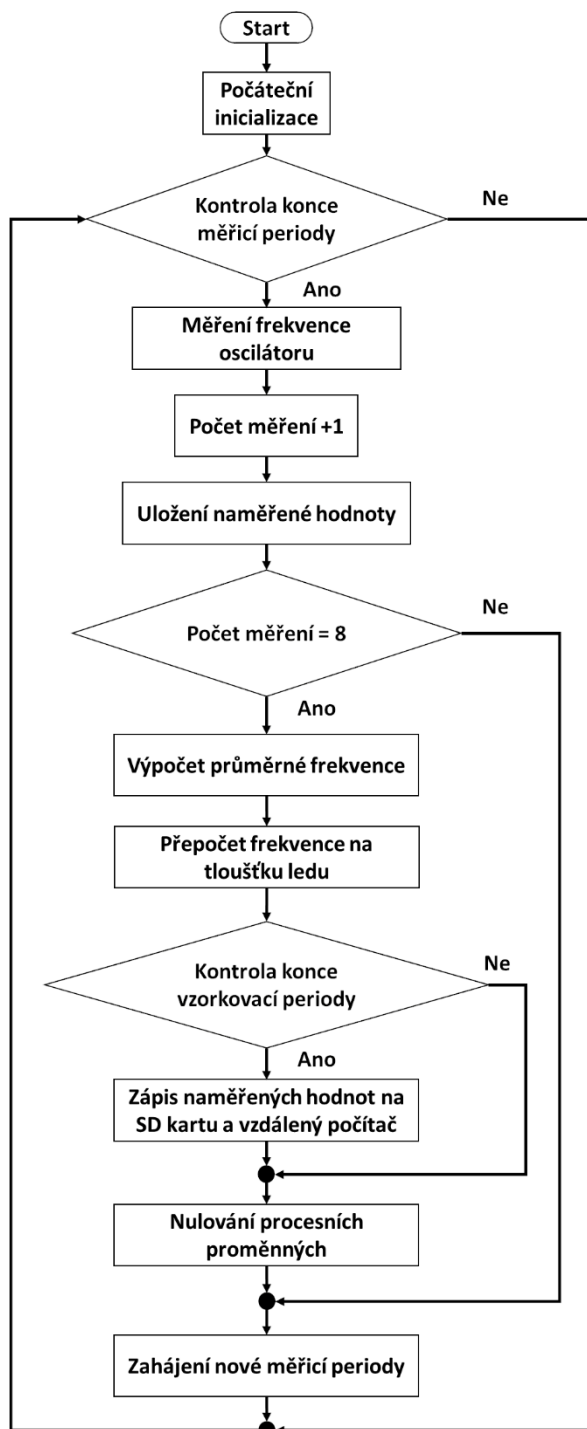
Měření frekvence oscilátoru spočívalo v detekci pulsů signálu generovaných tímto oscilátorem. Tyto pulsy byly počítány po dobu měřicí periody (4,08 ms) a následně dle vztahu (6.25) přepočteny na frekvenci oscilátoru.

$$f_{osc} = \frac{p}{T_m} \quad (6.25)$$

Kde f_{osc} [Hz] vyjadřuje změřenou frekvenci oscilátoru, p označuje počet změřených pulzů signálu za dobu T_m – doba čítání pulzů (4,08 ms). Výsledná frekvence byla počítána jako průměr z osmi naměřených hodnot. Tato hodnota byla následně přepočtena dle vztahu (6.24) na tloušťku ledu. Hodnota tloušťky ledu spolu s dalšími zdrojovými daty, na základě kterých byla výsledná tloušťka ledu stanovena, byly následně prostřednictvím modulu pro bezdrátovou komunikaci (xbee modul) přeneseny na vzdálený měřicí počítač, kde byla tato data ukládána. Současně byla veškerá tato data zálohována na SD kartu pro případ ztráty spojení. SD karta byla součástí měřicí jednotky. Zdrojová data jako jsou průměrná frekvence, skutečně změřený počet pulzů, ze kterých byla frekvence počítána, která sloužila ke stanovení tloušťky ledu, byla logována z důvodu testování a ladění chyb softwaru.

Vývojový diagram na Obr. 51 rámcově popisuje funkcionalitu softwaru jednotky. Jak je z diagramu patrné, po spuštění jednotky, proběhla nejprve počáteční inicializace, v rámci, které jsou nastaveny výchozí parametry procesním proměnným, iniciování časovačů a jednotlivých rozhraní SPI a sériové linky, která slouží pro komunikaci s periferiemi (SD modul, xbee modul). Následně probíhá cyklické měření frekvence oscilátoru. Výsledná frekvence je vždy průměrována z osmi naměřených hodnot a dle převodní charakteristiky (6.24) je následně stanovena aktuální tloušťka ledu. Tato hodnota, stejně jako zdrojová data, na základě kterých je tloušťka ledu stanovena, jako jsou počty pulsů a frekvence oscilátoru, jsou každých deset sekund (vzorkovací perioda) odesílána na

vzdálený počítač prostřednictvím modulu pro bezdrátovou komunikaci. Současně jsou veškerá naměřená data zálohována na SD kartu, která je součástí jednotky. Každá měřicí perioda je ukončena nulováním procesních proměnných a inicializací nového měřicího cyklu.



Obr. 51 Vývojový diagram softwaru řídicí a vyhodnocovací jednotky

7 Testování funkčnosti kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky

Testování funkčnosti celé měřicí soustavy, vlastní kapacitní sondy a vlastní měřicí jednotky proběhlo v laboratorních podmínkách. K testování v laboratorních podmínkách bylo přistoupeno z důvodu možnosti ověření podmínek průběhu zámrazu a zajištění opakovatelnosti jednotlivých měření. Účelem měření bylo otestovat funkčnost měřicího systému jako celku a ověřit opakovatelnost dosažených výsledků.

7.1 Výchozí podmínky pro testování funkčnosti kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky

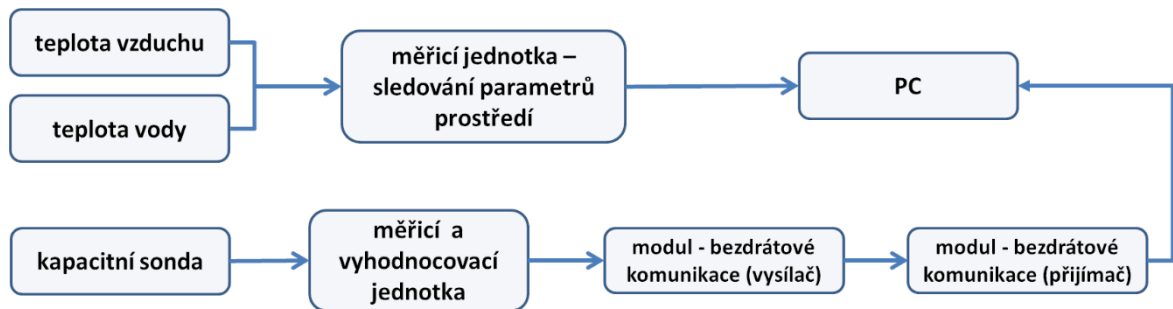
V rámci měření byla sonda umístěna do nádoby s vodou, která byla tepelně izolována od okolního prostředí minerální vatou. Toto opatření bylo zavedeno pro zajištění promrznání ve směru od hladiny ke dnu nádoby tak, aby se zajistilo věrné napodobení přírodních podmínek. Do této nádoby byly též umístěny senzory pro sledování teploty vody. Výška hladiny vody v nádobě byla dorovnána do stejné výšky, jaké dosahovala hladina destilované vody v pouzdru měřené sondy, tedy 180 mm. Nádoba byla následně umístěna do mrazicího boxu, kde probíhalo vlastní měření, viz Obr. 52.



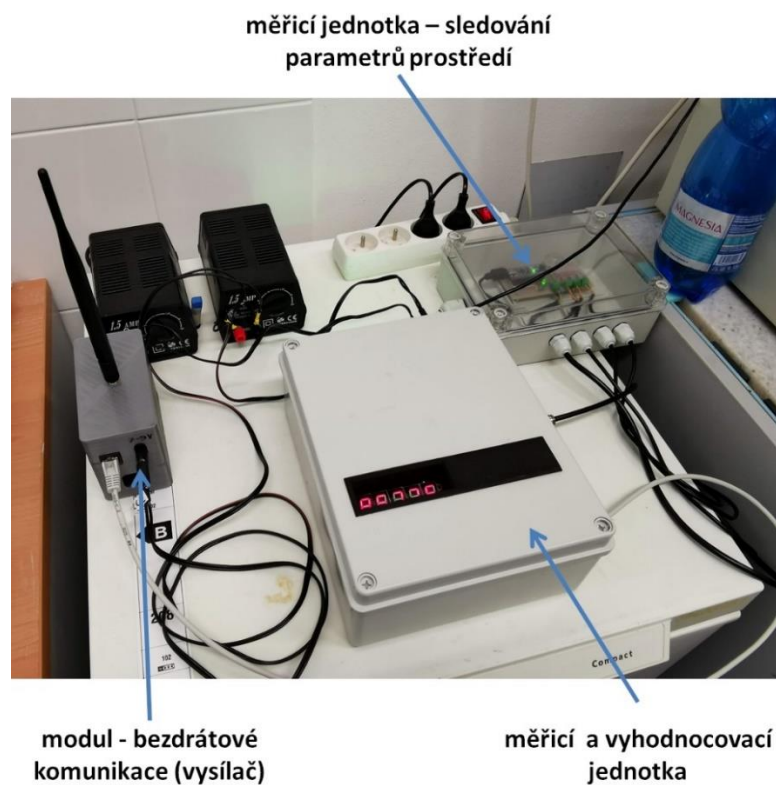
Obr. 52 Kapacitní sonda v pokusné tepelně izolované nádrži umístěné v mrazícím boxu

Měření spočívalo v cyklickém zamrznání a tání vody v testovací nádobě při současném sledování tloušťky ledu, které bylo měřeno vlastní měřicí a vyhodnocovací jednotkou.

V průběhu měření byla také sledována teplota vody pomocí aparatury pro měření teplot prostředí, která byla blíže popsána v kapitole 6.4. Struktura měřicího pracoviště je uvedena na Obr. 53. Zde byla kapacita sondy průběžně vyhodnocována měřicí a vyhodnocovací jednotkou, teploty vzduchu a vody byly indikovány pomocí navržené jednotky pro sledování parametrů prostředí. Naměřená data o stavu tloušťky ledu byla ukládána na SD kartu, která byla součástí jednotky, a dále pak na vzdálený měřicí počítač, kde také byla průběžně ukládána data o stavu prostředí. Reálné měřicí pracoviště je uvedeno na Obr. 54.



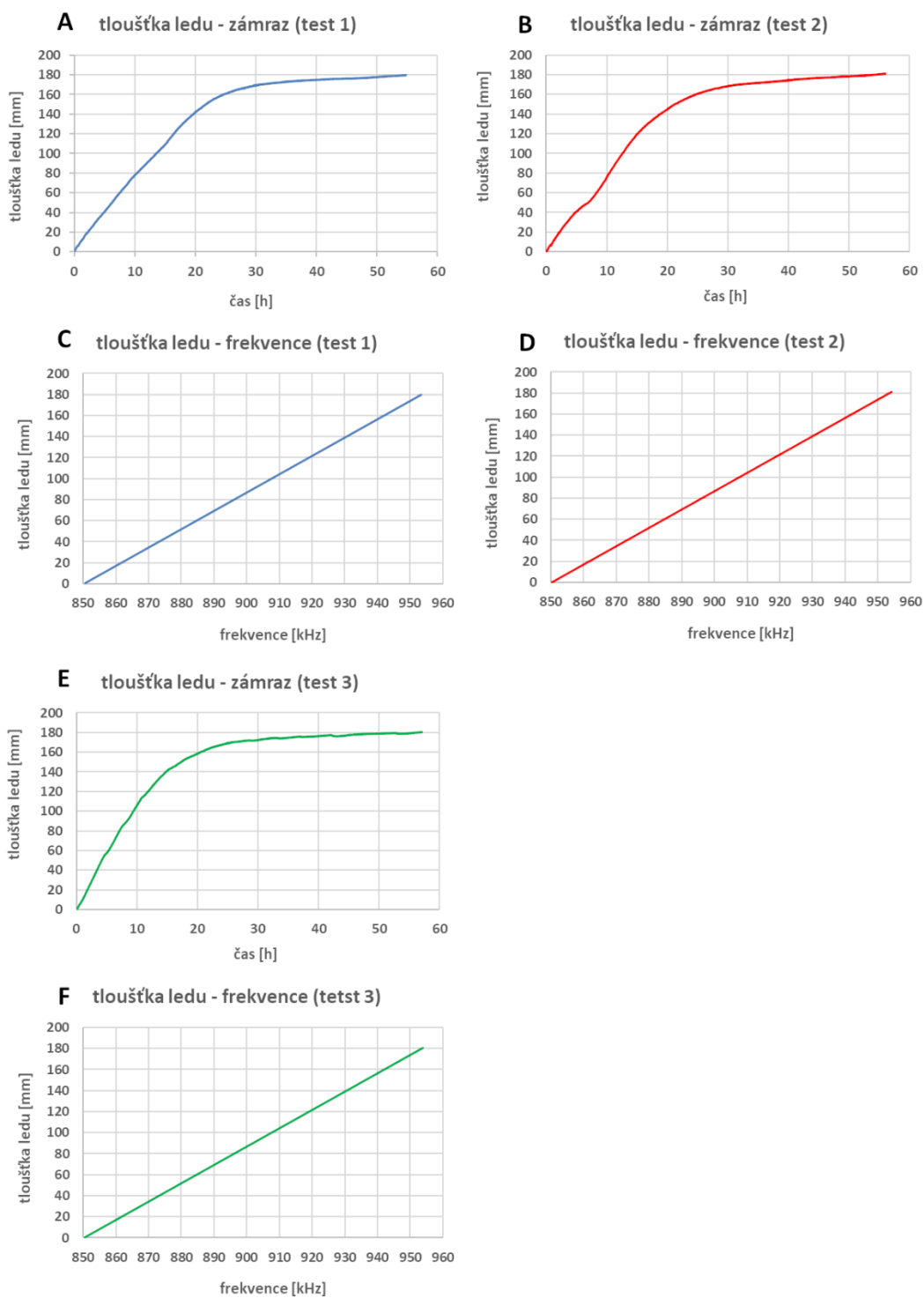
Obr. 53 Struktura měřicího pracoviště – testování kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky



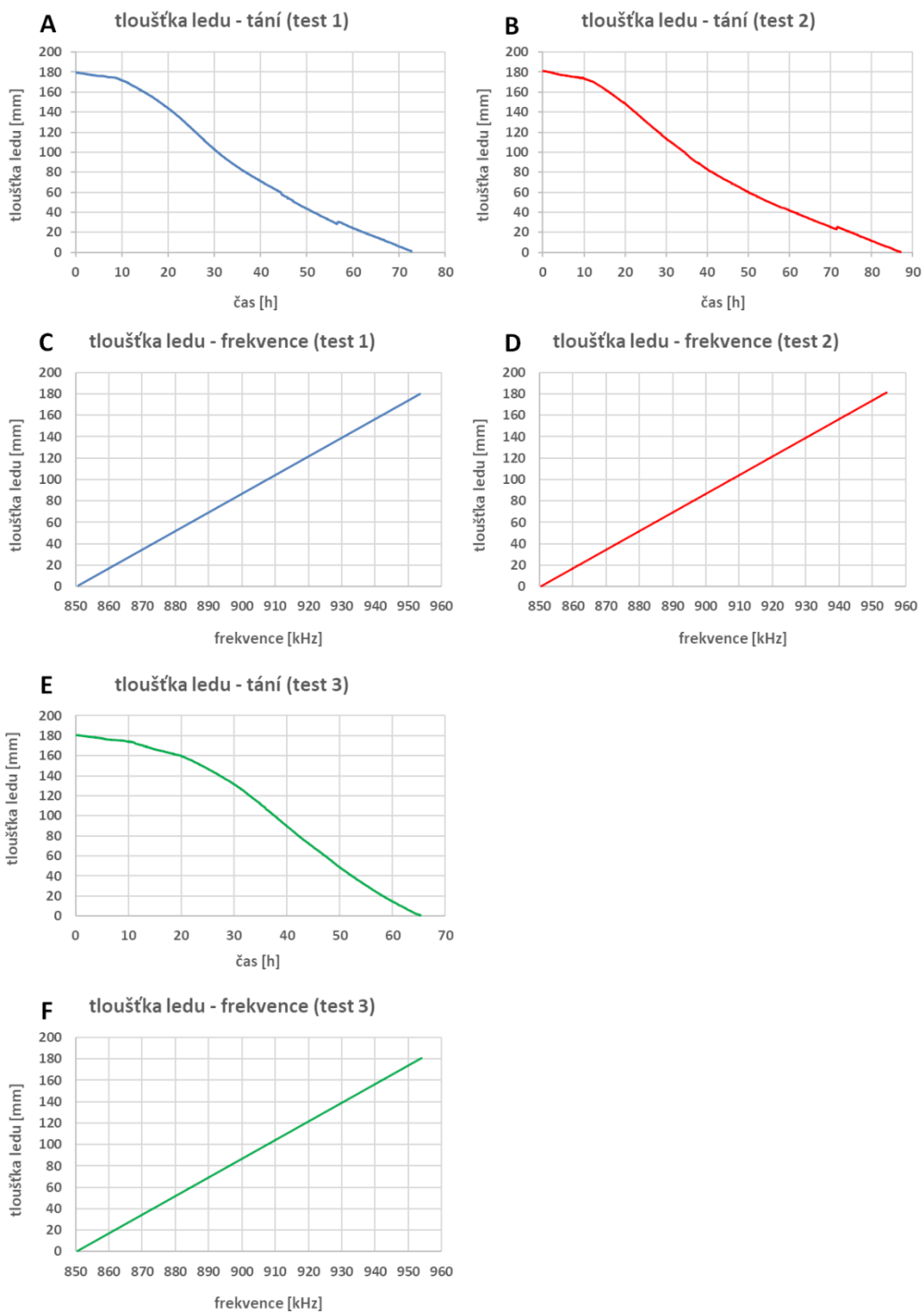
Obr. 54 Měřicí pracoviště – testování kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky

7.2 Výsledky testování funkčnosti kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky

Výsledky dosažené v rámci provedeného testování navržené sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky při cyklickém zámrazu a tání vody v testovací nádobě jsou shrnuty v grafech na Obr. 55 a Obr. 56. Křivky v grafech na Obr. 55 vyjadřují indikovanou tloušťku ledu během tří různých zámrazů. Zde jednotlivé grafy A, B a E vyjadřují časovou závislost tloušťky ledu v průběhu zámrazu. Grafy C, D a F popisují závislost indikované frekvence na tloušťce ledu během jednotlivých testů. Na Obr. 56 jsou uvedeny grafy (A, B, E) vyjadřující časovou závislost indikované tloušťky ledu a grafy C, D, a F frekvenční závislost tloušťky ledu v průběhu tání během jednotlivých testů. Jak je patrné z grafů C a F na Obr. 55 a Obr. 56 frekvenční závislosti tloušťky ledu v průběhu zámrazu a tání během jednotlivých testů jsou lineární. Směrnice přímk v těchto grafech byla stanovena na $1,74 \text{ mm} \cdot \text{kHz}^{-1}$.



Obr. 55 Tloušťka ledu v průběhu zámrazu: A – časová závislost tloušťky ledu v průběhu testu 1; B – časová závislost tloušťky ledu v průběhu testu 2; C – frekvenční závislost tloušťky ledu v průběhu testu 1; D – frekvenční závislost tloušťky ledu v průběhu testu 2; E – časová závislost tloušťky ledu v průběhu testu 3; F – frekvenční závislost tloušťky ledu v průběhu testu 3



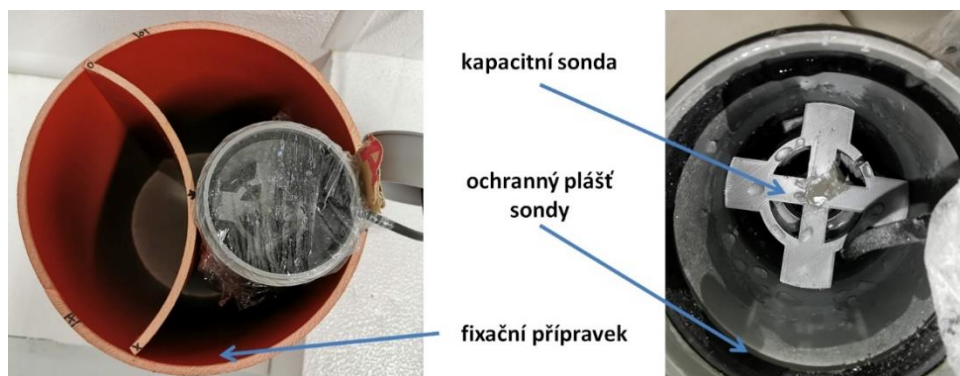
Obr. 56 Tloušťka ledu v průběhu tání: A – časová závislost tloušťky ledu v průběhu testu 1; B – časová závislost tloušťky ledu v průběhu testu 2; C – frekvenční závislost tloušťky ledu v průběhu testu 1; D – frekvenční závislost tloušťky ledu v průběhu testu 2; E – časová závislost tloušťky ledu v průběhu testu 3; F – frekvenční závislost tloušťky ledu v průběhu testu 3

8 Stanovení standardní nejistoty měřicí kapacitní sondy

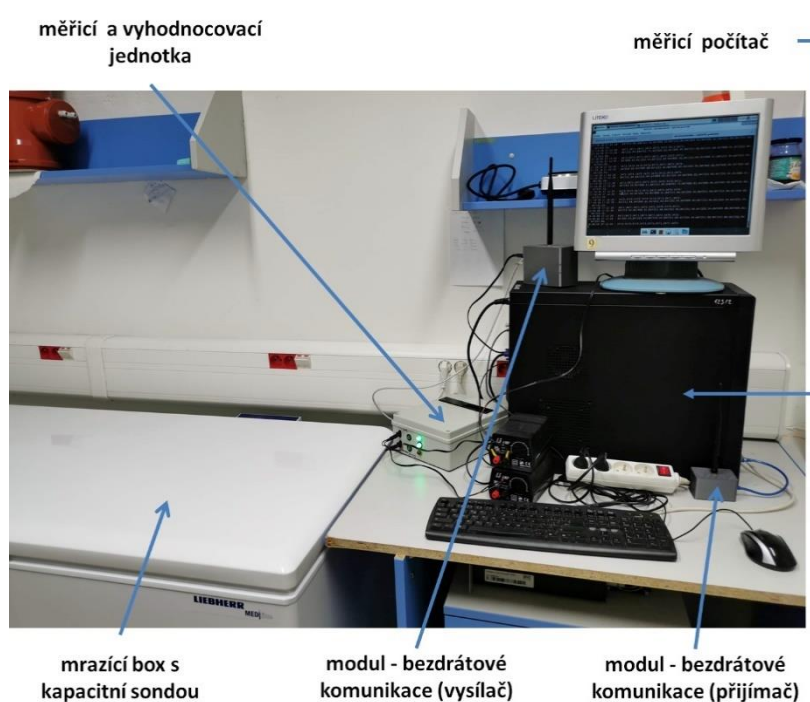
Stanovení standardní nejistoty měřicí sondy proběhlo na základě měření při pokusném zámrazu v laboratorních podmínkách. Při tomto zámrazu byla při osmi různých tloušťkách ledu stanovena odpovídající frekvence oscilátoru měřicí a vyhodnocovací jednotky a stanovena příslušná tloušťka ledu dle převodní charakteristiky (6.24). Tato data byla použita pro výpočet standardní nejistoty typu A měřicí kapacitní sondy. Z důvodu využití měřicí a vyhodnocovací jednotky vlastní konstrukce nebylo možné použít informace výrobce pro stanovení standardní nejistoty typu B kapacitní sondy. Nejistota měřicí a vyhodnocovací jednotky v pracovním frekvenčním rozsahu sondy (850 – 960 kHz) byla stanovena pomocí oceňovaných kondenzátorů (etalonů), které svou velikostí co možná nejpřesněji odpovídaly kapacitě sondy při pokusném zámrazu při testovaných tloušťkách ledu. Následně byly stanoveny standardní nejistoty typu B a C měřicí a vyhodnocovací jednotky. Kombinovaná standardní nejistota typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky byla následně použita pro výpočet standardní nejistoty typu B a C kapacitní sondy.

8.1 Stanovení standardní nejistoty typu A měřicí kapacitní sondy

Standardní nejistota typu A měřicí a kapacitní sondy byla stanovena z dat získaných během pokusného zámrazu samotné kapacitní sondy, tedy sondy bez vnější pokusné nádrže umístěné pouze ve fixačním přípravku, viz Obr. 57. Naměřená data o stavu tloušťky ledu byla ukládána na SD kartu, která byla součástí jednotky, a dále pak byla ukládána na vzdálený měřicí počítač. Blokové schéma měření je shodné jako v případě stanovení převodní charakteristiky (kapitola 6.7), viz Obr. 46. Měřicí pracoviště je uvedeno na Obr. 58.



Obr. 57 Kapacitní sonda ve fixačním přípravku

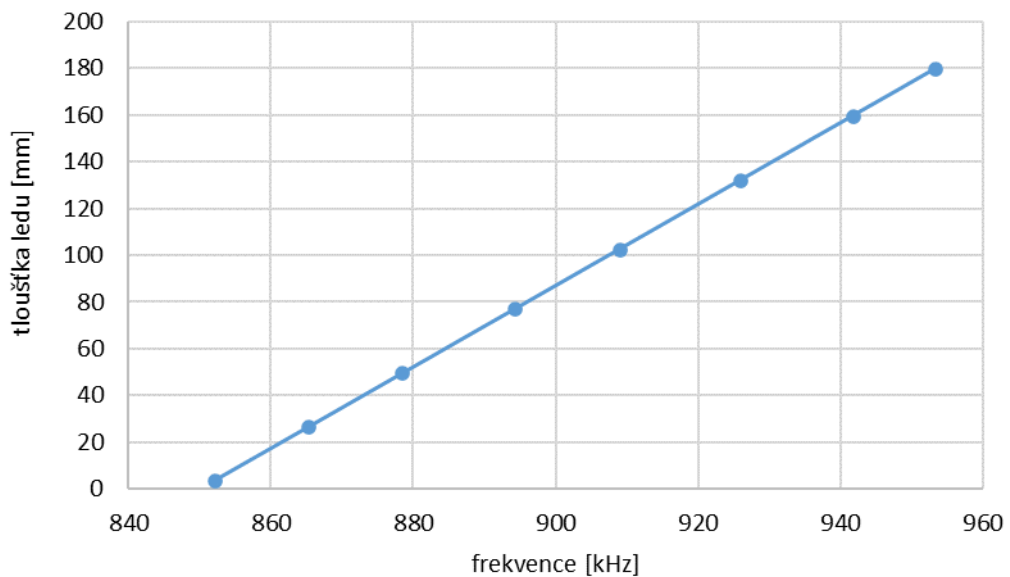


Obr. 58 Měřicí pracoviště - stanovení standardní nejistoty typu A kapacitní sondy

Měření bylo koncipováno způsobem, který umožňoval měřit přesně definované přírůstky ledu. Z tohoto důvodu bylo postupováno dle stejného měřicího postupu jako v případě měření pro stanovení převodní charakteristiky (kapitola 6.7) a využívající horizontální symetričnosti sondy. Postup měření se skládal z kroků, ve kterých bylo vždy do pláště sondy dolito definované množství destilované vody, která byla ponechána zamrznout. Po jejím zámrazu byla dolita destilovaná voda v plášti sondy do výšky odpovídající 180 mm (maximální měřicí rozsah sondy) a po ustálení byla odečtena frekvence oscilátoru měřicí jednotky, která odpovídala dané tloušťce ledu. Po odečtení

frekvence byla tato voda vylita. Následně byl, pro opětovný zámraz, dolit definovaný objem destilované vody, čímž bylo simulováno zvýšení ledové vrstvy. Tento postup byl opakován, tak aby byl pokryt celý měřicí rozsah sondy (0 – 180 mm).

Výsledky měření jsou shrnuty v grafu Obr. 59 a v tabulce Tab. 5. Graf na Obr. 59 vyjadřuje závislost tloušťky ledu na indikované frekvenci oscilátoru. Tab. 5 shrnuje výsledky měření. Průměrná frekvence byla vždy stanovena jako průměr deseti hodnot naměřených pro danou tloušťku ledu. Standardní nejistota typu A kapacitní sondy byla následně vypočtena jako směrodatná odchylka ze změřených frekvencí oscilátoru. Následně byla tato směrodatná odchylka vyjádřena v milimetrech, převod byl uskutečněn pomocí převodní charakteristiky (6.24). Jak je uvedeno v Tab. 5 indikovaná průměrná frekvence oscilátoru se pohybovala mezi 852,171 – 953,360 kHz. Standardní nejistota typu A se pro jednotlivé frekvence pohybovala v rozsahu 20 – 468 Hz, tedy vyjádřeno v milimetrech tloušťky ledu 0,1 – 1,6 mm.



Obr. 59 Tloušťka ledu v závislosti na měřené frekvenci oscilátoru v průběhu měření standardní nejistoty typu A kapacitní sondy

Tab. 5 Souhrn výsledků měření standardní nejistoty typu A kapacitní sondy

Tloušťka ledu [mm]	Průměrná frekvence oscilátoru [kHz]	u_{Ak} [Hz]*	u_{Ak} [mm]*
3,3	852,171	106,33	0,37
26,2	865,311	20,32	0,07
49,3	878,562	57,21	0,20
76,7	894,233	49,80	0,17
102,4	909,003	277,52	0,97
132,0	925,991	468,49	1,63
159,5	941,776	277,72	0,97
179,7	953,360	23,93	0,08

* u_{Ak} – standardní nejistota typu A kapacitní sondy.

8.2 Stanovení standardní nejistoty typu A měřicí a vyhodnocovací jednotky

Pro účely měření byla použita měřicí a vyhodnocovací jednotka vlastní konstrukce. Z tohoto důvodu nebylo možné pro účely stanovení standardní nejistoty typu B kapacitní sondy použít údaje o nejistotě měřicí jednotky z dokumentace výrobce. Chybějící informace o nejistotě měření jednotky byly stanoveny výpočtem z experimentálně získaných dat.

Prvním krokem bylo stanovení standardní nejistoty typu A vyhodnocovací a měřicí jednotky v operačním frekvenčním rozsahu kapacitní sondy (852,2 – 953,4 kHz). K tomuto účelu byla použita sada kalibrovaných kondenzátorů (etalonů), které simulovaly rozdílnou kapacitu sondy při různých tloušťkách ledu. Kondenzátory byly voleny tak, aby co možná nejpřesněji odpovídaly kapacitě sondy indikované při měření její nejistoty typu A (kapitola 8.1). Kapacita sondy při jednotlivých tloušťkách ledu byla stanovena z indikované frekvence oscilátoru během měření pomocí známých parametrů obvodu za užití vztahu (8.1). Výsledné kapacity jsou uvedeny v Tab. 6.

$$C_{sondy} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_{osc})^2 \cdot L_1} - C_k \quad (8.1)$$

Kde: C_{sondy} [F] - kapacitu sondy při dané tloušťce ledu; f_{osc} [Hz] – frekvence oscilátoru při dané tloušťce ledu; $L_1 = 156 \mu\text{H}$ – indukčnost cívky oscilátoru; $C_k = 13,1 \text{ pF}$ – parazitní kapacita konektoru.

Tab. 6 Přepočtená frekvence oscilátoru indikovaná v průběhu měření standardní nejistoty typu A kapacitní sondy na kapacitu sondy při daných tloušťkách ledu

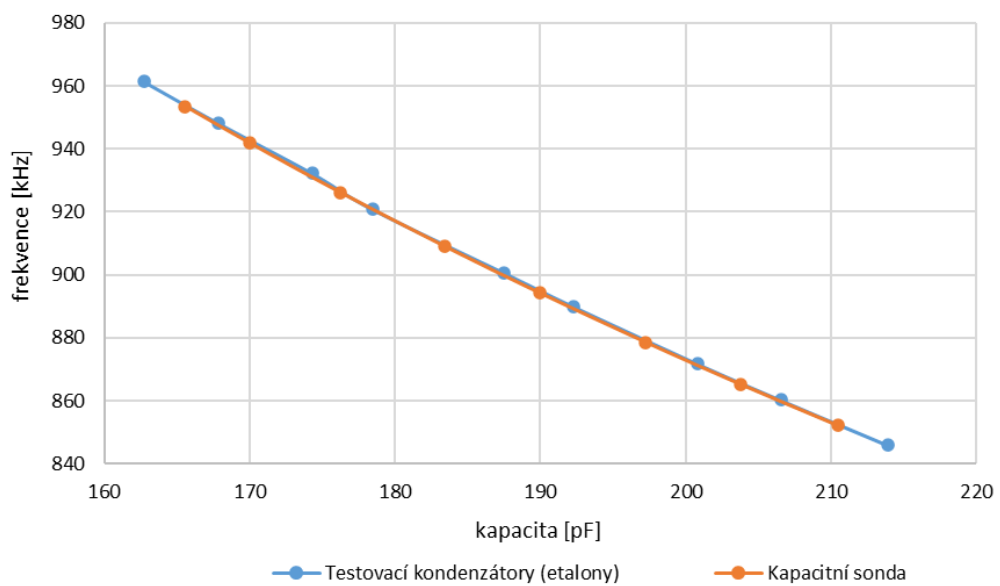
Tloušťka ledu [mm]	Průměrná frekvence oscilátoru [kHz]	Kapacita sondy C_{sondy} [pF]
3,3	852,171	210,5
26,2	865,311	203,8
49,3	878,562	197,3
76,7	894,233	190,0
102,4	909,003	183,4
132,0	925,991	176,3
159,5	941,776	170,0
179,7	953,360	165,6

Z dostupných kondenzátorů byly vybrány hodnoty, které se nejvíce blížily kapacitám sondy uvedeným v tabulce (Tab. 6). Tyto kondenzátory byly následně ocejchovány pomocí E4990A analyzátoru impedance (Keysight Technologist). Výsledné kapacity byly stanoveny jako průměr z deseti naměřených hodnot a jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Ocejchované kapacity testovacích kondenzátorů

Kapacita testovacích kondenzátorů [pF] (ocejchována)								
213,9	206,5	200,8	192,3	187,5	178,5	174,3	167,9	162,7

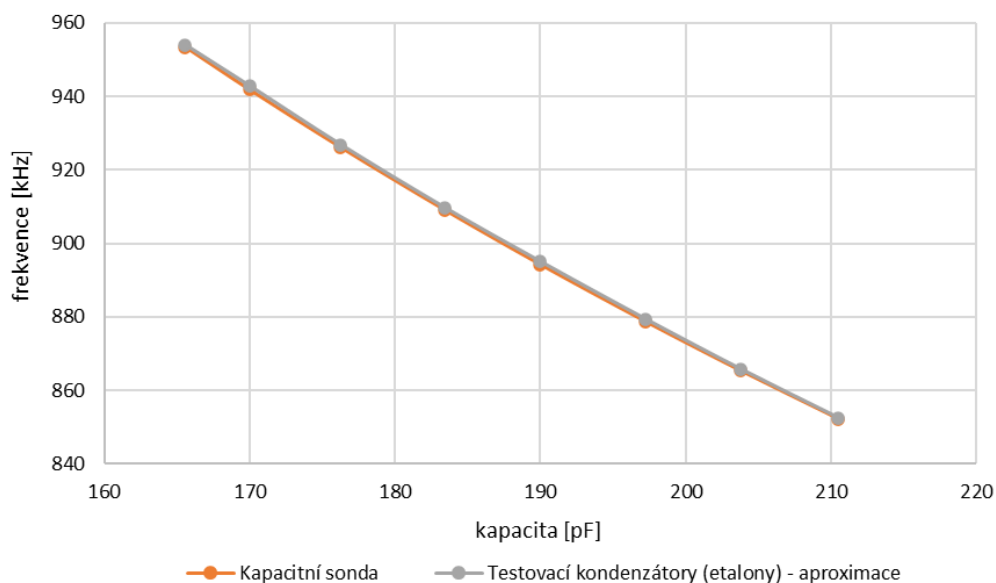
Testovací kondenzátory byly v průběhu měření nejistoty A měřicí a vyhodnocovací jednotky postupně připojovány na její vstup namísto kapacitní sondy. Pro každý kondenzátor bylo vždy naměřeno deset hodnot frekvence oscilačního obvodu, z kterých byla vypočtena průměrná hodnota a stanovena směrodatná odchylka (standardní nejistota typu A jednotky). Výsledná závislost indikované frekvence oscilátoru při daných testovaných kapacitách je uvedena na Obr. 60. Pro srovnání je zde uvedena závislost frekvence oscilátoru na kapacitě sondy v průběhu měření standardní nejistoty A. Z grafu je patrné, že obě křivky jsou téměř totožné.



Obr. 60 Závislost frekvence oscilátoru na kapacitě testovacích kondenzátorů (modrá křivka) a kapacitní sondě (oranžová křivka) v průběhu testů standardní nejistoty typu A

Z důvodu absence testovacích kondenzátorů o identické velikosti jako v případě kapacit indikovaných u měřicí sondy při jejím měření nejistoty typu A, byly použity dostupné kondenzátory o hodnotách kapacit s nejvyšší možnou shodou s kapacitami sondy získaných z měření (Tab. 6). Hodnoty frekvence oscilátoru při identických kapacitách změřených u kapacitní sondy (Tab. 6) byly ze závislosti získané měřením etalonů (Obr. 60) aproximovány. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v grafu na obrázku (Obr. 61) a v tabulce (Tab. 8). Graf na Obr. 61 vyjadřuje závislost frekvence oscilátoru na kapacitě testovacích kondenzátorů, jejichž hodnoty byly aproximovány na identické kapacity měřené při testování kapacitní sondy (šedá křivka), v průběhu testů standardní nejistoty typu A. Tabulka (Tab. 8) shrnuje výsledky měření. Jak je zde uvedeno indikovaná průměrná

frekvence oscilátoru se pohybovala mezi 852,542 – 954,028 kHz. Standardní nejistota typu A se pro jednotlivé frekvence pohybovala v rozsahu 37 – 60 Hz. Následně byla tato směrodatná odchylka vyjádřena v milimetrech, převod byl uskutečněn pomocí převodní charakteristiky (6.24). Standardní nejistota typu A se pohybovala v rozsahu 0,1 – 0,2 mm tloušťky ledu.



Obr. 61 Závislost frekvence oscilátoru na kapacitě testovacích kondenzátorů (aproximováno na identické kapacity měřené při testování kapacitní sondy) (šedá křivka) a kapacitní sondě (oranžová křivka) v průběhu testů standardní nejistoty typu A

Tab. 8 Souhrn výsledků měření standardní nejistoty typu A vyhodnocovací a měřicí jednotky

Kapacita [pF]	Aproximovaná indikovaná průměrná frekvence [kHz]	u_{Aj} [Hz]	u_{Aj} [mm]
210,50	852,542	40,97	0,14
203,76	865,833	55,61	0,19
197,26	879,309	59,61	0,21
189,96	895,117	43,79	0,15
183,41	909,738	48,89	0,17
176,27	926,806	36,69	0,13
169,97	942,859	46,69	0,16
165,55	954,028	50,98	0,18

* u_{Aj} – standardní nejistota typu A vyhodnocovací a měřicí jednotky.

8.3 Stanovení standardní nejistoty typu B měřicí a vyhodnocovací jednotky

Při výpočtu standardní nejistoty typu B měřicí a vyhodnocovací jednotky byly uvažovány následující zdroje nejistot: nejistota etalonu, nejistota krystalu (LFXTAL058383Bulk (HC49/4H)) použitého měřicího mikrokontroleru a nejistota metody měření frekvence mikrokontrolerem. Nejistotou etalonu je označena nejistota měřicího analyzátoru impedance použitého pro cejchování testovacích kondenzátorů v daném frekvenčním rozsahu (850 – 960 kHz). Pro účely cejchování kondenzátorů byl použit E4990A analyzátor impedance (Keysight Technologist), který na testovaném frekvenčním rozsahu dosahuje přesnosti 1% [61]. Nejistota krystalu (IQD Frequency Products Ltd, LFXTAL058383Bulk (HC49/4H)) použitého pro časování měřicího mikrokontroleru byla stanovena dle údajů dostupných u výrobce, který u tohoto krystalu deklaruje v teplotním rozsahu -40 – +85 °C toleranci +/- 30 ppm [62]. Měření frekvence bylo uskutečněno čítačovou metodou. Pro účely výpočtu nejistoty byla uvažována nejvyšší možná odchylka, která při použití této metody může nastat, a to ve velikosti maximálně dvou period měřené

frekvence. Stanovené nejistoty při dané testované kapacitě jsou uvedeny v tabulce (Tab. 9). Z tabulky je patrné, že největší podíl na celkové nejistotě představuje chyba etalonu, která se pohybuje v intervalu 4 392 – 4 952 Hz. Nejistota krystalu (LFXTAL058383Bulk (HC49/4H)) byla stanovena na 960 Hz a nejistota metody měření frekvence mikrokontrolerem se pohybuje v rozsahu $2,10 \cdot 10^{-6}$ - $2,35 \cdot 10^{-6}$ Hz. Výsledná standardní nejistota typu B měřicí a vyhodnocovací jednotky byla stanovena v intervalu pomocí vztahu (8.2). Při výpočtu bylo uvažováno normální rozdělení měřených dat. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 9). Z tabulky je patrné, že standardní nejistota typu B měřicí a vyhodnocovací jednotky byla stanovena v intervalu 4 495 – 5 044 Hz, tedy 7,8 - 8,8 mm (vyjádřeno v milimetrech tloušťky ledu).

$$u_{Bj} = \sqrt{\sum_{j=1}^3 u_{zj}^2} \quad (8.2)$$

Kde: u_{Bj} [Hz] – výsledná standardní nejistota typu B vyhodnocovací a měřicí jednotky, u_{zj} [Hz] – jednotlivé složky nejistoty B (nejistota etalonu, nejistota krystalu (LFXTAL058383Bulk (HC49/4H)) použitého měřicího mikrokontroleru a nejistota metody měření frekvence mikrokontrolerem).

Tab. 9 Souhrn výsledků měření standardní nejistoty typu B vyhodnocovací a měřicí jednotky

Kapacita [pF]	Frekvence oscilátoru [kHz]	Zdroje nejistot [Hz]			u_{Bj} [Hz] ⁴	u_{Bj} [mm] ⁵
		Etalon ¹	Krystal ²	Metoda ³		
210,50	852,542	4391,51	960	$2,35^{-6}$	4495,21	7,8
203,76	865,833	4463,54	960	$2,31^{-6}$	4565,61	8,0
197,26	879,309	4536,40	960	$2,27^{-6}$	4636,86	8,1
189,96	895,117	4622,84	960	$2,23^{-6}$	4721,47	8,2
183,41	909,738	4704,60	960	$2,20^{-6}$	4801,55	8,4
176,27	926,806	4799,00	960	$2,16^{-6}$	4894,07	8,5
169,97	942,859	4887,05	960	$2,12^{-6}$	4980,45	8,7
165,55	954,028	4951,88	960	$2,10^{-6}$	5044,08	8,8

¹ nejistota etalonu [Hz]; ² nejistota krystalu (LFXTAL058383Bulk (HC49/4H)) [Hz]; ³ nejistota metody měření frekvence mikrokontrolerem [Hz]; ⁴ standardní nejistota typu B měřicí a vyhodnocovací jednotky [Hz]; ⁵ standardní nejistota typu B měřicí a vyhodnocovací jednotky [mm].

8.4 Stanovení kombinované standardní nejistoty typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky

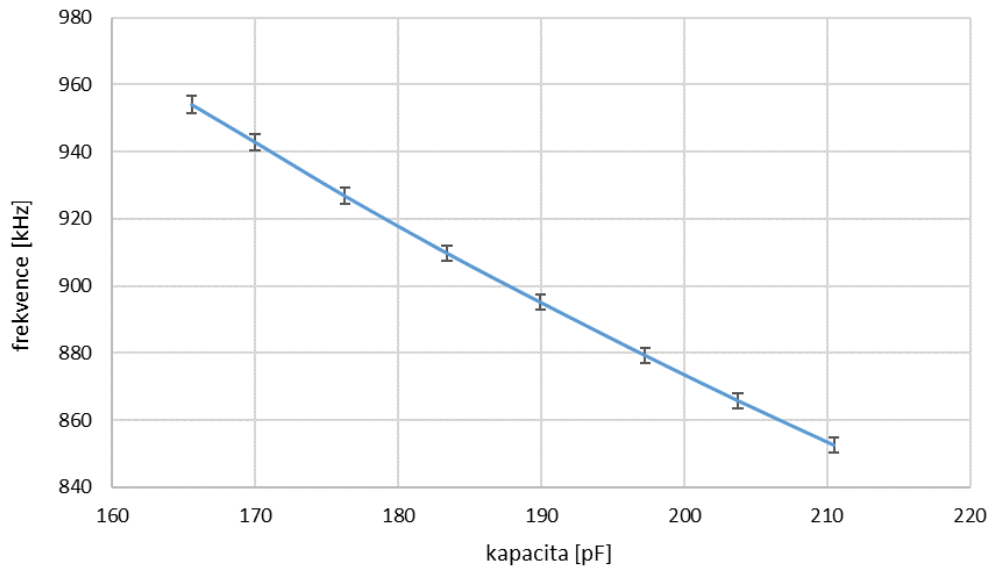
Výsledná kombinovaná standardní nejistota typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky byla stanovena dle vztahu (8.3) a na základě standardních nejistot u_{Aj} a u_{Bj} vypočtených dříve.

$$u_{Cj} = \sqrt{u_{Aj}^2 + u_{Bj}^2} \quad (8.3)$$

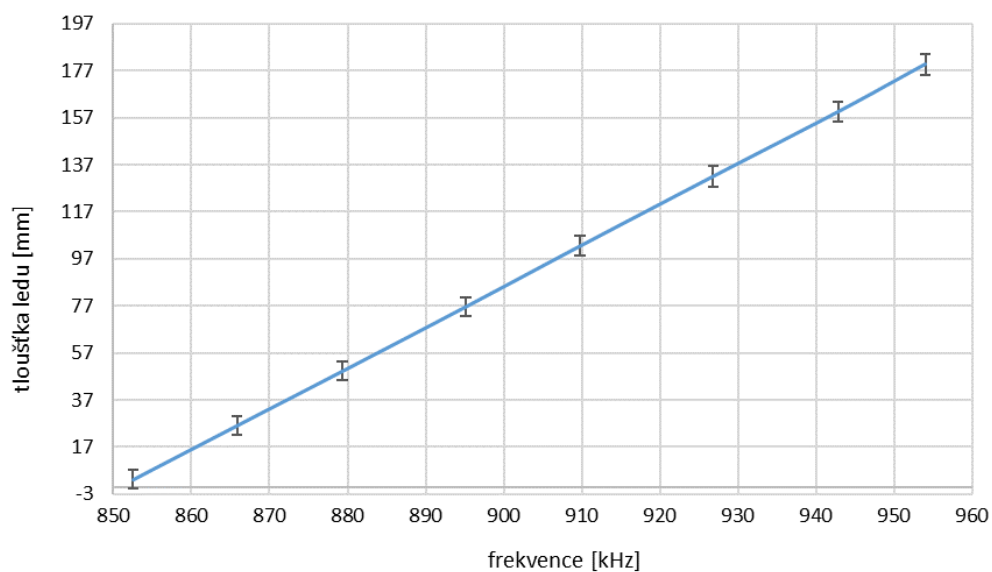
Kde: u_{Cj} [Hz] – kombinovaná standardní nejistota typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky, u_{Bj} [Hz] – výsledná standardní nejistota typu B vyhodnocovací a měřicí jednotky, u_{Aj} [Hz] – výsledná standardní nejistota typu A vyhodnocovací a měřicí jednotky.

Stanovené nejistoty při dané testované kapacitě jsou uvedeny v tabulce Tab. 10 a v grafech na Obr. 62 a Obr. 63. Graf na Obr. 62 vyjadřuje závislost oscilátoru na vstupní

kapacitě se zobrazením intervalů kombinované nejistoty C v testovaných kapacitách. Obrázek Obr. 63 vyjadřuje statickou charakteristiku měřicí a vyhodnocovací jednotky. Výsledné velikosti kombinované standardní nejistoty C měřicí jednotky Tab. 10 byly stanoveny v pracovní frekvenční oblasti jednotky (850 – 960 kHz) v intervalu 4 495 – 5 044 Hz, tedy 7,8 – 8,8 mm tloušťky ledu.



Obr. 62 Závislost frekvence oscilátoru na vstupní kapacitě – standardní kombinovaná nejistota typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky



Obr. 63 Statická charakteristika měřicí a vyhodnocovací jednotky (Závislost tloušťky ledu na frekvenci oscilátoru)

Tab. 10 Souhrn výsledků měření standardní kombinované nejistoty typu C vyhodnocovací a měřicí jednotky

Tloušťka ledu [mm]	Kapacita [pF]	Frekvence oscilátoru [kHz]	u_{Aj} [Hz]¹	u_{Bj} [Hz]²	u_{cj} [Hz]³	u_{cj} [mm]⁴
3,3	210,50	852,542	40,97	4495,21	4495,40	7,8
26,2	203,76	865,833	55,61	4565,61	4565,95	8,0
49,3	197,26	879,309	59,61	4636,86	4637,25	8,1
76,6	189,96	895,117	43,79	4721,47	4721,67	8,2
102,4	183,41	909,738	48,89	4801,55	4801,80	8,4
132,0	176,27	926,806	36,69	4894,07	4894,21	8,5
159,5	169,97	942,859	46,69	4980,45	4980,66	8,7
179,7	165,55	954,028	50,98	5044,08	5044,34	8,8

¹ standardní nejistota typu A měřicí a vyhodnocovací jednotky [Hz]; ² standardní nejistota typu B měřicí a vyhodnocovací jednotky [Hz]; ³ standardní kombinovaná nejistota typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky [Hz]; ⁴ standardní kombinovaná nejistota typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky [mm].

8.5 Stanovení standardní nejistoty typu B a kombinované standardní nejistoty typu C měřicí kapacitní sondy

Při stanovení standardní nejistoty typu B (u_{Bk}) měřicí kapacitní sondy byla marginálním zdrojem nejistoty považována měřicí a vyhodnocovací jednotka. Za standardní nejistotu typu B (u_B) měřicí kapacitní sondy byla použita kombinovaná standardní nejistota typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky, která je uvedena v kapitole 8.4 (Tab. 10). Hodnoty byly stanoveny v pracovní frekvenční oblasti jednotky (850 – 960 kHz) v intervalu 4 495 – 5 044 Hz, tedy 7,8 – 8,8 mm tloušťky ledu.

Výsledná kombinovaná standardní nejistota typu C kapacitní sondy byla stanovena dle vztahu (8.4) a na základě standardních nejistot u_{Ak} a u_{Bk} stanovených dříve.

$$u_{Ck} = \sqrt{u_{Ak}^2 + u_{Bk}^2} \quad (8.4)$$

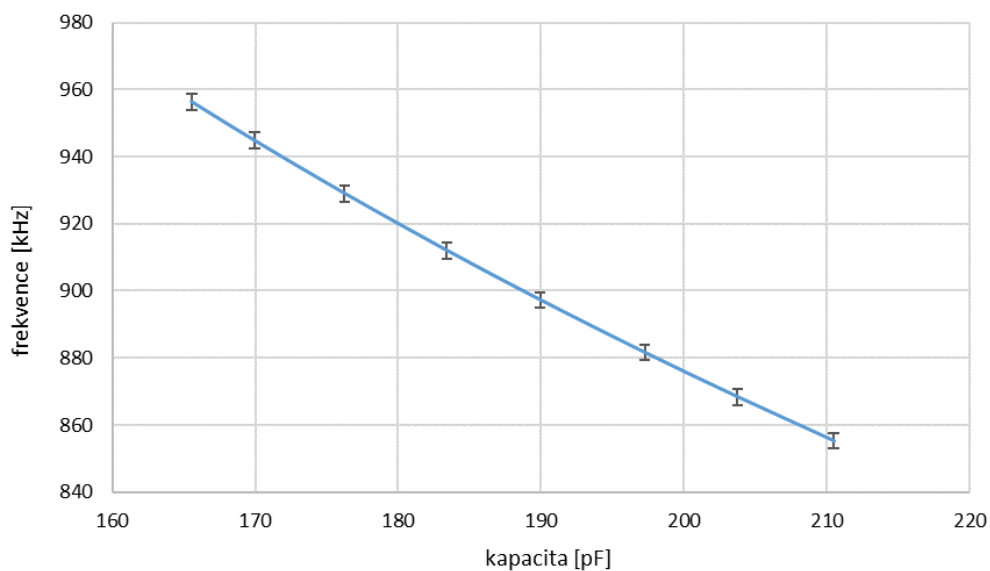
Kde: u_{Ck} [Hz] – kombinovaná standardní nejistota typu C měřicí kapacitní sondy, u_{Bk} [Hz] – výsledná standardní nejistota typu B měřicí kapacitní sondy, u_{Ak} [Hz] – výsledná standardní nejistota typu A měřicí kapacitní sondy.

Stanovené nejistoty pro testované tloušťky ledu jsou uvedeny v Tab. 11 a v grafech (Obr. 64, Obr. 65 a Obr. 66). Graf na (Obr. 64) vyjadřuje závislost oscilátoru na kapacitě sondy při testovaných tloušťkách ledu se zobrazením intervalů kombinované nejistoty C. Obrázek (Obr. 65) vyjadřuje závislost tloušťky ledu na kapacitě sondy s vyjádřenými intervaly kombinované nejistoty C. Graf (Obr. 66) vyjadřuje statickou charakteristiku kapacitní sondy. Výsledné velikosti kombinované standardní nejistoty C kapacitní sondy (Tab. 11) byly stanoveny v pracovní frekvenční oblasti jednotky v intervalu 4 497 – 5 044 Hz, tedy 7,8 – 8,8 mm tloušťky ledu. Výsledná přesnost kapacitní sondy s vyhodnocovací a měřicí jednotkou se pohybuje v rozsahu 4,33 – 4,89 %.

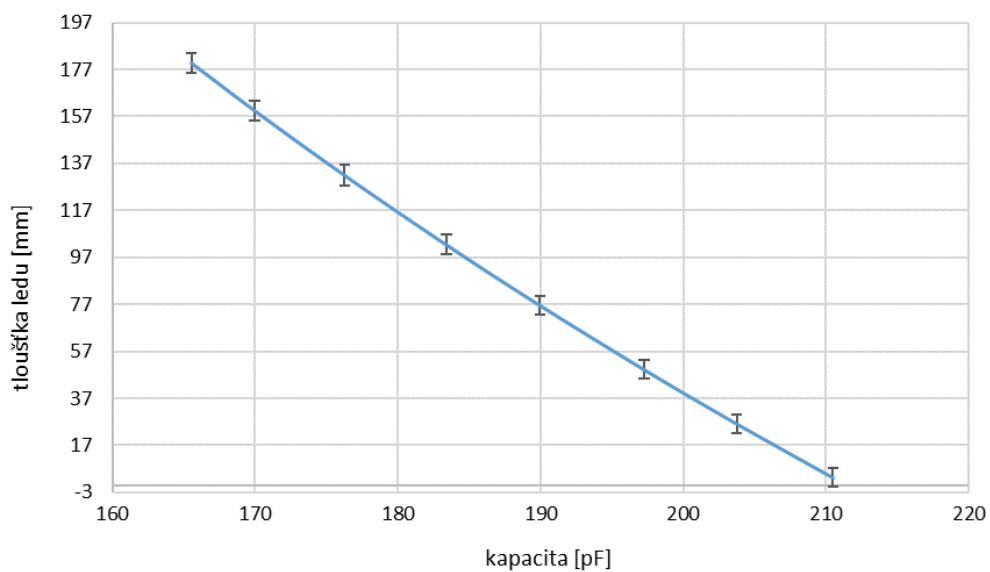
Tab. 11 Souhrn výsledků měření standardní kombinované nejistoty typu C kapacitní sondy

TLoušťka ledu [mm]	Kapacita [pF]	Frekvence oscilátoru [kHz]	u_{Ak} [Hz] ¹	u_{Bk} [Hz] ²	u_{ck} [Hz] ³	u_{ck} [mm] ⁴
3,3	210,50	855,161	106,33	4495,40	4496,66	7,8
26,2	203,76	868,301	20,32	4565,95	4566,00	8,0
49,3	197,26	881,552	57,21	4637,25	4637,60	8,1
76,6	189,96	897,223	49,80	4721,67	4721,93	8,2
102,4	183,41	911,993	277,52	4801,80	4809,81	8,4
132,0	176,27	928,982	468,49	4894,21	4916,58	8,6
159,5	169,97	944,766	277,72	4980,66	4988,40	8,7
179,7	165,55	956,350	23,93	5044,34	5044,40	8,8

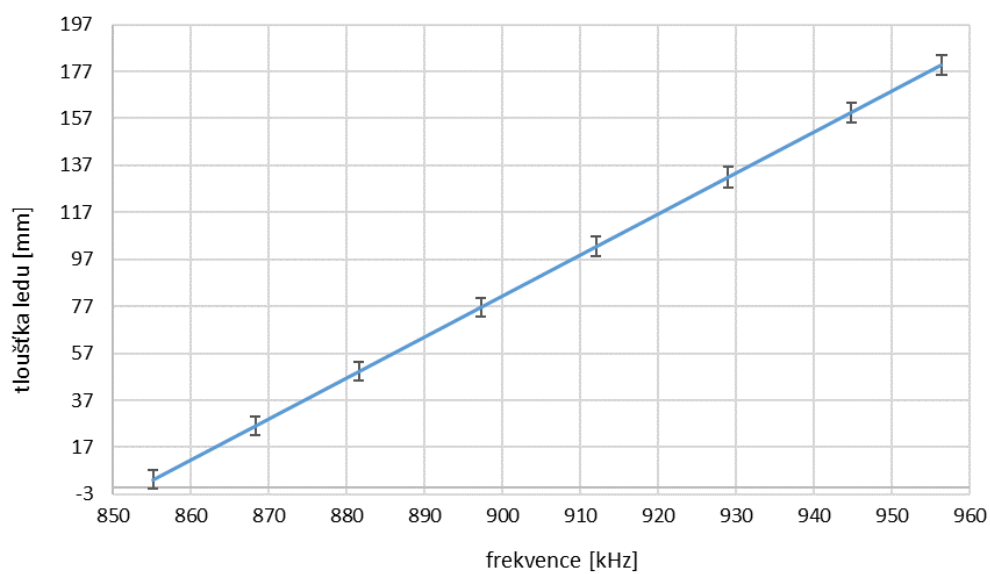
¹ standardní nejistota typu A kapacitní sondy [Hz]; ² standardní nejistota typu B kapacitní sondy [Hz]; ³ standardní kombinovaná nejistota typu C kapacitní sondy [Hz]; ⁴ standardní kombinovaná nejistota typu C kapacitní sondy [mm].



Obr. 64 Závislost frekvence oscilátoru kapacitní sondy – standardní kombinovaná nejistota typu C kapacitní sondy



Obr. 65 Závislost tloušťky ledu na kapacitě sondy – standardní kombinovaná nejistota typu C kapacitní sondy



Obr. 66 Statická charakteristika kapacitní sondy

9 Diskuse

Stanovení vhodné měřicí metody, která by umožňovala nedestruktivní, přímé, průběžné a lokální měření tloušťky ledu proběhlo na základě analýzy tuzemských a zahraničních literárních zdrojů. V rámci studie byly identifikovány jednotlivé přístupy k problematice měření tloušťky ledu a byly posouzeny jejich výhody a nevýhody.

9.1 Stanovení vhodné měřicí metody

Na základě literární rešerše lze stanovit, že kapacitní metody představují vhodné řešení z pohledu možnosti nedestruktivního průběžného lokálního měření tloušťky ledu. Tyto metody poskytují možnost vývoje senzorových systémů, které by umožnily levný, dlouhodobý, automatizovaný monitoring tloušťky ledu v daných lokalitách. Doposud jsou kapacitní metody využívány především v oblasti leteckého průmyslu pro účely měření tloušťky námrazy v palivovém potrubí [47] a na křídlech letadel [48, 49]. Kapacitní metody jsou též využívány v oblasti dopravy k detekci námrazy na vozovkách [50].

Kapacitní metody dále umožňují vývoj automatizovaných měřicích platform, což dává možnost dlouhodobého sledování tloušťky ledu v daném místě bez potřeby obsluhy a tedy bez rizika úrazu plynoucího s jejím pohybem během měření po ledové vrstvě jako je tomu u měření pomocí sondáže zamrzlé vodní plochy [6] a pomocí georadaru [3]. Přítomnost obsluhy na ledové ploše během měření také limituje minimální tloušťku ledu měřitelnou těmito metodami.

Kapacitní systémy umožňují měřit celkovou tloušťku ledu bez zkraslení způsobeného sněhovou vrstvou, což není možné v případě měření metodami založených na principu elektromagnetické indukce, které vzájemně nediferencují sněhovou a ledovou vrstvu z důvodu jejich nízkého vodivostního rozdílu [6].

Výhodou kapacitních metod oproti měření tloušťky ledu pomocí sonaru nebo radarových a laserových výškoměrů je možnost přímého měření v celé tloušťce měřeného ledu bez nutnosti sledování dalších parametrů, kterými například jsou hloubka měřicí platformy, hustota vody, ledu a sněhu. Sonarové systémy umožňují přímé měření pouze ponořené části ledu a pro přesné stanovení celkové tloušťky ledu je nutné znát další

informace o tloušťce sněhové vrstvy a vynořené části ledu [32]. Pomocí laserových a radarových výškoměrů jsme bohužel schopni měřit pouze vynořenou část ledu [36]. Pro stanovení celkové tloušťky ledu je nutné kombinovat výsledky měření se znalostí hustoty vody v dané oblasti a na základě hydrostatické rovnováhy stanovit celkovou tloušťku ledu [41]. Nevýhodou těchto metod je zatížení výsledné tloušťky jistou nepřesností, která je vyvolána rušivými vlivy atmosféry, změnou výšky hladiny v důsledku střídání přílivu a odlivu, které nelze zcela spolehlivě potlačit. Dalším zdrojem nepřesností je vliv hustoty ledu a sněhu, které nejsou ještě pro všechny sledované oblasti známy [42].

9.2 Princip měření

Na základě dostupných literárních zdrojů byly shledány nejvhodnějšími kapacitní metody. Princip vyhodnocování tloušťky ledu těmito metodami spočívá ve využití významného rozdílu relativní permitivity ledu a vody. Výslednou tloušťku ledové vrstvy lze určovat ze změny kapacity, která je vyvolána změnou poměru jednotlivých dielektrických prostředí (voda/led), ke kterému dochází v důsledku zámrazu/tání. Navržený systém je založen na kapacitním principu, kdy je měřicí sonda umístěna ve svislé poloze do vodní nádrže, ve které bude průběžně sledována tloušťka ledu, a to ještě před zahájením zámrazu. Sonda je ponořena do hloubky, která je omezena její délkou měřících elektrod, která též limituje maximální měřitelnou tloušťku ledu. V takovémto případě výslednou kapacitu sondy ovlivňují prostředí: vzduch, voda a led, které mají rozdílné dielektrické vlastnosti a které v průběhu zámrazu a tání mění své poměrové zastoupení. Jedná se tedy o problematiku kondenzátoru s proměnnou dielektrickou konstantou.

9.3 Návrh kapacitního senzoru

Návrh konstrukce sondy zahrnoval kroky: stanovení vhodného tvaru a volby vhodných konstrukčních materiálů s vyhovujícími dielektrickými vlastnostmi; stanovení optimálních rozměrů sondy; simulace sondy v průběhu zámrazu pomocí metody konečných prvků.

9.3.1 Stanovení vhodného tvaru sondy a konstrukčních materiálů

Pro konstrukci sondy byl zvolen válcový tvar elektrod. Válcové elektrody vždy vykazují v porovnání s elektrodami ve tvaru rovinných desek větší stabilitu tvaru a mechanickou pevnost. Dále lze v případě válcových koncentrických elektrod snadněji zajistit vzájemnou rovnoběžnost elektrod, která má vliv na výslednou linearitu kapacitní závislosti na tloušťce ledu.

Pro účely vyhotovení pláště a ochranného dielektrika vnější elektrody bylo využito 3D tisku. Tato výrobní metoda byla zvolena s ohledem na válcový tvar sondy. 3D tisk dovoľoval vyhotovení těchto částí sondy v takové podobě, která umožňovala maximálně se přiblížit rozměrům vnější elektrody bez nutnosti se omezit na standartně vyráběné komponenty. Bohužel dielektrické vlastnosti materiálů používaných pro 3D tisk nejsou dostatečně popsány v operačním frekvenčním rozsahu sondy [51] a z tohoto důvodu je bylo nutné stanovit experimentálně. Zvažovanými konstrukčními materiály byly PETG, PLA, ABS a ASA. V případě materiálů PLA byl testován i vliv pigmentačních barviv na jejich dielektrické vlastnosti.

V testovaném frekvenčním rozsahu (1-100 MHz) byla relativní permitivita testovaných materiálů stanovena v intervalu 2,99 [-] (PLA-silver) až 3,36 [-] (PLA-metallic green). Významný rozdíl mezi PLA (bezbarvý materiál) a PLA-silver nebyl zjištěn. Nicméně PLA-metallic green dosahoval na testovaném frekvenčním rozsahu o 0,36 [-] vyšší hodnotu než PLA (bezbarvé). Tento jev lze vysvětlit přidáním pigmentačními barvivy v materiálu PLA-metallic green [55]. Všechny testované materiály projevíly v testovaném rozsahu z hlediska relativní permitivity minimální frekvenční závislost, což je vhodné z hlediska jejich použitelnosti v elektrotechnických aplikacích coby konstrukčních materiálů.

Podle naměřených dat byl ztrátový faktor bezbarvých materiálů v testovaném frekvenčním rozsahu v rozmezí 0,03 – 2,21 % a u barevných materiálů PLA (PLA-silver a metallic green) se pohyboval v rozmezí 0,71 – 4,31 %. Bezbarvé materiály vykazovaly výrazně nižší intervalovou variabilitu a mnohem nižší frekvenční závislost. Větší frekvenční závislost u barevných PLA materiálů byla způsobena vlivem pigmentačních barviv [51, 55]. Z důvodu významné frekvenční závislosti ztrátového činitele ve sledované oblasti byla podrobněji statisticky zpracována frekvenční oblast 1 – 2 MHz, která byla uvažovanou pracovní oblastí navrhované sondy. Z výsledků je patrné, že v daném

frekvenčním rozsahu se ztrátový činitel pohyboval v intervalu 0,74 % (PLA-Silver) – 2,11 % (PETG). A testované materiály na frekvenčním rozsahu 1 – 2 MHz prokázaly minimální frekvenční závislost, která se pohybovala v rozsahu 0,02 – 0,06 %.

Na základě provedených měření se v předpokládaném operačním frekvenčním rozsahu (1 – 2 MHz) z hlediska dielektrických parametrů pro účely konstrukce pláště a ochranného dielektrika vnější elektrody se jeví jako nejvhodnějšími konstrukčními materiály PLA-Silver a ABS, které oba dosahovaly velmi nízkých hodnot relativní permitivity i ztrátového činitele. Pro výběr výsledného konstrukčního materiálu byla uvažována také realizovatelnost tisku požadovaného tvaru na 3D tiskárně. Z tohoto pohledu vykazuje ABS výrazně horší vlastnosti, které se projevují častými výraznými deformacemi výsledných vytištěných objektů. Tyto deformace jsou důsledkem tisku ABS při vyšších teplotách (250 °C) [59], což se během tisku projevuje výraznými objemovými změnami tištěného materiálu. Z tohoto důvodu byl jako konstrukční materiál pro tištěné díly sondy zvolen PLA-silver.

Pro účely ochranného dielektrika vnitřní elektrody bylo z důvodu konstrukčního uspořádání sondy možné uvažovat standartní materiály využívané jako dielektrika. S ohledem na komerčně dostupné materiály a zvolený tvar a dimenze vnitřní elektrody byl pro účely ochranného dielektrika zvolen teflon ve formě trubičky, který má po stránce dielektrických vlastností výborné parametry (relativní permitivita: 2,1 [-]; ztrátový činitel: 0,028 %).

9.3.2 Optimalizace rozměrů sondy

Optimalizace rozměrů sondy proběhla na základě náhradního schématu, které představovalo idealizovaný model sondy. Poloměr vnitřní elektrody byl zvolen. Předmětem optimalizace bylo nalezení vhodné velikosti poloměru vnější elektrody tak, aby byla dosažena v maximální míře lineární závislost kapacity na tloušťce ledu a též, aby byla zajištěna dostatečná měřicí citlivost, udaná rozdílem kapacit pro sondu bez přítomnosti ledu (voda) a sondu plně zamrzlou (led).

Na základě výpočtů dle idealizovaného modelu kapacitní sondy a s ohledem na komerčně dostupné materiály byl stanoven průměr vnější elektrody na 39 mm. Jak je patrné z grafu na Obr. 23. při volbě menšího průměru by byla citlivost sondy menší, pro zvolený a vyšší průměr sondy se již citlivost sondy prakticky nemění.

Kapacita sondy se v závislosti na stupni zamrznutí pohybovala v rozsahu 11,17 pF (zamrzlý stav) až 71,20 pF (rozmrzlý stav). Měřicí rozsah sondy byl stanoven na 60,03 pF a závislost kapacity sondy na tloušťce ledu je lineární (Obr. 24.).

9.3.3 Simulace kapacity sondy v průběhu zámrazu pomocí metody konečných prvků

Ověření výsledného návrhu sondy bylo uskutečněno prostřednictvím simulace kapacity sondy v průběhu zámrazu pomocí MKP. Na základě této simulace bylo stanoveno rozložení skalárního elektrického potenciálu v aktivní části sondy pro počáteční (rozmrzlý) a koncový (zamrzlý) stav sondy. V obou uvažovaných případech bylo výsledné rozložení skalárního potenciálu v aktivní části sondy lineární. Ze změny skalárního potenciálu bylo dále možno určit kapacitu sondy.

Závislost kapacity sondy na tloušťce ledu je i v tomto případě lineární. Kapacita sondy se během simulace pohybovala v intervalu 30,61 pF (zamrzlý stav) až 92,08 pF (rozmrzlý stav). Měřicí rozsah sondy byl touto metodou stanoven na 61,47 pF, což je pouze o 1,44 pF více než v případě výpočtu s využitím modelu náhradních prvků. Měřicí rozsah získaný na základě MKP je oproti výsledkům předešlé simulace posunut o 20,88 pF, což je zřejmě způsobeno zahrnutím nehomogenního pole v blízkosti krajů elektrod a tedy možností přesněji zohlednit vlastní geometrii sondy (především větší délky vnitřní elektrody).

9.4 Konstrukce měřicí sondy

Na základě provedeného návrhu byla zkonstruována kapacitní sonda válcového tvaru. Sonda se skládá z vnitřní a vnější elektrody, které jsou umístěny v ochranném dielektriku, aby nedocházelo k jejich korozi. Prostor mezi těmito elektrodami je vyplněn vodou, která v důsledku změny skupenství v průběhu změn teploty mění svoji relativní permitivitu, což ovlivní výslednou celkovou kapacitu sondy. Jako ochranné dielektrikum vnitřní elektrody byl použit teflon. Pro realizaci vnějšího pláště sondy a ochranného dielektrika vnější elektrody bylo použito 3D tisku. Jako konstrukční materiál byl použit PLA-silver. Technologie 3D tisku umožnila výrobu těchto konkrétních částí, u kterých nebylo možné najít komerčně vyráběný materiál o vyhovujících dimenzích. Stejně tak se i materiál PLA-silver ukázal během následných testů jako dobře použitelný při nízkých teplotách.

Elektrody sondy byly zhotoveny z měděné trubky (vnější elektrod) a měděné tyče válcovitého tvaru (vnitřní elektroda). Válcový tvar sondy byl vybrán s ohledem na snížení rizika deformace způsobené v důsledku zámrazu. Průměr vnitřní elektrody a síla stěny měděné trubky použité k výrobě vnější elektrody byly též voleny s ohledem na snížení rizika deformace. K rozdílné délce vnitřní a vnější elektrody bylo přistoupeno z montážních důvodů v průběhu kompletace sondy.

Vnější ochranný obal sondy z PVC trubky, ve kterém je sonda umístěna byl použit z důvodu její ochrany jak po mechanické stránce, tak též proti znečištění, které by ovlivnilo výsledné měření.

9.5 Stanovení reálných parametrů senzoru

Testování skutečných parametrů sondy proběhlo v laboratorních podmínkách. Na základě výsledků byly zcela nevyhovujícími shledány měřicí kmitočty 100 kHz a 200 kHz, kde výsledná kapacita v průběhu měření vykazovala výraznou nelinearitu. Naopak vhodným měřicím rozsahem se ukázala frekvenční oblast 500 kHz až 2 MHz, kde kapacita vykazovala v průběhu zámrazu i tání lineární průběhy (Obr. 40 a Obr. 41). Maximální kapacita sondy byla stanovena měřením pro frekvenci 1 MHz na 217 pF při plně rozmrzlém stavu. Minimální kapacita sondy byla stanovena na hodnotu 158 pF a odpovídala plně zamrzlému stavu. Po odečtení parazitní kapacity přívodního vodiče 131 pF byly maximální a minimální hodnoty kapacity sondy stanoveny na 86 a 27 pF. Měřicí rozsah sondy byl stanoven na 59 pF.

Tyto reálné parametry sondy přibližně korespondují se simulacemi uskutečněnými pomocí metody MKP. Zde se simulovaná kapacita v průběhu pohybovala v intervalu 30,61 pF (zamrzlý stav) až 92,08 pF (rozmrzlý stav) a měřicí rozsah byl metodou MKP stanoven na 61,47 pF.

9.6 Měřicí a vyhodnocovací elektronika

Na základě stanovených reálných parametrů sondy byla navržena a realizována měřicí a vyhodnocovací jednotka. Jednotka je založena na principu, při kterém je míra

tloušťky ledu převedena na změnu frekvence oscilátoru. Zde je kapacitní sonda zapojena do laděného obvodu oscilátoru a přímo určuje jeho frekvenci kmitů.

Oscilátor jednotky byl založen na tříbodovém zapojení s induktivní zpětnou vazbou s aktivním prvkem tvořeným tranzistorem J-FET. Tato koncepce byla zvolena pro možnost snadné optimalizace konstrukce jednoduchého LC oscilátoru.

Samotné měření frekvence oscilátoru mikropočítačem Arduino Nano je založeno na čítačové metodě. Výsledná frekvence je vždy stanovena jako průměr z osmi naměřených hodnot. Výsledná tloušťka ledu je stanovena na základě této frekvence podle převodní funkce (6.24). Vzorkovací perioda měření je deset sekund, v tomto intervalu jsou vždy veškeré sledované parametry odesílány na vzdálený počítač a současně jsou zálohovány na SD kartu.

Pro účely stanovení převodní charakteristiky a nejistoty měřicí jednotky bylo nutné určit reálné základní parametry obvodu, kterými jsou parazitní kapacita konektoru a přívodních vodičů k cívce oscilátoru C_k , skutečná impedance cívky oscilátoru L_I . Na základě měření a následného výpočtu dle vztahu (6.22) byla stanovena parazitní kapacita C_k na 13,1 pF. Následně byla podle vztahu (6.23) dopočtena indukčnost cívky oscilátoru L_I na 156 μ H.

9.7 Převodní charakteristika indikované frekvence oscilátoru na tloušťku ledu

Převodní charakteristika byla stanovena na základě experimentálního zámrazu sondy v laboratorních podmínkách. Měření bylo koncipováno tak, aby bylo možné měřit přesně definované přírůstky ledu a tyto přírůstky kontrolně měřit pomocí posuvného měřítka.

Během testu se tloušťka ledu pohybovala v rozsahu 1,9 – 180,0 mm. Při těchto tloušťkách ledu se pohybovala indikovaná frekvence oscilátoru v intervalu 852,17 kHz – 953,36 kHz. Výsledná závislost indikované frekvence na tloušťce ledu je lineární (Obr. 49). Na základě dat naměřených během tohoto testu byla stanovena inverzní převodní charakteristika vyjadřující závislost tloušťky ledu na indikované frekvenci oscilátoru pomocí metody polynomiální regrese. Tato výsledná závislost tloušťky ledu na indikované frekvenci byla vyjádřena pomocí polynomu 1.řádu (6.24). Pro tento výsledný aproximační polynom byl stanoven koeficient determinace v hodnotě 99,96 %, což

vyjadřuje velmi vysokou úroveň predikce hodnot závislé proměnné (tloušťky ledu) na indikované frekvenci oscilátoru.

Dle vztahu (6.24) odpovídá měřicímu rozsahu sondy (0 – 180 mm) odpovídá frekvenční rozsah mezi 850,26 – 953,53 kHz. Tedy výsledné rozlišení bylo stanoveno na $0,57 \text{ kHz} \cdot \text{mm}^{-1}$, které je možné považovat za dostatečné.

9.8 Testování funkčnosti měřicího systému

Testování funkčnosti celé měřicí soustavy proběhlo v laboratorních podmínkách, které spočívalo v cyklickém zámrazu a tání vody v testované nádobě s měřicí sondou, při současném sledování tloušťky ledu pomocí navržené měřicí a vyhodnocovací jednotky.

Během testu byly celkem provedeny tři měřicí cykly, během kterých došlo k úplnému zámrazu a roztání vody ve sledované nádobě. Jak je patrné z grafů A, B, E na Obr. 55, časové závislosti tloušťky ledu v průběhu zámrazu vykazovaly ve všech třech případech shodné průběhy. Stejně výsledky byly pozorovány i v případě tání (grafy A, B, E na Obr. 56).

Frekvenční závislosti tloušťky ledu v průběhu zámrazu a tání během jednotlivých testů (grafy C, D a F na Obr. 55 a Obr. 56) mají stejný lineární průběh. Směrnice přímk v těchto grafech byla stanovena na $1,74 \text{ mm} \cdot \text{kHz}^{-1}$.

Na základě těchto výsledků bylo ověřeno, že realizovaný měřicí systém dosahuje při měření opakovaných výsledků, čímž byla prokázána jeho funkčnost.

9.9 Stanovení standardní nejistoty výsledného měřicího systému

Standardní nejistota typu A kapacitní sondy byla stanovena na základě pokusného zámrazu v laboratorních podmínkách. Průměrná frekvence oscilátoru indikovaná v průběhu měření se pohybovala v rozsahu 852,171 – 953,360 kHz. Standardní nejistota typu A kapacitní sondy se v měřeném intervalu pohybovala v rozsahu 20 – 468 Hz.

Pro účely vyhodnocování tloušťky ledu byla vyvinuta měřicí jednotka vlastní konstrukce. Proto bylo nutné informace o nejistotě jednotky, nezbytné ke stanovení standardní nejistoty typu B kapacitní sondy, stanovit výpočtem na základě experimentálně

změřených dat. Tedy určit kombinovanou standardní nejistotu typu C této měřicí a vyhodnocovací jednotky.

Prvním krokem bylo stanovení standardní nejistoty typu A měřicí a vyhodnocovací jednotky v operačním frekvenčním rozsahu kapacitní sondy (852,2 – 953,4 kHz). Jak je patrné z grafu na Obr. 60 výsledná závislost frekvence oscilátoru na kapacitě testovacích kondenzátorů byla na celém testovaném rozsahu lineární a svým průběhem odpovídá výsledkům získaným měření během měření standardní nejistoty typu A kapacitní sondy. Jak je uvedeno v Tab. 8 frekvence oscilátoru se během testu pohybovala mezi 852,542 – 954,028 kHz. Standardní nejistota typu A měřicí a vyhodnocovací jednotky se pohybovala v rozsahu 37 – 60 Hz.

Standardní nejistota typu B vyhodnocovací a měřicí jednotky byla stanovena v intervalu 4 495 – 5 044 Hz (Tab. 9). Nejvýznamnějším zdrojem nejistoty byla nejistota etalonu, která se pohybuje v intervalu 4 392 – 4 952 Hz a jejíž velikost je dána analyzátozem impedance E4990A (Keysight Technologies), který byl použit pro cejchování kondenzátorů použitých jako etalony. Výrobce udává pro testovaný frekvenční rozsah (850 – 960 kHz) přesnost 1 % [61]. Tuto nejistotu by bylo možné snížit, použitím analyzátoru s větší přesností v testované frekvenční oblasti. Bohužel takový analyzátor nebyl dostupný.

Kombinovaná standardní nejistota typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky byla vypočtena dle vztahu (8.3) a její velikost byla v pracovní frekvenční oblasti jednotky (850 – 960 kHz) stanovena v intervalu 4 495 – 5 044 Hz, tedy 7,8 – 8,8 mm tloušťky ledu. Největší podíl na výsledné nejistotě měřicí jednotky měla nejistota typu B. Statická charakteristika měřicí a vyhodnocovací jednotky je zcela lineární, jak je uvedeno na Obr. 63.

Na základě kombinované standardní nejistoty typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky byla určena standardní nejistota typu B měřicí kapacitní sondy. Nejistota měřicí a vyhodnocovací jednotky byla považována za marginální zdroj nejistoty typu B pro kapacitní sondu. Z tohoto důvodu byla za standardní nejistotu typu B považována právě kombinované standardní nejistoty typu C měřicí a vyhodnocovací jednotky. Tedy standardní nejistota typu B kapacitní sondy byla stanovena v intervalu 4 495 – 5 044 Hz.

Výsledná kombinovaná standardní nejistota typu C měřicí kapacitní sondy byla vypočtena dle vztahu (8.4) a její výsledná velikost byla v pracovní frekvenční oblasti sondy (850 – 960 kHz) stanovena v intervalu 4 497 – 5 044 Hz, tedy 7,8 – 8,8 mm tloušťky ledu. Největší vliv na celkovou nejistotu kapacitní sondy měla nejistota typu B, tedy nejistota zapříčiněná měřicí a vyhodnocovací jednotkou, jejíž velikost byla o řád větší než standardní nejistota typu A kapacitní sondy. Na její velikost měla podstatný vliv přesnost materiálového analyzátoru E4990A použitého pro cejchování testovacích kondenzátorů použitých pro testování měřicí a vyhodnocovací jednotky a jehož přesnost v testovaném frekvenčním rozsahu byla výrobcem stanovena na 1 % [61].

Výsledná přesnost kapacitní sondy s vyhodnocovací a měřicí jednotkou se pohybuje v rozsahu 4,33 – 4,89 % měřicího rozsahu sondy. Tato přesnost odpovídá standardům použitelných v průmyslové oblasti, kde jsou běžně používány snímače s přesností do 5 %. Výsledná statická charakteristika kapacitní sondy (Obr. 66) je prakticky lineární.

9.10 Porovnání kapacitních metod

Kapacitní senzory nejsou v současné době ve větší míře používány pro sledování tloušťky ledu na přírodních vodních plochách. Prvním systémem, který se z této oblasti k těmto účelům začíná aplikovat, je koplanární multi-elektrodový senzor, který již byl v rámci testování nasazen ve východní Antarktidě, nicméně se stále ještě nachází ve fázi laboratorního výzkumu a terénních testů [43]. Jedná se o systém, který umožňuje dlouhodobé monitorování tloušťky ledu v daném místě. Výsledný senzor se skládá z většího počtu výše popsaných elektrod, kde každá elektroda reprezentuje 10 mm měřeného rozsahu [46].

V případě koplanárních senzorů je limitujícím faktorem jejich přesnosti velikost a vzájemná vzdálenost jednotlivých elektrod v měřeném prostoru. V případě výše uvedeného multi-elektrodového senzoru pro měření tloušťky ledu je maximální možná přesnost 10 mm [43].

Pro kapacitní systém navržený a realizovaný v rámci této disertační práce byla stanovena kombinovaná standardní nejistota stanovena v intervalu 7,8 – 8,8 mm. Přesnost tohoto systému je tedy vyšší než v případě koplanárního multi-elektrodového senzoru.

9.11 Zhodnocení položených hypotéz

V práci byly položeny tři hypotézy, které byly zaměřeny na problematiku měření tloušťky ledu pomocí kapacitních metod a způsobu elektronického vyhodnocování indikovaných veličin.

H₁: Poměr výšky sloupce vody a ledu jako dielektrika v uzavřeném válcovém kondenzátoru lze stanovit dle jeho celkové kapacity.

Teoretický předpoklad hypotézy H₁ je uveden v grafu na Obr. 24, kde je vyjádřena závislost kapacity sondy na tloušťce ledu vypočtena na základě idealizovaného náhradního modelu sondy a která vychází pro sondu o daných rozměrech lineární. Na základě výsledků uvedených v grafu na Obr. 65, který vyjadřuje lineární závislost tloušťky ledu na kapacitě sondy lze hypotézu H₁ přijmout.

H₂: Kapacitu kondenzátoru sondy lze v celém jeho rozsahu změn skupenství dielektrika voda/led vyhodnocovat podle frekvence oscilátoru, v jehož rezonančním obvodu je zapojen.

Teoretickým předpokladem hypotézy H₂ je první část vztahu (6.23), vyjadřující závislost rezonanční frekvence obvodu LC na kapacitě v obvodu. Pro experimentální sledování rezonanční frekvence byl realizován oscilátor, jehož pracovní frekvence je rezonančním obvodem řízena. Změřená závislost pracovní frekvence oscilátoru na tloušťce ledu, viz Obr. 49, spolu s grafem na Obr. 24, kde je uvedena závislost kapacity sondy na tloušťce ledu, prokazují, že hypotézu H₂ lze přijmout.

H₃: Výpočet hledané tloušťky ledu je možno provést vyhodnocením výstupního signálu oscilátoru číslicově s využitím mikrokontroleru.

Frekvenci realizovaného oscilátoru lze stanovit mikrokontrolerem s využitím čítání pulzů během konstantního časového intervalu. Dále na základě měření a výsledků uvedených v kapitole 6.7 byla odvozena aproximační funkce (6.24) vyjadřující vztah mezi indikovanou frekvencí oscilátoru a výslednou tloušťkou ledu. Tato závislost umožňuje provádět vlastní výpočet prostřednictvím mikrokontroleru. Hypotézu H₃ lze přijmout.

10 Závěr

Disertační práce je zaměřena na návrh a ověření jednoduché, rychlé a spolehlivé metody vhodné pro průběžné lokální měření tloušťky ledu na vodních plochách, včetně návrhu a realizace vlastního senzoru.

Sledování tloušťky ledu je dnes aktuálním problémem, který je řešen jak z pohledu zajištění bezpečnosti při pohybu po zamrzlých vodních plochách, bezpečnosti lodní dopravy, tak i z důvodu monitoringu klimatických změn. Pro tyto účely byla vyvinuta řada metod pro její měření. Nejvíce dnes používanými metodami jsou: sondáž zamrzlé vodní plochy, metody založené na principu elektromagnetické indukce, georadary, sonary, laserové a radarové výškoměry.

Kapacitní metody jsou zatím využívány spíše okrajově pro účely měření tloušťky ledu na přírodních vodních plochách. V současné době existuje pouze měřicí systém založený na multi-elektrodovém koplanárním senzoru, který je ovšem zatím stále ve fázi testování. Dnes jsou tyto metody spíše využívány v leteckém průmyslu pro detekci a měření velikosti námrazy v palivovém potrubí a na křídlech letadel. Další častou aplikací je detekce námrazy na vozovkách. Kapacitní metody představují vhodné řešení z pohledu možnosti vývoje sensorových systémů, které by umožnily levný, dlouhodobý, automatizovaný monitoring tloušťky ledu v daných lokalitách.

Navržená metoda měření je založena na kapacitním principu, kde vyhodnocování tloušťky ledu spočívá ve využití významného rozdílu permitivity ledu a vody. Výslednou tloušťku vrstvy ledu lze určovat ze změny kapacity, která je vyvolána změnou poměru jednotlivých dielektrických prostředí (voda/led), ke kterému dochází v důsledku zámrazu/tání. Na základě tohoto principu byl navržen a realizován vlastní měřicí systém skládající se z kapacitní sondy a měřicí a vyhodnocovací jednotky.

Aplikace měřicího systému na sledovanou plochu vychází z umístění sondy na hladinu sledované vodní plochy před zamrznutím. Sonda je umístěna vertikálně tak, aby její aktivní část bezpečně vyčnívala nad hladinu. V průběhu měření sonda postupně zamrzá současně s okolní vodní plochou. Zamrznutí vody v sondě způsobuje snižování permitivity

prostředí a tím i kapacity na výstupu senzoru. Změna kapacity je vyhodnocována měřicí jednotkou. Během tání ledu dochází opět k nárůstu kapacity vlivem vzrůstu permitivity.

Vlastní návrh konstrukce kapacitní sondy zahrnoval kroky: stanovení vhodného tvaru a konstrukčních materiálů s vyhovujícími dielektrickými vlastnostmi; stanovení optimálních rozměrů sondy; simulaci sondy v průběhu zámrazu pomocí metody konečných prvků.

Pro účely indikace tloušťky ledu a zajištění větší mechanické pevnosti a odolnosti bylo zvoleno válcové uspořádání sondy. Pro výrobu pláště a ochranné dielektrické vrstvy vnější elektrody bylo použito 3D tisku, díky kterému byly vyrobeny tyto části sondy v podobě, která umožňovala maximálně se přizpůsobit tvaru vnější elektrody.

Volba materiálu pro tisk byla provedena na základě rozboru dielektrických vlastností dostupných filamentů. Z testovaných materiálů PLA, PLA-Silver, PLA-Metallic green, PETG, ABS a ASA byl zvolen materiál PLA-Silver, který v předpokládaném pracovním frekvenčním pásmu vykazoval nejmenší permitivitu i ztrátový činitel a vykazuje dobré tiskové vlastnosti.

Návrh sondy byl optimalizován vzhledem k její maximální citlivosti na tloušťce ledu.

Ověření výsledného návrhu bylo uskutečněno pomocí simulace chování sondy v průběhu zámrazu pomocí MKP. Zde bylo možné lépe zohlednit vliv okolního prostředí, tvar elektrod, okrajový efekt a horizontální rozložení jednotlivých dielektrických prostředí sondy. Simulací byla ověřena předpokládaná lineární závislost kapacity sondy na tloušťce ledu. Kapacita sondy byla stanovena 30 pF pro zamrzlý stav a 92 pF pro rozmrzlý stav.

Na základě provedených simulací byla realizována měřicí kapacitní sonda válcového tvaru, umožňující měřit tloušťku ledu v rozsahu 0 – 180 mm.

Sestavená sonda byla testována v laboratorních podmínkách experimentálním zámrazem, během kterého byla kapacita sondy měřena ve frekvenčním rozsahu 100 kHz až 2 MHz. Na základě výsledků byla zvolena optimální měřicí frekvence 1 MHz, kde závislost kapacity na tloušťce ledu je lineární a kapacity sondy byly změřeny: 86 pF pro rozmrzlý stav a 27 pF pro plně zamrzlý stav. Tyto hodnoty korespondují se simulacemi provedenými pomocí MKP.

Pro účely vyhodnocování tloušťky ledu byla vyvinuta měřicí jednotka vlastní konstrukce. Jednotka je založena na principu, při kterém je míra tloušťky ledu převedena na změnu frekvence LC oscilátoru, do jehož laděného obvodu je sonda zapojena. Frekvence signálu oscilátoru je měřena a dále převáděna na výslednou tloušťku ledu pomocí vyhodnocovací jednotky, založené na platformě Arduino Nano. Tato jednotka umožňuje automatizované měření tloušťky ledu, záznam naměřených dat na SD kartu a také jejich odesílání na vzdálený měřicí počítač.

Testování funkčnosti celé měřicí soustavy proběhlo v laboratorních podmínkách. V rámci testů byly celkem provedeny tři měřicí cykly, ve kterých došlo k úplnému zámrazu a roztání vody ve sledované nádobě. Na základě výsledků těchto testů lze konstatovat, že realizovaný měřicí systém poskytoval reprodukovatelné výsledky. Tím byla prokázána jeho funkčnost.

Standardní kombinovaná nejistota typu C kapacitní sondy byla v celém měřicím rozsahu systému stanovena v intervalu 7,8 – 8,8 mm tloušťky ledu. Výsledná přesnost kapacitní sondy s vyhodnocovací a měřicí jednotkou se pohybuje v rozsahu 4,33 – 4,89 %. Konkurenční systém, koplanární multi-elektrodový senzor, který je v současné době testován pro účely měření tloušťky ledu na vodních plochách dosahuje maximální přesnosti 10 mm.

V práci byly položeny hypotézy $H_1 - H_3$, které byly zaměřeny na problematiku měření tloušťky ledu pomocí kapacitních metod a způsobu elektronického vyhodnocování indikovaných veličin. Tyto hypotézy bylo možné na základě dosažených výsledků přijmout.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že byla vyvinuta a úspěšně otestována vhodná nedestruktivní metoda, založená na kapacitním principu, umožňující průběžné a lokální měření tloušťky ledu na vodních plochách. Na základě této metody byl navržen a úspěšně otestován měřicí systém obsahující kapacitní sondu a měřicí a vyhodnocovací jednotku, která umožňuje měřit tloušťku ledu v rozsahu 0 – 180 mm. Jeho aplikací lze zajistit vyšší bezpečnost při pohybu na těchto vodních plochách v období zimních měsíců. Jednotka též umožňuje bezdrátový přenos naměřených dat.

V případě dalšího vývoje tohoto systému je možné se zaměřit na zvětšení měřitelného rozsahu, tedy měřitelné tloušťky ledu. Tato změna by vyžadovala prodloužení sondy na

požadovanou délku a patřičnou úpravu obvodu měřicí jednotky. Další oblastí potenciálního vývoje by bylo vytvoření mesh sítě, která by obsahovala větší množství vzájemně komunikujících sond, umístěných na sledované vodní hladině. Takto koncipovaný systém by byl schopný poskytnout komplexnější pohled o stavu tloušťky ledu v dané lokalitě.

11 Použitá literatura

- [1] AARON-MORRISON, Arlene P., Steven A. ACKERMAN, Nicolaus G. ADAMS et al. State of the climate in 2015. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2016, **97**(8), S1–S275 [vid. 2017-12-18]. ISSN 00030007. Dostupné z: doi:10.1175/2016BAMSSStateoftheClimate.1
- [2] MESHER, Darel E., Samuel A. PROSKIN a Erik MADSEN. Ice road assessment, modeling and management. In: *Annual Conference of the Transportation Association of Canada Toronto, Ontario* [online]. 2008, s. 1–20 [vid. 2017-12-18]. Dostupné z: <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2008/docs/c1/mesher.pdf>
- [3] LIU, Hai, Kazunori TAKAHASHI a Motoyuki SATO. Measurement of dielectric permittivity and thickness of snow and ice on a brackish lagoon using GPR. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* [online]. 2014, **7**(3), 820–827 [vid. 2017-10-30]. ISSN 21511535. Dostupné z: doi:10.1109/JSTARS.2013.2266792
- [4] WILKINSON, J. P., T. BOYD, B. HAGEN, T. MAKSYM, S. PEGAU, C. ROMAN, H. SINGH a L. ZABILANSKY. Detection and quantification of oil under sea ice: The view from below. *Cold Regions Science and Technology* [online]. 2015, **109**, 9–17 [vid. 2017-12-18]. ISSN 0165232X. Dostupné z: doi:10.1016/j.coldregions.2014.08.004
- [5] JINGXUE, Guo, Sun BO a Tian GANG. The application of electromagnetic-induction on the measurement of sea ice thickness in the Antarctic. *Applied Geophysics* [online]. 2007, **4**(3), 214–220 [vid. 2017-10-30]. ISSN 16727975. Dostupné z: doi:10.1007/s11770-007-0024-9
- [6] TATEYAMA, K., K. SHIRASAWA, S. UTO, T. KAWAMURA, T. TOYOTA a H. ENOMOTO. Standardization of electromagnetic-induction measurements of sea-ice thickness in polar and subpolar seas. *Annals of Glaciology* [online]. 2006, **44**, 240–246 [vid. 2017-10-30]. ISSN 02603055. Dostupné z: doi:10.3189/172756406781811484

- [7] HOLT, Benjamin, Pannirselvam KANAGARATNAM, Siva Prasad GOGINENI, Vijaya Chandran RAMASAMI, Andy MAHONEY a Victoria LYTLE. Sea ice thickness measurements by ultrawideband penetrating radar: First results. *Cold Regions Science and Technology* [online]. 2009, **55**(1), 33–46 [vid. 2017-10-24]. ISSN 0165232X. Dostupné z: doi:10.1016/j.coldregions.2008.04.007
- [8] FIGUEROA-KARLSTRÖM, Eduardo. Device and method for measuring ice thickness [online]. US 2013/0238282 A1. 2013. United States. [vid. 2017-10-17]. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US20130238282>
- [9] GO, Jeung Sang, Man Young HA, Changmin SON a June Kee MIN. Ice thickness measurement sensor [online]. US 2015/0260501 A1. 2015. [vid. 2017-10-17]. Dostupné z: <https://www.google.com/patents/US20150260501?hl=cs>
- [10] PANZER, Ben, Carl LEUSCHEN, Aqsa PATEL, Thorsten MARKUS a Sivaprasad GOGINENI. Ultra-wideband radar measurements of snow thickness over sea Ice. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* [online]. Honolulu: IEEE, 2010, s. 3130–3133 [vid. 2017-10-30]. ISBN 9781424495658. Dostupné z: doi:10.1109/IGARSS.2010.5654342
- [11] REID, James E., A. PFAFFLING, A. P. WORBY a J. R. BISHOP. In situ measurements of the direct-current conductivity of Antarctic sea ice: Implications for airborne electromagnetic sounding of sea-ice thickness. In: *Annals of Glaciology* [online]. 2006, s. 217–223 [vid. 2017-10-30]. ISSN 02603055. Dostupné z: doi:10.3189/172756406781811772
- [12] HAAS, Christian, John LOBACH, Stefan HENDRICKS, Lasse RABENSTEIN a Andreas PFAFFLING. Helicopter-borne measurements of sea ice thickness, using a small and lightweight, digital EM system. *Journal of Applied Geophysics* [online]. 2009, **67**(3), 234–241 [vid. 2017-10-30]. ISSN 09269851. Dostupné z: doi:10.1016/j.jappgeo.2008.05.005
- [13] POLICIE ČR. *Monitoring zaledněných vodních ploch* [online]. 2019 [vid. 2019-10-13]. Dostupné z: <https://www.policie.cz/clanek/monitoring-zalednenych-vodnich-ploch.aspx>

- [14] MĚSTSKÁ POLICIE BRNO. *Měření ledu a přehled událostí ze dne 21. ledna 2016* [online]. 21. leden 2016 [vid. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.mpb.cz/media/tiskove-zpravy/mereni-ledu-a-prehled-udalosti-ze-dne-21-ledna-2016/>
- [15] SINHA, A K. *A Field Study For Sea - Ice Thickness Determination By Electromagnetic Means* [online]. 1976 [vid. 2019-11-21]. Dostupné z: doi:10.4095/100777
- [16] MCNEIL, J. D. *Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers* [online]. 1980 [vid. 2020-04-12]. Dostupné z: <http://www.geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn6.pdf>
- [17] KOVACS, A., Morey R.M. Sounding sea ice thickness using a portable electromagnetic induction instrument. *GEOPHYSICS* [online]. 1991, **56**(12), 1992–1998 [vid. 2020-03-25]. Dostupné z: doi:org/10.1190/1.1443011
- [18] ANDREAS, Pfaffling. *Helicopter Electromagnetic sea ice thickness estimation: An induction method in the centimetre scale* [online]. B.m., 2006 [vid. 2020-04-11]. Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung. Dostupné z: <https://epic.awi.de/id/eprint/27072/1/27431.pdf>
- [19] ŠIROKÝ, Jakub. *Využití georadaru v geomorfologii* [online]. Praha, 2011 [vid. 2020-04-08]. Univerzita Karlova v Praze. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/50742/BPTX_2010_1__0_261895_0_98731.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [20] ANNAN, A. P. GPR-History, Trends and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications* [online]. 2002, **3**(4), 253–270 [vid. 2020-04-05]. ISSN 1566-0184. Dostupné z: doi:10.1023/A:1020657129590
- [21] TKADLEČEK, Petr. *Detekce poruch a dutin v konstrukcích s využitím radaru* [online]. Brno, 2014 [vid. 2020-04-08]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=91894
- [22] ANNAN, A. Peter, Nectaria DIAMANTI, J. David REDMAN a Steven R. JACKSON. Ground-penetrating radar for assessing winter roads. *Geophysics* [online]. 2016, **81**(1), WA101–WA109 [vid. 2020-04-09]. ISSN 19422156. Dostupné z: doi:10.1190/GEO2015-0138.1

- [23] HEALY, D., C. KATOPODIS a P. TARRANT. Application of ground penetrating radar for river Ice surveys. In: *14th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers* [online]. Quebec City: CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, 2007, s. 1–10 [vid. 2020-04-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228894967_Application_of_ground_penetrating_radar_for_river_Ice_surveys
- [24] KOPECKÝ, Pavel. *Georadarový průzkum vybraných lokalit na Říčansku* [online]. Praha, 2016 [vid. 2020-04-08]. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66415/F1-DP-2016-Kopecky-Pavel-georadarovy_pruzkum.pdf?sequence=-1
- [25] SINGH, S. K., B. P. RATHORE, I. M. BAHUGUNA, A. L. RAMNATHAN a AJAI. Estimation of glacier ice thickness using Ground Penetrating Radar in the Himalayan region. *CURRENT SCIENCE* [online]. 2012, **103**(1), 68–73 [vid. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.currentscience.ac.in/Volumes/103/01/0068.pdf>
- [26] COLOMBERO, Ch., C. COMINA, E. DE TOMA, D. FRANCO a A. GODIO. Ice Thickness Estimation from Geophysical Investigations on the Terminal Lobes of Belvedere Glacier (NW Italian Alps). *Remote Sensing* [online]. 2019, **11**(7), 1–19 [vid. 2020-04-19]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: [doi:10.3390/rs11070805](https://doi.org/10.3390/rs11070805)
- [27] BOHADLO, Antonín. *Přehled prostředků pro nedestruktivní výzkum pod vodní hladinou* [online]. Praha, 2019 [vid. 2020-04-10]. Univerzita Karlova. Dostupné z: <https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/105917/130251007.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [28] WILKINSON, J. P., P. WADHAMS a N. E. HUGHES. A Review of the Use of Sonar on Underwater Vehicles to Obtain Information on Sea Ice Draft. In: P. WADHAMS a G. AMANATIDIS, ed. *International Workshop Artic Sea Ice Thickness: Past, Present and Future* [online]. Rungstedgaard: EUROPEAN COMMISSION, 2005, s. 30–45 [vid. 2020-04-12]. ISBN 92-79-02803-0. Dostupné z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/73a475e1-ba53-4fe7-8f79-dc9b8d59f295>

- [29] LUCIEER, Vanessa, Amy NAU, Alexander FORREST a Ian HAWES. Fine-Scale Sea Ice Structure Characterized Using Underwater Acoustic Methods. *Remote Sensing* [online]. 2016, **8**(10), 821 [vid. 2020-04-12]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs8100821
- [30] FISSEL, D. B., R. A. J. CHAVE a J. BUERMANS. Real-time measurement of sea ice thickness, keel sizes and distributions and ice velocities using upward looking sonar instruments. In: *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges* [online]. Biloxi: IEEE Xplore, 2009, s. 1–6 [vid. 2020-04-10]. Dostupné z: doi:10.23919/OCEANS.2009.5422332
- [31] BIRCH, R., D. B. FISSEL, H. MELLING, K. VAUDREY, K. SCHAUDT, J. HEIDEMAN a W. LAMB. Ice-profiling sonar. *Sea Technology* [online]. 2000, **41**, 1–8 [vid. 2020-04-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/290884311_Ice-profiling_sonar
- [32] RICHTER-MENGE, J. A., D. K. PEROVICH, C. GEIGER, B. C. ELDER a K. CLAFFEY. Ice Mass Balance Buoy: An Instrument to Measure and Attribute Changes in Ice Thickness. In: P. WADHAMS a G. AMANATIDIS, ed. *International Workshop Artic Sea Ice Thickness: Past, Present and Future* [online]. Rungstedgaard: EUROPEAN COMMISSION, 2005, s. 24–29 [vid. 2020-04-13]. ISBN 92-79-02803-0. Dostupné z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/73a475e1-ba53-4fe7-8f79-dc9b8d59f295>
- [33] RICHTER-MENGE, Jacqueline A., Donald K. PEROVICH, Bruce C. ELDER, Keran CLAFFEY, Ignatius RIGOR a Mark ORTMEYER. Ice mass-balance buoys: A tool for measuring and attributing changes in the thickness of the Arctic sea-ice cover. *Annals of Glaciology* [online]. 2006, **44**, 205–210 [vid. 2020-04-13]. ISSN 02603055. Dostupné z: doi:10.3189/172756406781811727
- [34] Ice Mass Balance Buoys. *The Great White Con* [online]. [vid. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://greatwhitecon.info/resources/ice-mass-balance-buoys/>
- [35] NEBYLOV, A. V. a F. J. YANOVSKY. Radar Altimeters. In: A. V. NEBYLOV a J. WATSON, ed. *Aerospace Sensors* [online]. 1st vyd. New York: Momentum Press, 2013 [vid. 2020-04-16], s. 55–88. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/260275632_Radar_Altimeters#fullTextFileContent

- [36] KILDEGAARD ROSE, S. *Measurements of sea ice by satellite and airborne altimetry* [online]. B.m., 2013 [vid. 2020-04-17]. National Space Institute. Dostupné z: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/files/80537655/PhD_SKRose.pdf
- [37] FARRELL, S. L., N. KURTZ, L. N. CONNOR, B. C. ELDER, C. LEUSCHEN, T. MARKUS, D. C. MCADOO, B. PANZER, J. RICHTER-MENGE a J. G. SONNTAG. A first assessment of IceBridge Snow and Ice thickness data over arctic sea ice. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 2012, **50**(6), 2098–2111 [vid. 2020-04-19]. ISSN 01962892. Dostupné z: doi:10.1109/TGRS.2011.2170843
- [38] SKOURUP, H. a R. FORSBERG. Sea Ice Freeboard from ICESat – A Comparison with Airborne Lidar Measurements. In: P. WADHAMS a G. AMANATIDIS, ed. *International Workshop Arctic Sea Ice Thickness: Past, Present and Future* [online]. Rungstedgaard: EUROPEAN COMMISSION, 2005, s. 82–92 [vid. 2020-04-19]. ISBN 92-79-02803-0. Dostupné z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/73a475e1-ba53-4fe7-8f79-dc9b8d59f295>
- [39] HVIDEGAARD, S. M. a R. FORSBERG. Sea-ice thickness from airborne laser altimetry over the Arctic Ocean north of Greenland. *Geophysical Research Letters* [online]. 2002, **29**(20), 1–4 [vid. 2020-04-17]. ISSN 00948276. Dostupné z: doi:10.1029/2001GL014474
- [40] NOAA / NESDIS / STAR LABORATORY FOR SATELLITE ALTIMETRY. *Laboratory for Satellite Altimetry / Sea Ice and Polar Dynamics Science Team* [online]. 12. března 2020 [vid. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaIce/background.php>
- [41] GILES, K. A., S. W. LAXON, D. J. WINGHAM, D. W. WALLIS, W. B. KRABILL, C. J. LEUSCHEN, D. MCADOO, S. S. MANIZADE a R. K. RANEY. Combined airborne laser and radar altimeter measurements over the Fram Strait in May 2002. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2007, **111**(2), 182–194 [vid. 2020-04-16]. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2007.02.037
- [42] KURTZ, N. T., T. MARKUS, D. J. CAVALIERI, L. C. SPARLING, W. B. KRABILL, A. J. GASIEWSKI a J. G. SONNTAG. Estimation of sea ice thickness distributions through the combination of snow depth and satellite laser altimetry

- data. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2009, **114**(C10), 1–16 [vid. 2020-04-19]. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/2009JC005292
- [43] ZHANG, L. a Y. DOU. An Apparatus for Monitoring Sea Ice Thickness Based on Coplanar Multi-Electrode Capacitance Sensor. In: S. ZHOU, ed. *3rd International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation* [online]. Chongqing: SCITEPRESS, 2018, s. 467–475 [vid. 2020-04-21]. ISBN 978-989-758-312-4. Dostupné z: <http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0006972804670475>
- [44] LIN, T. T., Y. DU a J. MAO. Monitoring of icing behavior based on signals from a capacitance sensor. *Optik* [online]. 2016, **127**(11), 4650–4655 [vid. 2020-04-22]. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2016.01.005
- [45] WANG, Z., J. WANG, W. LI a Z. LI. Study on Capacitance Sensor Simulation of Ice Thickness Measurement Based on ANSYS. *Sensors & Transducers Journal* [online]. 2014, **162**(1), 47–52 [vid. 2020-04-23]. ISSN 2306-8515. Dostupné z: https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P_1748.htm
- [46] YINKE, Dou a Chang XIAOMIN. Mechanism analysis and simulation of coplanar multi-electrode capacitive ice thickness measuring sensor. *Sensors and Transducers* [online]. 2013, **158**(11), 27–32 [vid. 2020-04-23]. ISSN 17265479. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/286916140_Mechanism_Analysis_and_Simulation_of_Coplanar_Multi-Electrode_Capacitive_Ice_Thickness_Measuring_Sensor
- [47] ZHI, X., H. Ch. CHO, B. WANG, Ch. H. AHN, H. S. MOON a J. S. GO. Development of a capacitive ice sensor to measure ice growth in real time. *Sensors* [online]. 2015, **15**(3), 1–11 [vid. 2020-04-24]. ISSN 14248220. Dostupné z: doi:10.3390/s150306688
- [48] GERALDI, J. J., G. A. HICKMAN, A. A. KHATKHATE a D. A. PRUZAN. Measuring ice distribution profiles on a surface with attached capacitance electrodes [online]. US5551288A. 3. září 1996. [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US5551288A/en>
- [49] GERARDI, J. J., G. A. HICKMAN, A. A. KHATKHATE a D. A. PRUZAN. Apparatus for measuring ice distribution profiles [online]. US5398547A.

21. březen 1995. [vid. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US5398547A/en>
- [50] TROIANO, A., E. PASERO a L. MESIN. New system for detecting road ice formation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2011, **60**(3), 1091–1101 [vid. 2020-04-24]. ISSN 00189456. Dostupné z: doi:10.1109/TIM.2010.2064910
- [51] PICHA, Tomas a Stanislava PAPEZOVA. Dielectric properties of materials for 3D printing at high frequencies. *Research in Agricultural Engineering*. in press.
- [52] COJOCARU, Vasile, Doina FRUNZEVERDE, Calin-Octavian MICLOSINA a Gabriela MARGINEAN. The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication—A Review. *Polymers* [online]. 2022, **14**(5), 1–23 [vid. 2022-02-27]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/POLYM14050886
- [53] MASZYBROCKA, Joanna, Michał DWORAK, Grażyna NOWAKOWSKA, Patrycja OSAK a Bożena ŁOSIEWICZ. The Influence of the Gradient Infill of PLA Samples Produced with the FDM Technique on Their Mechanical Properties. *Materials* [online]. 2022, **15**(4), 1–19 [vid. 2022-02-27]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/MA15041304
- [54] LE, Thai-Hung, Van-Son LE, Quoc-Khanh DANG, Minh-Thuyet NGUYEN, Trung-Kien LE a Ngoc-Tam BUI. Microstructure Evaluation and Thermal–Mechanical Properties of ABS Matrix Composite Filament Reinforced with Multi-Walled Carbon Nanotubes by a Single Screw Extruder for FDM 3D Printing. *Applied Sciences* [online]. 2021, **11**(19), 1–10 [vid. 2022-02-27]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/APP11198798
- [55] PICHA, Tomas, Stanislava PAPEZOVA a Stepan PICHA. Evaluation of Relative Permittivity and Loss Factor of 3D Printing Materials for Use in RF Electronic Applications. *Processes* [online]. 2022, **10**(9), 1–15 [vid. 2022-10-31]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/PR10091881
- [56] VESELÝ, Petr, Eva HORYNOVÁ, Tomáš TICHÝ a Ondřej ŠEFL. Study of electrical properties of 3D printed objects. In: Libor HUSNÍK, ed. *Proceedings of the International Student Scientific Conference Poster – 22/2018* [online]. Prague:

- Czech Technical University in Prague, 2018, s. 1–5 [vid. 2020-03-03]. Dostupné z: http://poseidon2.feld.cvut.cz/conf/poster/proceedings/Poster_2018/Section_PE/PE_043_Vesely.pdf
- [57] KUMAR, S. Raam, S. SRIDHAR, R. VENKATRAMAN a M. VENKATESAN. Polymer additive manufacturing of ASA structure: Influence of printing parameters on mechanical properties. In: *2nd International Conference on Recent Trends in Metallurgy, Materials Science and Manufacturing (IMME)* [online]. Tiruchirappalli, INDIA: Elsevier Ltd, 2019, s. 1316–1319 [vid. 2022-07-10]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/J.MATPR.2020.04.500
- [58] AGILENT TECHNOLOGIES INC. *Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer Installation and Quick Start Guide* [online]. 2012 [vid. 2022-08-29]. Dostupné z: https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/agilent-e4991a_installation_guide.pdf
- [59] BIROUAS, Flaviu -Ionut a Arnold NILGESZ. PROTOTYPING ROBOTIC MEDICAL REHABILITATION DEVICES. *Nonconventional Technologies Review* [online]. 2017, **21**(2), 51–56 [vid. 2020-08-03]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/331968702>
- [60] CHAPLIN, Martin. *Water and microwaves* [online]. 9. říjen 2021 [vid. 2023-01-12]. Dostupné z: https://water.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html
- [61] KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *E4990A Impedance Analyzer* [online]. B.m.: Keysight Technologies, 2022 [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-04256/data-sheets/5991-3890.pdf>
- [62] IQD FREQUENCY PRODUCTS LTD. *Quartz Crystal Specification: LFX TAL058383Bulk (HC49/4H)* [online]. B.m.: IQD Frequency Products Ltd, 2022 [vid. 2022-10-13]. Dostupné z: <https://www.iqdfrequencyproducts.com/products/pn/LFX TAL058383Bulk.pdf>