

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VYUŽITÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ  
KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S MODIFIKOVANOU  
CEMENTOVOU MATRICÍ

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

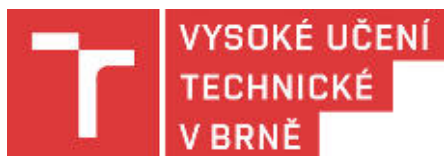
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. LADISLAV MACHÁŇ

BRNO 2015

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS



## VYUŽITÍ ELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S MODIFIKOVANOU CEMENTOVOU MATRICÍ

THE USE OF ELECTRICAL PROPERTIES OF COMPOSITES WITH MODIFIED CEMENT  
MATRIX

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. LADISLAV MACHÁŇ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL ŠTEFFAN, Ph.D.

BRNO 2015

## **Abstrakt**

Dizertační práce se zabývá praktickým využitím kompozitního materiálu s modifikovanou cementovou matricí. V práci je zkoumána zejména oblast využití elektrických vlastností kompozitních materiálů na bázi cementu pro snímání mechanického namáhání. V experimentální části je řešena problematika koroze uhlíku a kovových materiálů v alkalickém prostředí cementové matrice. Je zde popsán návrh fyzického provedení senzoru a jeho výroba s použitím funkčního cementového kompozitního materiálu. Je také diskutováno určení vlivů teploty a vlhkosti prostředí na změnu elektrických vlastností integrovaných senzorů. Důležitou součástí práce je oblast vyhodnocení série měření elektrických parametrů při dynamickém zatěžování. Je zde podrobně rozebrána navržená měřicí metoda vhodná pro stanovení elektrických vlastností cementových kompozitních materiálů včetně konstrukce monitorovacího systému, který umožňuje praktickou aplikaci senzorů do složitých konstrukcí.

## **Klíčová slova**

Kompozitní materiál, modifikovaná cementová matrice, beton, koroze, inhibitory koroze, dynamické zatěžování, laboratorní měřicí aparatura, MSP430, AD5933, monitorovací systém.

## **Abstract**

The dissertation thesis is focused on practical use of composite material with modified cement matrix. Especially the area of electrical behavior of composite materials in use has been examined, for strain sensing material. The experimental part solves the problematics of corrosion of carbon and metallic materials in alkaline environment of the cement matrix. The physical design of the sensor and its fabrication using functional composite cement material have been described here. The thesis has also discussed defining the influence of temperature change and humidity change on the change of electrical parameters of integrated sensors. An important part of the thesis is the area of evaluating a series of measurements of electrical parameters under dynamic loading. The thesis analyzes designed measurement method in detail, being suitable to determine electrical properties of cement composite materials including the construction of a monitoring system that enables practical application of sensors in complex structures.

## **Keywords**

Composite, modified cement matrix, concrete, corrosion, corrosion inhibitors, dynamic loading, laboratory measuring equipment, MSP430, AD5933, monitoring system.

## **Bibliografická citace**

MACHÁŇ, L. *Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 144 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou dizertační práci na téma „Využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí“ vypracoval samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Pavla Šteffana, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne: 30.10.2015.

.....

Ing. Ladislav Macháň



Tato práce vznikla v rámci centra CEITEC - Středoevropského technologického institutu s intenzivní pomocí výzkumné infrastruktury financované projektem CZ.1.05/1.1.00/02.0068 z Evropského fondu regionálního rozvoje.



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



## Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mě podporovali při tvorbě této práce. Největší dík patří mému školiteli doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. nejen za cenné rady, podněty a metodické vedení během realizace práce, ale také za vstřícný a přátelský přístup. Můj velký dík patří kolegům z Ústavu elektrotechnologie za cenné rady a provedená měření v oblasti korozních testů, kolegům z VUSTAH za přípravu a výrobu vzorků a společnosti DAKO za výrobu betonových prvků s integrovanými senzory. Za příjemnou spolupráci a přátelskou atmosféru, která provázela mé doktorské studium, děkuji všem svým kolegům z Ústavu mikroelektroniky.

Na závěr bych také rád poděkoval svým rodičům a své přítelkyni za trpělivost a psychickou podporu nejen při psaní této dizertační práce, ale i po celou dobu mého dlouhého studia na Vysokém učení technickém v Brně.

Tato práce vznikla za podpory grantů a v návaznosti na ně:

- *Multifunkční kompozity mimořádných vlastností na bázi anorganických nanosložek (KOMPOZITY), FT-TA3/027*
- *„Sledování stavu stavebních konstrukcí pomocí elektricky vodivých prvků s modifikovanou cementovou matricí“, FR-TI3/485*



## Obsah

|          |                                                                                                |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>ÚVOD .....</b>                                                                              | <b>10</b> |
| <b>2</b> | <b>SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....</b>                                                        | <b>12</b> |
| 2.1      | KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....                                                                     | 12        |
| 2.2      | KOMPOZITNÍ MATERIÁLY S MODIFIKOVANOU CEMENTOVOU MATRICÍ .....                                  | 14        |
| 2.2.1    | <i>Elektricky vodivá plniva.....</i>                                                           | <i>15</i> |
| 2.2.2    | <i>Elektrické vlastnosti materiálů a možnosti jejich využití.....</i>                          | <i>17</i> |
| 2.3      | FUNKČNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁL .....                                                              | 20        |
| <b>3</b> | <b>CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE.....</b>                                                              | <b>23</b> |
| <b>4</b> | <b>NÁVRH, REALIZACE A CHARAKTERIZACE SENZORU .....</b>                                         | <b>24</b> |
| 4.1      | MĚŘENÍ KOROZNÍHO PŮSOBENÍ V PROSTŘEDÍ BETONU .....                                             | 24        |
| 4.1.1    | <i>Koroze kovových materiálů .....</i>                                                         | <i>24</i> |
| 4.1.2    | <i>Vliv inhibitorů na korozi kovových materiálů.....</i>                                       | <i>32</i> |
| 4.1.3    | <i>Koroze uhlíku .....</i>                                                                     | <i>43</i> |
| 4.1.4    | <i>Koroze betonu .....</i>                                                                     | <i>46</i> |
| 4.2      | VÝROBA SENZORU A JEHO MECHANICKÉ PROVEDENÍ .....                                               | 46        |
| 4.3      | INTEGRACE SENZORŮ DO BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ .....                                               | 49        |
| 4.4      | MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ SENZORŮ .....                                                    | 50        |
| 4.4.1    | <i>Statická měření elektrických parametrů .....</i>                                            | <i>51</i> |
| 4.4.2    | <i>Dynamická měření elektrických parametrů.....</i>                                            | <i>51</i> |
| 4.4.3    | <i>Dlouhodobé měření elektrických parametrů .....</i>                                          | <i>65</i> |
| <b>5</b> | <b>VÝVOJ MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE PRO CHARAKTERIZACI<br/>BETONOVÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....</b> | <b>68</b> |
| 5.1      | VYUŽITÍ INTEGROVANÉHO PŘEVODNÍKU IMPEDANCE .....                                               | 72        |
| 5.1.1    | <i>Mikrokontrolér MSP430F5438A .....</i>                                                       | <i>75</i> |
| 5.1.2    | <i>Převodník impedance AD5933 .....</i>                                                        | <i>76</i> |
| 5.1.3    | <i>Programové vybavení .....</i>                                                               | <i>78</i> |
| 5.1.4    | <i>Diskuze vlastností integrovaného obvodu AD5933 .....</i>                                    | <i>78</i> |
| 5.2      | NÁVRH NOVÉ MĚŘICÍ METODY .....                                                                 | 79        |
| 5.2.1    | <i>Nová měřicí metoda .....</i>                                                                | <i>79</i> |
| 5.2.2    | <i>Měřicí modul.....</i>                                                                       | <i>83</i> |
| 5.2.3    | <i>Výkonový operační zesilovač OPA567 .....</i>                                                | <i>84</i> |
| 5.2.4    | <i>Přístrojový zesilovač LMP8358.....</i>                                                      | <i>85</i> |
| 5.2.5    | <i>Převodník D/A MCP4921 .....</i>                                                             | <i>87</i> |
| 5.2.6    | <i>Převodník A/D vestavěný v mikrokontroléru .....</i>                                         | <i>89</i> |
| 5.2.7    | <i>Programové vybavení .....</i>                                                               | <i>89</i> |

|          |                                                       |            |
|----------|-------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.8    | <i>Diskuse vlastností nové měřicí metody</i> .....    | 90         |
| 5.3      | NÁVRH A KONSTRUKCE LABORATORNÍ MĚŘICÍ APARATURY ..... | 90         |
| 5.3.1    | <i>Mikrokontrolér MSP430F5529</i> .....               | 95         |
| 5.3.2    | <i>Zobrazovací panel</i> .....                        | 95         |
| 5.3.3    | <i>Převodník A/D ADC161S626</i> .....                 | 97         |
| 5.3.4    | <i>Senzor teploty a vlhkosti SHT21</i> .....          | 98         |
| 5.3.5    | <i>Programové vybavení</i> .....                      | 100        |
| <b>6</b> | <b>MONITOROVACÍ SYSTÉM</b> .....                      | <b>101</b> |
| 6.1      | TOPOLOGIE MONITOROVACÍHO SYSTÉMU .....                | 101        |
| 6.2      | MĚŘICÍ BOD .....                                      | 102        |
| 6.2.1    | <i>Přístrojový zesilovač INA331</i> .....             | 106        |
| 6.2.2    | <i>Operační zesilovač OPA2376</i> .....               | 107        |
| 6.2.3    | <i>Programové vybavení</i> .....                      | 108        |
| 6.3      | KOMUNIKAČNÍ ÚSTŘEDNA .....                            | 111        |
| 6.3.1    | <i>Komunikační modul SIM900</i> .....                 | 113        |
| 6.3.2    | <i>Programové vybavení</i> .....                      | 115        |
| 6.4      | BEZDRÁTOVÝ KOMUNIKAČNÍ MODUL S CC430F5137 .....       | 116        |
| 6.5      | APLIKACE PRO PC .....                                 | 118        |
| <b>7</b> | <b>ZÁVĚR</b> .....                                    | <b>123</b> |
|          | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....                       | 126        |
|          | DALŠÍ PUBLIKAČNÍ AKTIVITY .....                       | 132        |
|          | SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....                        | 133        |
|          | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....                        | 135        |
|          | SEZNAM OBRÁZKŮ .....                                  | 136        |
|          | SEZNAM TABULEK .....                                  | 140        |
|          | CURRICULUM VITAE .....                                | 141        |
|          | PŘÍLOHA .....                                         | 143        |

# 1 Úvod

*„Nestačí jen něco vědět, je třeba to i využít, nestačí něco chtít, je třeba to i vykonat.“*

Johann Wolfgang von Goethe

Materiály s cementovou matricí jsou lidstvu známy již z období antiky, kdy římsí stavitelé začali používat přírodní hydraulický cement „pucolán“, který vzniká jako vedlejší produkt sopečné činnosti. Objev hydraulického betonu umožnil vznik významných antických inženýrských staveb, akvaduktů a mostů. Se zánikem říše římské byla znalost využití hydraulických pojiv ztracena téměř na tisíc let. Znovuobjevení betonu nastalo až v období novověku, kdy v roce 1756 britský inženýr John Smeaton poprvé použil jako hydraulické pojivo tzv. „Portlandský cement“. Od té doby prodělal vývoj betonu prudký vzestup a z betonu se stal jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů současnosti [1].

I přes velkou odolnost betonu dochází vlivem mechanického namáhání, chemické koroze a eroze povrchu k postupné degradaci jeho vlastností. U exponovaných staveb jako jsou přehrady, mosty, skelety budov apod., je klíčová dlouhodobá bezpečnost provozu. Stav těchto konstrukcí musí být pravidelně kontrolován a monitorován. Pro kontroly se používají defektoskopické metody založené na akustickém principu [2], na principu počítačové rentgenové tomografie [3] nebo elektrické odporové tomografie [4]. Pro dlouhodobé monitorování struktur se využívají tenzometrické systémy založené buď na piezoelektrickém elementu integrovaném v objemu [5], nebo nejčastěji odporové tenzometry umístěné na povrchu materiálu.

Nevýhody konvenčních způsobů monitorování vedly k myšlence vytvořit elektrický senzor, který by umožňoval měřit namáhání betonu v objemu materiálu, jehož výroba by byla levná, ekologická a technologicky slučitelná s výrobou betonu. Možnost nepřetržitého sledování pochodů uvnitř objemu materiálu s využitím elektrických parametrů materiálu je benefitem, který umožňuje včas reagovat na případné strukturální poruchy a včasnou sanaci materiálu předcházet katastrofálním následkům selhání. Výzkumu materiálů s modifikovanou cementovou matricí se již řadu let věnují vědci na předních světových pracovištích. Záměr využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí za účelem zvýšení bezpečnosti stavebních konstrukcí z betonu může znamenat obrovský celospolečenský přínos.

Dizertační práce navazuje na výsledky projektu „*Multifunkční kompozity mimořádných vlastností na bázi anorganických nanosložek (KOMPOZITY)*“, který byl řešen na Ústavu mikroelektroniky v letech 2006 až 2010. Jedním z výstupů tohoto projektu byla patentovaná receptura přípravy kompozitního materiálu s cementovou matricí, který vykazoval vlastnosti vhodné pro výrobu senzoru. Navazující projekt „*Sledování stavu stavebních konstrukcí pomocí elektricky vodivých prvků s modifikovanou cementovou matricí*“, který byl řešen od roku 2011 až do května 2015,

ještě více prohloubil poznatky v oblasti přípravy funkčního materiálu. Byla vytvořena receptura s optimalizovanými elektrickými vlastnostmi, chráněná užitným vzorem.

Popisu současného stavu řešené problematiky se věnuje kapitola 2. Je zde vysvětlen fyzikální princip a mechanismy zvýšení vodivosti, které vedou k výhodným tenzometrickým vlastnostem kompozitního materiálu. Během průzkumu současného stavu problematiky a studia literatury byly nalezeny tematické oblasti, které vyžadovaly důkladnější prozkoumání.

Cíle dizertační práce, kterým se věnuje kapitola 3, vychází z provedeného průzkumu současného stavu problematiky. Jsou zaměřeny na možnost praktického využití tenzometrických vlastností funkčního kompozitního materiálu.

V experimentální části práce, kterou popisuje kapitola 4, jsou uvedeny výsledky výzkumu korozního působení alkalického prostředí betonu na vybrané materiály. Další oblastí zájmu bylo testování vlivu aditiv v podobě organických inhibitorů koroze na korozní odolnost kovů vytipovaných pro aplikaci v elektrodovém systému senzoru (kapitola 4.1). Výrobě, mechanickému povedení elektrodového systému a integraci vyrobených senzorů do železobetonových konstrukčních prvků se věnují kapitoly 4.2 a 4.3. Výsledky měření statických elektrických parametrů, elektrické odezvy senzorů při dynamickém zatěžování a dlouhodobého měření vlivu okolního prostředí na elektrické parametry senzoru jsou uvedeny v kapitole 4.4.

Vývojem a konstrukcí laboratorní měřicí aparatury, která umožnila provést měření elektrických parametrů senzorů, se zabývá kapitola 5. V rámci řešení dizertační práce byl navržen a zkonstruován monitorovací systém, popsáný v kapitole 6, který je komplexním nástrojem, umožňujícím praktické využití elektrických vlastností kompozitů s modifikovanou cementovou maticí.

## 2 Současný stav problematiky

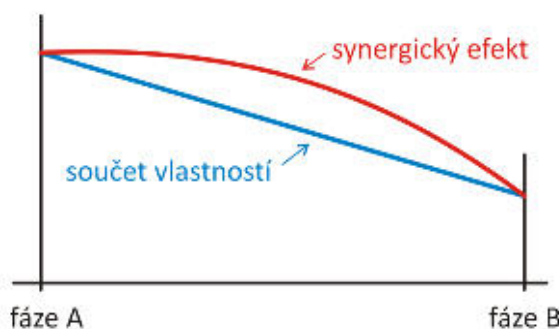
„Znalost příčin je skutečná věda.“

Francis Bacon

Problematiku kompozitních materiálů, která se váže k tématu dizertační práce, lze rozdělit do tří tematických celků. První část tvoří obecné kompozitní materiály. Jejich rozdělení a vysvětlení názvosloví se věnuje kapitola 2.1. Druhá část (kapitola 2.2) se věnuje rozboru plniv a výztuží, která umožňují měnit výsledné mechanické a elektrické vlastnosti kompozitního materiálu s cementovou maticí. Kapitola 2.3 popisuje konkrétní recepturu výroby funkční kompozitní směsi, která po vytvrzení reaguje na mechanické namáhání výraznou změnou reálné složky elektrické impedance. Na základě důkladného průzkumu současného stavu řešené problematiky byly nalezeny tematické oblasti, které vyžadovaly důkladnější prozkoumání. Identifikace těchto oblastí vedla ke stanovení cílů dizertační práce uvedených v kapitole 3.

### 2.1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiál (kompozit) je vícefázový technický materiál složený ze dvou nebo více fází s rozdílnými vlastnostmi. Jejich složením vzniká materiál s novými vlastnostmi, kterých sama o sobě nedosahuje ani jedna z použitých fází – synergický (spolupracující) efekt (obr. 1). Použité materiály se v makroměřítku liší tvarem nebo složením, ale v rámci kompozitu si zachovávají svoji identitu i přes to, že na své okolí působí v součinnosti. Nedochází k úplnému rozpouštění, nebo slučování a každá z fází může být fyzikálně identifikována [6].



Obr. 1 Synergický efekt [6]

Tvrďší a pevnější nespojitá fáze kompozitu bývá označována jako výztuž. Typickým příkladem výztuže jsou různá vlákna či tkaniny, které dodávají kompozitu vlastnosti spojené s vysokou pevností v tahu (skleněná, uhlíková, aramidová). Spojitá a poddajnější fáze, která zastává funkci pojiva výztuže, bývá označována jako matrice. Matrice udává výsledný tvar kompozitu a zajišťuje přenos zatížení do vyztužující fáze.

Vícefázový materiál může být označen kompozitem, pokud je podíl výplně větší než 5 %, je připraven smícháním složek a má odlišné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti výztuže a matrice [7].

Podle typu disperze lze rozlišit tři druhy kompozitních materiálů. Kompozitní materiály *prvního druhu* obsahují disperzi v pevné fázi. Jsou v technice nejdůležitější a nejvíce používané. Kompozitní materiály *druhého druhu* obsahují disperzi v kapalně fázi. Nejčastěji se vyskytují ve formě přírodních materiálů (dřevo s mizou), ale jsou připravovány i uměle. Příkladem mohou být materiály pro výrobu samomazných ložisek, které obsahují spékaný kov s disperzí oleje. Kompozitní materiály *třetího druhu* obsahují disperzi v plynné fázi. Do této skupiny patří různé pěnové materiály, jako jsou pěnoplasty (pěnový polystyren), pěnokeramika (pěnokorund) a kovové pěny (hliníková pěna).

Z hlediska zaměření práce jsou nejdůležitější kompozity s disperzí v pevné fázi (prvního druhu). Ty lze dále dělit podle materiálu matrice:

- s polymerní matricí (PMC),
- s kovovou matricí (MMC),
- s keramickou matricí (CMC),
- speciální typy (např. skleněná, sklokeramická nebo uhlíková matrice),

nebo podle geometrické charakteristiky disperze:

- fibrilární (vlákna – spojitá, dlouhá, krátká),
- granulární (částice – jednorozměrné, vrstevnaté, izometrické),
- lamelární (plošné).

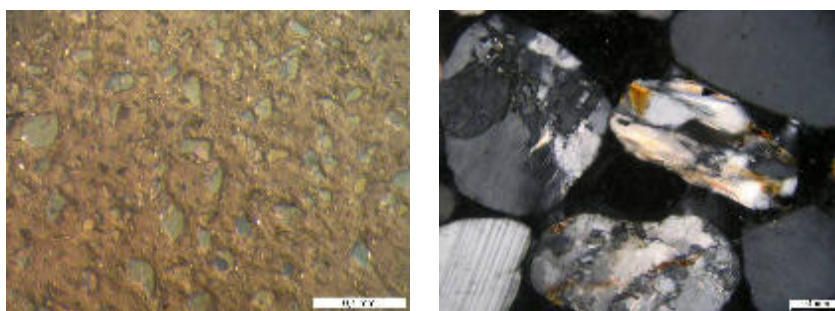
Důležitou skupinou materiálů pro výztuže s fibrilární disperzí jsou různé druhy technických, ale i přírodních vláken. Používají se vlákna: skleněná, uhlíková, borová, polymerní, keramická ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), piezoelektrická, proteinová (vlákna produkovaná pavouky) a přírodní (rostlinná, čedičová a azbestová). Většina uspořádání kompozitních materiálů vyvolává anizotropii. Anizotropie může být pro některé aplikace žádoucí (lopatky rotoru, luk) a je jí záměrně využíváno. Pokud je anizotropie nežádoucí, může být potlačena vhodným uspořádáním fází (laminát, překližka).

Podle rozměrů vyztužující fáze lze kompozity rozdělit na *makrokompozity*, *mikrokompozity* a *nanokompozity*. Makrokompozity obsahují výztuž, jejíž příčné rozměry dosahují velikosti 1 mm až 100 mm. Jsou používány především ve stavebnictví. Typickým zástupcem této kategorie je železobeton (výztuž – ocelové pruty, lana; pojivo – beton), polymerní beton (výztuž – drcené kamenivo; pojivo –

polymerní pryskyřice) a plátované kovy. U mikrokompozitů se příčné rozměry výztuže pohybují v rozmezí 1  $\mu\text{m}$  až 100  $\mu\text{m}$ . Jejich charakteristickou vlastností je příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě. Tím dosahují velké měrné pevnosti ( $R_m/\rho$ ) a měrného modulu pružnosti ( $E/\rho$ ). Díky těmto vlastnostem mají v současné době mikrokompozity v průmyslu největší význam. Nanokompozity mají rozměry výztuže řádově v jednotkách nanometrů. Příkladem využití nanokompozitu může být disperze malého množství kovových částic do keramického materiálu (cermet), která výrazným způsobem zlepší jeho mechanické vlastnosti (zvýšení houževnatosti jinak velmi křehkého materiálu). U funkční keramiky pro výrobu elektronických součástek, např.  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnO}_2$ , mohou být tímto způsobem zlepšeny nejen elektrické vlastnosti, ale zároveň snížena náchylnost k porušení struktury při prudkých změnách teploty a rozšířena teplotní pracovní oblast součástky. Vzhledem k unikátním vlastnostem nanokompozitů a k potenciálu jejich využití je současné době v této oblasti prováděn intenzivní výzkum [8].

## 2.2 Kompozitní materiály s modifikovanou cementovou maticí

Nejpoužívanějším kompozitním materiálem v oblasti stavitelství je beton. Matrice betonu je tvořena cementem, který plní funkci hydraulického pojiva. K hydraulickému tvrdnutí cementu dochází důsledkem hydratace vápenatých silikátů a aluminátů (křemičitanů a hlinitanů). Po vytvrzení vlivem hydratačních procesů a reakcí je materiál pevný, stálý a odolný proti působení vody. Do cementové matrice jsou přidávána plniva, která určují výsledné mechanické vlastnosti betonu. Základními plnivy je písek a kamenivo s různou velikostí frakce (obr. 2). Kamenivo tvoří až 80 % celkového objemu směsi. Díky vzájemnému opření a zaklínění jednotlivých zrn vzniká pevná vrstva odolná v tlaku [9].

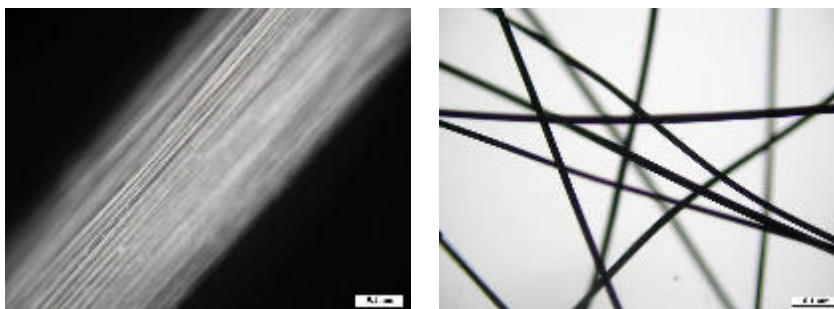


**Obr. 2** Písek (vlevo) a kamenivo (vpravo) na snímcích z optického mikroskopu

Kromě základních plniv mohou být do struktury kompozitu přidávány výztuže, nejčastěji ve formě ocelových nebo železných drátků, drátů, sítí a rohoží. Každý druh výztuže je vhodný pro jinou aplikaci. Pro výrobu extrémně zatěžovaných podlah ve výrobních halách nebo pro vyztužování výrubu tunelů se s výhodou využívá vlastností drátkobetonu, který vzniká rovnoměrným rozptýlením drátků

v cementové matici. Drátkobeton je houževnatý a jeho pevnost v tahu a tlaku je podstatně vyšší než u betonu bez výztuže. Výrazného zvýšení pevnosti betonu v tahu lze docílit přidáním betonářské výztuže ve formě drátů, sítí a rohoží. Takto vzniklé kompozitní materiály jsou jednotně nazývány železobetonem. V civilním stavitelství má železobeton uplatnění v celé řadě aplikací (stavby výškových budov, mostů, přehrad atd.), v armádě byl v minulosti využíván např. při stavbě československého opevnění, které bylo v pohraničí budováno v letech 1935 až 1938.

Modifikací cementové matrice přidáním vláken vzniká speciální typ betonu – vláknobeton. Díky synergickému efektu získává beton plněný vlákny výhodné vlastnosti v podobě omezení vzniku trhlin v objemu materiálu při tepelném nebo mechanickém namáhání, zvýšení odolnosti proti průniku vody a zlepšení jakosti povrchu. Vláknobetony se díky svým vlastnostem uplatňují při výrobě prefabrikovaných dílců (roury, žlaby, římsy apod.), pohledového betonu a podlah. Výztuž může být tvořena ocelovými, skleněnými, syntetickými či uhlíkovými vlákny (obr. 3).



**Obr. 3** Skleněná (vlevo) a uhlíková vlákna (vpravo) na snímku z optického mikroskopu

Pro výsledné mechanické vlastnosti je důležité rovnoměrné rozptýlení vláken v objemu materiálu a jejich orientace. Pro některé aplikace je výhodná anizotropie mechanických vlastností, kterou způsobuje náhodná poloha vláken. Pro dosažení izotropních mechanických vlastností lze vlákna do matrice ukládat s jednotnou orientací, ve svazcích nebo v tkaninách.

### 2.2.1 Elektricky vodivá plniva

Elektrická rezistivita cementové matrice je po vytvrzení a vyžrání přibližně  $5 \times 10^3 \Omega \cdot m$  [10]. Přidáním anorganických složek plniva rezistivita kompozitního materiálu ještě vzroste. Vzhledem k velmi nízké hodnotě měrné elektrické vodivosti může být beton považován za izolant. Zajímavé elektrické vlastnosti, kterým je věnována kapitola 2.2.2, mohou být získány přidáním vodivých plniv do cementové matrice. Ideálním materiálem, který je velmi dobře vodivý, chemicky odolný a snadno dostupný, je uhlík. Uhlíkový materiál lze obstarat v různých formách. Některé formy



uhlíku jsou průmyslově vyráběné (vlákna, tkaniny, vločky), jiné vznikají jako vedlejší produkt průmyslové výroby a jsou odpadním materiálem (saze). Z hlediska využití, jako plniva do cementové matrice je při výběru materiálu důležitá velikost částic, případně délka vláken. Cílem je, aby se jednotlivé částice nebo vlákna rozptýlily v objemu materiálu rovnoměrně. Různé formy uhlíku vhodné pro využití v kompozitních materiálech s cementovou maticí jsou uvedeny na obr. 4.



**Obr. 4** Uhlíkové materiály (zleva: mikromletá vlákna, vločky, saze)

Při vývoji funkčního kompozitního materiálu, popsaného v kap. 2.3, bylo provedeno laboratorní měření vodivosti různých forem komerčně dostupných uhlíkových materiálů. Laboratorní přípravek, pomocí kterého bylo měření provedeno, je znázorněn na obr. 5.



**Obr. 5** Laboratorní přípravek pro měření vodivosti uhlíkových materiálů

Vzorek měřeného uhlíkového materiálu byl stlačován mezi elektrodami v měřicím válci (obr. 5 – vlevo). Potřebná síla byla vyvinuta laboratorním lisem (obr. 5 – vpravo). Vzorek byl stlačen silami 10 kN ( $1,4 \text{ kN/cm}^2$ ), 20 kN ( $2,8 \text{ kN/cm}^2$ ) a 30 kN ( $4,2 \text{ kN/cm}^2$ ). Pomocí laboratorního přístroje Agilent 34420A byl měřen elektrický odpor stlačeného materiálu. Elektrody byly k laboratornímu přístroji připojeny čtyřvodičově. Ze známé plochy elektrod ( $7,07 \text{ cm}^2$ ) a tloušťky vzorku, odečtené z polohy pohyblivé části lisu, byla vypočtena rezistivita materiálu. Naměřené výsledky jsou zpracovány v tab. 1.

**Tab. 1** Výsledky měření vodivosti uhlíkových materiálů

| Název materiálu       | Výrobce            | Rezistivita $\rho$ [m $\Omega$ /m] |           |           |
|-----------------------|--------------------|------------------------------------|-----------|-----------|
|                       |                    | F = 10 kN                          | F = 20 kN | F = 30 kN |
| Timrex E-BE90         | Timrex             | 0,11                               | 0,09      | 0,09      |
| GK Cond 5995          | Graphite kropfmuhl | 0,12                               | -         | -         |
| Timrex SFG 75         | Timrex             | 0,15                               | 0,12      | 0,11      |
| GK Cond 2096          | Graphite kropfmuhl | 0,20                               | 0,16      | 0,15      |
| GK UF 995             | Graphite kropfmuhl | 0,30                               | 0,25      | 0,23      |
| GK Cond 396           | Graphite kropfmuhl | 0,33                               | 0,29      | 0,28      |
| Timcal SFG6           | Timcal             | 0,33                               | 0,25      | 0,24      |
| GK CR2 995            | Graphite kropfmuhl | 0,40                               | 0,30      | 0,30      |
| GK EG 290             | Graphite kropfmuhl | 0,47                               | 0,36      | 0,34      |
| Super P               | Timcal             | 0,70                               | 0,48      | 0,40      |
| Chezacarb A           | Chemopetrol        | 0,71                               | 0,53      | 0,46      |
| Chezacarb B           | Chemopetrol        | 0,80                               | 0,57      | 0,50      |
| Cabot XC72R           | Cabot              | 0,80                               | 0,53      | 0,44      |
| Vulcan P              | Cabot              | 0,87                               | 0,57      | 0,46      |
| Nor GL 50             | Norit              | 0,96                               | 0,67      | 0,54      |
| Vulcan 3              | Cabot              | 0,97                               | 0,61      | 0,48      |
| Black Pearls          | Cabot              | 1,47                               | 0,94      | 0,75      |
| Nor SA Super 8029-1   | Norit              | 1,59                               | 1,13      | 0,93      |
| Nor AZO               | Norit              | 1,66                               | 1,19      | 1,00      |
| Nor Elorit            | Norit              | 1,84                               | 1,36      | 1,16      |
| KRECA                 |                    | 3,23                               | 1,99      | 1,54      |
| Kreca (plazma 2,5 h)  |                    | 4,54                               | 2,65      | 2,08      |
| Kreca (plazma 20,5 h) |                    | 3,20                               | 2,41      | 1,93      |

Při stlačování materiálů na bázi grafitu došlo při měření k vylišování kompaktní, soudržné tabletky. U grafitu GK Cond 5995 došlo při přítlačné síle nad 10 kN k protečení materiálu kolem elektrod (hodnoty rezistivity pro přítlačnou sílu vyšší než 10 kN nejsou v tabulce uvedeny). Amorfnní uhlíkové částice (saze) po stlačení vytvořily tabletu, která nebyla kompaktní, nebo se obsah válce vysypal v práškové formě. Při měření uhlíkových vláken došlo k jejich rozpadu na drobná vlákna o velikosti 1 mm až 10 mm.

### 2.2.2 Elektrické vlastnosti materiálů a možnosti jejich využití

Kompozitní materiál s modifikovanou cementovou matricí vykazuje závislost elektrické rezistivity na změně teploty, mechanickém namáhání nebo na strukturálních poruchách v objemu materiálu. Na kovových elektrodách, zapuštěných do objemu materiálu, dochází ke generování velmi malých termoelektrických napětí vlivem Seebeckova jevu. V závislosti na plánovaném způsobu využití materiálu lze způsobem

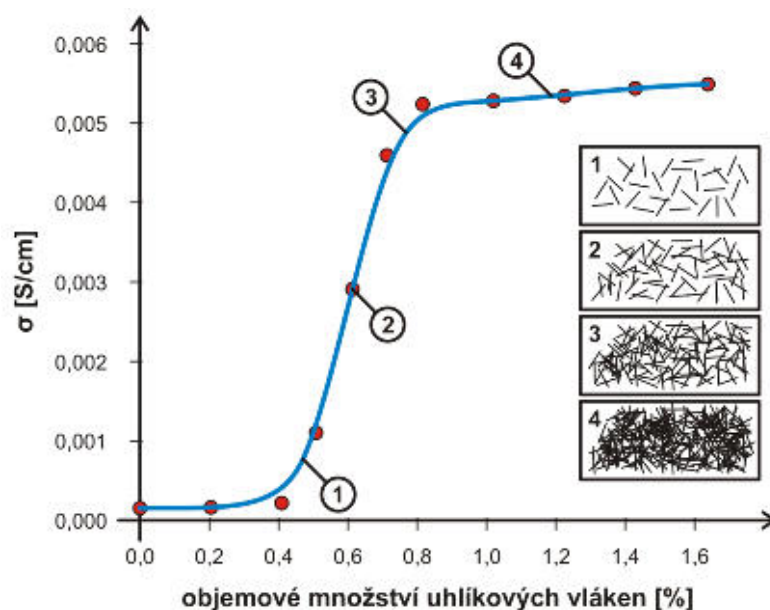
přípravy, použitou recepturou a obecně materiálovým složením zvýšit závislost rezistivity na změně požadované veličiny.

Elektrickým vlastnostem materiálu a možnosti jejich využití se věnuje autorka D. L. L. Chung v [10], [11], [12], která zkoumala vliv krátkých ocelových a uhlíkových vláken na elektrické vlastnosti kompozitu. Výsledky poukazují na zvýšení piezorezistivní schopnosti materiálu vlivem přidání krátkých uhlíkových vláken. Touto modifikací cementové matrice výrazně stoupla citlivost na mechanické namáhání a vznik strukturálních poruch v objemu materiálu. Zároveň došlo k posílení vlivu Seebeckova jevu typu p. K posílení Seebeckova jevu typu n naopak došlo použitím krátkých ocelových vláken. Další zkoumanou oblastí bylo využití materiálu pro elektromagnetické stínění. Autorka došla k závěru, že ke zvýšení elektromagnetické odrazivosti materiálu významně přispívají mikroskopické uhlíkové částice, rovnoměrně rozptýlené v objemu materiálu.

Další výzkum, kterému se věnovala dvojice D. L. L. Chung a Sihai Wen [13], je zaměřen na možnost využití termorezistivních vlastností. Autoři došli k závěru, že materiál, který plní funkci termistoru, lze připravit modifikací cementové matrice pomocí krátkých uhlíkových vláken a křemenného prachu (mikrosiliky). Takto připravený materiál vykazoval záporný koeficient teplotní závislosti, kdy při aktivací energii 0,4 eV se vzrůstající teplotou v rozsahu 1°C až 45°C rezistivita materiálu klesala. Aktivací energii bylo možné ještě dále snižovat použitím latexu namísto křemenného prachu nebo vynecháním uhlíkových vláken. Tím se zároveň zvýšila i rezistivita materiálu.

Autoři článků [14] a [15] zkoumali vliv uhlíkových vláken na vodivost kompozitu. Došli k závěru, že na vztah mezi vodivostí a objemovým množstvím uhlíkových vláken lze aplikovat statistickou perkolační teorii [16]. Aplikaci perkolační teorie na vodivost materiálu publikoval již v roce 1973 fyzik Scott Kirkpatrick [17]. Perkolační teorie se zabývá pravděpodobností, s jakou se vodivé částice, náhodně rozmístěné v jednotkovém objemu izolantu, vzájemně dotknou a vytvoří elektricky vodivou cestu z jedné strany materiálu na druhou (stranová perkolace) [18]. Při velmi malém objemovém množství jsou vodivé částice náhodně rozptýleny v objemu materiálu tak, že se téměř vzájemně nedotýkají. Pokud ano, tak jsou tvořeny pouze velmi malé oblasti s vysokou elektrickou vodivostí, které k celkové vodivosti materiálu přispívají pouze nepatrně (obr. 6 – detail 1). Postupným zvyšováním objemového množství vodivých částí dochází k tvorbě a postupnému zvětšování shluků (clusterů). Vodivost v rámci jednoho shluku je vysoká, protože se částice vzájemně dotýkají. Mezi jednotlivými shluky a volnými vodivými částicemi v jejich blízkosti se začíná uplatňovat princip vodivosti materiálu založený na tunelování a vzájemných přeskočích elektronů (obr. 6 – detail 2). Dalším zvyšováním množství vodivých částic v objemu materiálu nastává

prudký nárůst vodivosti. Koncentrace vodivých částic dosáhla tzv. „perkolačního prahu“ (*percolation treshold*). Prudký nárůst vodivosti je způsoben zvětšováním vodivých shluků a jejich vzájemným vodivým dotykům.



**Obr. 6** Závislost měrné elektrické vodivosti materiálu na objemovém množství uhlíkových vláken [14]

Při dalším zvyšování koncentrace vodivých částic začíná nad mechanismem vodivosti v podobě tunelování a přeskoků elektronů převládat vzájemný ohmický kontakt (obr. 6 – detail 3). Dochází k vytvoření ohmicky vodivé cesty z jedné strany objemu materiálu na druhou. Celková vodivost materiálu je v tomto případě vysoká a s dalším zvyšováním množství vodivých částic roste již jen velmi málo (obr. 6 – detail 4). V této oblasti se již uplatňuje pouze vliv snižování ohmického odporu vlivem paralelního řazení jednotlivých vodivých cest [14].

Autoři Sihai Wen a D. L. L. Chung prováděli ve své práci [19] sérii měření, která prokázala, že pro dosažení co nejlepších piezorezistivních vlastností materiálu je důležité, aby se koncentrace vodivých příměsí v cementové matici pohybovala pod perkolačním prahem. Problémem přípravy takového materiálu je fakt, že díky velkému sklonu závislosti vodivosti materiálu na objemovém množství vodivých částic, dochází velmi malými odchylkami koncentrace vodivých příměsí k velkým změnám vodivosti. Ke stejnému závěru došli i autoři článků [20], [21], [22] a [23].

Receptury pro přípravu funkční kompozitní uvedené v následující kapitole vychází z poznatků získaných studiem literatury. Problematika stanovení vhodného objemového množství vodivých částic byla řešena experimentálně, kdy byly vyráběny série vzorků s postupně rostoucím objemovým množstvím vodivých částic. U vyrobených vzorků byly měřeny statické elektrické parametry. Pokud vzorek vykazoval příliš nízkou hodnotu

reálné složky impedance ( $0 \Omega$  až  $100 \Omega$ ), bylo zjevné, že perkolační práh byl koncentrací vodivých příměsí překročen. Naopak, pokud byla reálná část impedance příliš vysoká ( $10 \text{ k}\Omega$  až jednotky  $\text{M}\Omega$ ), bylo nepochybné, že byla koncentrace vodivých částic příliš nízká. Na základě výsledků těchto měření bylo stanoveno takové objemové množství vodivého materiálu, u kterého se reálná složka impedance vyrobených vzorků pohybovala v intervalu  $1 \text{ k}\Omega \pm 50 \%$ .

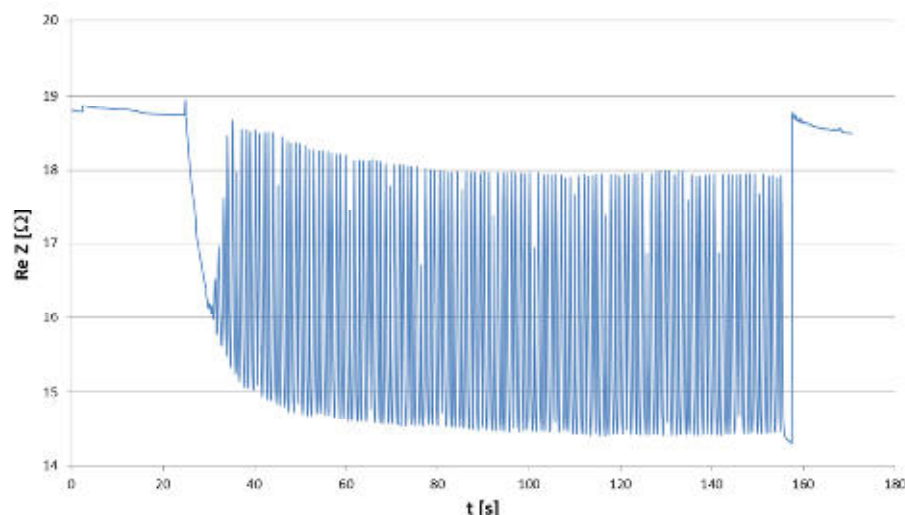
## 2.3 Funkční kompozitní materiál

Složení směsi funkčního kompozitního materiálu vychází z receptury, která je chráněna užitným vzorem [24] a patentem [25]. Receptura vznikla jako výstup z projektu „Multifunkční kompozity mimořádných vlastností na bázi anorganických nanosložek (KOMPOZITY)“. Složení receptury v podobě hmotnostních podílů jednotlivých složek směsi je uvedeno v tab. 2.

**Tab. 2** Receptura pro přípravu směsi NKT 1[25]

| Složka směsi                                                     | Typ, výrobce            | Navážka [g] | Hmotnostní podíl [%] |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------|----------------------|
| portlandský cement                                               | CEM I 52,5, Mokrá       | 6900        | 51,6 %               |
| jemnozrnný písek                                                 | slévárenský B30, Bzenec | 5250        | 39,2 %               |
| mikrosilika                                                      | Elkem 940-U             | 366         | –                    |
| skleněné vlákno                                                  | NEG ARG ACS 13H-350Y    | 130         | 1,0 %                |
| uhlíkové vlákno                                                  | KRECA                   | 260         | 1,9 %                |
| uhlíkové částice                                                 | expandovaný grafit      | 800         | 6,0 %                |
| superplastifikátor                                               | Glenium ACE 40          | 346         | –                    |
| voda záměsová                                                    | 1. dávka (15 %)         | 1500        | –                    |
| voda k doředění                                                  | 2. dávka (85 %)         | 8334        | –                    |
| tkaná polyamidová textilie s obsahem grafitu $160 \text{ g/m}^3$ |                         | 40          | 0,3 %                |

Ze směsi vyrobené dle receptury z tab. 2 byly vyrobeny vzorky čtvercového tvaru o rozměrech  $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$  a výšce  $2 \text{ cm}$ . Na dno formy byla vložena polyamidová textilie s obsahem grafitu. Forma byla zaplněna do poloviny výšky vzorku (cca  $1 \text{ cm}$ ), poté byly vloženy elektrody ve formě měděných pásků. Elektrody byly zality zbytkem směsi až do dosažení tloušťky vzorku  $2 \text{ cm}$ . Zalité vzorky byly ponechány vytvrdnout a vyzrát po dobu 28 dní, která je definovaná normou pro tvrdnutí betonu ČSN EN 206-1 [26]. U takto připravené vzorků byla měřena jejich elektrická odezva na cyklické zatěžování. Výsledek jednoho z měření je uveden na obr. 7.



**Obr. 7** Odezva reálné složky impedance na cyklické zatěžování desky vyrobené z materiálu 1 (zatížení hmotností 0,4 t až 4 t s frekvencí cyklování 1 Hz) [25]

V tematicky navazujícím projektu „Sledování stavu stavebních konstrukcí pomocí elektricky vodivých prvků s modifikovanou cementovou maticí“ byla původní receptura upravena. Kompozitní materiál, připravený podle nové receptury, vykazoval velkou citlivost změny elektrických parametrů na mechanické namáhání materiálu, přičemž byla ovlivňována zejména reálná složka komplexní impedance. Receptura nového složení materiálu je chráněna užitným vzorem [27], který vznikl jako jeden z výstupů projektu. Materiálové složení receptury je uvedeno v tab. 3.

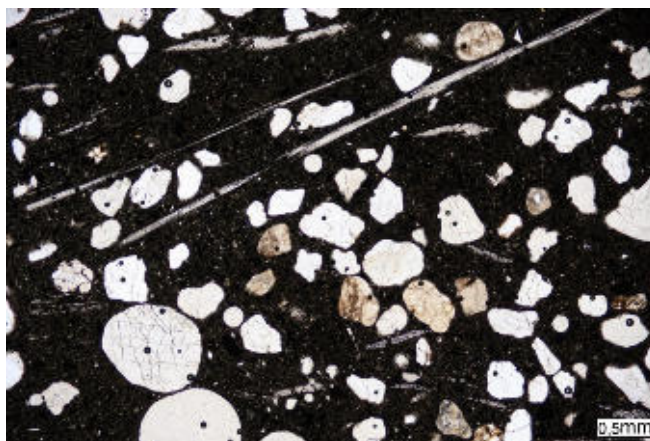
**Tab. 3** Receptura pro přípravu směsi SK9-1 [27]

| Složka směsi       | Typ, výrobce            | Navážka [g] | Hmotnostní podíl [%] |
|--------------------|-------------------------|-------------|----------------------|
| portlandský cement | CEM I 52,5, Mokrá       | 1000        | 56,8 %               |
| jemnozrnný písek   | slévárenský B30, Bzenec | 640         | 36,4 %               |
| uhlíkové vlákno    | KRECA 10 mm             | 14          | 0,8 %                |
| uhlíkové částice   | saze B                  | 106         | 6,0 %                |
| superplastifikátor | Glenium ACE 442         | 50          | –                    |
| voda záměsová      | 1. dávka                | 600         | –                    |
| voda k doředění    | 2. dávka                | 200         | –                    |

Oproti receptuře NKT1 (tab. 2) byl u složení receptury SK9-1 výrazně redukován počet jednotlivých komponent a byly upraveny hmotnostní podíly. Byla odstraněna polyamidová textilie s obsahem grafitu, skelná vlákna, mikrosilika a uhlíkové částice v podobě expandovaného grafitu byly nahrazeny sazemi. Příprava materiálu byla zjednodušena a výsledná cena výrazně snížena (expandovaný grafit byl nahrazen odpadním materiálem – sazemi).

Výrobní postup přípravy směsi byl následující. V nádobě planetového mixéru byl nejprve po dobu dvou minut mísen písek se sazí. Do této suché směsi byl přidán cement a mísení pokračovalo další dvě minuty až do důkladné homogenizace. Poté byla přidána první záměsová dávka vody. Mísení pokračovalo přibližně tři minuty. Podle potřeby byla směs dořezávána pomocí druhé záměsové dávky vody. Do mokré, homogenní směsi písku, sazí a cementu byla postupně přidávána uhlíková vlákna. Následovalo mísení až do důkladné homogenizace směsi. Vlivu mísící procedury a teploty směsi na výsledné elektrické vlastnosti kompozitu s uhlíkovými vlákny se věnuje [28].

Po nalití směsi do připravených forem a vložení elektrod byla směs vibrována přibližně po dobu jedné minuty. U prvních vyrobených vzorků byla provedena analýza dispergace jednotlivých složek kompozitu v objemu materiálu. Cílem bylo zjistit, zda výše popsaná technologie přípravy směsi zajišťuje rovnoměrné rozptýlení složek a jejich náhodnou orientaci. Byl proveden mikrovýbrus vzorku, který potvrdil, že je postup výroby správný. Z fotografie pořízené pomocí mikroskopu, uvedené na obr. 8, je patrné rovnoměrné rozptýlení jednotlivých zrn písku. Prostor mezi zrny je vyplněn cementovou matricí s přídavkem uhlíkových sazí. Mezi zrny písku jsou velmi dobře patrná skleněná vlákna (receptura pro výrobu vzorku, u kterého byl prováděn mikrovýbrus, byla mírně odlišná od složení receptury SK9-1). Při malé tloušťce vzorku deskového tvaru byla u vláken pozorována tendence shodného zorientování v podélné rovině. Míra tohoto jevu byla závislá na tloušťce vzorku a délce vláken. Uhlíková vlákna nejsou na fotografii dobře patrná. Jsou však rozptýlena v objemu materiálu stejným způsobem, jako vlákna skleněná.



**Obr. 8** Mikrovýbrus kompozitní směsi

Vzhledem k velmi zajímavým vlastnostem nového materiálu, který byl doposud testován pouze v laboratorních podmínkách, se nabízela možnost prozkoumat možnosti jeho praktického využití. Praktickému využití směsi SK9-1 pro výrobu senzorů citlivých na mechanické namáhání se věnuje kap. 4.

### 3 Cíle dizertační práce

*„Vysoké cíle, třebaže nespílitelné, jsou cennější než nízké, třebaže splnitelné.“*

Johann Wolfgang von Goethe

Práce se zaměřuje na praktické využití cementového kompozitního materiálu, který byl dosud testován pouze v laboratorních podmínkách. Na základě současného stavu problematiky byly stanoveny tyto cíle:

- 1) návrh, realizace a charakterizace senzoru:
  - a) měření korozního působení v prostředí betonu (koroze kovových materiálů, vliv inhibitorů na korozi kovových materiálů, koroze uhlíku),
  - b) návrh fyzické podoby senzoru (tvar a rozměry senzoru, provedení elektrodového systému),
  - c) návrh fyzické podoby betonových prvků pro integraci senzorů (volba rozměrů a způsobu umístění senzorů v objemu materiálu s ohledem na dynamické zatěžování),
  - d) měření elektrických parametrů vyrobených senzorů (měření statických elektrických vlastností, dynamické zatěžování betonových prvků s integrovanými senzory a sledování elektrické odezvy, dlouhodobé měření elektrických parametrů),
- 2) vývoj měřicího přístroje pro charakterizaci betonových kompozitních materiálů:
  - a) návrh a konstrukce přístroje založeného na integrovaném převodníku impedance,
  - b) návrh a konstrukce laboratorní měřicí aparatury založené na novém měřicím principu,
- 3) vývoj monitorovacího systému pro praktickou aplikaci senzorů založených na kompozitním materiálu s modifikovanou cementovou maticí:
  - a) návrh topologie systému,
  - b) návrh a konstrukce jednotlivých součástí,
  - c) vývoj aplikace pro zobrazení výstupů z monitorovacího systému.



## 4 Návrh, realizace a charakterizace senzoru

*„Čím výstřednějšími plány se pyšníme, tím složitější bude jejich realizace.“*

Erich Kästner

Experimentální část práce, popsaná v této kapitole, je zaměřena na praktické využití materiálu popsaného v kap. 2. Cílem bylo vytvořit senzor citlivý na zatížení, který bude možné integrovat do objemu materiálu betonového prvku. Kap. 4.1 se zabývá korozním působením silně alkalického prostředí betonu na vybrané materiály, které jsou buď obsaženy ve složení směsi funkčního materiálu, nebo slouží pro vytvoření elektrodového systému. Mechanické provedení senzoru je popsáno v kap. 4.2. Integraci vyrobených senzorů do betonových prvků se zabývá kap. 4.3. Takto vyrobené konstrukční celky byly podrobeny různým měřením, při kterých byly sledovány elektrické parametry senzorů. Výsledky měření jsou zpracovány v kap. 4.4.

### 4.1 Měření korozního působení v prostředí betonu

Korozní procesy probíhající v betonových kompozitních strukturách lze rozdělit do tří skupin: koroze elektrodového systému, koroze uhlíkových aditiv a koroze samotného betonu. Korozní testy kovových materiálů jsou popsány v kap. 4.1.1. Na základě výsledků korozních testů byly vybrány dva perspektivní kovové materiály, na kterých byl v kap. 4.1.2 testován vliv různých inhibitorů koroze. Korozi uhlíku v prostředí betonu se věnuje kap. 4.1.3 a korozi samotného betonu popisuje kap. 4.1.4.

#### 4.1.1 Koroze kovových materiálů

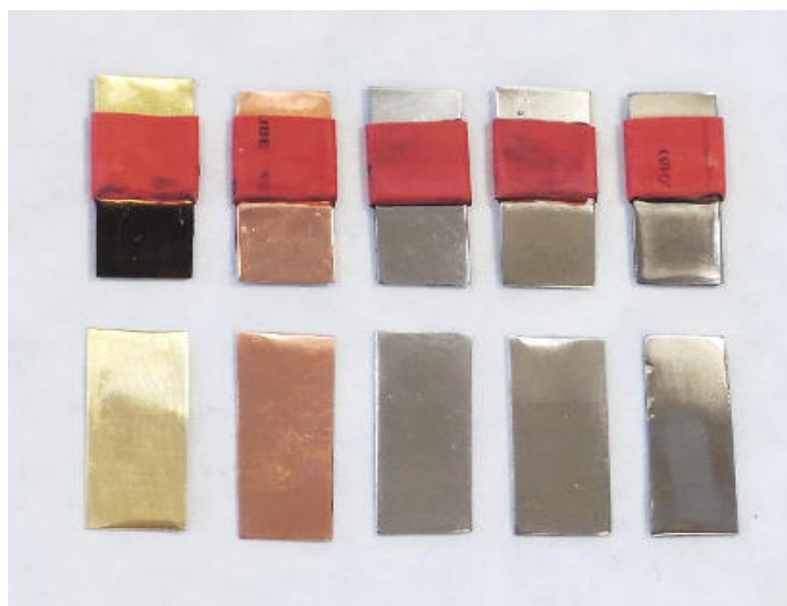
Úkolem elektrodového systému ve struktuře betonového kompozitního materiálu je vytvořit stabilní elektrický kontakt. Na rozhraní mezi betonovým materiálem a kovem dochází k degradačním procesům, způsobeným prostředím silně alkalického elektrolytu. Chemická koroze v prostředí betonu způsobuje samovolné rozpouštění kovového materiálu, které může být ještě urychleno přiložením elektrického napětí. Rychlost samovolného rozpouštění je závislá i na mobilitě iontů uvnitř betonu, která souvisí s jeho vlhkostí.

Pro komerční využití výsledného senzoru hraje klíčovou roli cena použitých materiálů. Z výběru kovů potenciálně vhodných pro vytvoření elektrodového systému v kompozitním betonu byly předem vyloučeny vzácné kovy (Au, Ag, Pt atd.), které by sice díky svým jedinečným vlastnostem vyhověly požadavkům, ale jejich vysoká cena by znemožnila komerční využití. Byly vybrány materiály, které se běžně využívají v průmyslu a jejichž cena odpovídá způsobu využití. V tab. 4 je uveden přehled vybraných kovových materiálů.

**Tab. 4** *Kovové materiály pro přípravu vzorků*

| Materiál elektrody | Pracovní plocha [cm <sup>2</sup> ] | Složení                                            |
|--------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Měď                | 1,091                              | Cu                                                 |
| Mosaz              | 0,964                              | Cu-65,23 %, Zn-34,77 %                             |
| Nerez              | 0,996                              | Fe-68 %, Cr-15,3 %, Ni-8,3 %, (C-7,8 %), Si-0,36 % |
| Nikl               | 1,093                              | Ni                                                 |
| Titan              | 1,011                              | Ti                                                 |

Složení jednotlivých materiálů bylo určeno pomocí prvkové analýzy na elektronovém mikroskopu. Stanovení uhlíku vykazovalo chybu měření až 5 %, proto je údaj v závorce u nerezů třeba brát s rezervou. Z vybraných materiálů byly vytvořeny vzorky pro potenciodynamická měření korozního působení prostředí betonu. Jednotlivé kovy byly obstarány ve formě plechu o tloušťce 1 mm. Kvůli možnosti vzájemného porovnání výsledků u jednotlivých kovů byly plechy nastříhány na pásy široké 1 cm, dlouhé 2,5 cm a jejich povrch byl sjednocen pomocí postupného broušení smirkovými papíry o zrnitosti 600, 1200 a 4000. Finální doleštění proběhlo s použitím diamantové brusné pasty a filcového kotouče. Pracovní plocha vzorku byla omezena pomocí teplem smrštitelné bužírky a epoxidového lepidla na plochu přibližně 1 cm<sup>2</sup> (obr. 9). Epoxidové lepidlo zabraňuje vztlínání pracovního roztoku do prostoru pod bužírkou. Bužírka kromě izolační funkce vytváří prostor pro úchop vzorku při manipulaci během měření.



**Obr. 9** *Vzorky kovů pro přípravu elektrod (mosaz, měď, nerez, nikl a titan)  
před a po měření potenciodynamickou metodou*

Pro základní charakterizaci kovů z hlediska korozních dějů, probíhajících při polarizaci elektrod, slouží potenciodynamická měření. Korozní chování kovů je charakterizováno závislostí proudové hustoty  $J$  [A/m<sup>2</sup>] na potenciálu  $E$  [V]. Proudová hustota odpovídá množství náboje, který projde rozhraním kov-elektrolyt o jednotkové ploše za jednotku času. Z velikosti proudové hustoty lze vypočítat rychlost průběhu

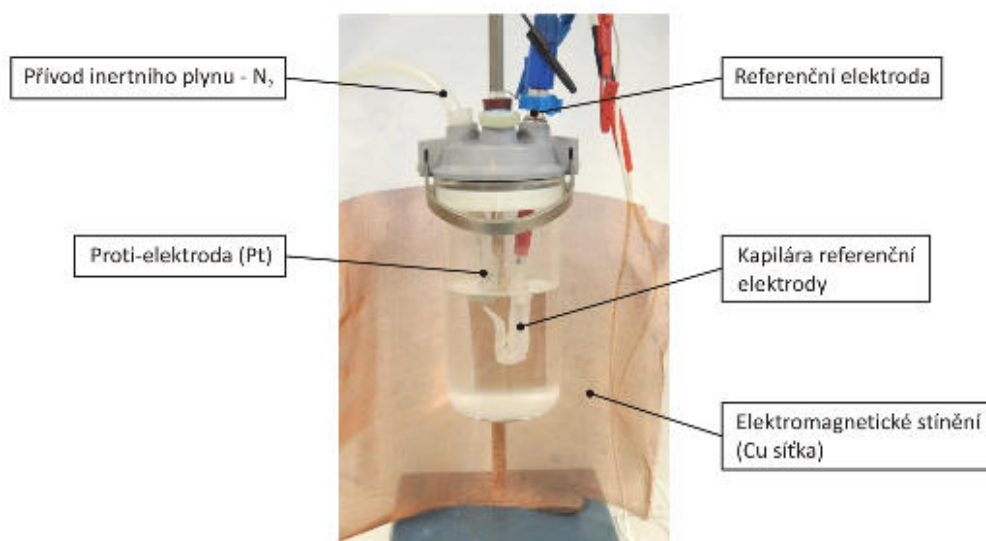
chemických reakcí na rozhraní. Vzájemnou závislost těchto veličin určuje Faradayův zákon:

$$n = \frac{I \cdot t}{z \cdot F} \quad [\text{mol}] \quad (1)$$

kde  $n$  [mol] je látkové množství,  $I$  [A] elektrický proud,  $t$  [s] čas,  $z$  [-] počet vyměněných elektronů a  $F = 96485 \text{ C/mol}$  je Faradayova konstanta.

Prostředí betonu lze simulovat pomocí roztoku 0,01 mol/l NaOH, nasyceného hydroxidem vápenatým –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Výsledky měření pomocí potenciodynamických metod jsou silně závislé na konfiguraci měřicího systému a vnějších vlivech (teplota, vzájemná poloha měřicích elektrod v pracovní komoře, průtok inertního plynu atd.). Aby bylo možné výsledky měření pro jednotlivé vzorky porovnat, musely být předem stanoveny parametry měření.

Na obr. 10 je znázorněna konfigurace měřicí aparatury, která se sestává z elektrochemického článku (cely), elektrod, kapiláry, přívodu inertního plynu a měděné sítě, která stíní článek proti pronikání elektromagnetického rušení.



**Obr. 10** Konfigurace aparatury pro potenciodynamická měření

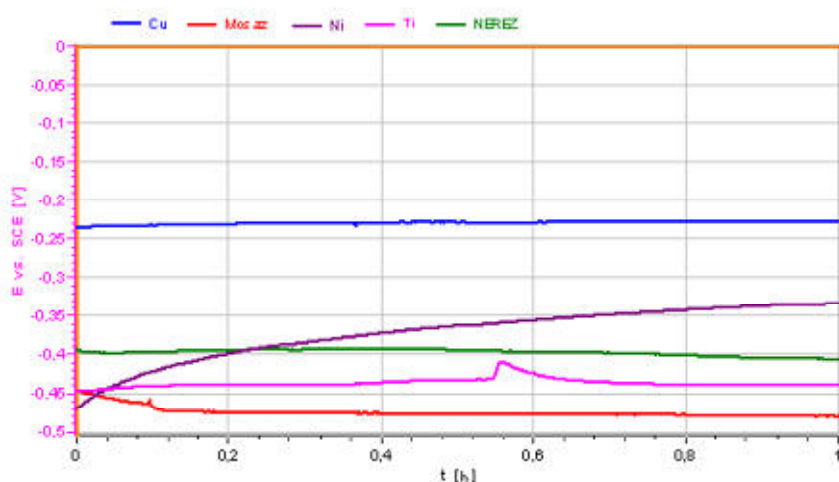
Pro dosažení reprodukovatelných výsledků a možnosti vzájemného porovnání výsledků byly u všech provedených měření dodrženy tyto parametry:

- konstantní teplota v laboratoři 23 °C,
- roztok probubláván dusíkem s minimálním průtokem 150 cm<sup>3</sup>/min,
- platínová proti-elektroda,
- kapilára referenční elektrody umístěna ve vzdálenosti 2 mm od proti-elektrody,

- měření metodou OCV (*Open Circuit Voltage*) po 55 minutách od ponoření,
- rychlost polarizace nastavena na hodnotu 0,6 V/h (0,1667 mV/s).

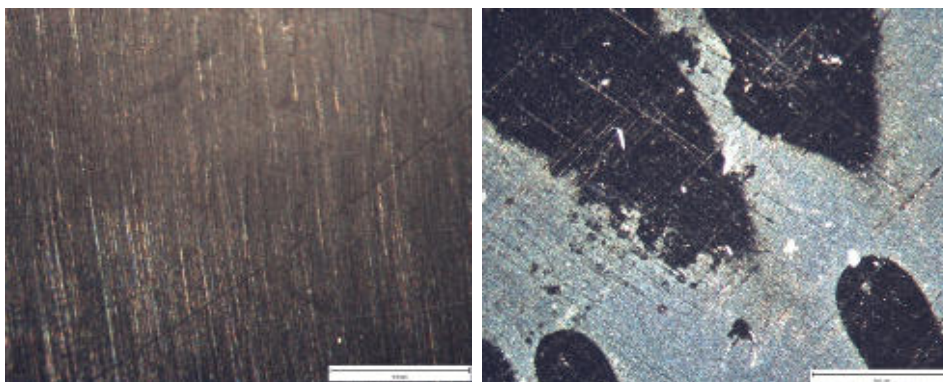
Všechny připravené vzorky kovových materiálů byly postupně měřeny pomocí shodné metodiky. Nejprve byl pracovní roztok po dobu nejméně 15 minut probubláván dusíkem, následovalo vložení elektrody a spuštění záznamu potenciálu OCV. Záznam probíhal vždy po dobu 1 h a bezprostředně poté byla provedena impedanční spektroskopie vzorku. Následovala polarizace elektrody s nastavenou rychlostí 0,6 V/h v mezích potenciálů -1,2 V až +1,2 V vůči SCE (standardní kalomelové elektrodě), nebo do překročení proudu 1 mA. Hned poté následovala zpětná polarizace s rychlostí 0,6 V/h od hodnoty potenciálu, při které byl při předchozí polarizaci překročen proud 1 mA, do hodnoty potenciálu 0,1 V vůči SCE. Dále byl vzorek opět změřen metodou OCV po dobu 15 minut a na závěr byla provedena impedanční spektroskopie.

Průběh ustálení potenciálu elektrod z měřených materiálů vůči potenciálu SCE byl měřen po dobu 60 minut od ponoření vzorku do pracovního roztoku (obr. 11).

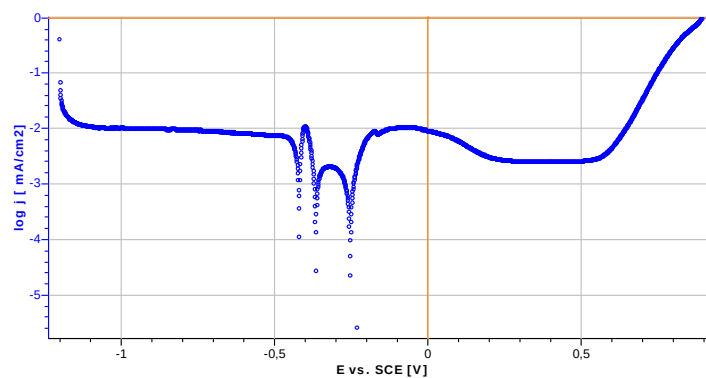


**Obr. 11** Ustálení potenciálu měřených materiálů vůči potenciálu SCE

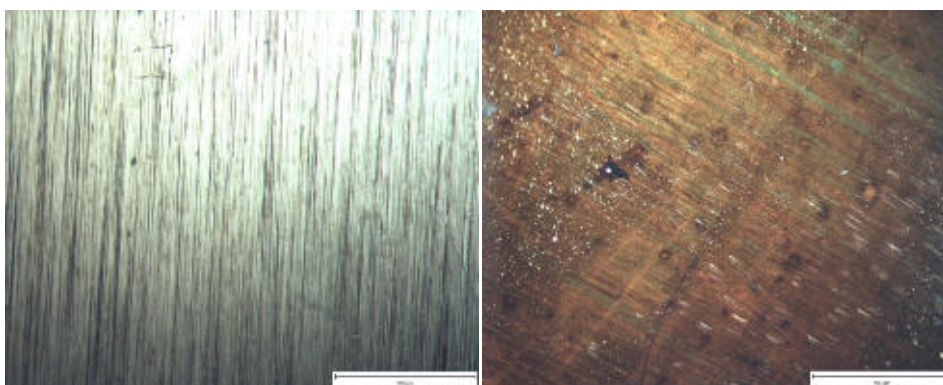
Pro každý vzorek měřeného materiálu byla pomocí optického mikroskopu pořízena fotografie před i po skončení měření. Díky tomu je možné porovnat vizuální změnu vzhledu a odhalit např. začínající bodovou korozi. Na obr. 12, obr. 14, obr. 16, obr. 18 a obr. 20 je porovnána změna vzhledu povrchu jednotlivých vzorků. Naměřené potenciodynamické křivky vzorků jsou uvedeny na obr. 13, obr. 15, obr. 17, obr. 19 a obr. 21.



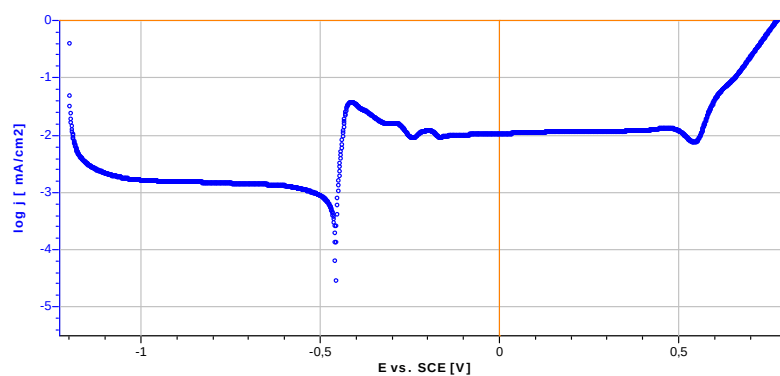
**Obr. 12** Povrch vzorku z mědi před (vlevo) a po měření (vpravo)



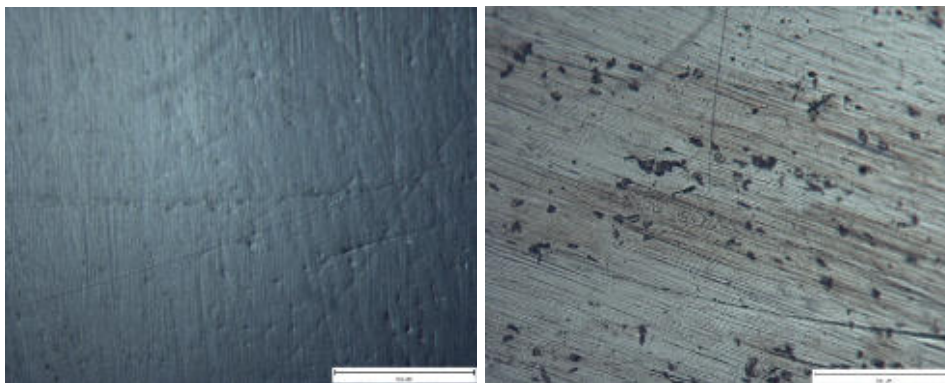
**Obr. 13** Potenciodynamická křivka mědi



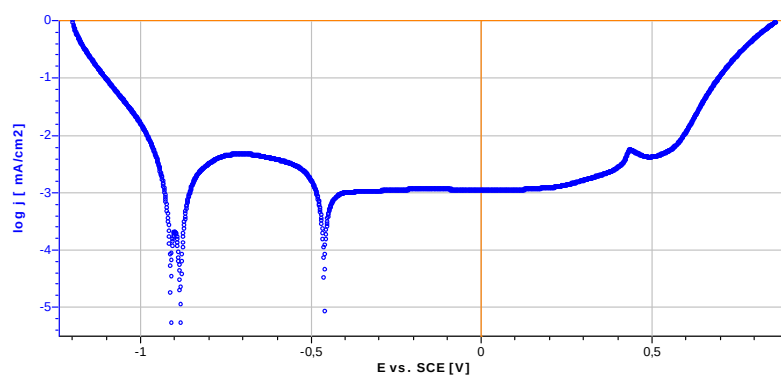
**Obr. 14** Povrch vzorku z mosazi před (vlevo) a po měření (vpravo)



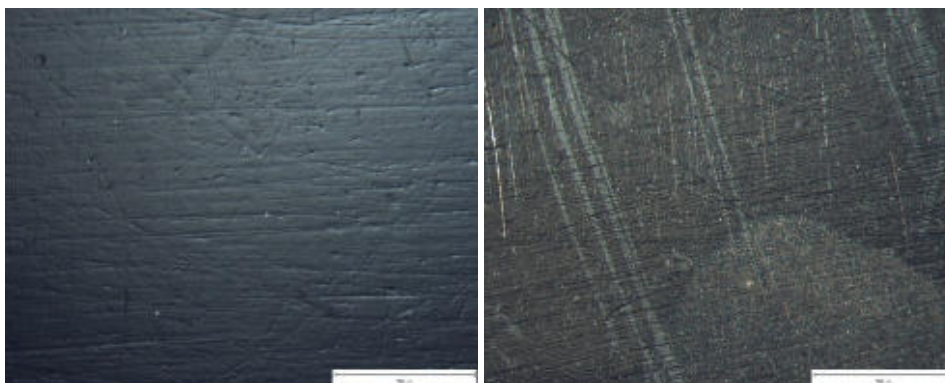
**Obr. 15** Potenciodynamická křivka mosazi



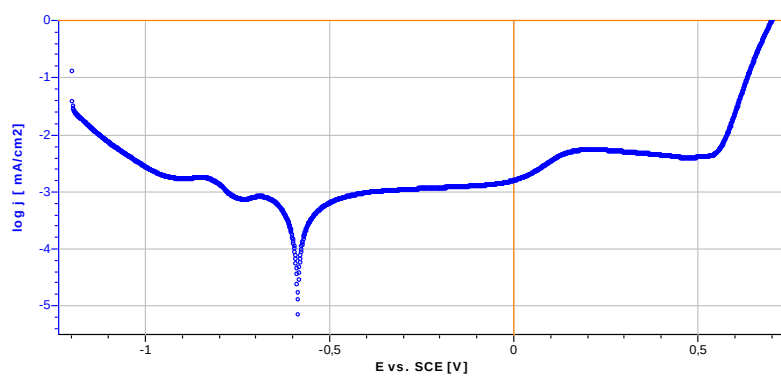
**Obr. 16** Povrch vzorku z niklu před (vlevo) a po měření (vpravo)



**Obr. 17** Potenciodynamická křivka niklu

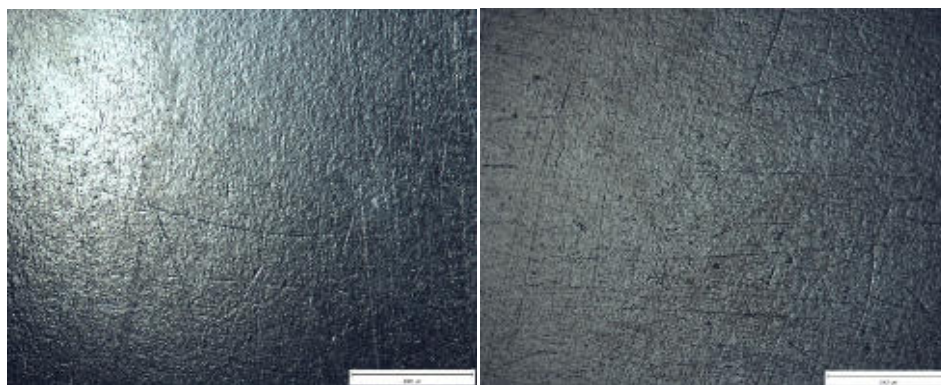


**Obr. 18** Povrch vzorku z nerezů před (vlevo) a po měření (vpravo)

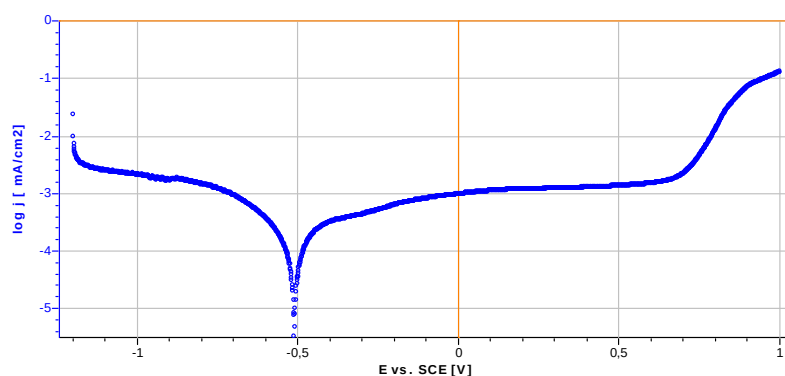


**Obr. 19** Potenciodynamická křivka nerezů



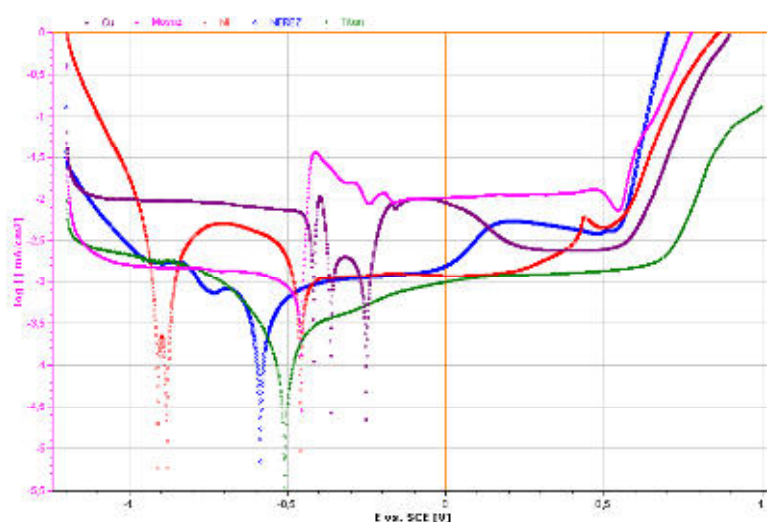


**Obr. 20** Povrch vzorku z titanu před (vlevo) a po měření (vpravo)



**Obr. 21** Potenciodynamická křivka titanu

Při vzájemném porovnání naměřených potenciodynamických křivek mědi, mosazi, niklu, nerezů a titanu uvedených na obr. 22, lze rozlišit kovy, které vykazují buď jedno, nebo tři vychýlení. Kovy, v jejichž charakteristice jsou tři vychýlení, přecházejí ze základního stavu do oxidované formy, přes formu hydroxidu (měď a nikl).



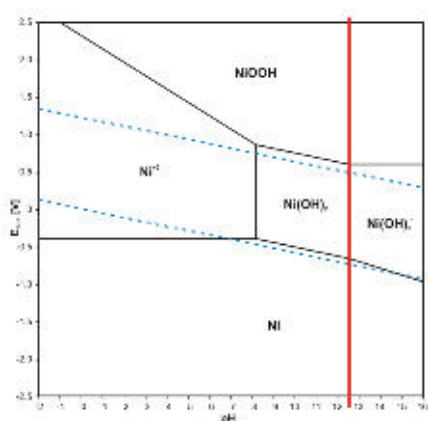
**Obr. 22** Vzájemné porovnání potenciodynamických křivek vybraných kovů

Mosaz není vhodným materiálem pro výrobu elektrod. Při přiložení kladných potenciálů přechází do formy rychle rozpustných oxidů, které místo aby povrch

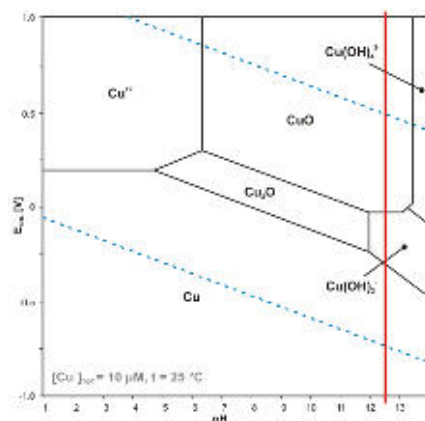
materiálu pasivovaly, tak korozi ještě urychlují. Z obr. 9 a obr. 14 je patrná kompletní změna povrchu mosazného vzorku způsobená aplikováním potenciálu v korozním prostředí.

Měď má sníženou korozi v oxidované formě  $\text{CuO}_2$  (obr. 24), ale i tak je její korozní proud téměř o řád vyšší než u niklu, titanu a nerez. Na obr. 12 je patrná významná změna povrchu vzorku po provedení potenciodynamických měření.

Nikl, titan a nerez vykazují nejlepší vlastnosti z hlediska korozních proudů. Povrch vzorku niklu (obr. 16) vykazoval po provedení měření změny, které poukazují na počátek bodové koroze. Ta představuje pro životnost elektrodového systému závažný problém. Korozní rychlost niklu je obtížně stanovitelná vzhledem k velkému počtu materiálových stavů při pH odpovídajícím prostředí betonu (v obr. 23 označeno červenou svislou čarou).



**Obr. 23** Pourbaixův diagram pro nikl [29]



**Obr. 24** Pourbaixův diagram pro měď [30]

Z provedeného měření se jako nejlepší a cenově nejvýhodnější kovový materiál pro elektrodový systém jeví nerez. U nerez byla zjištěna podobná korozní odolnost jako u titanu. Titan je však podstatně dražší materiál a díky příznivým vlastnostem nerez není pro jeho použití důvod. Nevýhodou nerez je jeho nepoddajnost a obtížná tvarovatelnost. Nerez nelze pájet pomocí měkké pájky.

I přes nepříliš dobrou korozní odolnost je zajímavým materiálem pro tvorbu elektrodového systému měď. Její výhodou je snadná dostupnost, dobrá tvárnost, vynikající pájitelnost a velmi malý ohmický odpor. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších materiálů nejen v elektrotechnice, ale i ve strojírenství. Měď lze obstarat v různých formách a tvarech (drát, kulatina, trubka, plech, síťovina).

Pro zvýšení korozní odolnosti materiálů lze použít tzv. „inhibitory koroze“. Zkoumání jejich účinků na korozní odolnost nerez a mědi se věnuje následující kapitola.



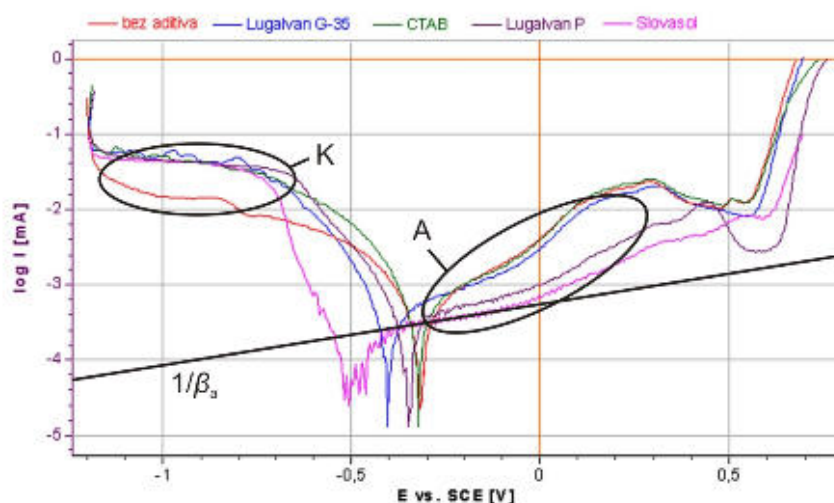
#### 4.1.2 Vliv inhibitorů na korozi kovových materiálů

Na základě předchozích zkušeností pracovníků Ústavu elektrotechnologie s inhibitory koroze v oblasti Ni-Zn akumulátorů byla pro testování vlivu vybrána tato aditiva:

- *Lugalvan G35* (látko ze skupiny polyethyleniminů, leštící přísada do galvanických lázní, inhibitor koroze, výrobce BASF),
- *Lugalvan P* (vodný roztok polymerních amoniových skupin, leštící přísada do galvanických lázní, inhibitor koroze, výrobce BASF),
- *Slovasol 2520/2* (alkylpolyglykoléter, neionogenní tenzid využívaný jako smáčedlo a korozní inhibitor, výrobce Slovchema s. r. o.),
- *CTAB* (cetyltrimethylammonium bromid, využívá se jako kationaktivní surfactant),
- *Tween 20* (neionogenní detergent na bázi kyseliny laurové, používá se v mycích prostředcích, výrobce Sigma-Aldrich).

Měření korozní odolnosti s aditivy probíhalo dle parametrů ASTM, popsaných v kap. 4.1.1, tedy za stejných podmínek, za kterých byly provedeny testy korozní odolnosti jednotlivých kovů. Díky tomu je možné vzájemně porovnat výsledky měření a posoudit vliv použití konkrétního aditiva na korozní odolnost.

Nejprve byl testován vliv aditiv Lugalvan G35, Lugalvan P, CTAB a Slovasol 2520/2 na korozní odolnost nerezů. Byl použit stejný roztok jako v případě měření v kap. 4.1.1. Koncentrace jednotlivých aditiv byla při tomto měření 500 ppm. Polarizační křivky naměřené během potenciodynamických měření jsou zachyceny na obr. 25.



**Obr. 25** Vliv vybraných aditiv na potenciodynamické polarizační křivky nerezů

V grafu jsou vyznačeny dvě oblasti. Oblast „K“ odpovídá katodické polarizaci, při které na elektrodě dochází k vývinu vodíku. Anodická polarizace (oblast „A“) je ovlivněna především korozním proudem. Z naměřené závislosti (obr. 25) je patrné, že použitím aditiv došlo k výraznému zvýšení katodického proudu. Změna v této oblasti poukazuje na zvýšení vývinu vodíku vlivem použití povrchově aktivních látek. Změna je u všech použitých aditiv podobná.

Změna v anodické oblasti je pro jednotlivá aditiva individuální. U aditiv Lugalvan P a Slovasol 2520/2 došlo k výraznému snížení korozních proudů. Aditiva Lugalvan G-35 a CTAB tuto část výrazným způsobem neovlivnily. Korozní parametry odečtené z výsledných průběhů jsou shrnuty v tab. 5. Korozní proud  $I_{\text{cor}}$  je odečtený v průsečíku tafelovy směrnice  $\beta_a$  s hodnotou potenciálu při nulovém proudu. Hodnota  $E_{\text{cor}}$  je rovnovážný korozní potenciál.

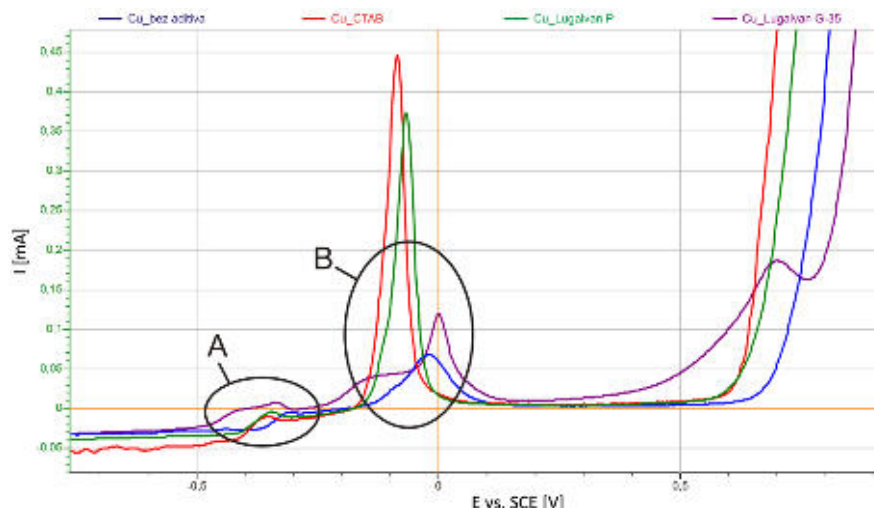
**Tab. 5** Korozní parametry nerezového materiálu s různými typy aditiv

| Inhibitor koroze | $E_{\text{cor}}$ [V] | $\beta_a$ [mV/dek] | $I_{\text{cor}}$ [ $\mu\text{A}$ ] |
|------------------|----------------------|--------------------|------------------------------------|
| žádný            | -0,302               | 364                | 0,47                               |
| Slovasol 2520/2  | -0,503               | 1200               | 0,21                               |
| Lugalvan G35     | -0,401               | 566                | 0,4                                |
| CTAB             | -0,323               | 429                | 0,51                               |
| Lugalvan P       | -0,347               | 808                | 0,33                               |

V případě nerezů by bylo k ochraně proti korozi vhodné použít inhibitory koroze Slovasol 2520/2 nebo Lugalvan P, které výrazně snižují velikost korozního proudu.

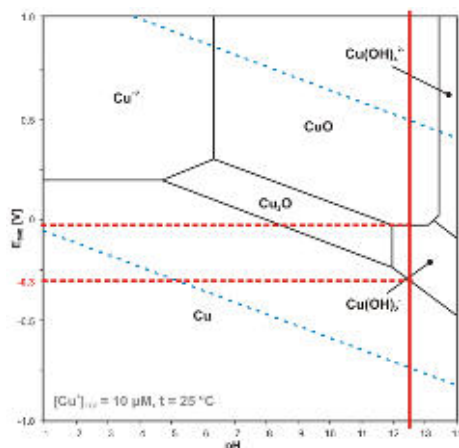
Pro vytvoření elektrodového systému by bylo výhodné použít měď. Jako technický materiál je měď poměrně levná, dostupná v celé řadě prefabrikovaných forem, vyniká svými elektrickými vlastnostmi a lze ji snadno spojovat pomocí měkké pájky. V testech korozní odolnosti v prostředí betonu (kap. 4.1.1) měď vykazovala výraznou změnu povrchu vzorku a poměrně velký korozní proud. Chování mědi v korozivním prostředí betonu není ideální a při jejím využití lze očekávat sníženou životnost elektrodového systému. Následující měření měla za úkol vyzkoušet, zda je možné korozní odolnost mědi pozitivně ovlivnit použitím inhibitorů koroze.

Působení inhibitorů na korozi mědi bylo testováno podle shodné metodiky jako v případě nerezů. Na obr. 26 jsou zobrazeny naměřené potenciodynamické křivky pro měděnou elektrodu vloženou do pracovního roztoku bez aditiva, s aditivem CTAB, Lugalvan P a Lugalvan G-35. V průběhu jsou vyznačeny dvě oblasti, ve kterých jsou patrné proudové špičky.



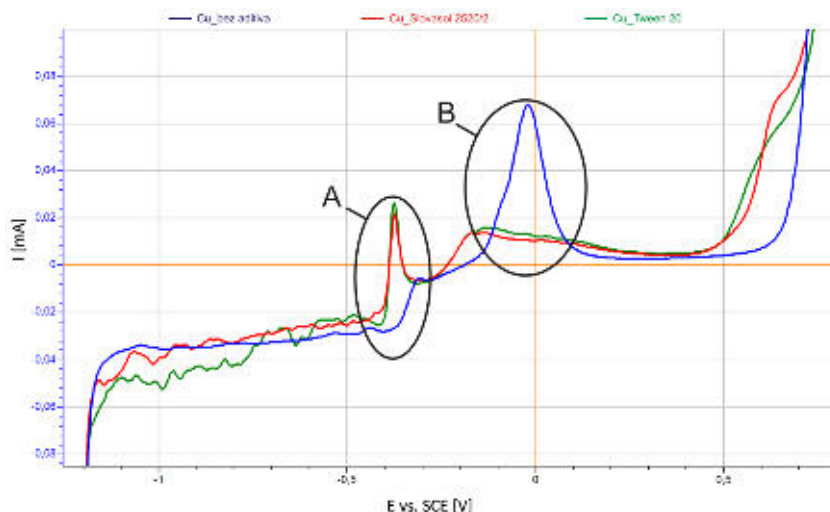
**Obr. 26** Vliv aditiv CTAB, Lugalvan P a Lugalvan G-35 na potenciodynamické polarizační křivky mědi

Proudové špičky v oblasti A svým tvarem připomínají proudovou vlnu, která pravděpodobně vzniká v důsledku přeměny mědi na rozpustnou formu hydroxidu  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ . K této hypotéze se lze přiklonit i s ohledem na potenciál  $-0,5$  V vůči SCE, respektive  $-0,25$  V vůči SHE, ve kterém proudová vlna vzniká. V Pourbaixově fázovém diagramu, uvedeném na obr. 24, lze vynést průsečíky hranice fáze  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  s čarou označující pH roztoku simulujícího prostředí betonu (obr. 27). Přechod Cu na  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  při hodnotě  $\text{pH} = 12,5$  odpovídá potenciálu  $-0,3$  V vůči SHE, který koreluje s polohou proudové vlny.



**Obr. 27** Pourbaixův fázový diagram pro měď v prostředí hydroxidu sodného [30]

Proudové špičky v oblasti B se nacházejí v oblasti potenciálů, které ve fázovém diagramu (obr. 27) odpovídají přechodu povrchu materiálu do pasivované formy  $\text{CuO}$ . Větší plocha oxidační proudové špičky naznačuje možnou účast aditiva CTAB a Lugalvan P v proudové výměně nebo na větší množství oxidovaného materiálu.



**Obr. 28** Vliv aditiv Slovasol 2520/2 a Tween 20 na potenciodynamické polarizační křivky mědi

Na obr. 28 je vynesena naměřená závislost pro aditiva Slovasol 2520/2 a Tween 20. Jejich chování je velmi podobné, proto bylo měření těchto aditiv pro větší přehlednost vyneseno do zvláštního grafu. V oblasti B došlo k výraznému potlačení oxidační proudové špičky, které poukazuje na přechod materiálu do pasivovaného stavu. Naopak v oblasti A došlo k výraznému zvětšení proudové špičky.

Po měření potenciodynamických křivek byl proveden test ustálení rovnovážného potenciálu elektrody. Nejprve byla provedena lineární polarizace do potenciálu 0,1 V vůči SCE a následně byl měřen rovnovážný potenciál elektrody. U aditiv Slovasol 2520/2, Lugalvan G-35 a Tween 20 došlo k velmi rychlému ustálení potenciálu na hodnotě  $-0,24$  V vůči SCE ( $0$  V vůči SHE). S aditivou CTAB a Lugalvan P potenciál velice pomalu klesal a ani během patnácti minut nedošlo k jeho ustálení stejně jako v roztoku bez přidaného aditiva. Z naměřených potenciodynamických křivek je patrné, že aditiva výrazně ovlivňují kinetiku elektrodových reakcí. Aditiva Slovasol 2520/2, Lugalvan G-35 a Tween pravděpodobně způsobila zvýšenou pasivaci povrchu elektrody, naopak aditiva Lugalvan P a CTAB pasivaci bránila. Vzhledem k velké složitosti měřeného systému nelze pomocí výše uvedeného měření identifikovat všechny procesy elektrodového rozhraní včetně působení povrchově aktivních látek.

Pro ověření hypotéz o vlivu aditiv na korozní odolnost mědi byl proveden dlouhodobý expoziční test, při kterém byly vzorky mědi ve formě plíšek ponořeny v roztoku simulujícím korozní prostředí betonu po dobu 140 hodin. Teplota roztoku byla zvýšena na  $60^{\circ}\text{C}$  a měření probíhalo bez přiloženého potenciálu. Kromě doposud používaných aditiv Slovasol 2520/2, Lugalvan G-35, Lugalvan P, CTAB a Tween 20 byl testován vliv nově vytipovaných aditiv Spolapon AES 232, Alfonal K a TMT (Tri-

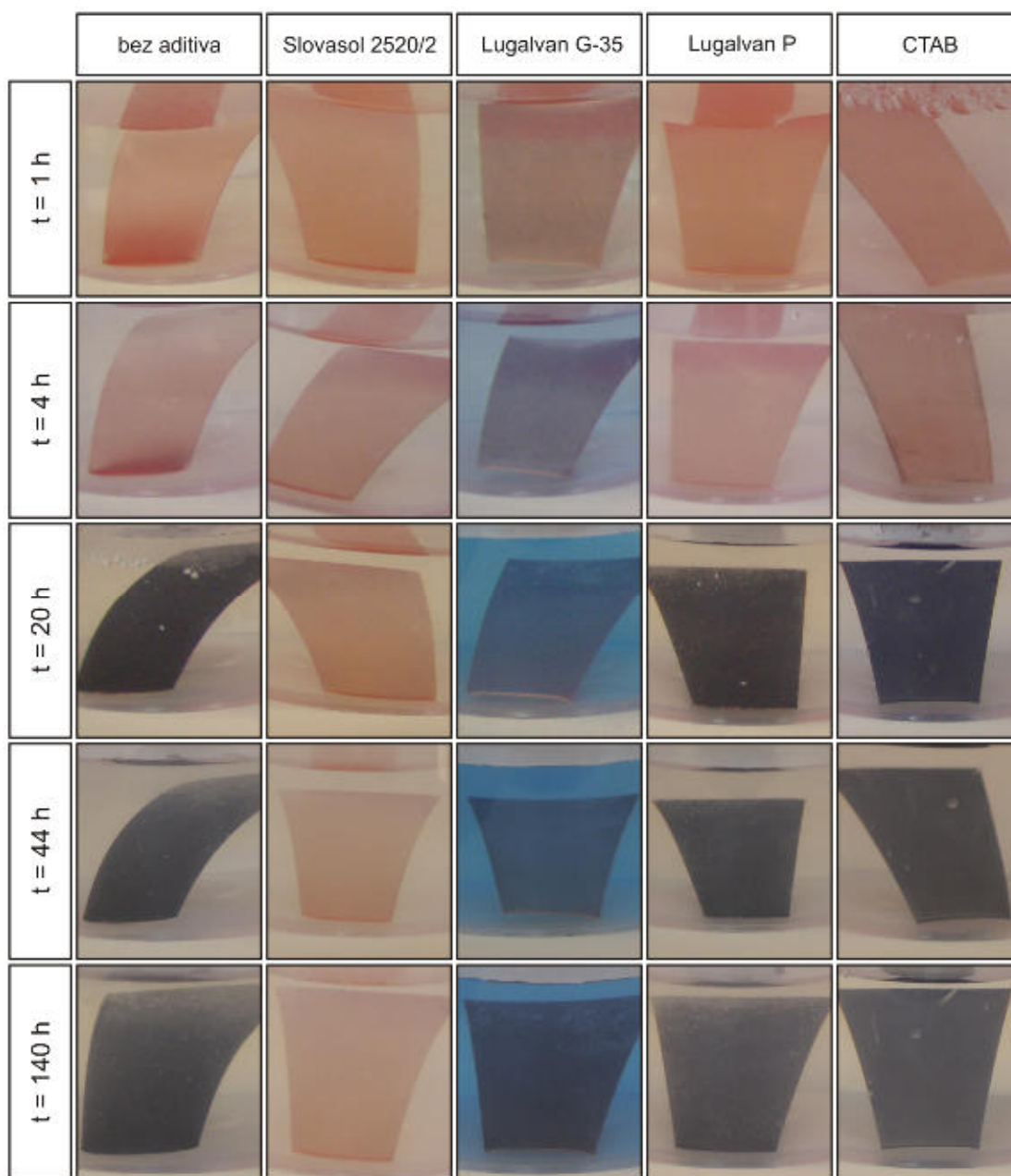
*Merapto Triazin*). Jeden ze vzorků sloužil pro testování korozní odolnosti mědi vyloučené na povrch plíšku z pokovovacího roztoku Cupracid TP od firmy Atotech, který se používá pro galvanické pokovování vrtaných otvorů při výrobě desek plošných spojů. Pokovení probíhalo při konstantním přepětí  $-0,35$  V vůči SCE po dobu 60 s.

Vzorky pro expoziční test byly připraveny v podobě pásků o délce 50 mm a šířce 10 mm. Ty byly očištěny izopropylalkoholem a pro odstranění oxidů ponořeny do ultrazvukové lázně roztoku 1 mol/l  $H_2SO_4$ . Působení lázně byly vystaveny po dobu pěti minut. Poté byly vzorky několikrát propláchnuty v demineralizované  $H_2O$  a důkladně osušeny. Takto připravené byly zváženy na analytických vahách s přesností na  $\pm 0,1$  mg. Expoziční test probíhal v roztoku simulujícím korozní prostředí betonu 0,01 mol/l NaOH saturovaného  $Ca(OH)_2$ , tedy ve stejném roztoku, který byl použit pro všechna předchozí měření. Bylo použito celkem deset skleněných kádinek s roztokem. Ve dvou kádinkách nebylo použito žádné aditivum. V nich byly testovány účinky korozního prostředí na čistou měď a na měď vyloučenou z pokovovacího roztoku Cupracid TP. Do ostatních kádinek byla přidána aditiva v koncentraci 500 ppm. (50 g roztoku, 25 mg sušiny aditiva). Na korozi může mít vliv množství kyslíku rozpuštěného v pracovním roztoku. Expozice byla prováděna v uzavřených kádinkách s 50 ml roztoku a 100 ml vzduchu. Vizualní snímání úrovně oxidace vzorků bylo prováděno po 1 h, 4 h, 20 h, 44 h a 140 h. Při každém snímání byly kádinky otevřeny, aby se vzduch mohl vyměnit. Cílem bylo zajistit dostatečné množství kyslíku v roztoku, který se může rozpouštět v elektrolytu a účastnit se tak oxidačního procesu. Naopak bylo třeba omezit přístup  $CO_2$ , který při kontaktu s pracovním roztokem rychle vytváří uhličitany. Výsledky expozičního testu vzorků ponořených v pracovním roztoku bez aditiva a s aditivem Slovasol 2520/2, Lugalvan G-35, Lugalvan P a CTAB jsou uvedeny na obr. 29.

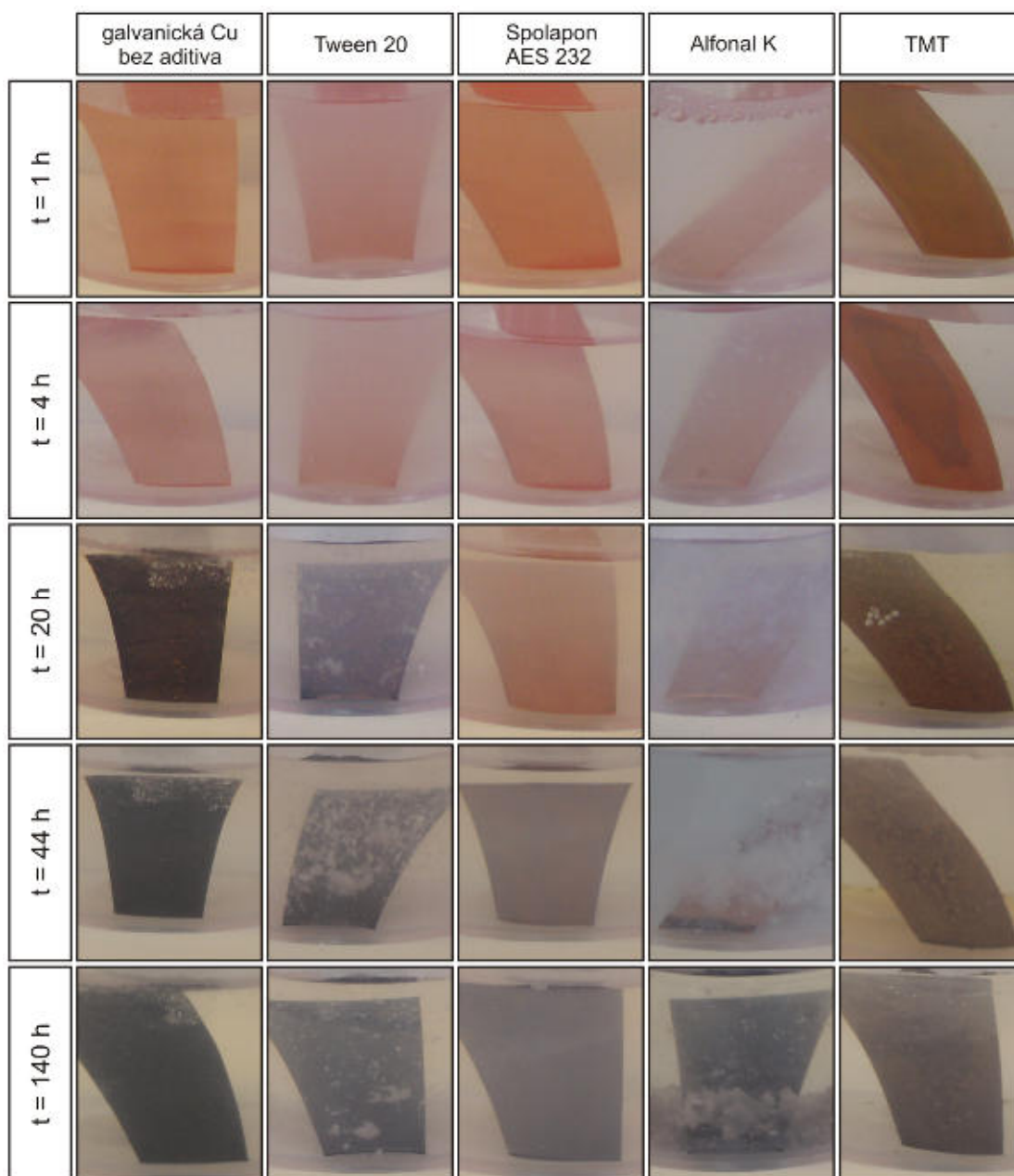
Výsledky expozičního testu vzorků ponořených v pracovním roztoku s aditivem Tween 20, Spolapon AES 232, Alfonal K, TMT a vzorku s povrchem vytvořeným pomocí galvanického pokovení mědi bez přidaného aditiva jsou uvedeny na obr. 30. Snímky jednotlivých vzorků byly pořízeny nejprve po jedné hodině působení roztoku. Po této době je patrné pouze mírné ztmavnutí povrchu u vzorků ponořených do roztoků s aditivem Lugalvan G-35 a TMT. Ztmavnutí těchto vzorků je ještě výraznější po čtyřech hodinách působení roztoku, kde roztok s přídavkem Lugalvanu G-35 získává lehce namodralou barvu, která poukazuje na rozpouštění iontů mědi.

Po této době začíná tmavnutí vzorku ponořeného do roztoku s přídavkem CTAB, které je patrné na jeho hranách. Po dvaceti hodinách působení roztoku je patrná tvorba oxidové vrstvy téměř na všech vzorcích. Výjimkou jsou vzorky v roztoku s aditivem Slovasol 2520/2, Spolapon AES 232 a Alfonal K. Nejkompaktnější vrstva oxidů je vytvořena na vzorku v roztoku s aditivem CTAB. V pracovním roztoku s přídavkem

aditiva TMT jsou na povrchu vzorku vytvářeny hnědošedé neadherentní šupiny, které při pohybu se vzorkem odpadávají. Po 140 hodinách expozice jsou pokryty oxidy všechny vzorky až na ty ponořené do pracovního roztoku s přídavkem aditiva Slovasol 2520/2. Roztok s přídavkem Lugalvanu G-35 získal sytě modré zabarvení, které poukazuje na silné rozpouštění mědi do kapalného prostředí.



**Obr. 29** Expoziční test (bez aditiva, Slovasol 2520/2, Lugalvan G-35, Lugalvan P, CTAB)



**Obr. 30** Expoziční test (galvanická měď bez aditiva, Tween 20, Spolapon AES 232, Alfonal K a TMT)

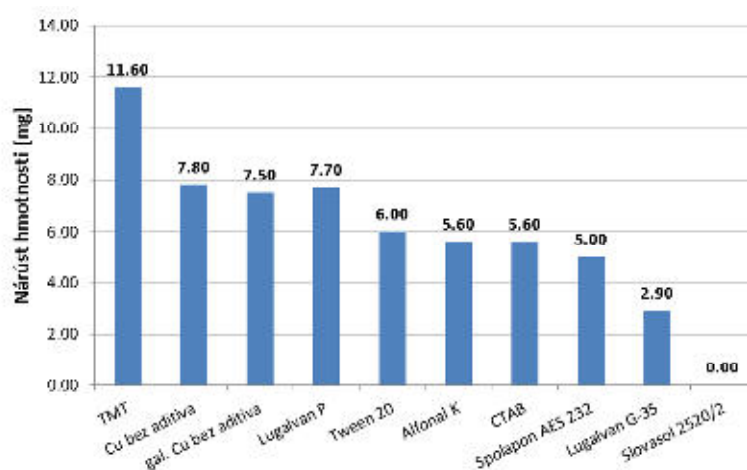
Po ukončení expozičního testu byly vzorky omyty v demineralizované  $H_2O$  a při teplotě  $50^\circ C$  sušeny. Po usušení byla měřena hmotnost vzorků po expozici (s přesností  $\pm 0,1$  mg). Každý vzorek byl analyzován pomocí optického metalografického mikroskopu. Následovalo odstranění („stripování“) oxidů z povrchu materiálu pomocí roztoku  $1 \text{ mol/l } H_2SO_4$  a nové měření hmotnosti vzorků. Z naměřených hodnot počáteční hmotnosti, hmotnosti po expozici a hmotnosti po odstranění oxidové vrstvy byly vypočteny hodnoty nárůstu hmotnosti vlivem oxidace a poklesu hmotnosti vzorku po odstranění oxidové vrstvy. Výsledky jsou shrnuty v tab. 6.



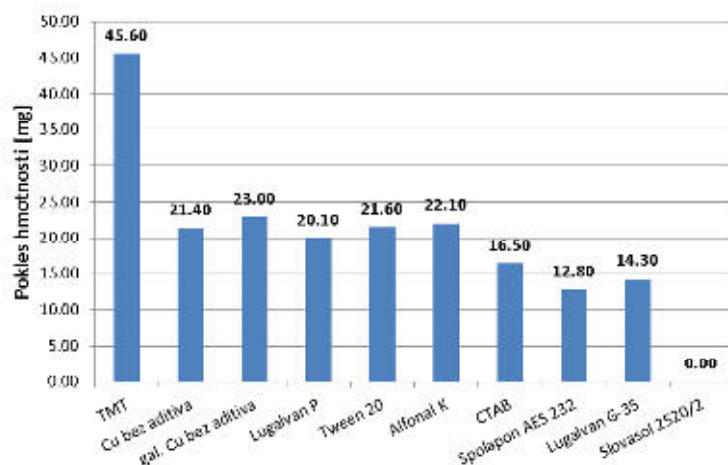
**Tab. 6** Výsledky expozičního testu

| aditivum            | počáteční hmotnost [g] | hmotnost po expozici [g] | nárůst hmotnosti [mg] | hmotnost po stripování [g] | pokles hmotnosti [mg] | poměr poklesu a nárůstu |
|---------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| TMT                 | 2,0470                 | 2,0586                   | 11,6                  | 2,0130                     | 45,6                  | 0,254                   |
| Cu bez aditiva      | 2,0300                 | 2,0378                   | 7,8                   | 2,0164                     | 21,4                  | 0,364                   |
| gal. Cu bez aditiva | 2,0266                 | 2,0341                   | 7,5                   | 2,0111                     | 23,0                  | 0,326                   |
| Lugalvan P          | 2,0125                 | 2,0202                   | 7,7                   | 2,0001                     | 20,1                  | 0,383                   |
| Tween 20            | 2,0241                 | 2,0301                   | 6,0                   | 2,0085                     | 21,6                  | 0,278                   |
| Alfonal K           | 2,0254                 | 2,0310                   | 5,6                   | 2,0089                     | 22,1                  | 0,253                   |
| CTAB                | 2,0313                 | 2,0369                   | 5,6                   | 2,0204                     | 16,5                  | 0,339                   |
| Spolapon AES 232    | 2,0338                 | 2,0388                   | 5,0                   | 2,0260                     | 12,8                  | 0,391                   |
| Lugalvan G-35       | 2,0144                 | 2,0173                   | 2,9                   | 2,0030                     | 14,3                  | 0,203                   |
| Slovasol 2520/2     | 2,0183                 | 2,0183                   | 0                     | 2,0183                     | 0                     | -                       |

Naměřené výsledky nárůstu hmotnosti, poklesu hmotnosti po stripování vůči hmotnosti po expozici a poklesu hmotnosti po stripování vůči počáteční hmotnosti jsou přehledně shrnuty v grafech na obr. 31, obr. 32 a obr. 33.

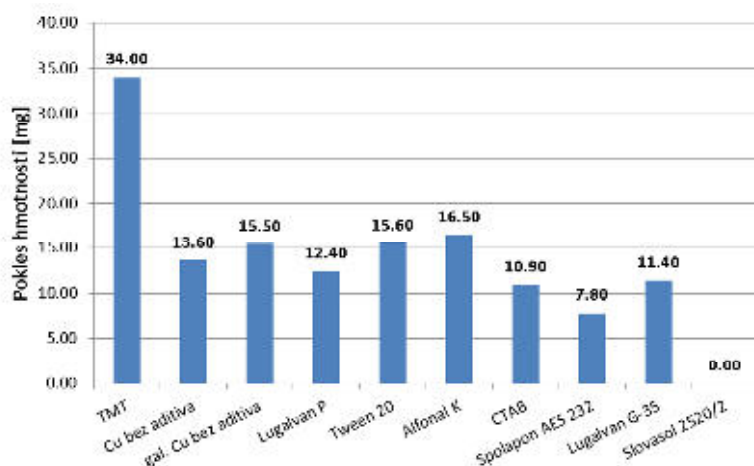


**Obr. 31** Nárůst hmotnosti vzorků v průběhu expozičního testu



**Obr. 32** Úbytek hmotnosti vzorků po stripování oxidové vrstvy





**Obr. 33** Úbytek hmotnosti vzorků po stripování oxidové vrstvy vůči počáteční hmotnosti

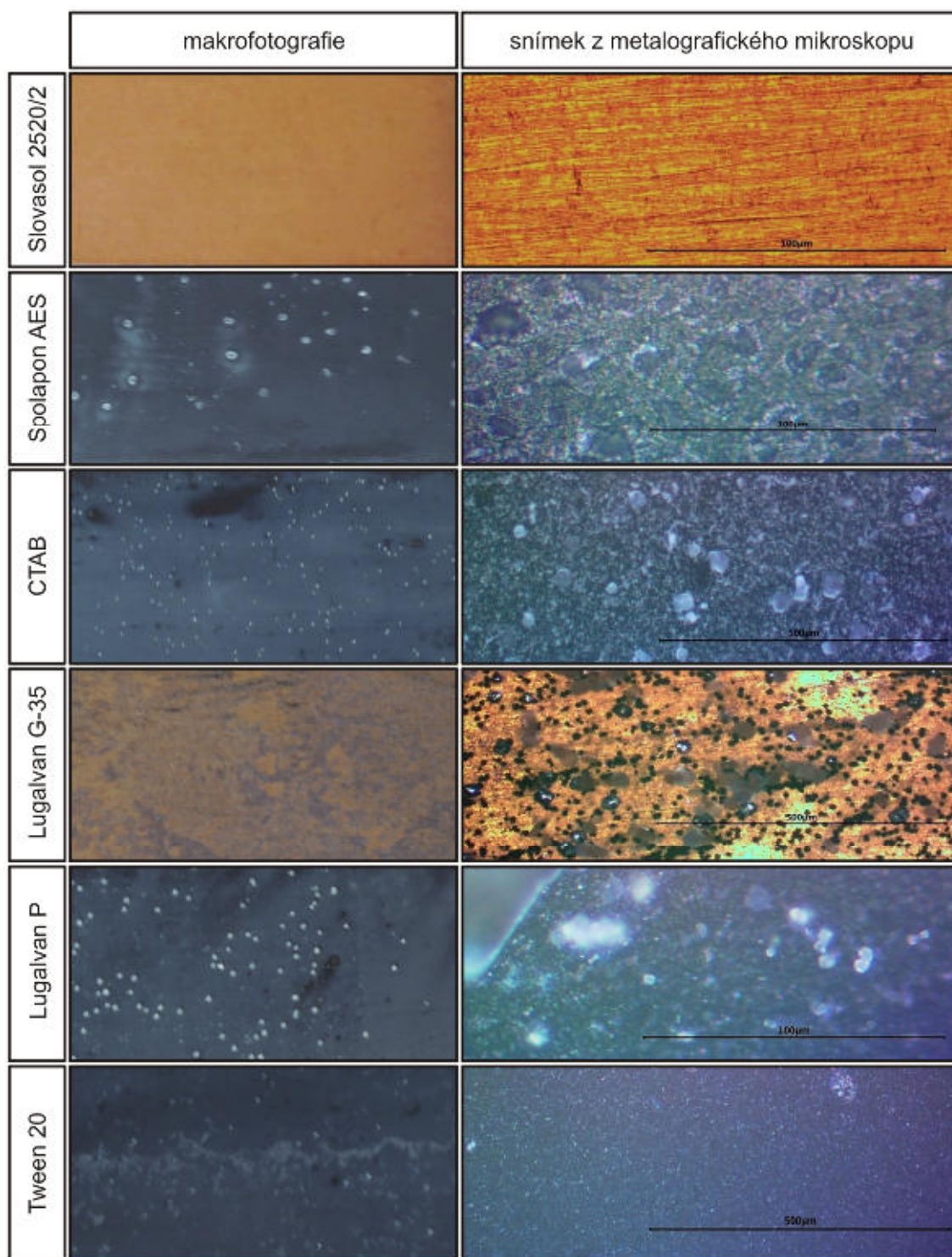
V případě že na povrchu kovu je během expozice vytvářena vrstva  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  a nedochází k rozpouštění kovu do pracovního roztoku, ani není přírůstek hmotnosti ovlivněn přídavnými uhličitany, lze předpokládat, že nárůst hmotnosti bude způsoben vytvářením hydroxidových skupin  $(\text{OH})_2$ .

Při stripování oxidové vrstvy dochází k úbytku nejen hydroxidových skupin, ale i vázané mědi. Pokud je hypotéza správná, tak by měl být podíl nárůstu hmotnosti vůči zvážení poklesu hmotnosti roven poměru atomové hmotnosti  $(\text{OH})_2$  vůči relativní hmotnosti  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  viz vztah (2).

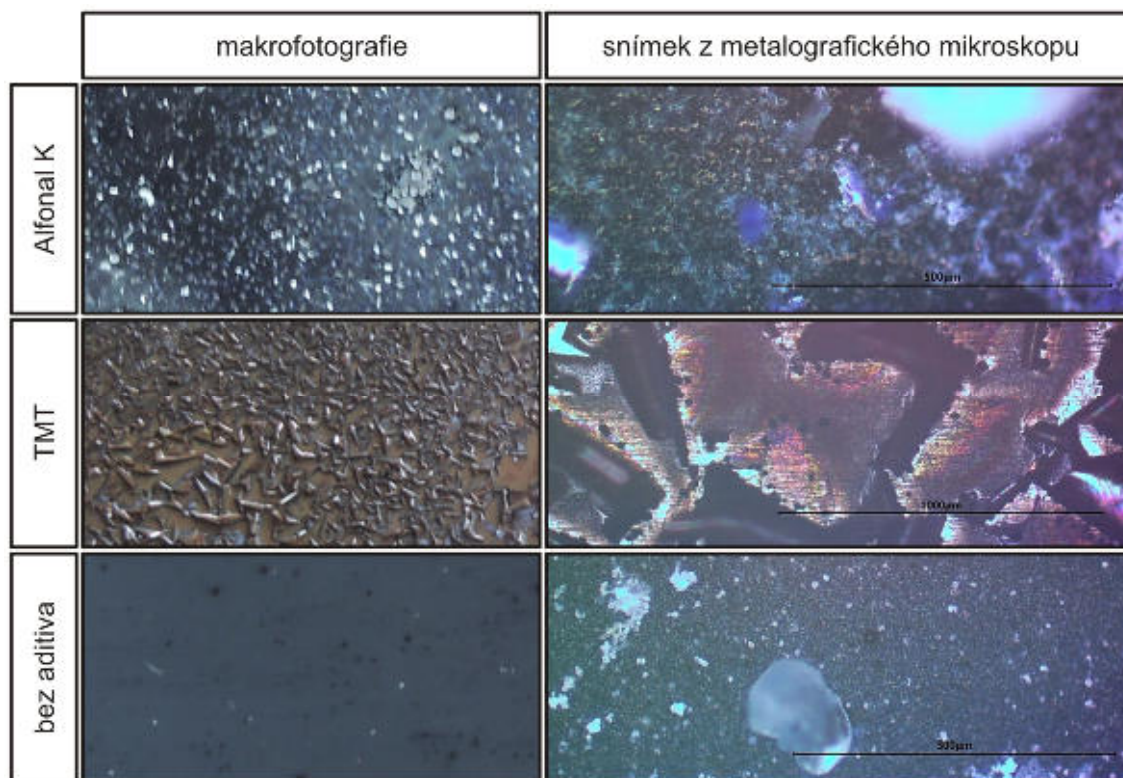
$$\frac{A_r[(\text{OH})_2]}{A_r[\text{Cu}(\text{OH})_2]} = \frac{2 \cdot (16 + 1)}{(64 + 2 \cdot (16 + 1))} = 0,347 \quad [-] \quad (2)$$

Pro měděné vzorky v pracovním roztoku bez aditiva vycházejí poměry poklesu vůči nárůstu hmotnosti na hodnoty 0,364 (měděný plíšek) a 0,326 (galvanicky nanesená vrstva mědi). Aritmetický průměr těchto dvou hodnot je 0,345, což je hodnota velmi blízká teoreticky vypočtené hodnotě 0,347, vycházející ze vztahu (2). Tento výsledek potvrzuje hypotézu o tvorbě hydroxidové vrstvy  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  během reakčního mechanismu.

Bezprostředně po ukončení korozního testu byly povrchy všech vzorků nasnímány makroskopicky pomocí digitálního fotoaparátu a mikroskopicky pomocí metalurgického mikroskopu. Optické zvětšení mikroskopu bylo nastaveno buď na hodnotu 500, nebo 1000 v závislosti na povaze snímané scény. Obr. 35 a obr. 34 umožňují vzájemné porovnání vzhledu jednotlivých povrchů po expozičním testu.



**Obr. 34** Snímky povrchu vzorků po expozičním testu (pokračování na obr. 35)



**Obr. 35** Snímky povrchu vzorků po expozičním testu

Z grafů uvedených na obr. 31, obr. 32, obr. 33 a snímků povrchu vzorků po provedení expozičního testu uvedených na obr. 34 a obr. 35, lze vyvodit tyto závěry:

- měď vyloučená z pokovovací lázně Cupracid TP nemá větší odolnost proti korozi, než měď ve formě plíšků (došlo k mírnému zvýšení tvorby pasivační vrstvy),
- jako zcela nežádoucí se ukázalo aditivum TMT, které způsobuje tvorbu nepřiléhavých šupin a korozi výrazně urychluje,
- aditiva Tween 20 a Alfonal K mírně snížila nárůst hmotnosti během expozice, ale po stripování oxidové vrstvy byl úbytek hmotnosti velice podobný jako v případě vzorku čisté mědi bez přidaného aditiva (v případě aditiva Alfonal K docházelo na povrchu vzorku k tvorbě bílých krystalů, patrně díky přítomnosti  $\text{CO}_2$ ),
- aditivum Lugalvan P pomohlo vytvořit na povrchu vzorku kompaktní pasivační vrstvu, naměřený úbytek hmotnosti byl nepatrně nižší než u vzorku v prostředí bez aditiva,
- chování roztoku s aditivem Lugalvan G-35 je zcela odlišné od chování ostatních aditiv, modré zabarvení roztoku poukazuje na postupné rozpouštění mědi (pravděpodobně přes komplex mezi kationaktivním aditivem

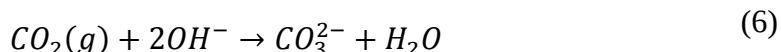
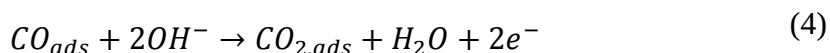
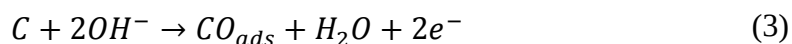
a aniontem  $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$ ), které způsobuje menší nárůst hmotnosti vzorku během expozice a menší celkový pokles hmotnosti po stripování (povrch vzorku po expozici je kovově lesklý, s velkým množstvím černých bodů o průměru cca 10  $\mu\text{m}$ ),

- snížený úbytek materiálu vykázal vzorek exponovaný v roztoku s aditivem CTAB, které vedlo k vytvoření kompaktní vrstvy pasivačního hydroxidu,
- druhý nejnižší úbytek materiálu vykázal vzorek umístěný v pracovním roztoku s aditivem Spolapon AES 232, z mikroskopických snímků je patrné postupné tmavnutí vzorku a vytvoření kompaktní pasivační vrstvy, celkový úbytek hmotnosti byl poloviční oproti vzorku exponovanému v roztoku bez aditiva,
- vynikající výsledky vykázal pracovní roztok s aditivem Slovasol 2520/2, během expozice vzorek nevykázal žádnou změnu vzhledu, ani měřitelný nárůst, či úbytek hmotnosti.

Výsledkem expozičního testu je jednoznačné zjištění, že při použití aditiva Slovasol 2520/2 dochází ke kompletní inhibici oxidačních dějů na povrchu mědi. Použití tohoto aditiva pro potlačení změn na rozhraní měď – prostředí betonu, se jeví jako nejvýhodnější. Aditivum Slovasol 2520/2 bylo přidáno do směsi pro výrobu senzorů, opatřených měděnými kontakty. Výroba senzorů je popsána v kapitole 4.2.

#### 4.1.3 Koroze uhlíku

Uhlík (grafit) je v různých formách zastoupen ve složení jednotlivých receptur pro výrobu funkčního materiálu. Přidáním uhlíku ve formě vláken jsou ovlivněny výsledné mechanické vlastnosti kompozitního materiálu (synergický efekt, kap. 2.1). Zároveň je využíváno jejich elektrických vlastností, které ve spolupráci s grafitem ve formě malých částic, rovnoměrně rozptýlených v objemu, slouží pro zvýšení vodivosti materiálu. Z hlediska dlouhodobé spolehlivosti senzoru je důležité zjistit vliv korozního prostředí betonu na uhlík při působení budicího napětí. Uhlík je v alkalickém prostředí stabilní. Může však docházet k jeho elektrochemické korozi vlivem zvýšených potenciálů a teplot [31]. Průchodem korozního proudu dochází k oxidaci uhlíku dle rovnic:

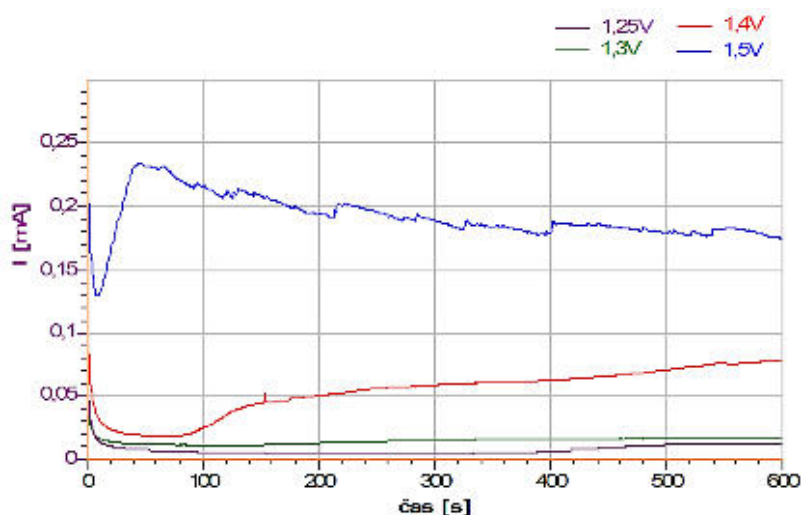




Uhlík oxiduje na adsorbovaný oxid uhelnatý. Ten přechází na plynný oxid uhličitý. Za přítomnosti aniontové skupiny  $\text{OH}^-$  dochází k rozpouštění plynného oxidu uhličitého do roztoku. Tím vzniká reaktivní  $\text{CO}_3^{2-}$ . Je pravděpodobné, že v prostředí hydroxidu vápenatého, který je v betonu obsažen, bude docházet k tvorbě uhličitanu vápenatého. Ten při kontaktu s  $\text{CO}_3^{2-}$  přechází na bikarbonát vápenatý, který se lehce vyplavuje. Tímto mechanismem může být porušena chemická rovnováha uvnitř betonu. Porušení chemické rovnováhy vede ke vzniku tzv. „koroze vymýváním“ (viz kap 4.1.4).

Cílem provedeného měření bylo stanovení bezpečných potenciálů, při kterých v alkalickém prostředí betonu ke korozi uhlíku nedochází. Pro simulaci podmínek v korozivním prostředí betonu byl použit roztok 0,01 mol/l NaOH, nasycený hydroxidem vápenatým –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Jako testovaný materiál byla použita grafitová tyčinka zalitá do epoxidového nástavce. Pomocí nástavce byl proveden mikrovýbrus průřezu tyčinky. Po počátečním broušení pomocí smirkových papírů byl povrch doleštěn s použitím korundového prachu o velikosti částic 2 nm až 4 nm. Jako referenční elektroda byla použita SCE (standardní kalomelová elektroda), s rovnovážným potenciálem 244 mV oproti SHE (standardní vodíkové elektrodě). Protielektroda byla z platiny.

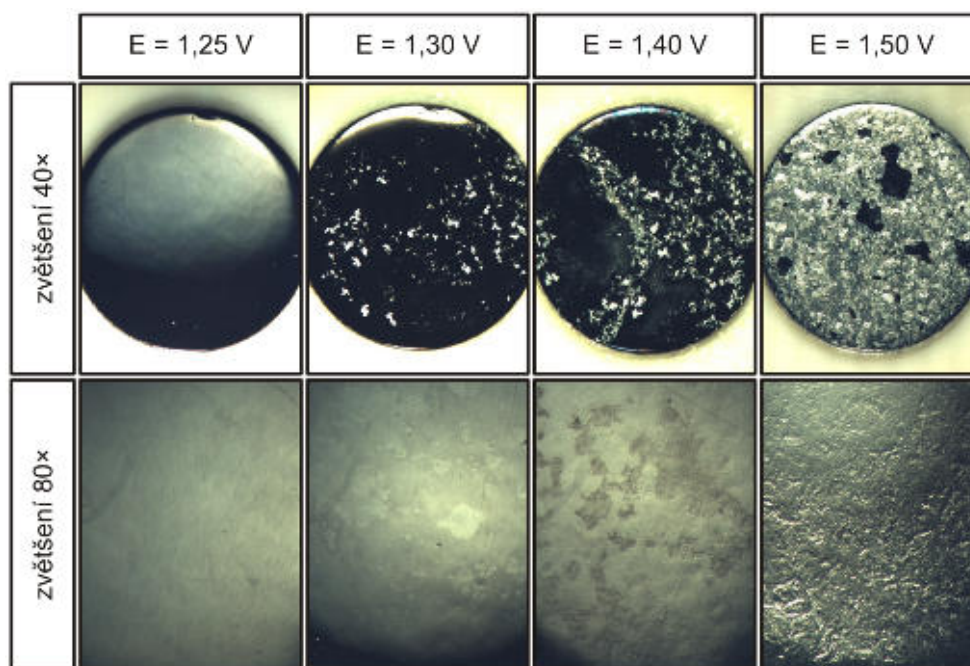
Byla provedena série potenciostatických měření v rozmezí od 0,8 V do koncových potenciálů 1,25 V, 1,3 V, 1,4 V a 1,5 V. Pro každý měřicí rozsah bylo provedeno deset měření, a poté byla elektroda po dobu deseti minut trvale vystavena působení maximálního potenciálu daného rozsahu. Během této doby byl snímán proud. Výsledné amperometrické křivky jsou uvedeny na obr. 36



**Obr. 36** Průběhy korozních proudů vzorku uhlíku  
při potenciálech: 1,25 V, 1,3 V, 1,4 V a 1,5 V

Z naměřených průběhů je patrné, že při hodnotě potenciálu 1,25 V a 1,3 V je průběh proudu časově konstantní, zatímco při hodnotách 1,4 V a 1,5 V má proud po počátečním poklesu vzrůstající tendenci.

Při pohledu na mikroskopické snímky povrchu uhlíkové elektrody po ukončení měření (obr. 37) se lze domnívat, že chování proudu při potenciálech 1,4 V a 1,5 V má souvislost s modifikací povrchu elektrody, který vlivem oxidace narůstal.



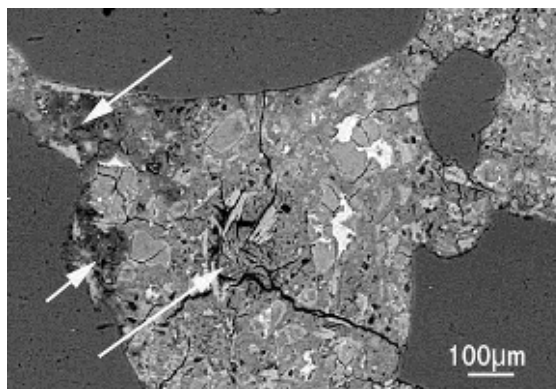
**Obr. 37** Mikroskopické fotografie povrchu uhlíkové elektrody po ukončení měření

Docházelo k tvorbě katalyzačních center, které urychlují korozní reakce na povrchu elektrody. Bílý povlak, který se vytvořil na povrchu elektrody během měření, byl uhličitán vápenatý. Toto tvrzení se podařilo ověřit pokusem, kdy byl tento povlak odstraněn z povrchu (stripován) ponořením elektrody do roztoku slabé kyseliny chlorovodíkové. Při následné chemické reakci vznikaly v roztoku bublinky  $\text{CO}_2$  a bílý povlak  $\text{CaCO}_3$  byl postupně odstraněn.

Z provedených měření je patrný závěr, že grafit bude v alkalickém prostředí betonu stabilní do velikosti potenciálů 1,25 V oproti SCE (1,5 V oproti SHE). Při vyšších hodnotách potenciálu bude pravděpodobně docházet k oxidaci grafitu a k navázání vzniklého  $\text{CO}_2$  na vápník při tvorbě uhličitanu vápenatého. Uvedené hodnoty platí pro čistý povrch materiálu. V případě uhlíkových plniv kompozitního materiálu lze předpokládat přítomnost již navázaných nečistot na jejich povrchu. Tyto nečistoty mohou snižovat limitní oxidační potenciál. Pro měření elektrických parametrů senzorů byl na základě těchto výsledků stanoven bezpečný testovací potenciál na 1 V.

#### 4.1.4 Koroze betonu

Korozi betonu lze rozdělit na tři základní typy, a to korozi síranovou, uhličitou a tzv. „kyselou“ [32], [33], [34]. K síranové korozi dochází nejčastěji vystavením betonu působení podzemní vody, obsahující síranové ionty. Účinek síranové koroze na strukturu cementové matrice je uveden na obr. 38.



**Obr. 38** Síranová koroze betonu [35]

Kyselá koroze je způsobena vystavením silně alkalického prostředí betonu působení kyselin, které způsobují pokles pH [35]. Pokud jsou produkty neutralizace rozpustné, dochází k tzv. „vymývání“ betonu, které vede k celkové ztrátě pevnosti a celkové degradaci materiálu. V této souvislosti byl prováděn výzkum vlivu kyselých dešťů na mechanické vlastnosti betonu [36]. Uhličitou korozi betonu způsobuje oxidu uhličitý, obsažený ve vzduchu nebo rozpuštěný v podzemní vodě.

## 4.2 Výroba senzoru a jeho mechanické provedení

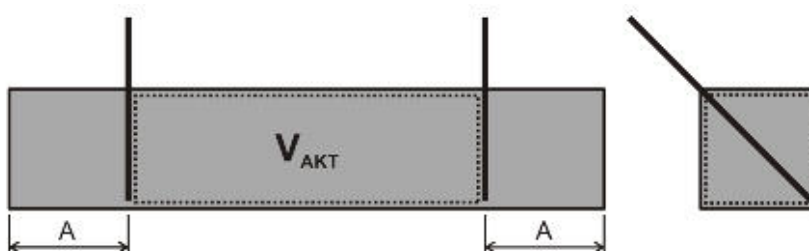
Výhodou senzoru, vyrobeného z funkčního kompozitního materiálu, je možnost vytvořit jeho tvar s ohledem na požadovanou aplikaci a účel využití. Pro výrobu senzorů určených pro testování elektrických parametrů v závislosti na mechanickém namáhání bylo výhodné připravit vzorky ve tvaru kvádra. Pro výrobu vzorků byly použity již existující kovové formy, které se používají pro výrobu zkušebních vzorků z konvenčních materiálů. K dispozici byly formy určené pro výrobu vzorků z jemnozrnných směsí ve tvaru kvádra o rozměrech 160 mm × 40 mm × 40 mm a formy určené pro výrobu vzorků z malty a cementových past ve tvaru kvádra o rozměrech 100 mm × 20 mm × 20 mm (obr. 39).



**Obr. 39** Formy pro výrobu kvádrů (vpravo – zalité vzorky s měděnými elektrodami)

Na základě výsledků korozních testů, uvedených v kap. 4.1, byla jako materiál pro vytvoření elektrod vybrána měď ve formě drátu o průměru 1,7 mm. Materiál byl obstarán ve formě elektroinstalačního kabelu. Izolace byla na části drátu ponechána, jako ochranná vrstva, která zabraňuje znečištění a korozi vnější části elektrody během formování a zrání kompozitního materiálu. Pro zvětšení kontaktní plochy mezi elektrodou a kompozitem byl její povrch upraven pokovením v galvanické lázni Cupracid TP. Galvanickým pokovením se vytvořila na jinak velmi hladkém, lesklém povrchu drátu vrstva mědi matného vzhledu, zajišťující lepší fixaci elektrody v objemu kompozitního materiálu. Pro zvýšení korozní odolnosti mědi v alkalickém prostředí betonu bylo do směsi přidáno aditivum Slovasol 2520/2 v koncentraci 500 ppm, které se v korozním testu projevilo jako velice účinný inhibitor koroze (viz kap 4.1.2).

Kvůli snaze využít co největší aktivní objem materiálu senzoru byly měděné kontakty prvních sad vzorků umísťovány příliš blízko k jejich čelům. To mělo za následek velmi malou mechanickou odolnost a náchylnost k vylomení elektrody během manipulace a připojování vodičů. Na základě tohoto poznatku byla upravena pozice elektrod, čímž došlo ke zmenšení aktivního objemu materiálu, ale mechanická odolnost výrazně vzrostla. Mechanické provedení senzoru a umístění elektrod je uvedeno na obr. 40.



**Obr. 40** Návrh mechanického provedení senzoru a umístění elektrod



Pro dosažení co největší styčné plochy jsou kontakty instalovány pod úhlem  $45^\circ$  (obr. 40). U vzorků o rozměrech  $160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  byly kontakty umístěny ve vzdálenosti  $A = 1 \text{ cm}$ , u vzorků o rozměrech  $100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  ve vzdálenosti  $A = 1,5 \text{ cm}$ . Změnou konstrukčního uspořádání byl aktivní objem materiálu větších senzorů omezen z hodnoty  $V_{\text{AKT}} = 256 \text{ cm}^3$  na hodnotu  $V_{\text{AKT}} = 224 \text{ cm}^3$ . U menších senzorů byl aktivní objem omezen z hodnoty  $V_{\text{AKT}} = 40 \text{ cm}^3$  na hodnotu  $V_{\text{AKT}} = 28 \text{ cm}^3$ .



**Obr. 41** Míchání směsi a její vzhled před formováním

Pro výrobu senzorů byla vybrána směs a receptura přípravy popsaná v kap. 2.3. Směs byla mísená s použitím průmyslového planetového mixéru do dosažení homogenní konzistence (obr. 41). Připravená směs byla nalita do forem, kde byla vibračně zhutněna. Po vytvrdnutí směsi byly senzory vyjmuty z formy a ponechány při běžné pokojové teplotě a vlhkosti vyzrát po dobu 28 dní. Připojení kabelů bylo provedeno pomocí nasouvacích svorek „WAGO“, které díky svému nožovému systému kontaktů zajišťují stabilní a trvalý elektrický kontakt mezi kabelem a elektrodami senzoru. Pro lepší mechanickou odolnost kontaktů byly svorky a kabely zajištěny pomocí tavného lepidla (obr. 42).



**Obr. 42** Vyrobený senzor a detail způsobu připojení vodiče k elektrodám

Takto vyrobené senzory z funkčního kompozitního materiálu byly připraveny pro měření statických elektrických parametrů a následnou integraci do betonových konstrukcí. Mechanické provedení senzoru, jako jeden z výstupů dizertační práce, je chráněno užitným vzorem [27].

### 4.3 Integrace senzorů do betonových konstrukcí

Jednou z největších výhod využití senzorů z funkčního kompozitního materiálu je možnost jejich integrace do objemu materiálu. Díky tomu lze sledovat vliv zatížení, nebo mechanického namáhání přímo uvnitř jednotlivých konstrukčních prvků. Pro vytvoření testovacích těles, sloužících k ověření funkce vyrobených senzorů, popsaných v kap. 4.2, byly zvoleny dva základní konstrukční prvky – pilíř a nosník. Rozměry obou prvků byly přizpůsobeny technologickým možnostem brněnské pobočky státního podniku TZÚS Praha (Technický a zkušební ústav stavební Praha).

Pilíř o rozměrech 500 mm × 300 mm × 300 mm s vnitřní drátěnou výztuží z betonářské oceli B500B byl vyroben z betonu C25/30-XC1.



**Obr. 43** Formování betonového pilíře, způsob fixace výztuže a senzorů

Nosník o rozměrech 3400 mm × 150 mm × 150 mm s vnitřní drátěnou výztuží z betonářské oceli B500B byl vyroben z betonu C16/20-XC1.



**Obr. 44** Formování betonového nosníku, způsob fixace výztuže a senzorů

Na obr. 43 a obr. 44 je uveden způsob upevnění drátěné výztuže a senzorů pomocí plastových distančních prvků, lišt a fixačních pásků, které mají za úkol udržet komponenty ve správné poloze během formování a tvrdnutí betonu. Použitím poddajných plastů je docíleno minimálního vlivu fixace na výsledné rozložení sil během testování betonového prvku. Pro konstrukci forem byla použita dřevotřískka s hladkou vrstvou lamina, která má separační funkci, zabraňuje vsakování vody do stěn formy a napomáhá snadnému oddělení při rozebírání formy. Po zalití formy betonem a jeho zhutnění pomocí vibrování byly prvky ponechány v klidu až do úplného vytvrzení. Poté byly formy rozebrány a prvky očištěny (obr. 45).



**Obr. 45** Vyrobené betonové pilíře s integrovanými senzory

Před měřením elektrických vlastností při zatěžování (kap 4.4) byly takto vyrobené prvky ponechány po dobu 28 dní vyzrát. Detailní výkresy provedení pilíře i nosníku, včetně polohy výztuže a senzorů, jsou uvedeny v příloze práce.

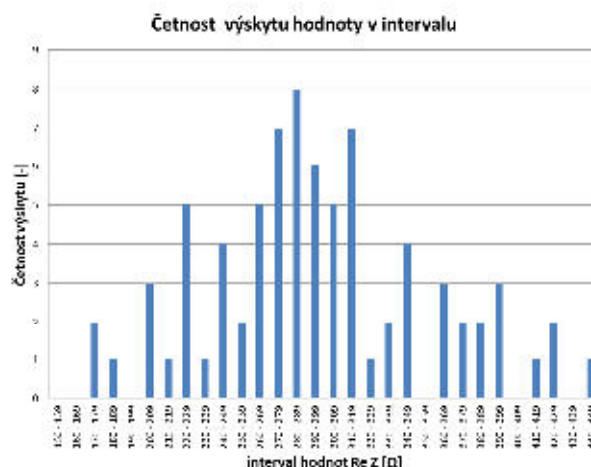
#### **4.4 Měření elektrických parametrů senzorů**

Měření elektrických parametrů senzorů lze rozdělit do tří skupin. U všech vyrobených senzorů byly nejprve změřeny elektrické parametry ve statickém režimu. Toto výchozí měření sloužilo k ověření funkčnosti elektrodového systému a roztřídění senzorů do skupin dle velikosti reálné složky komplexní impedance (kap. 4.4.1). Po integraci vyrobených senzorů do betonových prvků byla provedena série měření elektrických parametrů při dynamickém namáhání prvků s cílem zjistit velikost elektrické odezvy na působení mechanického napětí v objemu materiálu (kap. 4.4.2). Poslední skupinou bylo dlouhodobé měření elektrických parametrů betonových prvků. Při dlouhodobém měření byla zkoumána závislost elektrické odezvy betonového konstrukčního prvku na okolní teplotě a relativní vzdušné vlhkosti (kap. 4.4.3). Ze všech provedených měření bylo nashromážděno velké množství dat. Vzhledem

k povaze a rozsahu této práce byly vybrány ty nejzajímavější výsledky, které jsou v textu okomentovány.

#### 4.4.1 Statická měření elektrických parametrů

Koncentrace vodivých příměsí u materiálu, který má mít dobrou citlivost na mechanické namáhání, se musí pohybovat těsně pod perkolačním prahem (viz kap. 2.2.2). Ze závislosti uvedené na obr. 6 je patrné, že v této oblasti je vodivost materiálu výrazně ovlivněna i velmi malou změnou koncentrace vodivých příměsí. Vzhledem ke způsobu přípravy kompozitní směsi pro výrobu senzorů je výsledná velikost reálné složky impedance silně závislá na mnoha faktorech. V případě vzorků vyrobených z jedné dávky směsi se výsledná hodnota reálné složky po vytvrzení a vyzrání materiálu senzoru liší až o 50 %. V případě porovnání hodnot vzorků z různých výrobních dávek jsou odchylky hodnot výrazně vyšší.



**Obr. 46** Měření statických elektrických parametrů vyrobených senzorů

Měření probíhalo pomocí RLC měřicí stanice Agilent E4980A. Velikost budícího signálu byla nastavena na 1 V<sub>P-P</sub> při frekvenci 1 kHz. Zapojení měřicího pracoviště a rozdělení hodnot reálné složky impedance u vzorků z jedné materiálové dávky je uvedeno na obr. 46. Na základě měření statických elektrických parametrů byly vytvořeny skupiny senzorů s velmi podobnými hodnotami reálné složky impedance. Pro integraci do betonového prvku byly použity senzory podobných elektrických vlastností.

#### 4.4.2 Dynamická měření elektrických parametrů

Dynamická měření betonových konstrukčních prvků s integrovanými senzory byla prováděna ve státním podniku TZÚS v Brně. Strojní a technologické vybavení podniku umožňuje provádět certifikované zkoušky různých stavebních a konstrukčních prvků. Pro měření odezvy senzorů integrovaných do konstrukčních prvků byla klíčová možnost řízeného zatěžování pomocí hydraulicky poháněného lisu.



Pro měření odezvy vzorků na mechanické namáhání byly zpočátku používány přístroje Agilent E4980A s automatickým zpracováním měřených dat prostřednictvím rozhraní USB (*Universal Serial Bus*). Vzhledem k problémům, kterým se podrobně věnuje kap. 5, nebylo možné tyto přístroje použít pro současné měření většího množství senzorů integrovaných v objemu betonového prvku.

Problém bylo třeba vyřešit, protože dostupné technické vybavení neumožňovalo současné měření na větším množství kanálů. Pro potřeby těchto vícekanálových měření byla vyvinuta speciální laboratorní měřicí aparatura, díky které bylo možné dynamická měření na betonových prvcích provést. Vývoj přístroje, kterému se věnuje kapitola 5.3, vycházel z několikaletých zkušeností získaných v průběhu řešení dizertační práce. Na obr. 47 jsou uvedeny fotografie prvotního ověření funkčnosti laboratorní měřicí aparatury během dynamického měření.



**Obr. 47** Ověření funkce laboratorní měřicí aparatury při dynamickém měření

Pracoviště, na kterém probíhalo měření elektrických parametrů senzorů integrovaných v pilíři při jeho dynamickém namáhání, je uvedeno na obr. 48. Mechanické namáhání v ose pilíře bylo zajištěno hydraulicky poháněným lisem. Prostřednictvím jeho ovládacího panelu lze velmi přesně nastavit udržení konstantní hodnoty, gradient nárůstu a poklesu působení síly. Po obvodu zatěžovaného pilíře byly umístěny digitální úchylkoměry, které snímaly změny rozměrů (deformace) na stěnách pilíře v průběhu celého měření. Hodnoty z úchylkoměrů byly zaznamenávány v počítači operátora formou tabulek, ze kterých bylo možné získat grafy závislosti měřené veličiny v čase.

Při přípravě betonového pilíře byly odstraněny nerovnosti na styčných plochách přebroušením pomocí diamantového kotouče. Pro dosažení rovinnosti byl povrch nivelován sádrovou stěrkou. Mezi povrch pilíře a kovovou desku lisu byl vložen list tenkého kartonu, který je schopen vyrovnat velmi malé nerovnosti na povrchu stěrky, ale není dostatečně pružný, aby negativně ovlivnil výsledky měření. Cílem bylo zajistit

perfektní rovinnost styčných ploch, která je důležitá k dosažení rovnoměrného působení síly v celém průřezu materiálu. Úchylkoměry byly na stěny pilíře připevněny pomocí kovových držáků, přilepených pomocí sádrového tmelu. Laboratorní měřicí aparatura byla připojena na elektrodový systém integrovaných senzorů prostřednictvím kabelů, vyvedených z objemu betonového pilíře.

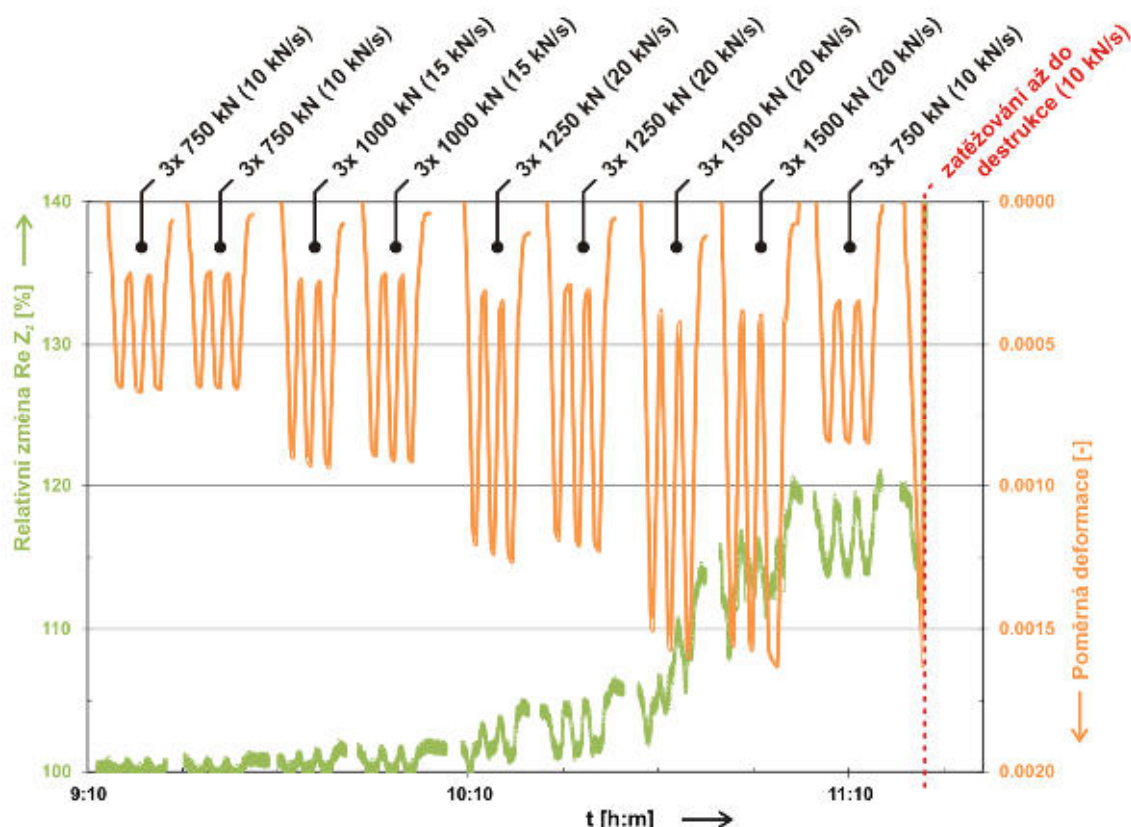


**Obr. 48** Pracoviště pro měření elektrických parametrů v průběhu dynamického namáhání betonového pilíře s integrovanými senzory

Zvolená metodika měření spočívala v cyklickém zatěžování a odlehčování betonového pilíře, vždy ve třech cyklech, s postupně rostoucím maximálním zatížením a gradientem. V grafu uvedeném na obr. 49 je vynesena průběh relativní změny reálné složky impedance jednoho z integrovaných senzorů (senzor č. 2 v obr. 51), vztažený k absolutní hodnotě reálné složky v nezatíženém stavu (zelená barva). Údaje získané z úchylkoměrů, byly přepočteny dle vztahu (7) na hodnotu poměrné deformace, jejíž časová závislost je v grafu vynesena průběhem oranžové barvy.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{\Delta l + l_0} \quad [-] \quad (7)$$

Poměrná deformace  $\varepsilon [-]$  vyjadřuje změnu rozměru měřeného prvku během namáhání, která je vztažena k jeho původnímu rozměru. Změna rozměru  $\Delta l [m]$  je vypočtena jako aritmetický průměr hodnot ze všech čtyřech úchylkoměrů. Původní rozměr prvku  $l_0 [m]$  byl určen před začátkem měření.



**Obr. 49** Odezva senzoru integrovaného v betonovém pilíři na cyklické namáhání

Cílem měření elektrických parametrů při cyklickém zatěžování a odlehčování bylo zjistit velikost odezvy senzoru v podobě změny reálné složky impedance. Měření probíhalo celkem déle než dvě hodiny. Bylo rozděleno na dílčí měření, která jsou spojena do jediného grafu. Mezi jednotlivými měřeními byl pilíř úplně odlehčen. V rámci každé trojice cyklů byla minimální hodnota síly, působící na pilíř, 200 kN. Hodnoty naměřené pomocí laboratorní měřicí aparatury a hodnoty získané z úchylkoměrů byly spárovány pomocí časové značky, kterou aparatura přidává ke každému ukládanému vzorku. Pilíř byl nejprve vystaven celkem šesti cyklům zatížení-odlehčení, provedeným s gradientem 10 kN/s do maximální hodnoty 750 kN. Relativní změna reálné složky impedance je v tomto případě velmi malá, s hodnotou do 2 %. I přes to je z průběhu patrné, že hodnota reálné složky při zvyšujícím se zatížení klesá a naopak při odlehčení stoupá. V dalších šesti cyklech byla rychlost změny nastavena na hodnotu 15 kN/s s maximální hodnotou 1000 kN. Z naměřené odezvy je patrné, že senzor skutečně reaguje nejen na zatížení samotné, ale velikost změny reálné složky sleduje velikost zatížení. U prvních tří cyklů začíná být patrný fakt, který se potvrdil při vyšších hodnotách zatížení. V objemu materiálu dochází během cyklování ke strukturálním změnám, které mají pozitivní vliv na citlivost senzoru. U dalších šesti cyklů, provedených s gradientem 20 kN/s do maximální hodnoty 1250 kN, je jev ještě více patrný. K formování struktury dochází během prvních tří



period, vždy po zvětšení hodnoty maximálního zatížení. Během nich dochází ke zvětšování odezvy, ale zároveň i k posunu absolutní hodnoty, která odpovídá stavu, kdy je prvek nezatížen. V následujících třech periodách je odezva podstatně pravidelnější a lépe kopíruje průběh poměrné deformace prvku. Dalších šest cyklů provedených s gradientem 20 kN/s do maximální hodnoty 1500 kN tento jev potvrzuje. Zde je třeba poznamenat, že hodnota 1500 kN byla statikem stanovena jako limitní pro strukturální integritu pilíře. Naměřená odezva při těchto cyklech poukazuje na určité strukturální změny v objemu materiálu, ale i přes to průběh stále kopíruje poměrnou deformaci pilíře a relativní změna reálné složky je až 10 %. Pilíř zůstal i po šesti cyklech při limitním zatížení neporušen i přes to, že údaje z úchylkoměrů ukazovaly při maximálním zatížení stlačení téměř o 1 mm (obr. 50).



**Obr. 50** Vzhled pilíře před (vlevo) a po porušení struktury (vpravo)

Následující tři periody, provedené do maximálního zatížení silou 750 kN a s gradientem 10 kN/s, způsobily velmi zajímavou elektrickou odezvu. V porovnání s původními šesti cykly došlo k výraznému zvýšení citlivosti senzoru na tuto úroveň zatížení. Změna velikosti reálné složky impedance dosahovala hodnoty až 8 %. Došlo také k výraznému posunutí absolutní hodnoty při nulovém zatížení. Poslední část měření měla za úkol zjistit reakci senzoru na porušení strukturální integrity pilíře. Gradient nárůstu síly byl nastaven na hodnotu 10 kN/s a průběh odezvy byl sledován až do destrukce pilíře, která nastala těsně po překročení hodnoty 1500 kN. Při destrukci stoupla hodnota relativní hodnoty reálné části impedance o více než 300 %. Cyklickým namáháním struktury dochází v objemu materiálu k postupnému vzniku mikrotrhlín, které se zvětšují při překračování mezních hodnot vnitřního mechanického napětí při osovém tlaku, daného vztahem:

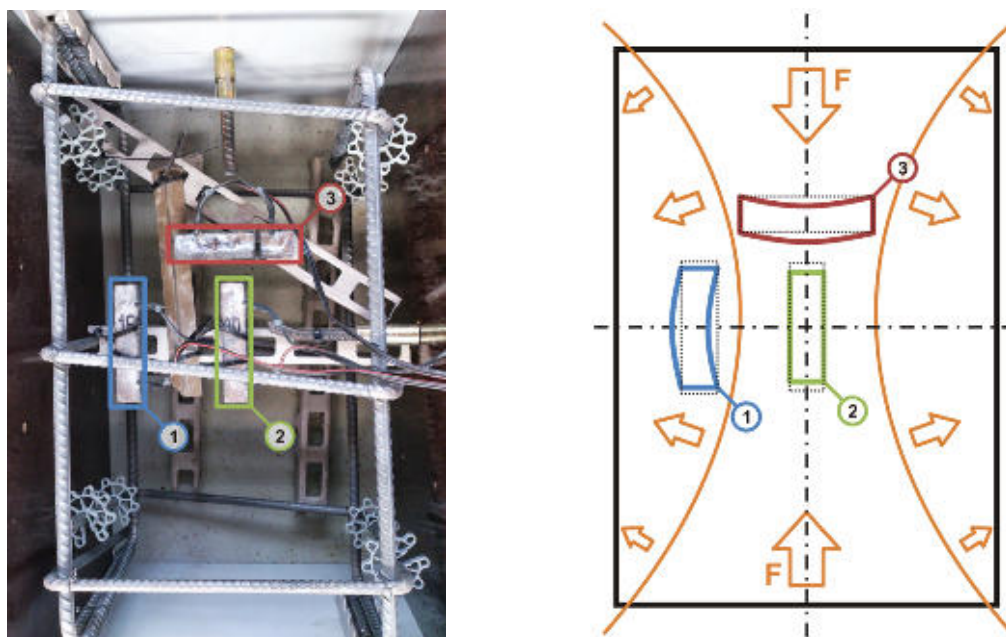
$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [Pa] \quad (8)$$

kde  $F$  [N] je síla působící v ose betonového prvku a  $S$  [m<sup>2</sup>] velikost styčné plochy. V případě testovaného pilíře byla statikem jako limitní určena hodnota mechanického napětí vyvolaná přitlačnou silou lisu o velikosti 1500 kN. Dosazením přitlačné síly a styčné plochy pilíře do vztahu (8), lze určit velikost limitního mechanického napětí při osovém tlaku (9):

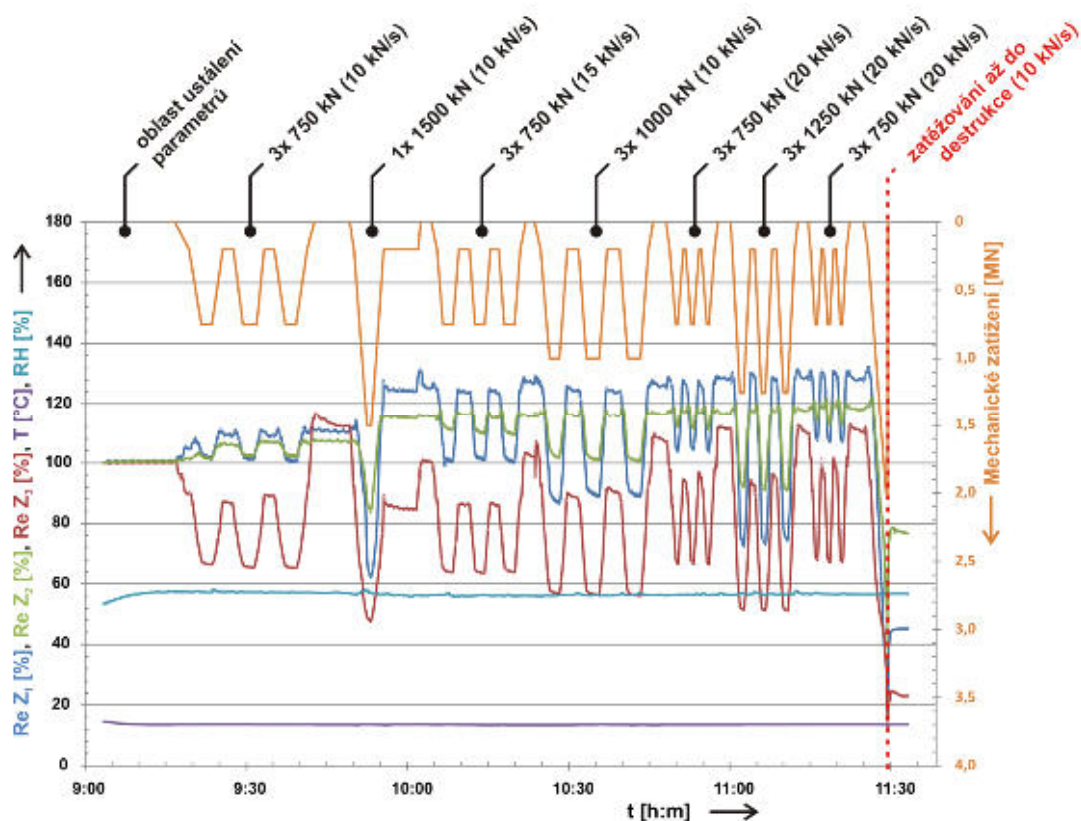
$$\sigma = \frac{1,5 \cdot 10^6}{0,3 \cdot 0,3} = 16,66 \text{ MPa} \quad (9)$$

Po překročení limitního mechanického napětí struktury pilíře dochází vlivem postupného spojování trhlin k náhlému skokovému jevu, při kterém je porušena strukturální integrita konstrukčního prvku. Fotografie pilíře po porušení strukturální integrity je uvedena na obr. 50 – vpravo. Ze způsobu, jakým se v pilíři vytvořily trhliny, lze zjistit, zda byl pilíř správně usazen v lisu a zatěžován rovnoměrně. Ideálním způsobem porušení struktury je vznik rotačního hyperboloidu (statiky slangově nazývaný „přesýpací hodiny“), který způsobuje typické odlomení hran ve tvaru hyperboly.

V případě dalšího měření byla použita stejná konfigurace měřicího pracoviště i způsob přípravy pilíře. Na obr. 51 – vlevo je uvedeno mechanické uspořádání senzorů v objemu materiálu. Senzor číslo 2 (zelená barva) je umístěn vertikálně v geometrickém středu prvku. Nad ním je umístěn senzor číslo 3 (červená barva) s horizontální orientací. Posunutí středu senzoru od geometrického středu prvku je 10 cm. Senzor číslo 1 (modrá barva) je umístěn ve stejné rovině jako senzory číslo 2 a 3 a současně je posunut o vzdálenost 10 cm směrem ke stěně pilíře. V pravé části obr. 51 je uvedeno předpokládané působení sil a jejich vliv na deformaci jednotlivých senzorů. Předpoklad vychází z tvaru prasklin ve struktuře při porušení strukturální integrity a ze známého vektoru působení deformační síly. Senzor číslo 2 by měl být namáhán zejména ve směru své podélné osy, kdy vlivem působení síly dochází k jeho smršťování (deformace tlakem). Namáhání senzorů 1 a 3 je způsobeno komplexním působením množiny vektorů síly, jejichž rozložení je ovlivněno přítomností drátěné výztuže. Sensory jsou pravděpodobně deformovány zejména ohybem, za přítomnosti působení deformace tlakem ve směru vektoru síly generované lisem.



**Obr. 51** Geometrické uspořádání senzorů v objemu materiálu pilíře (vlevo) a předpokládané působení sil během zatěžování (vpravo)



**Obr. 52** Odezva senzorů integrovaných v betonovém pilíři na cyklické namáhání

Byla zvolena odlišná sekvence cyklování a velikostí gradientů. Výsledný graf, uvedený na obr. 52, zobrazuje závislost reálné složky impedance u všech tří senzorů integrovaných v objemu pilíře (modrý, zelený a červený průběh). Měření je nyní

doplněno průběhem teploty (fialový průběh) a relativní vlhkosti vzduchu (tyrkysový průběh). Měření doplňkových veličin je umožněno pomocí sondy připojené k laboratorní měřicí aparatuře (viz kap. 5.3.4, obr. 90). Na rozdíl od měření uvedeného v grafu na obr. 49 zde není uveden záznam poměrné deformace. Ten byl nahrazen záznamem mechanického zatížení pilíře (oranžový průběh).

Měření trvalo celkem 2,5 hodiny. Na počátku byl pilíř měřen v klidu, bez působení síly generované lisem (15 minut). Tato doba byla určena k ustálení parametrů měření. Během ní došlo k ustálení teploty a relativní vlhkosti na sondě zasunuté do objemu materiálu. Hodnoty reálné složky impedance se v této časové oblasti nemění. První trojice cyklů zatížení-odlehčení byla provedena rychlostí 10 kN/s, do maximální hodnoty 750 kN. Mezi periodami cyklu nebyl prvek odlehčen úplně, ale minimální síla lisu byla nastavena na hodnotu 200 kN. Tato úroveň odlehčení byla zachována u všech následujících cyklů. K úplnému odlehčení docházelo až mezi jednotlivými cykly (patrné z oranžového průběhu – obr. 52). Během prvních třech cyklů je odezva senzoru 1 a 2 velmi podobná. Se zatížením se hodnota reálné složky impedance zvyšuje a s odlehčením snižuje. Modrý průběh (senzor 1) vykazuje vyšší citlivost na namáhání než senzor 2. Ve stavech odpovídajících odlehčení prvku (200 kN) je patrný mírný posun, zřejmě díky strukturálním změnám v objemu materiálu (dodatečné formování). Senzor 3 vykazuje jiný charakter chování. Při první periodě zatížení nejprve relativní hodnota reálné složky impedance výrazně poklesla. Během prvního odlehčení se však reakce svojí povahou začala shodovat se zbývajících senzory. Došlo k výraznému snížení hodnoty odpovídající klidovému stavu. Citlivost na změny zatížení je u senzoru 3 nejvyšší. Toto chování si lze vysvětlit vzájemným uspořádáním jednotlivých senzorů v objemu materiálu (obr. 51). Podle předpokládaného působení sil je senzor 2 namáhán zejména tlakem v podélné ose, při němž dochází k jeho smršťování. Tím se vodivé částice v matici kompozitu dostávají blíže k sobě a relativní složka impedance senzoru klesá. U senzoru 1 je situace podobná, ale ten je namáhán částečně ještě v ohybu. Tím lze vysvětlit větší změnu reálné složky impedance (větší citlivost) než u senzoru 2. Odlišné chování senzoru 3 je dáno jeho orientací. Zatímco senzory 1 a 2 jsou ve struktuře umístěny vertikálně, senzor 3 je jako jediný orientován horizontálně. Předpokládané působení sil v objemu pilíře, naznačené na obr. 51 – vpravo, poukazuje na fakt, že senzor může být namáhán v ohybu, ale zároveň díky své poloze smršťován ve své příčné ose. Smrštěním v příčné ose se elektricky vodivé částice v matici kompozitu dostávají blíže k sobě a vzhledem k menší ploše v příčném řezu senzoru mají na výslednou velikost reálné složky impedance podstatně větší vliv, než u senzorů smršťovaných v ose podélné. V dalším cyklu působila na styčné plochy pilíře mezní síla 1500 kN s gradientem 10 kN/s. U senzorů 1 a 2 došlo k výraznému posunu klidové hodnoty, u senzoru 3 k žádnému posunu nedošlo (při odlehčení

se hodnota vrátila na úroveň odpovídající začátku měření). Tímto extrémním zatížením patrně došlo k finálnímu zformování všech integrovaných senzorů. Výrazně stoupla citlivost senzoru 1 a při dalším cyklování odezva všech tří senzorů přesně sledovala aktuální úroveň zatížení pilíře. Výše uvedené poznatky potvrdily původní předpoklad o působení sil v objemu materiálu. Na základě naměřených průběhů, lze vliv pozice senzorů v pilíři zobecnit v několika bodech:

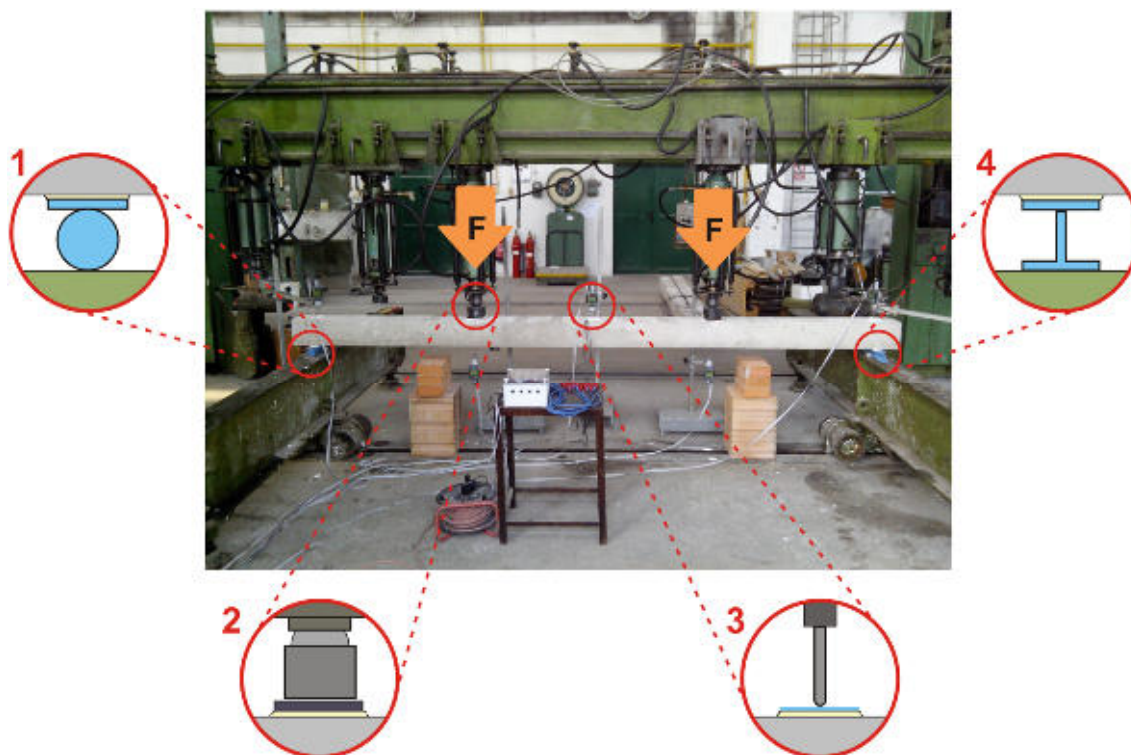
- senzor umístěný v *geometrickém středu, orientovaný vertikálně*, má relativně malou citlivost na namáhání prvku, výstupní signál však na změny zatížení reaguje přesně a poloha klidové úrovně je stabilní,
- senzor v příčné ose, posunutý *mimo geometrický střed, orientovaný vertikálně*, má velmi dobrou citlivost na namáhání prvku, výstupní signál na změny zatížení reaguje přesně a poloha klidové úrovně je stabilní,
- senzor umístěný v podélné ose, posunutý *mimo geometrický střed, orientovaný horizontálně*, má ze všech výše uvedených možností nejlepší citlivost na namáhání prvku, výstupní signál reaguje přesně, ale poloha klidové úrovně není příliš stabilní.

Pracoviště, na kterém bylo prováděno měření nosníků, je uvedeno na obr. 53. Přístroj pro zatěžování nosníků je kombinací portálového jeřábu a hydraulického lisu. Měřený nosník je položen mezi příčníky statické části přístroje. Zbývající části přístroje, včetně ramena s hydraulicky poháněnými písty a stanoviště operátora, se mohou pohybovat po kolejnicích zabudovaných v podlaze místnosti.



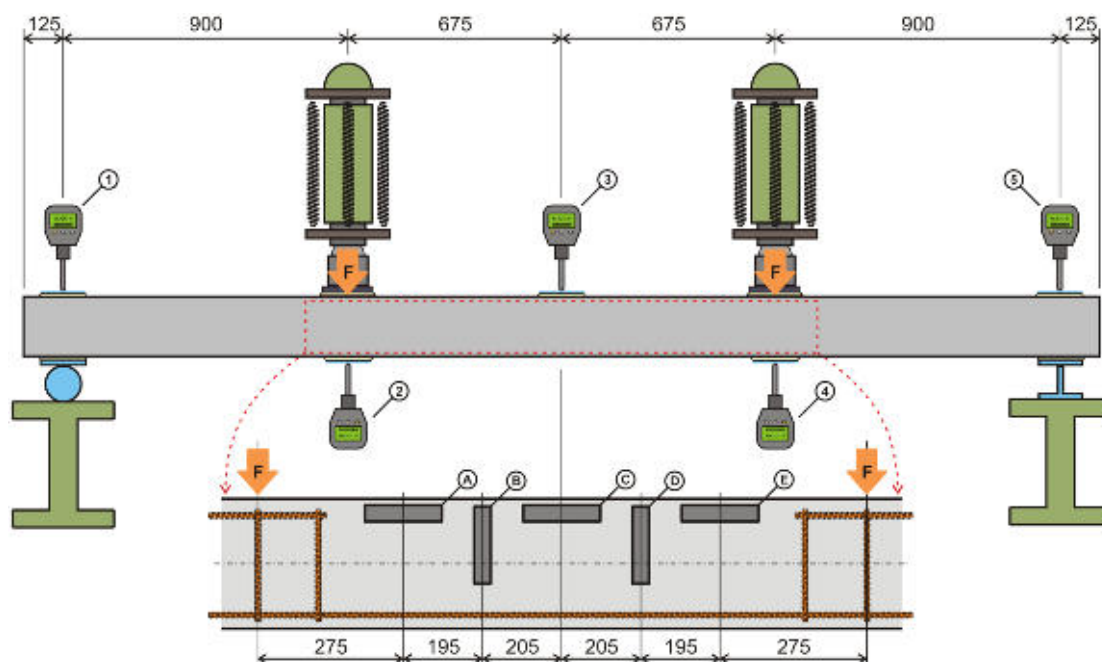
**Obr. 53** Pracoviště pro měření elektrických parametrů v průběhu dynamického namáhání betonového nosníku s integrovanými senzory





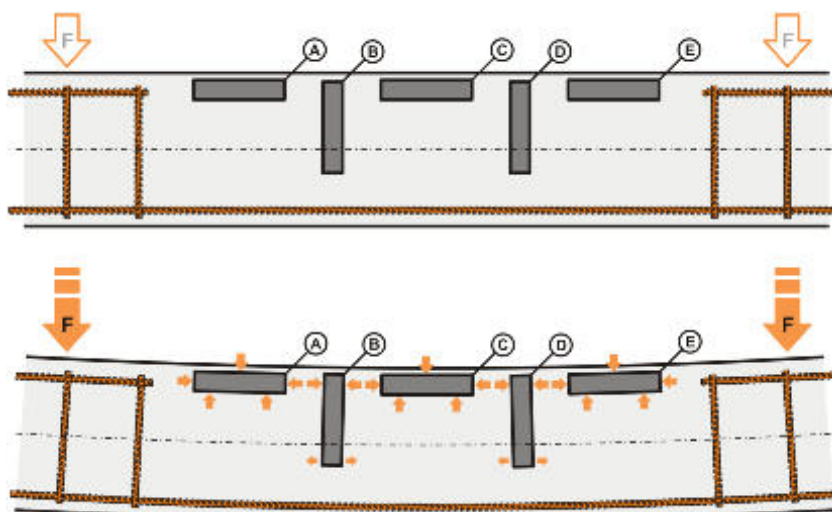
**Obr. 54** Způsob uložení nosníku, provedení styčných ploch a místa působení síly

Způsob uložení nosníku je uveden na obr. 54. Nosník byl položen na dvou podporách. Jedna byla pohyblivá (detail 1) a druhá pevná (detail 4). V místě dotyku podpory byl povrch nosníku vyrovnán pomocí hladké ocelové pásoviny, nalepené pomocí sádrového tmelu. Styčná místa, na která působí hydraulické písty, byla vyrovnána pomocí ocelových podložek, podlepených tmelem (detail 2). Během zatěžování nosníku byl měřen jeho průhyb na celkem pěti místech pomocí digitálních úchylkoměrů. Data z úchylkoměrů sloužila ke kontrole rovnoměrnosti zatěžování a dosažení limitních průhybů. V místě dotyku úchylkoměru a nosníku byly nalepeny skleněné podložky, zajišťující volný pohyb hřídelky s půlkulovým koncem po ploše (detail 3). Vzhledem k plánovanému testování až do porušení strukturální integrity, byly pod nosníkem, ve vzdálenosti 10 cm umístěny podpěry. Ty měly za úkol ochránit úchylkoměry umístěné pod nosníkem v případě úplného rozlomení (to bylo ale vzhledem k drátěné výztuži prvku nepravděpodobné). Laboratorní měřicí aparatura byla umístěna v blízkosti zatěžovaného prvku a připojena na elektrodový systém integrovaných senzorů prostřednictvím kabelů, vyvedených z objemu betonového nosníku. Detailní schematický náčrtek měřicího pracoviště a způsobu uložení jednotlivých senzorů v objemu materiálu je uveden na obr. 55. V náčrtu jsou okótovány důležité vzdálenosti a detail provedení drátěné výztuže v blízkosti senzorů.



**Obr. 55** Schematické znázornění uložení senzorů v objemu materiálu nosníku

Oba písty byly napojeny na stejný hydraulický okruh. To zajišťovalo rovnoměrné rozložení síly působící na nosník. Všechny senzory byly v nosníku umístěny v jeho podélné ose (při pohledu shora). Poloha senzorů při pohledu na přední část struktury je uvedena v detailu na obr. 55. Senzory označené A, C a E byly orientovány horizontálně, těsně pod povrchem horní části nosníku. Senzory B a D byly orientovány vertikálně a umístěny mezi senzory A, C a E. Drátěná výztuž je v blízkosti senzorů aplikována pouze ze spodní strany nosníku. Horní výztuž a svislé výztuhy byly v tomto místě vynechány, s cílem koncentrovat působení sil v centrálním prostoru vyplněném senzory. Výše popisované provedení výztuže zpevňuje oba konce nosníku. Předpokládané rozložení sil v nosníku během zatěžování je uvedeno na obr. 56.



**Obr. 56** Předpokládané rozložení sil během zatěžování nosníku



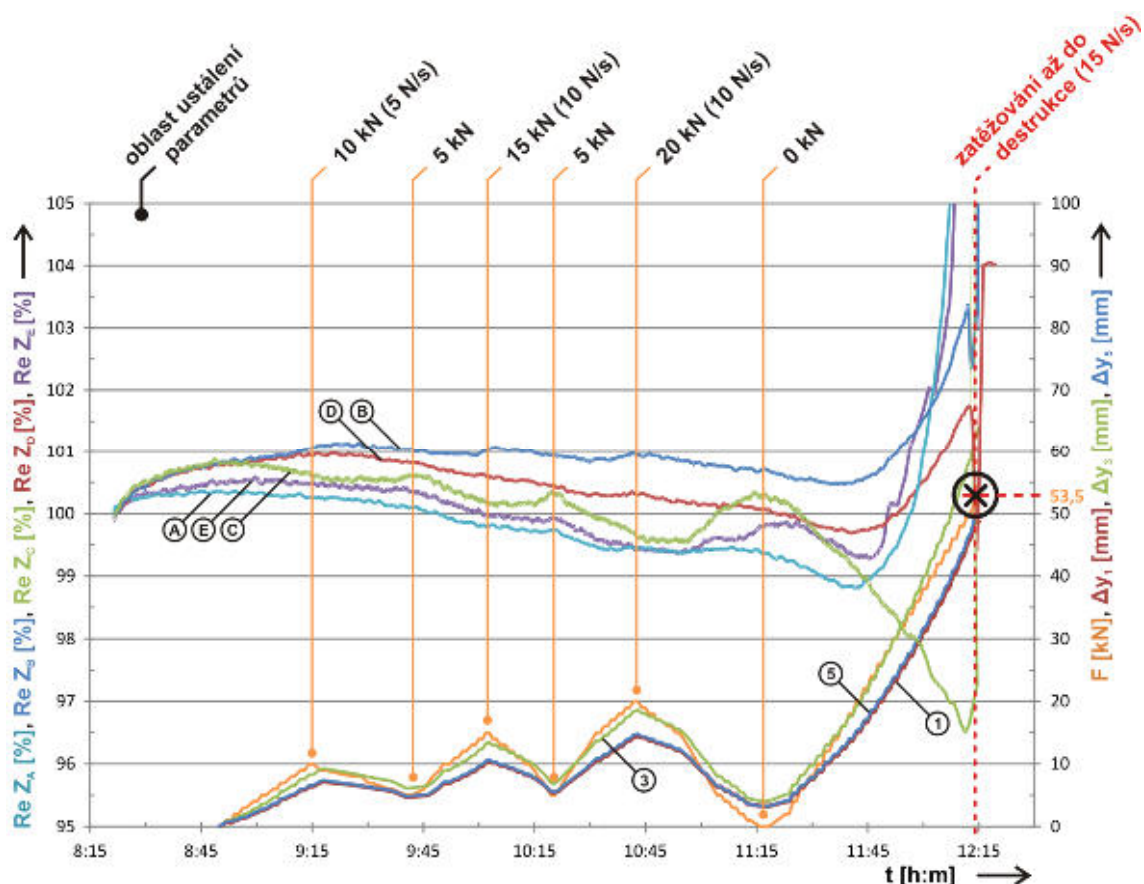
Ohýbání struktury by mělo dle předpokladu generovat sílu, která senzory A, C a E smršťuje v jejich podélné ose a zároveň způsobuje jejich prohýbání (působení sil je v obr. 56 naznačeno oranžovými šipkami). Velikost prohnutí senzorů a jejich smrštění v podélné ose by mělo být úměrné prohnutí nosníku. Senzory B a D by měly být ve své horní části smršťovány v příčné ose. V dolní části by naopak měly být mírně roztahovány. Míra roztažení by měla být úměrná prodloužení drátěné výztuže v dolní části struktury. Na obr. 57 – vlevo je uvedena fotografie nosníku s dobře patrným prohnutím během prováděného zatěžování, během kterého vznikaly ve spodní části nosníku trhliny. Ty se postupně zvětšovaly směrem od hrany do objemu materiálu.



**Obr. 57** Deformace nosníku během zatěžování (vlevo) a detail vznikajících trhlín v jeho spodní části (vpravo)

Měření trvalo celkem čtyři hodiny. Výsledné průběhy byly zaznamenány formou grafu, který je uveden na obr. 58. Na začátku měření byl nosník ponechán více než 30 minut v klidu, bez zatížení. Doba byla určena k ustálení elektrických parametrů senzorů integrovaných v nosníku. Následovaly tři cykly zatížení-odlehčení. První perioda probíhala rychlostí 5 N/s do hodnoty 10 kN. Následovalo nepřítis definované odlehčení způsobené chybou operátora. Odlehčeno bylo do hodnoty 5 kN a následovalo zatěžování s gradientem 10 N/s do hodnoty 15 kN. Po dalším odlehčení na hodnotu 5 kN byl nosník zatěžován s gradientem 10 N/s do hodnoty 20 kN. Odlehčení před posledním zatížením proběhlo až do nulové zatěžovací síly. Při posledním cyklu bylo cílem zvyšovat zatížení nosníku s gradientem 15 N/s až do porušení jeho strukturální integrity. Průběh zatěžovací síly je v grafu uveden oranžovou křivkou.

Elektrická odezva senzorů na cyklické zatěžování není příliš velká. Oproti předchozímu měření senzorů integrovaných v pilíři, kde změna relativní velikosti reálné části impedance dosahovala hodnoty až 50 %, je změna hodnoty u senzorů integrovaných v nosníku do 2 %. Největší odezvu vykazuje senzor C, který je v objemu materiálu smršťován v podélné ose a zároveň prohýbán (zelený průběh).



**Obr. 58** Odezva senzorů integrovaných v betonovém nosníku na cyklické namáhání

Nachází se v geometrickém středu a lze předpokládat, že úroveň jeho přetvoření je ze všech senzorů nejvyšší. Sensory A a E, orientované stejným způsobem, které jsou od geometrického středu vzdáleny 40 cm, vykazují nižší citlivost než senzor C. Odezva senzoru A je v grafu zaznamenána průběhem tyrkysové barvy, odezva senzoru E průběhem fialovým. Odezva senzoru E je o něco větší než odezva senzoru A. Jev si lze vysvětlit větším přetvářením materiálu v prostoru, kde byl umístěn senzor E. Tuto hypotézu potvrzuje způsob, jakým došlo k porušení nosníku při překročení limitního průhybu. Fotografie porušeného nosníku je uvedena na obr. 59.



**Obr. 59** Porušení strukturální integrity nosníku

K porušení strukturální integrity nosníku došlo při hodnotě zatěžovací síly 53,5 kN. Těsně před porušením byl již nosník v příčné ose prohnut o více než 60 mm. Porušení bylo lokální, na horní straně nosníku, v blízkosti místa působení pravého hydraulického pístu. Jednalo se o místo bez horní a příčné výztuže, v místě integrovaného senzoru E. Způsob porušení poukazuje na důležitost podélné výztuže v dolní části nosníku, která má na celkovou pevnost nosníku obrovský vliv. Jedním z ukazatelů, které potvrzují toto tvrzení, jsou trhliny, které postupně vznikaly od dolní hrany nosníku. Přestože trhliny začaly vznikat již při první zatěžovací periodě a s dalšími periodami docházelo k jejich zvětšování, tak ani jedna z nich nezpůsobila kolaps strukturální integrity nosníku. Trhliny byly jenom tak velké, jak jim dovolilo poměrné prodloužení spodní ocelové výztuže během prohýbání.

V grafu jsou vyneseny pouze hodnoty z úchylkoměrů 1, 3 a 5. Hodnoty z úchylkoměrů 2 a 4, které byly umístěny ze spodní strany nosníku, přímo naproti zatěžovacím pístům, přesně sledovaly pohyb obou pístů. Z naměřených dat bylo patrné, že zatěžování skutečně probíhalo rovnoměrně, protože oba průběhy byly naprosto totožné (v grafu by se překrývaly). Tvar křivky z těchto úchylkoměrů odpovídá průběhu zatěžovací síly (oranžová křivka). Z důvodu zachování přehlednosti grafu nebyly průběhy z úchylkoměrů 2 a 4 vyneseny. Data získaná z krajních úchylkoměrů 1 a 5, které snímaly nadzvedávání konců nosníku, také poukazují na velkou rovnoměrnost zatěžování.

Nejmenší citlivost na prohýbání měly senzory B a D, umístěné vertikálně ve vzdálenosti 20,5 cm od středu nosníku. Jejich odezva byla měřitelná až v časové oblasti před porušením strukturální integrity, během zatěžování s gradientem 15 N/s. Na velkou úroveň přetváření struktury reagovaly oba senzory stejným způsobem. Patrně vlivem roztahování dolních částí senzorů, způsobeném velkým průhybem, začala těsně před destrukcí reálná složka impedance stoupat. Stejný jev byl pozorován i u senzorů A a E. Strukturální změny uvnitř objemu materiálu při velké úrovni zatížení patrně způsobily porušení struktury senzorů a docházelo ke vzájemnému oddalování vodivých částic v matici kompozitu.

Naměřená odezva poukázala na zajímavý fakt, který se váže k problematice popisované v kap. 2.3 a kap. 4.2. Vzorky senzorů integrované do nosníku byly vyrobeny z jiné materiálové dávky než senzory integrované do pilíře. Složení směsi bylo v obou případech stejné, ale byl mírně pozměněn postup mísení. Po odlití směsi do forem byly vzorky senzorů určené pro zalití do nosníku vibrovány delší dobu. Takto vyrobené senzory byly méně porézní, vzhledově dokonalejší a pevnější. Mírná změna výrobního postupu, jejímž cílem bylo vyrobit senzory s lepšími mechanickými vlastnostmi, však očividně vedla k výraznému zhoršení schopnosti senzorů reagovat na zatížení prostřednictvím změny reálné složky impedance (snížení citlivosti na zatížení).

#### 4.4.3 Dlouhodobé měření elektrických parametrů

Dlouhodobé měření bylo prováděno za účelem zjistit vliv okolního prostředí na elektrické parametry senzorů integrovaných v nosníku. Nosník byl umístěn ve venkovním prostředí, pod střechou výrobní haly VUSTAH tak, aby na něj působily změny okolní teploty a vzdušné vlhkosti. Střecha haly a okolní budovy zajišťovaly, aby na nosník nepršelo a také aby měření nebylo ovlivněno přímým slunečním svitem. Měření probíhalo v letním období, v průběhu měsíce července, kdy denní teploty ve stínu dosahovaly téměř 40°C a noční teploty neklesaly pod 20°C.



**Obr. 60** Pracoviště pro dlouhodobé měření elektrických parametrů

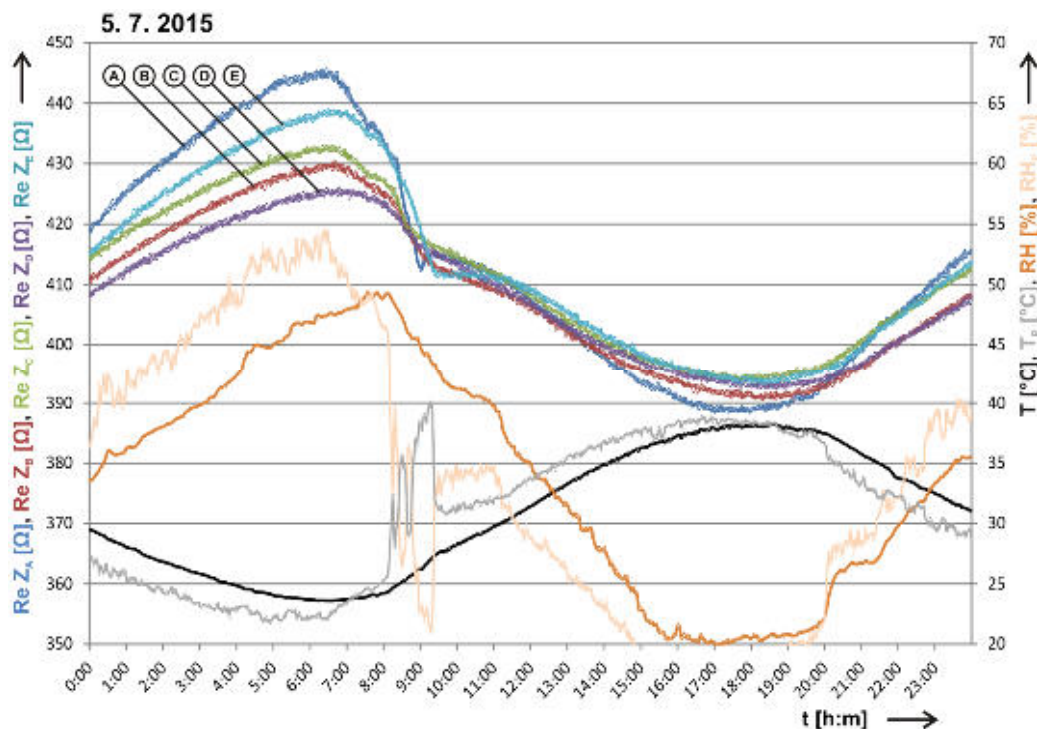
Měření bylo možné realizovat díky monitorovacímu systému, který byl vyvinut v rámci řešení dizertační práce a je detailně popsán v kap. 6. Jednotlivé bezdrátové měřicí body byly k nosníku připevněny pomocí plastových stahovacích pásek. Kabely elektrodového systému integrovaných senzorů byly k měřicímu bodu připojeny pomocí svorkovnice (modrý kabel na obr. 61). Sondy pro měření teploty a vlhkosti nemohly být v tomto případě zasunuty do objemu materiálu. Vzhledem k relativně malému průřezu nosníku by otvory o průměru 8 mm mohly výrazně ovlivnit jeho pevnost pro dynamická měření, proto nebyly ve struktuře vytvořeny. Sondy byly zasunuty mezi měřicí bod a nosník tak, aby aktivní část senzoru směřovala směrem k nosníku (šedý kabel na obr. 61).



**Obr. 61** Detail způsobu instalace bezdrátových měřicích bodů



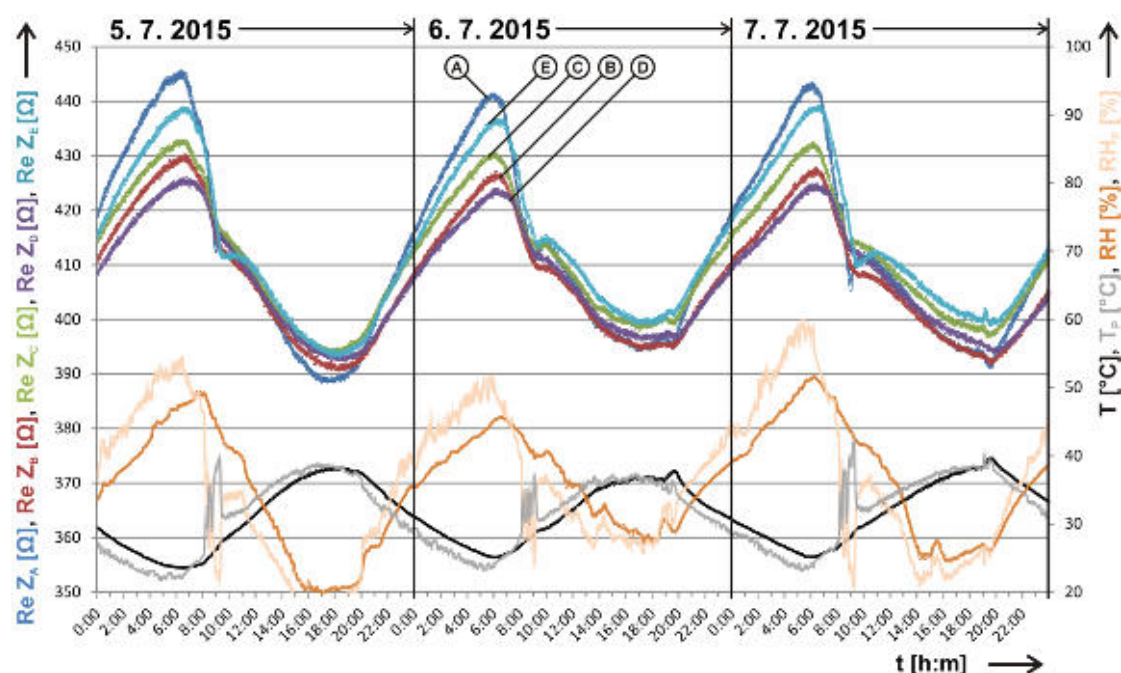
Komunikační ústředna monitorovacího systému byla umístěna v blízkosti nosníku. K přenosu naměřených dat do aplikace „Selfmonitoring Control Platform“ byla použita síť GSM, technologie GPRS a komunikační protokol TCP/IP. Podrobnému popisu aplikace se věnuje kap. 6.5.



**Obr. 62** Odezva senzorů integrovaných v objemu pilíře na změnu teploty a relativní vlhkosti v průběhu jednoho letního dne

Naměřená odezva senzorů v podobě změny reálné složky impedance v závislosti na okolní teplotě a relativní vlhkosti v průběhu jednoho dne je uvedena na obr. 62. Označení jednotlivých senzorů písmeny odpovídá nákresu na obr. 56 v předchozí kapitole. Průběhy jsou doplněny záznamem teploty a relativní vlhkosti, naměřeným pomocí sond (obr. 90) připojených k měřicím bodům. Jedna sonda byla umístěna v mezeře mezi měřicím bodem a povrchem pilíře, s cílem snímat průběh veličin v objemu materiálu (v grafu  $T [^{\circ}\text{C}]$ ,  $\text{RH} [\%]$ ). Druhá sonda byla umístěna volně v prostoru, s cílem snímat podmínky v okolí nosníku (v grafu  $T_p [^{\circ}\text{C}]$ ,  $\text{RH}_p [\%]$ ). Při vzájemném porovnání veličin měřených v objemu materiálu a v okolí nosníku je velmi dobře patrný vliv setrvačnosti. Ta je v případě teploty způsobena tepelnou kapacitou a v případě vlhkosti schopností betonu přebírat vlhkost prostředí. U průběhů měřených sondou umístěnou volně v prostředí jsou patrné prudší výkyvy, způsobené prouděním vzduchu kolem snímače. Extrémní výkyvy okolní teploty a vlhkosti v čase od 8 h do 9:30 h jsou způsobeny ranním sluncem, které díky své nízké poloze v tomto časovém intervalu prosvítalo mezerou mezi budovami přímo na nosník (i přes snahu tomu zabránit). Tento jev byl objasněn díky vlastnostem monitorovacího systému, který

umožňuje vzdáleně sledovat měřená data v reálném čase. Z naměřených závislostí reálné složky impedance je patrná silná závislost na vlhkosti. Velký vliv má i prostorové uspořádání senzorů v objemu materiálu. Sensory A, C a E byly umístěny v horní části nosníku (horizontálně), těsně pod povrchem. Výkyv okolní teploty a vlhkosti, způsobený osvětlením nosníku, se nejvíce projevil právě na těchto senzorech. Křivky získané ze senzorů B a D, které jsou umístěny vertikálně, hlouběji v objemu materiálu, tyto extrémy nevykazují a to díky setrvačnosti okolního materiálu, která zabraňuje prudkým změnám. Dlouhodobější měření, uvedené na obr. 63, potvrdilo, že závislost elektrických parametrů na okolních podmínkách není náhodná. V průběhu tří dnů změny okolních klimatických podmínek ovlivňovaly elektrické vlastnosti senzorů stejným způsobem.



**Obr. 63** Odezva senzorů integrovaných v objemu pilíře na změnu teploty a relativní vlhkosti v průběhu tří dnů

Závislost elektrických vlastností na okolních klimatických podmínkách představuje problém, který je třeba před praktickým využitím senzoru odstranit. Nabízí se možnost numerické kompenzace s použitím informací o aktuální teplotě a vlhkosti. Koncept monitorovacího systému s touto variantou počítá (kap. 6.2). Závislost elektrických parametrů senzoru na teplotě a vlhkosti musí být charakterizována prostřednictvím měření v klimatické komoře. Vliv změny teploty je třeba oddělit od vlivu změny vlhkosti a naopak. K tomu je nutné provést další měření v klimatické komoře s programově řízenou teplotou a vlhkostí. Kompenzace vlivu klimatických podmínek na elektrické vlastnosti je logickým pokračováním všech kroků popsaných v kapitole 4 a představuje výzvu pro budoucí práci na vývoji senzoru.



## 5 Vývoj měřicího přístroje pro charakterizaci betonových kompozitních materiálů

*„Největší chyba, kterou v životě můžete udělat, je mít pořád strach, že nějakou uděláte.“*

Elbert Hubbard

Elektrické vlastnosti vyrobených vzorků byly na začátku práce měřeny pomocí profesionální RLC měřicí stanice Agilent E4980A. Tento precizní přístroj dovoluje měřit impedanci pomocí čtyřvodičového zapojení v rozsahu kmitočtů 20 Hz až 2 MHz. Budicí napětí lze nastavit v rozmezí 0 V až 2 V a chyba měření se pohybuje při střední době vzorkování do 0,05 % z měřeného rozsahu. Automatizaci měření umožňuje datové rozhraní GPIB (*General Purpose Interface Bus*) a USB. Pomocí programu Agilent VEE bylo vytvořeno makro do tabulkového procesoru Microsoft Excel (obr. 64). Měření tak bylo možné spustit přímo z programu Excel a naměřená data ukládat formou tabulek a grafů.



**Obr. 64** Měřicí pracoviště s přístroji Agilent ovládaných pomocí softwaru VEE

Počátečním impulzem k vývoji vlastního přístroje byla potřeba měření v prostorách se zvýšenou prašností a rizikem mechanického poškození přístroje. Dalším důvodem byla potřeba umožnit pracovníkům VUSTAH samostatně měřit elektrické parametry při přípravě vzorků různých směsí.

Pracovní stanice Agilent pro tento účel nebyla vhodná hned z několika důvodů:

- vysoká pořizovací cena,
- malá odolnost proti vniknutí prachu do přístroje,
- nutnost zaškolení obsluhy – poměrně složité ovládání přístroje,
- pro možnost ukládání vzorků na paměťové médium musí být přístroj připojen přes datové rozhraní k PC,
- napájení přístroje pouze z rozvodné sítě 230 V.

Ve spolupráci s pracovníky VUSTAH byly specifikovány tyto požadavky na konstrukci vlastního laboratorního přístroje:

- odolnost proti vniknutí prachu, základní odolnost proti vniknutí vody,
- dostatečné rozlišení a přesnost měření impedance v rozsahu  $10\text{ k}\Omega \pm 20\%$ ,
- možnost měřit při budicím kmitočtu 1 kHz a napětí 1 V (špička-špička),
- snadné a pohodlné ovládání,
- napájení z akumulátoru.

Výše popsané požadavky vedly k návrhu a konstrukci měřicího přístroje s integrovaným převodníkem impedance, který je popsán v kapitole 5.1. Přístroj byl navržen, zkonstruován a jeho funkce ověřena v praxi. Při specifikaci požadavků na přístroj se předpokládalo, že bude možné připravovat kompozitní vzorky s přesně definovanými elektrickými parametry. Možnost přepínání měřicích rozsahů nebyla zahrnuta do seznamu požadavků na konstrukci přístroje. V období, kdy byla první verze přístroje testována, však ještě nebyla technologie přípravy betonové směsi vyladěna natolik, aby bylo možné vyrábět vzorky s přesně definovanými vlastnostmi. Tu se podařilo vyladit v časovém horizontu práce až mnohem později. Ve stávajícím stavu znamenala výše popsaná skutečnost problém, díky němuž bylo možné přístroj použít pouze na zlomek vyrobených vzorků, jejichž hodnota elektrického odporu odpovídala plánovanému rozsahu.

Nové poznatky o připravovaných vzorcích ukázaly, že u nejperspektivnějšího materiálu silně převažuje reálná složka impedance a při zatěžování vzorku dochází k její výrazné změně. Díky tomuto zjištění vznikla možnost zjednodušit měření pouze na reálnou část impedance. Vzhledem k elektrochemickým dějům probíhajících na rozhraní funkčního materiálu a elektrod není možné pro měření využít stejnosměrnou metodu. Působením stejnosměrného napětí by docházelo ke korozi elektrod a postupné degradaci materiálu (kap. 4.1). Po obvodové stránce lze měření reálné složky realizovat podstatně jednodušším způsobem, než měření komplexní impedance. Nová, jednoduchá

metoda měření (kap. 5.2.1) znamenala zásadní přínos i z hlediska vývoje monitorovacího systému (kap. 6), u kterého je klíčovým požadavkem velmi nízká spotřeba energie při dlouhodobém měření.

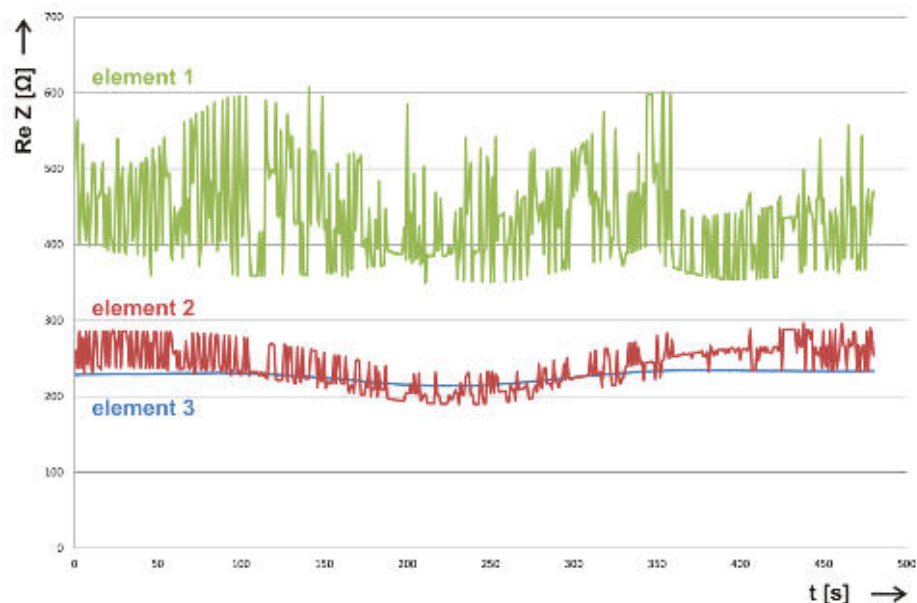
Cílem dalšího vývoje bylo najít a ověřit způsob měření, který by splňoval tyto požadavky:

- snadná realizovatelnost pomocí digitálního systému,
- malá proudová spotřeba zařízení (napájení z akumulátoru),
- dostatečná přesnost měření a citlivost na změnu reálné složky impedance,
- schopnost pracovat v širokém rozmezí pracovních rozsahů,
- možnost sledovat elektrickou odezvu vzorků v reálném čase,
- finančně nenáročné řešení.

Výše popsané požadavky vedly k vývoji měřicího modulu (kap. 5.2.2), který sloužil pro ověření měřicího principu a jeho citlivosti. Elektronika měřicího modulu byla navržena tak, aby v maximální míře využila možnosti stávající desky přístroje s integrovaným převodníkem impedance, se kterou byla propojena pomocí rozšiřujícího konektoru (viz obr. 66). Při testování měřicího modulu na reálných vzorcích funkčního materiálu se potvrdilo, že je navržená měřicí metoda dostatečně citlivá a navíc dovoluje měřit v širokém rozmezí hodnot.

Souběžně s vývojem a testováním měřicího modulu začaly ve zkušebně probíhat testy betonových prvků s větším počtem integrovaných senzorů, vyrobených z funkčního materiálu (kap. 4.4.2). Betonový prvek je při těchto testech cyklicky zatěžován a odlehčován v lisu. Měřením odezvy je sledována změna elektrických parametrů senzorů a vyhodnocována citlivost na úroveň zatížení. Odezvu je třeba měřit současně na všech senzorech tak, aby bylo možné hodnoty vzájemně porovnat. Při těchto testech, při kterých se zpočátku využívaly měřicí stanice Agilent, vyvstal zajímavý problém. Tím bylo vzájemné ovlivňování výsledků měření při použití dvou a více měřicích stanic. Každá stanice budila měřený vzorek excitačním signálem nepřetržitě a vzhledem k elektrickým vlastnostem materiálu docházelo k vzájemnému superponování těchto signálů do právě měřeného vzorku. Příklad zkresleného měření je uveden na obr. 65. Během zatížení a odlehčení betonového prvku byla měřena velikost reálné složky impedance u tří senzorů integrovaných v objemu materiálu. Měřicí frekvence byla nastavena na hodnotu 100 Hz. Prvek byl zatěžován v lisu od nulového zatížení lineárně do hodnoty 1,5 MN a poté opět lineárně odlehčován. Průběh naměřený na senzoru číslo 3 (modrý průběh) odpovídá skutečné odezvě měřeného vzorku. Průběh naměřený na senzoru číslo 1 a 2 je zatížen zkreslením, způsobeným superponováním budicího signálu, který se přenáší kapacitní vazbou

v objemu materiálu. Velikost zkreslení je závislá na aktuálně využívaném měřicím rozsahu a také na vzájemné poloze právě měřeného senzoru a senzoru, jehož budicí signál měření ruší. Výše popsany problém v podstatě znemožňoval současné měření většího počtu integrovaných senzorů pomocí profesionálních měřicích stanic Agilent E4980A.



**Obr. 65** Vzájemné ovlivňování měřicích stanic Agilent

Konstrukční provedení měřicího modulu nedovolovalo jeho použití při praktickém měření. Bylo třeba tento ověřený měřicí princip aplikovat do nového laboratorního přístroje, který v sobě sloučil všechny dosavadní poznatky v oblasti měření vzorků a umožnil plnohodnotné využití. Při specifikaci požadavků na nový přístroj byl seznam parametrů rozšířen o tyto nové poznatky. Cílem bylo vytvořit laboratorní měřicí aparaturu, kterou bude možné použít pro praktická měření. Seznam požadavků byl tedy rozšířen o:

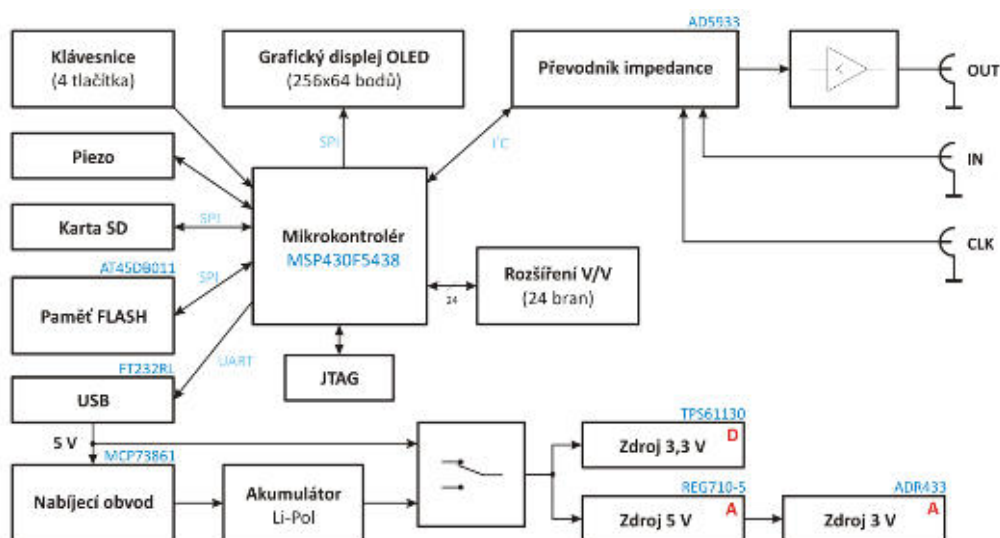
- možnost nezávislého měření alespoň na pěti kanálech,
- měření doplňkových údajů o teplotě a vlhkosti uvnitř betonového bloku,
- automatické vyhledání rozsahu s maximální možnou citlivostí na změnu odporu,
- vložení údaje o reálném čase do záznamu měření.

V průběhu řešení dizertační práce byl navržen a zkonstruován měřicí přístroj založený na integrovaném převodníku impedance, měřicí modul, který sloužil k ověření nové měřicí metody, a laboratorní měřicí aparatura. Při vývoji měřicí aparatury byly zohledněny všechny dosavadní zkušenosti a poznatky. Díky tomu je v současném stavu vývoje plně využitelná jak pro statická, tak pro dynamická měření. Detailnímu popisu jednotlivých fází vývoje se věnují podkapitoly 5.1, 5.2 a 5.3.

## 5.1 Využití integrovaného převodníku impedance

Koncept měřicího přístroje vychází z požadavku na možnost měřit impedanci při referenčním kmitočtu 1 kHz a velikosti budicího napětí 1 V<sub>p-p</sub>. Hodnota reálné složky impedance měřených vzorků byla plánována na 10 kΩ ± 20 %. Pro takto definované požadavky bylo ideální využít integrovaný převodník impedance AD5933 [37]. Využití tohoto obvodu umožnilo výrazně urychlit vývoj celého zařízení. Obvodový návrh se zjednodušil na vytvoření digitálního systému, který umožní konfigurovat převodník, spouštět měření s přednastavenými parametry a ukládat či jinak reprezentovat naměřené hodnoty.

Blokové schéma přístroje je uvedeno na obr.66. Hlavním řídicím prvkem je mikrokontrolér MSP430F5438A [38], ke kterému je převodník impedance AD5933 připojen pomocí sériového komunikačního rozhraní I<sup>2</sup>C (*Inter-Integrated Circuit*). K ovládání slouží klávesnice a grafický displej typu OLED (*Organic Light-Emitting Diode*). Displej má rozlišení 256 × 64 obrazových bodů. Každý obrazový bod lze řídit s rozlišením intenzity jasu v šestnácti úrovních. Pro lepší interakci s obsluhou je přístroj vybaven piezoreproduktorem, který zajišťuje akustickou odezvu na stisk tlačítek klávesnice a upozorňuje na důležité stavy přístroje. Pro ukládání naměřených hodnot byl přístroj vybaven vnitřní pamětí typu *Flash* a slotem pro paměťovou kartu SD (*Secure Digital*). Oba druhy pamětí jsou připojeny prostřednictvím sériového komunikačního rozhraní SPI (*Serial Peripheral Interface*). Integrace rozhraní USB má v přístroji dvě důležité role. První je možnost přenosu naměřených dat do PC (*Personal Computer*) a tou druhou je nabíjení vestavěného akumulátoru.



**Obr. 66** Blokové schéma přístroje s integrovaným převodníkem impedance

Přenos naměřených dat do PC umožňuje obvod FT232RL od společnosti FTDI [39]. Obvod slouží jako převodník rozhraní UART (*Universal Asynchronous Receiver and*

*Transmitter*) na USB. Integruje v sobě kompletní fyzickou vrstvu sběrnice USB a rozhraní UART. Po logické stránce funguje jako tzv. zařízení USB typu „host“, pracuje v režimu CDC (*Communications Device Class*), a připojuje se do kořenového rozbočovače sběrnice USB v PC. Na úrovni ovladačů se v operačním systému chová jako virtuální sériový port.

Sběrnice USB poskytuje napájecí napětí o velikosti 5 V s možností proudového odběru do 500 mA. Této vlastnosti je využíváno pro dobíjení vnitřního akumulátoru. V přístroji je využíván akumulátor typu Li-Po (*Lithium-ion Polymer battery*), který dosahuje hustoty uložené energie až 250 Wh/kg [40]. Díky tomu je možné akumulátor o kapacitě 1 A/h integrovat do konstrukce přístroje, a tím zajistit jeho dlouhodobý provoz na jedno nabití. Daní za výhody v podobě velké kapacity a nízké hmotnosti jsou specifické požadavky akumulátoru na nabíjení a vybíjení. Nabíjecí cyklus musí být velmi přesně kontrolován. V závislosti na stupni vybití je akumulátor nejdříve nabíjen v režimu konstantního proudu a při překročení určitého napětí dochází k přechodu na nabíjení konstantním napětím, při kterém klesá nabíjecí proud až téměř k nule. Nabíjení je ukončeno při dosažení minimálního nabíjecího proudu. Akumulátor nesmí být vybíjen pod určitou velikost napětí. Kontrolované nabíjení je v přístroji zajištěno obvodem MCP73861 [41]. Ochrana proti nadměrnému vybití je zajištěna na úrovni programu přístroje, který periodicky kontroluje napětí akumulátoru, a při poklesu pod nastavenou velikost je obsluha nejprve varována výpisem na displej. Pokud je přístroj dále v provozu, tak při dalším poklesu napětí dojde k jeho vypnutí. Další stupeň ochrany proti překročení maximálního napětí při nabíjení, nebo poklesu pod minimální napětí při vybíjení je integrován přímo v obalu akumulátoru na miniaturní desce s elektronikou. Ta zajistí elektrické odpojení článku od přírodních vodičů při překročení povoleného rozsahu napětí, nebo maximálního povoleného proudu.

Bloky napájecí části přístroje zajišťují transformaci a distribuci různých napájecích napětí k analogovým a digitálním obvodům přístroje. Napájecí napětí o velikosti 5 V je na vstupu napájecí části dostupné pouze při připojení ke sběrnici USB. Pokud je přístroj napájen z vestavěného akumulátoru, tak na vstupu napájecí části může být napětí v rozsahu 3,2 V až 4,2 V dle stupně jeho vybití. Digitální obvody přístroje jsou napájeny napětím o velikosti 3,3 V. Napájení digitálních obvodů konstantním napětím 3,3 V zajišťuje spínaný zdroj typu SEPIC (*Single-Ended Primary-Inductor Converter*) využívající integrovaný obvod TPS61130 [42]. Zdroj dokáže výstupní napětí oproti vstupnímu zvyšovat, ale i snižovat. Zpětná vazba z výstupního napětí zajišťuje jeho stabilizaci na nastavených 3,3 V. Díky možnosti zvyšování vstupního napětí lze využít plnou kapacitu napájecího akumulátoru. Specifické nároky na napájení má převodník impedance AD5933. Výrobce doporučuje oddělit napájecí napětí pro analogovou



(vstup AVDD) a digitální část obvodu (vstup DVDD). Při napájení obou napájecích vstupů obvodu z digitální napájecí větve hrozí pronikání digitálního šumu do citlivých obvodů analogové části, čímž by prudce vzrostla chyba měření. Pro napájení analogové části je využita přesná napěťová reference ADR433, která se vyznačuje velice nízkým výstupním šumem [43]. Reference vyžaduje napájecí napětí minimálně 5 V, které je zajištěno pomocí nábojové pumpy tvořené obvodem REG710-5 [44] s kondenzátory. Použitá napěťová reference má koeficient potlačení změn v napájecím napětí (PSRR) až  $-70$  dB, který zabraňuje pronikání případnému impulsnímu rušení z nábojové pumpy do napájení analogové části převodníku impedance. Za účelem potlačení možného šumu jsou na desce plošných spojů odděleny zemnicí plochy analogové a digitální části. Tyto dvě země jsou dle doporučených návrhových pravidel propojeny v jednom bodě a to v těsné blízkosti vývodů pouzdra převodníku impedance (obr. 67).



**Obr. 67** Desky plošných spojů přístroje s integrovaným převodníkem impedance

Nevyužité brány mikrokontroléru jsou vyvedeny do konektoru, který umožňuje budoucí rozšíření funkcionality přístroje (využívá jej elektronika měřicího modulu, kap. 5.2). Elektronika přístroje byla zabudována do sériové konstrukční krabičky z hliníkové slitiny, ve které byly vyfrézovány otvory pro displej, ovládací prvky a konektory (obr. 68). Měřicí elektrody jsou připojeny pomocí konektorů SMA (*Subminiature Version A*). Na pravém boku je umístěn konektor USB, vypínač napájení a slot pro kartu SD. Proudová spotřeba přístroje se liší v závislosti na množství rozsvícených bodů na displeji OLED. Průměrná spotřeba přístroje v aktivním režimu je do 100 mA. Vzhledem ke kapacitě akumulátoru 1 A/h je odhadovaná doba nepřetržitého provozu až 10 h.



**Obr. 68** Měřicí přístroj s integrovaným převodníkem impedance

Kalibrace měření byla provedena pro hodnotu impedance 10 k $\Omega$ . V oblasti 7 k $\Omega$  až 20 k $\Omega$  je chyba měření v intervalu  $\pm 1$  %. V oblasti od 6,7 k $\Omega$  do 90 k $\Omega$  se chyba měření pohybuje v intervalu  $\pm 2$  %. Nejlepších výsledků měření lze dosáhnout v poměrně úzkém rozmezí kolem hodnoty, pro kterou byl záznamník kalibrován. V tomto rozmezí vykazuje směrnice chyby průběh, který lze dodatečně kompenzovat pomocí vhodné aproximace.

#### 5.1.1 Mikrokontrolér MSP430F5438A

Pro konstrukci přístroje byl zvolen šestnáctibitový mikrokontrolér od firmy Texas Instruments. Důvodem volby byla možnost využít dostatečně velký výpočetní výkon při velmi malé proudové spotřebě. Architektura řady MSP430 je ve své kategorii považována za jednu z neúspornějších. Velkou výhodou je široká nabídka mikrokontrolérů, které mají shodné jádro a liší se pouze počtem integrovaných komponent. Základní parametry řady jsou uvedeny v tab. 7.

**Tab. 7** Typické parametry řady MSP430 [45]

|                                 |                                            |
|---------------------------------|--------------------------------------------|
| architektura                    | 16 bit, RISC                               |
| topologie                       | von Neumannova (společný adresový prostor) |
| počet instrukcí                 | 27 fyzických + 24 emulovaných              |
| spotřeba v aktivním režimu      | menší než 100 $\mu$ A / MHz                |
| spotřeba pro uchování dat v RAM | 0,1 $\mu$ A                                |
| spotřeba pro činnost obvodu RTC | menší než 1 $\mu$ A                        |

Typ MSP430F5438A [38] je vybaven 256 kB pamětí typu „Flash“ a 16 kB operační pamětí typu RAM (*Random Access Memory*). Paměť Flash je možné využít nejen jako paměť programu, ale zároveň může sloužit i pro ukládání dat. Oproti údajům uvedeným v tab. 7 má spotřebu v aktivním režimu 356  $\mu$ A / MHz a spotřebu pro uchování dat v paměti RAM 2,3  $\mu$ A. Reálná spotřeba mikrokontroléru závisí na počtu využívaných vnitřních komponent a na jejich pracovní frekvenci, kterou lze v širokém rozmezí

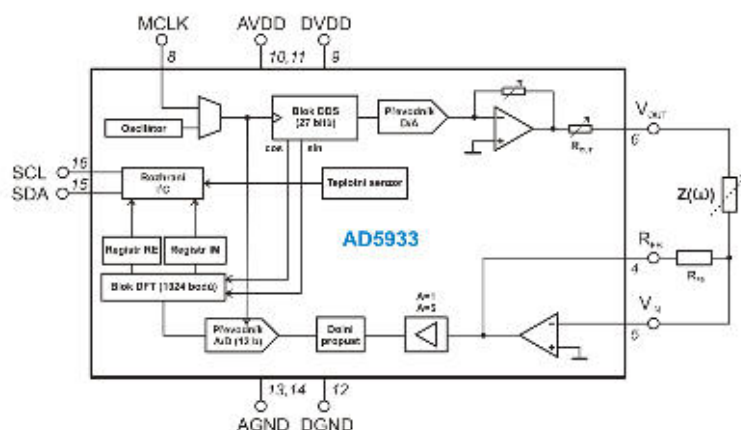
programově měnit. Maximální frekvence jádra je 25 MHz. Tu lze ve vnitřní struktuře generovat několika způsoby, nebo může být přivedena z vnějšku. Pro konfiguraci hodinové frekvence a její distribuci do jednotlivých vnitřních bloků slouží komponenta UCS (*Unified Clock System*). Z ní vychází tři hodinové signály MCLK (*Main Clock*), SMCLK (*Sub-Main Clock*) a ACL (*Auxiliary Clock*). Konfigurací zdroje hodinového kmitočtu pro jednotlivé bloky lze zajistit vnitřní synchronizaci a volbu optimální frekvence s ohledem na celkovou proudovou spotřebu.

Pro architekturu MSP430 je typická společná adresová MAB (*Memory Address Bus*) a datová směrnice MDB (*Memory Data Bus*), na kterou jsou připojeny všechny vnitřní periferie. Přímý přístup do paměti umožňuje tříkanálový řadič DMA (*Direct Memory Access*). Pro možnost programování a ladění je mikrokontrolér vybaven rozhraním JTAG (*Joint Test Action Group*) a SBW (*Spy-By-Wire*).

Při volbě konkrétního typu mikrokontroléru bylo důležité, aby měl dostatečný počet vstupně/výstupních bran pro připojení všech plánovaných komponent a dostatečnou kapacitu paměti programu. Velkou výhodou je i hardwarová podpora sériových komunikačních rozhraní I<sup>2</sup>C, SPI a UART, kterou zajišťují vnitřní bloky USCI\_A a USCI\_B (*Universal Serial Communication Interface*). Vestavěný převodník A/D s rozlišením 12 bitů je využit pro měření napětí napájecího akumulátoru. Mezi další zajímavé komponenty, které nejsou v současné verzi řídicího programu využívány a které lze využít pro budoucí rozšíření nebo optimalizaci funkce, patří 32 bitová násobička (MPY32) a blok generování cyklických redundantních součtů (CRC16).

### 5.1.2 Převodník impedance AD5933

Převodník impedance AD5933 je precizní integrovaný obvod od firmy Analog Devices [37]. Ve své vnitřní struktuře integruje převodník A/D, s rozlišením 12 bitů a vzorkovací frekvencí 1 MSPS, společně s bloky zajišťujícími generování budícího signálu a analýzu změny signálu po průchodu měřeným prvkem (obr. 69).

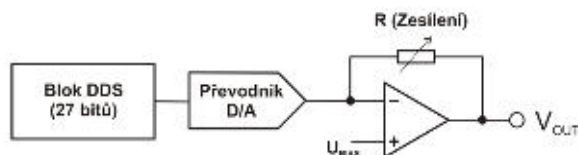


**Obr. 69** Blokové schéma převodníku impedance AD5933 [37]

Princip činnosti spočívá v porovnání budicího signálu se signálem pozměněným po průchodu měřeným prvkem. V závislosti na charakteru měřeného prvku dochází ke změnám v amplitudové a časové oblasti. Signál je vzorkován pomocí převodníku A/D a zpracován pomocí diskrétní Fourierovy transformace (DFT), kterou zajišťuje integrovaný digitální signálový procesor (DSP). Algoritmus DFT lze reprezentovat pomocí vztahu (10):

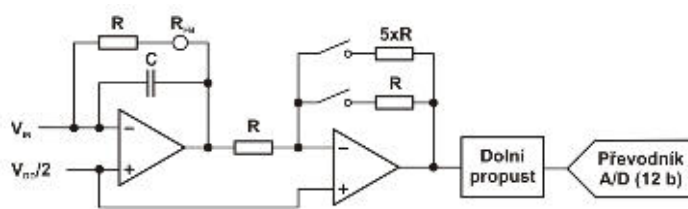
$$X(f) = \sum_{n=0}^{1023} (x(n) \cdot (\cos(n) - j\sin(n))) \quad (10)$$

kde  $X(f)$  je velikost signálu při dané frekvenci  $f$ ,  $x(n)$  výstupní hodnota z převodníku A/D. Testovací vektory  $\cos(n)$  a  $\sin(n)$  jsou pro danou frekvenci poskytovány blokem přímé digitální syntézy (DDS), který se nachází v budicí části obvodu (obr. 70). Pro každou měřenou frekvenci je ukládáno 1024 vzorků.



**Obr. 70** Budicí část obvodu AD5933 [37]

Snímací část obvodu obsahuje převodník proudu na napětí, programovatelný zesilovač, antialiasingový filtr a převodník A/D (obr. 71).



**Obr. 71** Snímací část obvodu AD5933 [37]

Měřená impedance je připojena mezi svorky  $V_{OUT}$  budicí části obvodu a  $V_{IN}$  snímací části. První stupeň v podobě převodníku proudu na napětí vytváří virtuální zem v polovině napájecího napětí a převádí proud tekoucí měřenou impedancí na velikost napětí. Signál je v druhém stupni zesílen programovatelným zesilovačem se ziskem 1, nebo 5 a přiveden přes dolnofrekvenční propust na vstup převodníku A/D. Výsledkem výpočtu DFT jsou dvě čísla, uložená ve formátu dvojkového doplňku v šestnáctibitových registrech „Real register“ a „Imaginary register“. Výpočet velikosti impedance a fázového posunu signálu musí být proveden v nadřazeném systému – mikrokontroléru. Komunikace s mikrokontrolérem probíhá pomocí sériového rozhraní I<sup>2</sup>C.

### 5.1.3 Programové vybavení

Programové vybavení měřicího přístroje s integrovaným převodníkem impedance spočívá v obslužném programu řídicího mikrokontroléru. Řídicí program obstarává funkce spojené s konfigurací a vyčítáním naměřených hodnot z obvodu AD5933. Uživatel může prostřednictvím menu přístroje nastavit základní parametry měření (velikost budicího napětí, budicí frekvenci, případně rozmítání budicí frekvence v určitém rozsahu).



**Obr. 72** Nastavení budicí frekvence v menu měřicího přístroje

Naměřená data jsou ukládána do paměti v podobě karty typu SD. Přístroj pracuje se souborovým systémem FAT32 (*File Allocation Table*), který umožňuje přenos vytvořených souborů do PC k následnému zpracování. Soubory jsou ukládány ve formátu „\*.csv“, který umožňuje pohodlné zpracování např. pomocí tabulkového procesoru Microsoft Excel.

### 5.1.4 Diskuze vlastností integrovaného obvodu AD5933

Při stanovení požadavků na vývoj měřicího přístroje s integrovaným převodníkem impedance nebyl kladen důraz na možnost přepínání měřicích rozsahů. V časovém horizontu vývoje materiálu, ve kterém bylo rozhodnuto o vývoji měřicího přístroje, se zdál být požadavek na přepínání rozsahu zbytečný. Během testování vyrobených vzorků se ukázalo, že vyrobit materiál s přesně definovanými elektrickými vlastnostmi je velmi obtížné. Rozptyl hodnot byl řádově ve stovkách ohmů. To se ukázalo jako největší problém z hlediska využitelnosti přístroje s integrovaným převodníkem. Měřicí rozsah obvodu AD5933 je nastaven pomocí zpětnovazebního rezistoru  $R_{FB}$  (obr. 71). Jedinou možností, jak změnit rozsah ve stávající konstrukci, by bylo nahradit původní rezistor za rezistor jiné hodnoty.

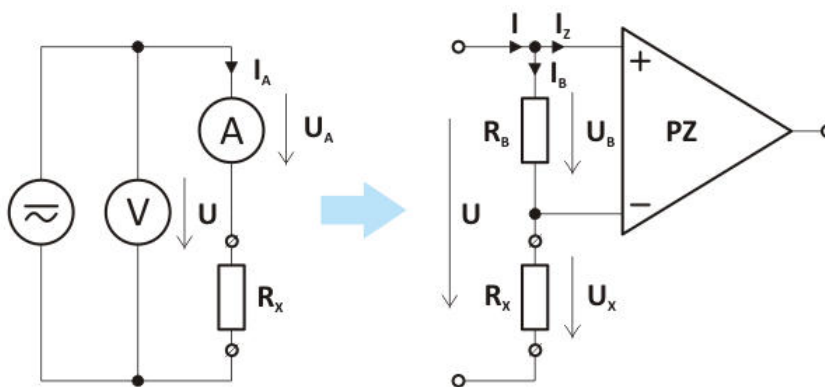
V této fázi práce bylo rozhodnuto vyzkoušet nový princip měření, který se jevil vzhledem k novým vlastnostem materiálu jako velmi perspektivní.

## 5.2 Návrh nové měřicí metody

U nově připravených vzorků materiálu docházelo při jejich zatěžování k významné změně reálné složky impedance. Bylo třeba najít novou měřicí metodu, která by umožnila měřit reálnou složku impedance, a její vlastnosti ověřit v praxi.

### 5.2.1 Nová měřicí metoda

Nejjednodušší metodou měření elektrického odporu je Ohmova metoda [46]. Jedná se o nepřímou metodu měření elektrické veličiny, při níž je hodnota odporu vypočítána na základě změřené velikosti napětí a proudu.



**Obr. 73** Využití Ohmovy metody měření elektrického odporu

V levé části obr. 73 je uvedeno principiální schéma zapojení měřicí metody, která je v odborné literatuře označována jako „měření s napěťovou chybou“ [47]. Velikost měřeného odporu  $R_x$  lze vypočítat dle vztahu:

$$R_x = \frac{U - U_A}{I_A} \quad [\Omega]. \quad (11)$$

Za předpokladu, že je úbytek napětí na ampérmetru zanedbatelný, je možné vztah (11) zjednodušit:

$$R_x \approx \frac{U}{I_A} \quad [\Omega]. \quad (12)$$

S ohledem na možnost zjednodušení výpočtu zanedbáním úbytku napětí na ampérmetru je metoda při využití konvenčních měřidel vhodná zejména pro měření velkých odporů.

Navržená měřicí metoda vychází z výše uvedeného principu. Ampérmetr je nahrazen převodníkem proudu na napětí, který je realizován pomocí odporového bočníku ( $R_B$ ) a přístrojového zesilovače (PZ).



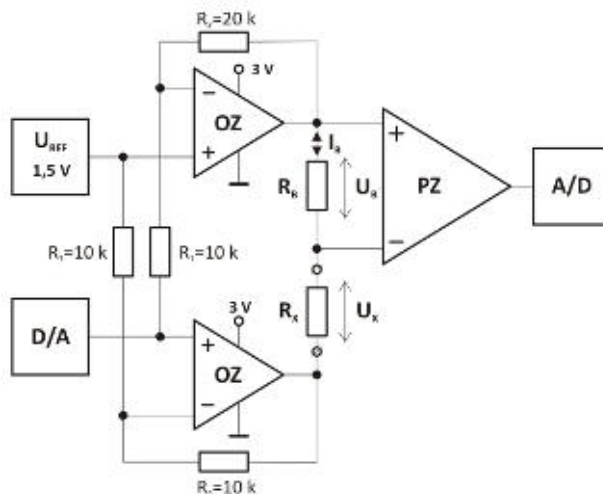
Vzhledem k velkému vstupnímu odporu přístrojového zesilovače lze proud ( $I_Z$ ) tekoucí do jeho vstupu zanedbat. Dle prvního Kirchhoffova zákona platí, že:

$$I = I_B + I_Z \quad [\text{A}]; \quad I_Z = 0 \rightarrow I = I_B \quad [\text{A}]. \quad (13)$$

Po zanedbání proudu tekoucího do přístrojového zesilovače je proud tekoucí bočnickem přímo úměrný velikosti vstupního napětí ( $U$ ) a nepřímo úměrný součtu odporu bočnicku ( $R_B$ ) a měřeného odporu ( $R_X$ ). Úbytky napětí na obou odporech se rozdělí ve vzájemném poměru jejich hodnot. Pokud je hodnota odporu bočnicku ( $R_B$ ) konstantní, je možné velikost měřeného odporu vypočítat pomocí známého napětí ( $U$ ) a napětí ( $U_B$ ) změřeného přístrojovým zesilovačem dle vztahu:

$$R_X = \frac{U - U_B}{I} \rightarrow R_X = \frac{U - U_B}{\frac{U_B}{R_B}} \rightarrow R_X = R_B \cdot \frac{U - U_B}{U_B} \quad [\Omega]. \quad (14)$$

V případě kompozitního betonu není možné pro měření odporu využít stejnosměrné napětí. Působením stejnosměrného napětí v silně alkalickém prostředí betonu by docházelo k elektrochemické korozi elektrodového systému (viz kap 4.1). Výše uvedená měřicí metoda byla upravena tak, aby bylo možné měřený odpor budít střídavým napětím. Pro aplikaci měřicího principu ve smíšeném, analogově-digitálním systému je nejjednodušší variantou generování obdélníkového průběhu.



**Obr. 74** Princip měření odporu pomocí střídavého buzení zátěže

V zapojení na obr. 73 byl zdroj stejnosměrného napětí nahrazen komplementární dvojicí operačních zesilovačů v zapojení „push-pull“ (obr. 74). Horní z dvojice zesilovačů je zapojen jako invertující, dolní jako neinvertující. Kvůli zachování symetrie výstupního signálu musí mít oba zesilovače stejné zesílení. Napětíové zesílení invertujícího zesilovače je dáno vztahem:

$$A_U = \frac{U_{VYST}}{U_{VST}} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{20 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = -2 \quad [-], \quad (15)$$

napět'ové zesílení neinvertujícího zesilovače vztahem:

$$A_U = \frac{U_{VYST}}{U_{VST}} = 1 + \frac{R_4}{R_3} = 1 + \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 2 \quad [-]. \quad (16)$$

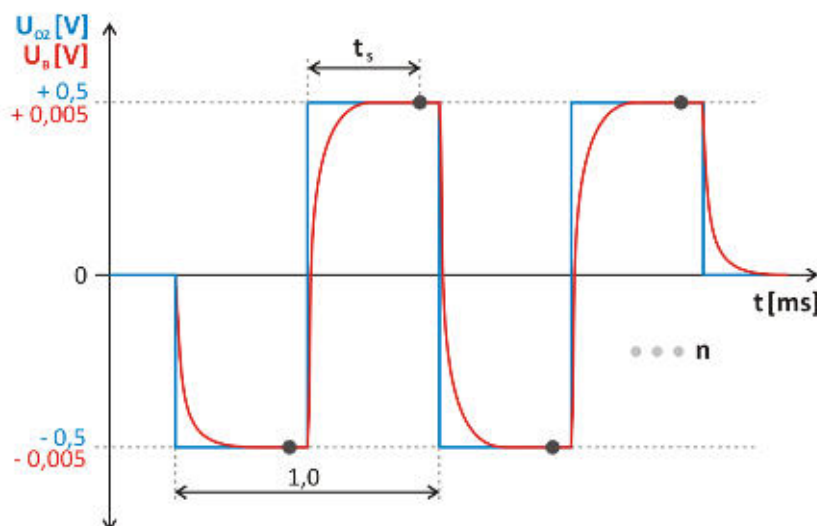
Zesílení neinvertujícího zesilovače je vždy větší než 1, proto bylo zvoleno zesílení 2, kterého lze snadno dosáhnout u obou typů zapojení. Dvojice zesilovačů je buzena napětím, které lze programově generovat pomocí převodníku D/A. Použitý typ převodníku MCP4921 má jeden výstupní kanál s rozlišením 12 bitů. Referenční napětí ( $U_{REF}$ ), které určuje výstupní rozsah převodníku, je přivedeno z vnějšku. Jeho velikost je dána velikostí výstupního napětí 3 V obvodu ADR433, který je osazen na původní desce elektroniky. Výstupní napětí převodníku lze tedy digitálně nastavovat v rozsahu 0 V až 3 V. Nejmenší krok odpovídá nejméně významnému bitu digitální hodnoty (LSB) a lze ho vypočítat ze vztahu pro hodnotu výstupního napětí:

$$U_{D/A} = \frac{U_{REF} \cdot A \cdot D_N}{2^n} \quad [V], \quad (17)$$

kde  $A$  je velikost napět'ového zesílení výstupního obvodu převodníku,  $D_N$  je digitální hodnota a  $n$  je počet bitů. Napět'ové zesílení je možné nastavit na hodnotu 1 nebo 2. Výchozí velikost napět'ového zesílení je  $A = 1$ . Pro potřeby zapojení není důvod tuto hodnotu měnit. Pro zjištění velikosti napětí, které odpovídá nejmenšímu kroku, je  $D_N = 1$ . Rozlišení převodníku je  $n = 12$ . Dosazením do vzorce pro výpočet výstupního napětí lze vypočítat velikost napětí, které odpovídá jednomu LSB (*Least Significant Bit*):

$$U_{1LSB} = \frac{U_{REF} \cdot A \cdot D_N}{2^n} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 1}{2^{12}} = 0,7324 \text{ mV}. \quad (18)$$

Komplementární dvojice zesilovačů (obr. 74) je napájena napětím o velikosti 3 V, které poskytuje spínaný měnič umístěný na desce měřicího bloku (obr. 76). Zdroj referenčního napětí o velikosti 1,5 V slouží k vytvoření tzv. „virtuální země“ pro oba operační zesilovače. Cílem je vytvořit stejnosměrné posunutí výstupního napětí zesilovačů o 1,5 V tak, aby nebylo nutné pro obousměrné buzení zátěže napájet operační zesilovače zdrojem symetrického napětí. Výstupní napětí z převodníku D/A rozvažuje komplementární dvojici obdélníkovým signálem o frekvenci 1 kHz (obr. 75 – modrý průběh). Generování obdélníkového průběhu je zajištěno časově synchronizovaným střídáním tří hodnot výstupního napětí.



**Obr. 75** Budicí signál ( $U_{OZ}$ ) a reakce měřeného prvku snímaná na bočníku ( $U_B$ )

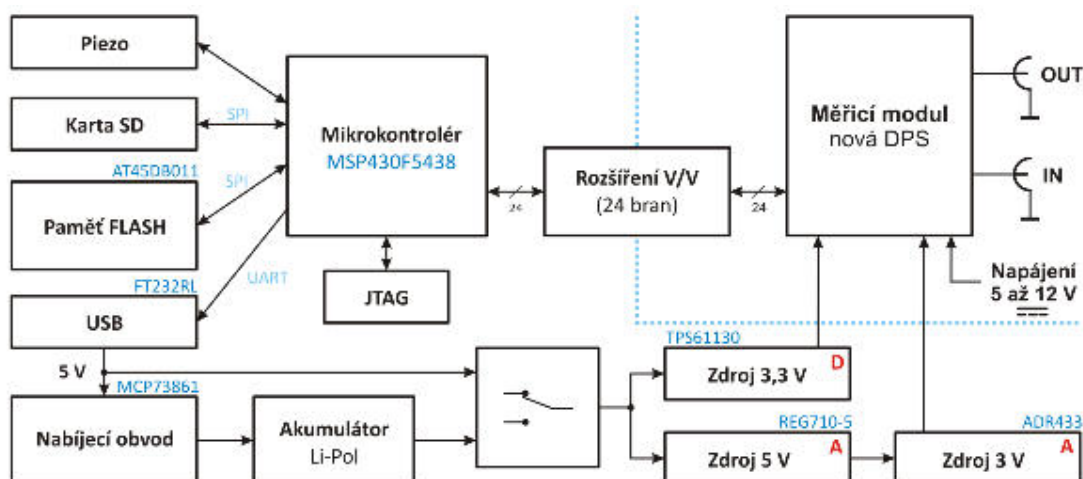
Počáteční a konečná hodnota odpovídá klidovému stavu, ve kterém je komplementární dvojice vyvážená a zátěží neprotéká téměř žádný proud. Zbytkový proud, který v tomto stavu protéká měřeným prvkem, je způsobený konečným rozlišením převodníku D/A. Dokonalého vyvážení dvojice nelze dosáhnout. I když je tento proud velmi malý, mohl by mít v případě dlouhodobého měření vliv na korozi elektrodového systému. Výhodou použitého typu výkonového operačního zesilovače je možnost vypnutí jeho výstupu (nastavení výstupu do režimu vysoké impedance) pomocí vstupního signálu *Enable* (viz kap. 5.2.3).

Na začátku měřicí periody je nejprve nastavena výstupní hodnota napětí převodníku D/A, která odpovídá klidovému stavu. Teprve poté jsou aktivovány výstupy operačních zesilovačů. Po uplynutí krátké prodlevy, která slouží k ustálení provozních parametrů operačních zesilovačů, je generován určitý počet měřicích impulzů ( $n$ ) pomocí střídání dvou hodnot výstupního napětí převodníku D/A. Jejich velikost je nastavena tak, aby byl výsledný obdélníkový signál symetrický, s rozkmitem  $1 V_{p-p}$ . Po skončení posledního impulzu jsou výstupy operačních zesilovačů opět deaktivovány. Kvůli potlačení možné koroze elektrodového systému vlivem polarizace má budicí signál stejný počet kladných a záporných kmitů.

Typická odezva měřeného prvku na budicí signál je zobrazena na obr. 75 pomocí červeného průběhu. Při změně polarizace dochází k postupnému nabíjení a vybíjení kapacity materiálu, které se do průběhu promítá zaoblením náběžné či sestupné hrany signálu. Vzorkování výstupu přístrojového zesilovače pomocí převodníku A/D probíhá až po ustálení přechodového děje, těsně před další změnou polarity (naznačeno šedými body). Doba  $t_s$  označuje zpoždění vzorkování od změny polarity budicího signálu a je jedním z parametrů měření, který může být programově nastaven. Dalším parametrem je počet budicích impulzů  $n$  (v obr. 75  $n = 2$ ).

### 5.2.2 Měřicí modul

Vzhledem k povaze konstrukce byla využita prototypová deska přístroje s integrovaným převodníkem impedance, ke které je deska plošných spojů přípravku připojena prostřednictvím rozšiřujícího konektoru. Díky tomu došlo k úspoře finančních nákladů na materiál a byl zkrácen čas vývoje. Na obr. 76 je znázorněno upravené blokové schéma přístroje.



**Obr. 76** Integrace měřicího modulu do zapojení původního přístroje

Z původního zapojení desky přístroje s integrovaným převodníkem impedance (obr. 66) byl odstraněn panel s klávesnicí a displejem OLED. Dále byl odstraněn převodník impedance AD5933 a jeho externí zesilovač. Pro napájení digitálních obvodů v novém měřicím bloku slouží napětí 3,3 V, které je přivedeno prostřednictvím rozšiřujícího konektoru. Napětí 3 V, které v původním zapojení sloužilo k napájení převodníku impedance, je v novém zapojení využito jako zdroj referenčního napětí. Do konektoru v desce měřicího bloku je přivedeno pomocí drátové propojky. Pro napájení výkonových prvků měřicího bloku bylo nutné přivést napětí z vnějšku. Napájecí blok obsahuje spínaný snižující měnič, který ze vstupního napětí v rozsahu 5 V až 12 V vytváří konstantní napětí o velikosti 3 V. Sestava desek plošných spojů přístroje je zobrazena na obr. 77. Obvodové řešení měřicího bloku je podrobně popsáno v kapitole 5.2.1.

Jedním z požadavků na konstrukci přístroje byla možnost přenášet naměřená data do PC a tam je zobrazovat v reálném čase. Pro realizaci tohoto požadavku je využit blok komunikace USB, který obsahuje převodník rozhraní UART na rozhraní USB. Rozhraní UART je sériové asynchronní komunikační rozhraní, které využívá napěťové úrovně odvozené od napájecího napětí digitální části mikrokontroléru. Převodník FT232RL od firmy FTDI obsahuje kompletní fyzickou i logickou vrstvu rozhraní USB. Po připojení obvodu k PC je na základě systémových ovladačů emulována standardní asynchronní sériová komunikace.



**Obr. 77** Měřicí modul připojený k původní desce plošných spojů

V operačním systému je vytvořen sériový port (COMx), který se chová transparentně vzhledem k rozhraní UART. Podmínkou správné funkce je shodné nastavení parametrů komunikace v ovladači sériového portu a v komunikačním bloku mikrokontroléru (komunikační rychlost, délka slova, parita).

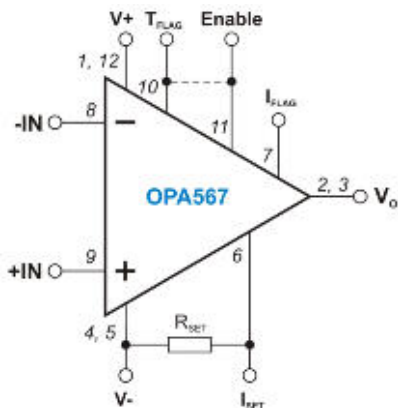
### 5.2.3 Výkonový operační zesilovač OPA567

Pro konstrukci komplementární dvojice byl zvolen výkonový operační zesilovač OPA567 [48], který je schopen dodávat do zátěže proud až 2 A a je určen pro rozsah napájecích napětí od 2,7 V do 5,5 V. Maximální výstupní proud zesilovače může být nastaven pomocí rezistoru  $R_{SET}$  (viz obr. 78) podle vztahu (19). Díky tomu nehrozí zničení zesilovačů při spojení měřicích svorek „na krátko“, kdy je za normálních okolností proud protékající zesilovači omezen pouze ohmickým odporem bočníku  $R_B$ .

$$I_{LIMIT} = 9800 \cdot \left( \frac{1,18 \text{ V}}{R_{SET}} \right) \quad [A] \quad (19)$$

Maximální proud byl pro potřeby testování nastaven pomocí rezistoru s odporem 12 k $\Omega$  na hodnotu  $I_{LIMIT} = 0,96 \text{ A}$ . Další integrovanou ochranou je ochrana proti přehřátí zesilovače. Ta může v obvodu fungovat dvojím způsobem. Nejjednodušší varianta ochrany spočívá v přímém propojení výstupu  $T_{FLAG}$  a vstupu  $Enable$ . Po překročení kritické teploty nastavené výrobcem dojde ke změně logické úrovně na výstupu  $T_{FLAG}$  z log. 1 na log. 0, a tím k deaktivaci výstupu zesilovače. Při využití zesilovače ve smíšeném analogově-digitálním systému je výhodnější přenechat funkci ochrany mikrokontroléru. Signály  $T_{FLAG}$ , případně  $I_{FLAG}$ , lze s výhodou přivést na vstupní brány mikrokontroléru, které disponují funkcí vyvolání vnějšího přerušení programu. Změna jejich logické úrovně signalizuje důležitý příznak, na který je nutné co nejdříve reagovat. V programové obsluze události lze rozhodnout, v jakém stavu se zesilovač nachází, následně provést kroky vedoucí k řešení problému a informovat obsluhu

přístroje o aktuálním stavu. Řízení vstupu *Enable* je v tomto případě plně v režii mikrokontroléru, přičemž kromě ochranné funkce je v navrženém řešení vstup *Enable* využíván k vypínání výstupů komplementární dvojice mezi jednotlivými měřicími periodami (viz kap 5.2.1).



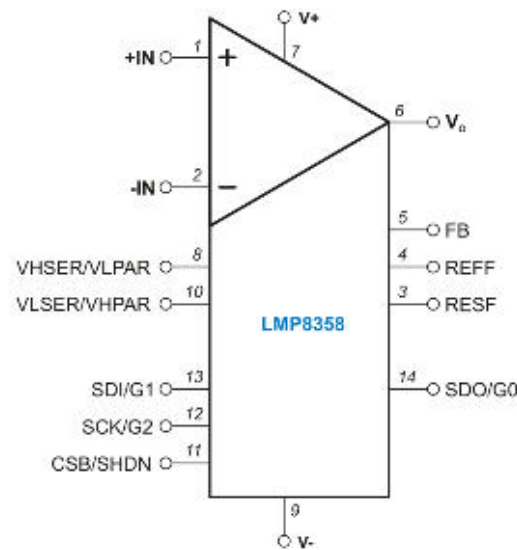
**Obr. 78** Výkonový operační zesilovač OPA567 [48]

Z pohledu generování budicího signálu je důležitá další vlastnost operačního zesilovače, který má vstup i výstup tzv. „rail-to-rail“. Omezení rozkmitu výstupního napětí je díky tomu pouze max. 0,3 V. Tato vlastnost dává prostor pro možné zvýšení výstupního rozkmitu komplementární dvojice. Šířka přenášeného pásma (*GBW*) zesilovače je 1,2 MHz a rychlost přeběhu (*SR*) dosahuje 1,2 V/ $\mu$ s. Pro využití na zamýšlené frekvenci 1 kHz s napětovým zesílením  $A = 2$  zesilovač bez problémů vyhoví bez jakéhokoliv omezení.

#### 5.2.4 Přístrojový zesilovač LMP8358

Přístrojový zesilovač LMP8358 je precizní integrovaný obvod, který obsahuje analogový přístrojový zesilovač a digitální část, jež slouží k jeho konfiguraci a kalibraci. Díky patentovanému způsobu nepřetržité kalibrace je u zesilovače průběžně kompenzován vstupní offset, teplotní drift a vliv šumu  $1/f$ . Zesílení je možné programově měnit v krocích 10, 20, 50, 100, 200, 500 a 1000. Obvod obsahuje blok detekce chyb, který umožňuje rozeznat rozpojení, zkratování vstupních svorek nebo zhoršující se připojení zdroje signálu. Rozsah napájecího napětí obvodu je od 2,7 V do 5,5 V.





**Obr. 79** Precizní přístrojový zesilovač LMP8358 [49]

Pro aplikaci v popisovaném měřicím systému je klíčovou vlastností obvodu velmi malý šum přes široký rozsah zesílení. Pro frekvenci 1 kHz, která je pro měření využívána, je obvod charakterizován výrobcem a typické hodnoty spektrální hustoty vstupního šumového napětí pro různá zesílení jsou uvedeny v katalogovém listu [49]. Šířka přenášeného pásma (GBW) a šířka pásma (BW) jsou parametry závislé na nastaveném zesílení. Pro použití v přístroji je klíčové, aby při měřicí frekvenci 1 kHz nedocházelo ke zkreslení díky frekvenčnímu omezení. Zde obvod vyhoví svými parametry s velkou rezervou. Nejméně příznivé hodnoty šířky pásma jsou  $BW = 89 \text{ kHz}$  a šířky přenášeného pásma  $GBW = 8 \text{ MHz}$ . Činitel potlačení vstupního souhlasného signálu (CMRR) a činitel potlačení zvlnění napájecího zdroje (PSRR) dosahují hodnoty minimálně 110 dB.

Komunikace s obvodem je umožněna prostřednictvím sériového rozhraní *SPI*, nebo paralelního rozhraní. Použitý typ mikrokontroléru obsahuje vestavěný blok řízení komunikace *SPI*, kterého je s výhodou využito pro připojení zesilovače a převodníku D/A (kap. 5.2.5). Komunikace se zesilovačem probíhá pouze jednosměrně, kdy mikrokontrolér v roli nadřazeného zařízení („master“) předává povely zesilovači, který pracuje jako zařízení podřízené („slave“). Pro komunikaci jsou tak využity signály *SDI* (*Serial Data Input*), *SCK* (*Serial Clock*) a *CSB* (*Chip Select Bit*). Přenos jednotlivých bitů na sériovém vstupu (*SDI*) je synchronizován pomocí hodinového signálu (*SCK*). Výběr konkrétního zařízení, pro které jsou data určena, probíhá pomocí signálu *CSB*. Obvod při komunikaci očekává přenos celkem šestnácti bitů, které tvoří konfigurační registr. Jejich význam popisuje tab. 8.

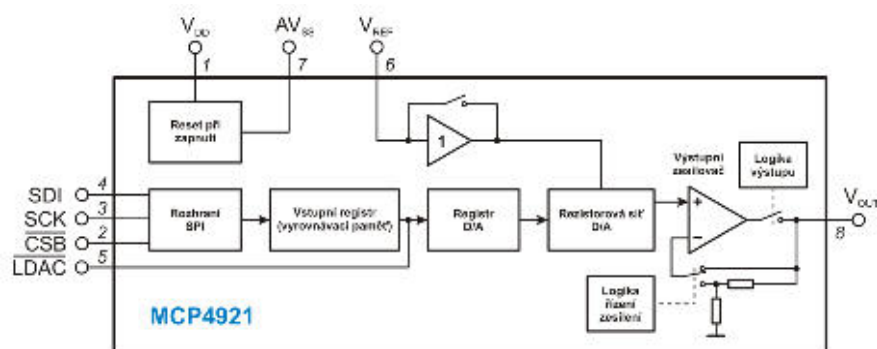
**Tab. 8** Význam jednotlivých bitů konfiguračního registru obvodu LMP8358 [49]

| Bit číslo | Název bitu | Popis                                                   |
|-----------|------------|---------------------------------------------------------|
| 0         | G0         | nastavení zesílení (LSB)                                |
| 1         | G1         | nastavení zesílení                                      |
| 2         | G2         | nastavení zesílení (MSB)                                |
| 3         | COMP0      | nastavení frekvenční kompenzace (LSB)                   |
| 4         | COMP1      | nastavení frekvenční kompenzace                         |
| 5         | COMP2      | nastavení frekvenční kompenzace (MSB)                   |
| 6         | MUX0       | nastavení vstupního multiplexeru (LSB)                  |
| 7         | MUX1       | nastavení vstupního multiplexeru (MSB)                  |
| 8         | POL        | nastavení polarity vstupního signálu                    |
| 9         | SHDN       | vypnutí zesilovače (úsporný režim)                      |
| 10        | FILT       | povolení externího filtračního kondenzátoru             |
| 11        | PIN        | výběr vstupu pro aplikaci zdroje proudu (detekce chyby) |
| 12        | CUR0       | výběr velikosti proudu pro detekci chyby (LSB)          |
| 13        | CUR1       | výběr velikosti proudu pro detekci chyby                |
| 14        | CUR2       | výběr velikosti proudu pro detekci chyby (MSB)          |
| 15        | N/A        | bit není využíván, nastavuje se vždy do log. 0          |

Možnosti programového přepínání zesílení přístrojového zesilovače je využíváno v algoritmu automatického vyhledání nejvhodnějšího měřicího rozsahu, který je implementován v laboratorní měřicí aparatuře (kap. 5.3).

### 5.2.5 Převodník D/A MCP4921

Jednakanálový převodník D/A slouží v měřicím řetězci ke generování signálu, který rozvažuje komplementární dvojici výkonových operačních zesilovačů [50]. Napájecí napětí obvodu je od 2,7 V do 5,5 V. Vnější vstup referenčního napětí ( $V_{REF}$ ) určuje výstupní rozsah převodníku. V tomto rozsahu může být výstupní napětí programově nastavováno s rozlišením 12 bitů. Dle vzorců (17) a (18) lze při použitím referenčním napětí 3 V rozlišit výstupní napětí s krokem 0,7324 mV.



**Obr. 80** Blokové schéma převodníku D/A MCP4921 [50]

Výstup převodníku je nastavován ve dvou fázích. Nejprve je prostřednictvím komunikačního rozhraní naplněn vstupní registr (vyrovnávací paměť) požadovanou hodnotou. Aktivací vnějšího signálu *LDAC* je tato hodnota přesunuta do registru D/A spojeného s rezistorovou sítí (viz obr. 80). Následně dojde ke změně propojení sítě, která se projeví na výstupu  $V_{OUT}$  změnou napětí. Tento režim činnosti je výhodný pro časovou synchronizaci při generování výstupního signálu nebo může být využit pro synchronizované nastavení výstupní hodnoty většího počtu převodníků D/A. Přesnost převodníku ovlivňují chyby způsobené výrobními tolerancemi a změnou teploty. Integrovaná nelinearita (INL) nabývá typické hodnoty 2 LSB (1,5 mV). Může ale být až  $\pm 12$  LSB (8,8 mV). Diferenciální nelinearita (DNL) převodníku se pohybuje v rozmezí  $\pm 0,75$  LSB (0,55 mV), s typickou hodnotou  $\pm 0,2$  LSB (0,15 mV). Chyba posunutím (*offset error*) a chyba zisku (*gain error*) jsou maximálně 1 % z výstupního rozsahu (při  $V_{REF} = 3$  V je to tedy až 30 mV). Změna teploty působí na chybu zisku s gradientem  $-3$  ppm/°C a na chybu posunutím s gradientem  $0,16$  ppm·V/°C. Výsledná chyba, kterou je výstupní napětí zatíženo, je součtem příspěvků výše popsaných chyb. V nejhorším případě může být chyba výstupního napětí až cca 40 mV.

Pro komunikaci s obvodem je využito rozhraní SPI, které je sdíleno společně s přístrojovým zesilovačem LMP8358 (viz kap. 5.2.4). Převodník při komunikaci očekává přenos celkem šestnácti bitů, které tvoří konfigurační registr. Dolních dvanáct bitů určuje hodnotu pro nastavení výstupu. Bit *SHDN* slouží k vypnutí převodníku. V tomto stavu je spotřeba obvodu pouze 6  $\mu$ A a aktivní zůstává pouze digitální rozhraní, kterým lze obvod opět programově zapnout. Převodník obsahuje výstupní zesilovač, jehož zesílení lze nastavit buď na hodnotu  $A = 1$  (bit *GA* je v log. 1), nebo na hodnotu  $A = 2$  (bit *GA* je v log. 0). Bit *BUF* slouží k aktivaci používání vyrovnávací paměti (aktivní v log. 1). Pokud paměť není používána, změna výstupního napětí nastává bezprostředně po zápisu nové hodnoty do vstupního registru. V tomto režimu je časová synchronizace změny výstupního napětí velmi obtížná (diskutováno výše). Nejvyšším bitem konfiguračního registru probíhá výběr jednoho ze dvou kanálů. Tato volba je přístupná pouze v případě dvoukanálové verze MCP4922 a bit je zde z důvodu vzájemné kompatibility. Jednotlivé bity konfiguračního registru shrnuje tab. 9.

**Tab. 9** Význam jednotlivých bitů konfiguračního registru obvodu MCP4921 [50]

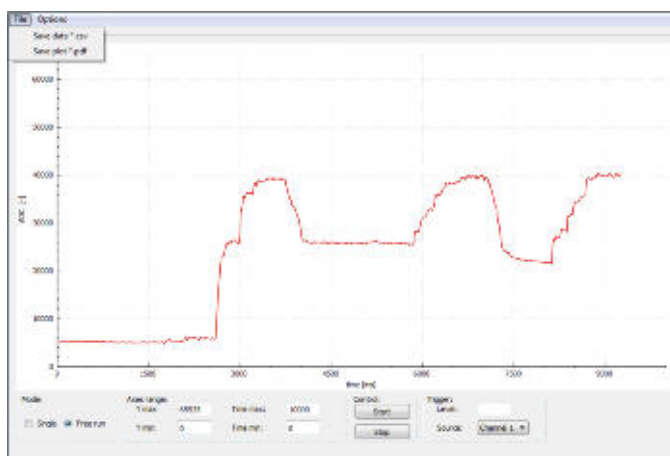
| Bit číslo | Název bitu | Popis                                                                           |
|-----------|------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 0 – 11    | D0 : D11   | hodnota pro nastavení výstupu                                                   |
| 12        | SHDN       | vypnutí převodníku (úsporný režim), aktivní v log. 0                            |
| 13        | GA         | nastavení výstupního zesilovače (log. 0 – $2\times$ , log. 1 – $1\times$ )      |
| 14        | BUF        | povolení funkce vstupního registru (log. 0 – nepoužívá se, log. 1 – používá se) |
| 15        | A/B        | volba kanálu převodníku (pro dvoukanálovou verzi MCP4922)                       |

### 5.2.6 Převodník A/D vestavěný v mikrokontroléru

Použitý typ mikrokontroléru (kap. 5.1.1) obsahuje převodník A/D fungující na principu postupné aproximace (SAR). Převodník je monotónní, jeho rozlišení je 12 bitů a dokáže pracovat s obnovovací frekvencí až 200 kHz. Vstupní obvod „sample-and- hold“ slouží jako analogová paměť, která udržuje na vstupu převodníku konstantní velikost napětí po celou dobu trvání převodu. Jako zdroj referenčního napětí lze použít buď vnitřní vestavěné zdroje referenčních napětí v mikrokontroléru (1,5 V a 2,5 V), nebo napětí přivedené z vnějšku v rozsahu 1,4 V až  $V_{CC}$  (napájecí napětí analogové části mikrokontroléru). V případě konstrukce měřicího modulu je použita vnitřní reference 1,5 V.

### 5.2.7 Programové vybavení

Obslužný program pro řídicí mikrokontrolér obstarává konfiguraci převodníku D/A a přístrojového zesilovače prostřednictvím sběrnice SPI. Časově synchronní změny výstupního napětí převodníku D/A vytvářejí budicí signál pro rozvažování komplementární dvojice operačních zesilovačů. Ve správný okamžik každé měřicí periody jsou převodníkem A/D sbírány vzorky výstupního napětí z přístrojového zesilovače. Vzorky jsou odesílány prostřednictvím rozhraní USB. Pro možnost vizualizace naměřených dat a jejich ukládání byla vyvinuta aplikace „Custom Serial Plot“ pro operační systém Microsoft Windows 7. Aplikace umožňuje zobrazovat data získaná ze sériového portu (z převodníku FT323RL) v podobě grafu. Pro účely měření vzorků při jejich dynamickém zatěžování je možné zobrazit časovou závislost změny reálné části impedance. Příklad výstupu naměřených dat je uveden na obr. 81.



**Obr. 81** Odezva vzorku na zatěžování v lisu – program Custom Serial Plot

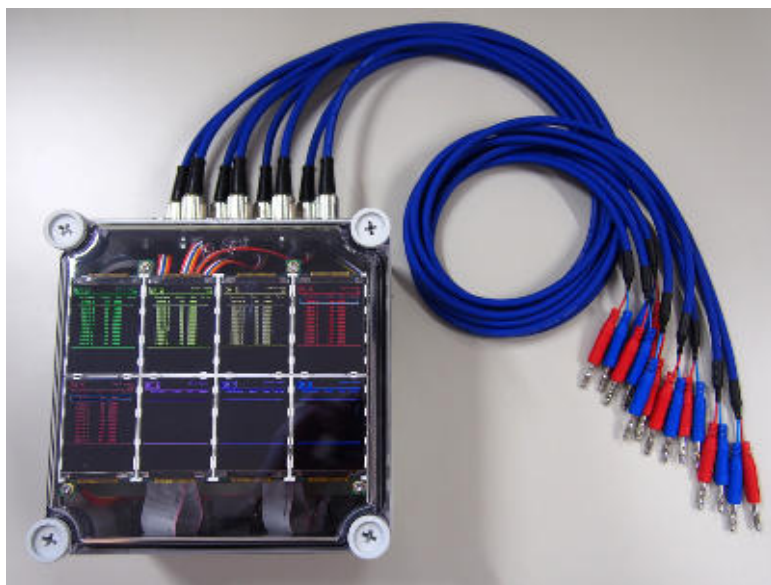
Naměřená data je možné ukládat do souboru formátu „\*.csv“. Další možností, která aplikace nabízí je přímý tisk právě zobrazeného grafu do souboru formátu „\*.pdf“. Naměřené průběhy tam mohou být snadno uloženy buď ve formátu, který umožňuje jejich následné zpracování, nebo formátu, který usnadní jejich tisk a archivaci.

### 5.2.8 Diskuse vlastností nové měřicí metody

Úkolem konstrukce měřicího modulu bylo vytvořit funkční vzorek přístroje, který umožní měřit vzorky nového materiálu s výraznými změnami reálné složky impedance. Deska plošných spojů byla koncipována jako rozšiřující modul, který byl připojen ke stávající desce plošných spojů prostřednictvím konektoru. Z původní desky byly využity především digitální komponenty pro řízení přístroje a přenos naměřených dat prostřednictvím rozhraní USB. Pro napájení výkonových operačních zesilovačů OPA567 byl na nové desce osazen spínaný měnič napětí ST1S10PHR [51], který pracuje na frekvenci 1 MHz. Použití spínaného měniče se ukázalo jako nevhodné, protože docházelo k pronikání harmonických složek do citlivé měřicí části. Důsledkem toho byl měřený průběh zatížen šumem, který dosahoval z pohledu převodníku A/D až 40 LSB a výrazně ovlivňoval citlivost přístroje. Z hlediska šumu je problematické i propojení dvou desek pomocí konektoru, kde není oddělená analogová a digitální zem přístroje. Problémy se podařilo částečně potlačit pomocí dodatečně dodaných součástek, sloužících jako filtr. Díky tomu bylo možné vyzkoušet funkci přístroje a nové měřicí metody na připravených vzorcích.

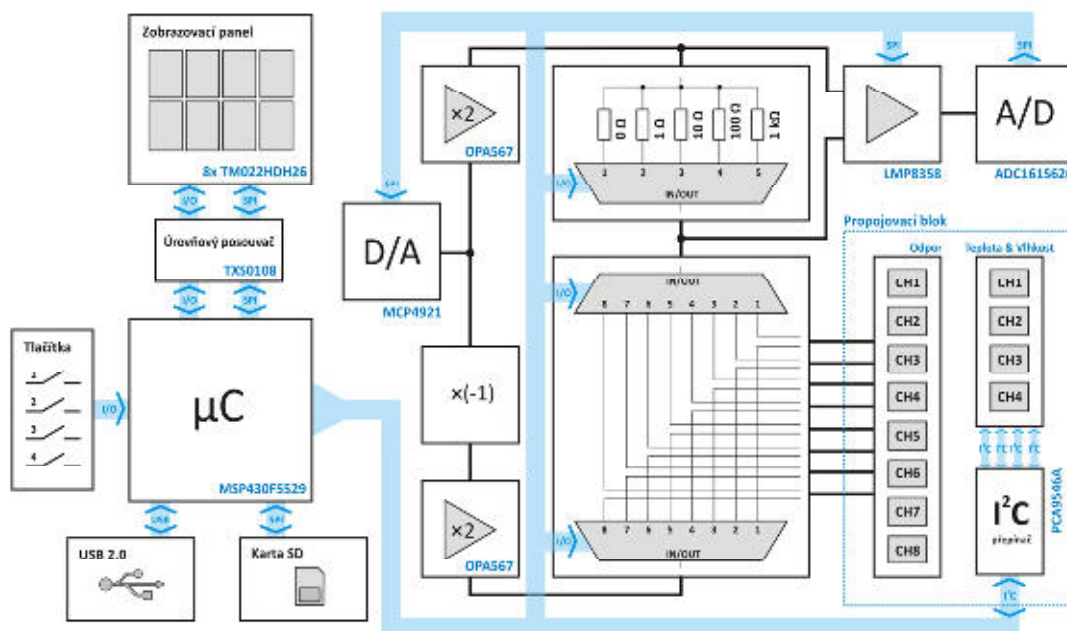
### 5.3 Návrh a konstrukce laboratorní měřicí aparatury

Při vývoji laboratorní měřicí aparatury byly zohledněny všechny předchozí poznatky. Přístroj umožňuje měření pomocí dvou implementovaných metod, a to buď na osmi samostatných, galvanicky oddělených kanálech, nebo lze využít čtyři kanály pro můstkové zapojení. Při návrhu byl kladen důraz na robustnost měřicí konstrukce, aby odpovídala průmyslovému použití přístroje (obr. 82).



**Obr. 82** Laboratorní měřicí aparatura

Blokové schéma přístroje je znázorněno na obr. 83. Princip měření vychází ze zapojení měřicího modulu (kap. 5.2). Spočívá v generování obdélníkového signálu pomocí převodníku D/A, který je přiveden na dvojici výkonových operačních zesilovačů OPA567. Zesilovače jsou zapojeny tak, aby byla připojená zátěž buzena v protifázi signálem o frekvenci 1 kHz a velikosti amplitudy 1 V (špička-špička). Budící signál prochází přes digitálně řízený bočník, který umožňuje volbu jednoho z pěti měřicích rozsahů. Dále vstupuje do digitálně řízeného prepínače kanálů, který umožňuje měřicí řetězec připojovat k jednotlivým kanálům dle aktuálního měřicího režimu. Úbytek napětí na odporovém bočníku je snímán pomocí diferenciálního vstupu přístrojového operačního zesilovače LMP8358. Vestavěný algoritmus automatické volby měřicího rozsahu využívá možnosti měnit zesílení pomocí programu. V současné fázi vývoje je nastaven tak, aby pro každý měřený vzorek našel optimální zisk zesilovače, který umožní maximální citlivost na změnu měřeného odporu.



**Obr. 83** Blokové schéma laboratorní měřicí aparatury

Výstup přístrojového zesilovače je vzorkován pomocí šestnáctibitového převodníku A/D. Číslo, které odpovídá velikosti odporu pro daný vzorek, je díky známé velikosti odporu bočníku a zisku přístrojového zesilovače přepočítáno na reálnou velikost měřené veličiny.

Jedním z požadavků na konstrukci byla možnost měřit doplňkové veličiny v podobě teploty a vlhkosti. Přístroj je vybaven čtyřmi kanály, které umožňují připojit externí sondy se senzory SHT21 [52]. Senzory komunikují s mikrokontrolérem prostřednictvím sériové datové sběrnice I<sup>2</sup>C. Pro připojení čtyř senzorů k jednomu kanálu rozhraní I<sup>2</sup>C



musel být použit přepínač PCA9546A [53], který umožňuje adresovat každý senzor zvlášť (viz kap. 5.3.4).

Přístroj lze ovládat pomocí čtveřice tlačítek. Vizualizaci naměřených dat a navigaci během nastavování měřicích režimů obstarává osmice barevných displejů LCD (*Liquid Crystal Display*) typu TFT (*Thin-Film Transistor*), které jsou sdruženy do konstrukčního celku v podobě zobrazovacího panelu. Ten je vytvořen na samostatné desce plošných spojů, která je umístěna těsně pod transparentním krytem konstrukční krabičky. Rozlišení každého z displejů je  $320 \times 240$  obrazových bodů. V současné verzi programového vybavení je každému měřicímu kanálu přiřazena zobrazovací plocha jednoho displeje. Jsou zobrazovány informace o aktuálním čísle vzorku, naměřené velikosti odporu, použitém odporovém bočníku a zesílení přístrojového zesilovače. Pro každý kanál je zobrazována historie tří po sobě jdoucích naměřených vzorků, která je s každým novým vzorkem aktualizována. Naměřená data jsou společně s doplňkovými informacemi (teplota, vlhkost, rozsah, zesílení přístrojového zesilovače, napětí napájecího akumulátoru) ukládána do souboru typu „\*.csv“ na paměťovou kartu SD. Přístroj využívá standardní souborový systém FAT32, který zajišťuje kompatibilitu a čitelnost naměřených dat na PC. Data v souboru s příponou csv mají formát textového záznamu, který lze velmi snadno zpracovat např. v tabulkovém procesoru Microsoft Excel.

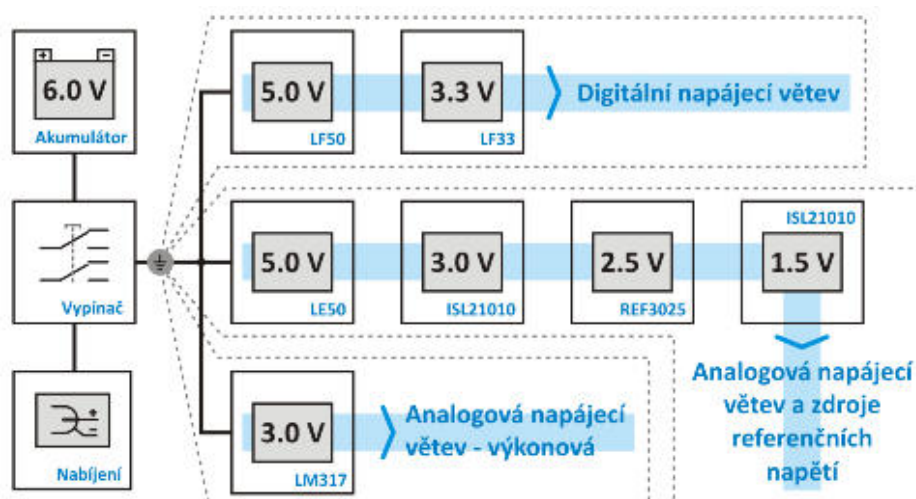
Použitý mikrokontrolér obsahuje fyzickou vrstvu rozhraní USB. Vyšší vrstvy komunikačního protokolu USB jsou implementovány v řídicím programu. Jsou využity dva různé režimy. Pokud probíhá měření, sběrnice pracuje v režimu CDC. Naměřená data jsou ukládána na kartu SD a zároveň jsou odesílána na USB. V režimu CDC je emulována funkce standardního sériového portu. Na úrovni operačního systému v PC je vytvořen virtuální sériový port, který se v systému chová jako standardní sériové rozhraní (COM). Díky tomu je možné naměřená data přenášet v reálném čase do aplikace „*Custom Serial Plot*“ (kap. 5.2.7), nebo do aplikace „*Selfmonitoring Control Platform*“ (kap. 6.5), která byla vyvinuta pro potřeby monitorovacího systému (kap. 6).

Druhý režim sběrnice USB je využíván, pokud měření neprobíhá. V tomto případě není karta SD využívána pro záznam měřených dat a může být zpřístupněna jako paměťové zařízení. Režim se nazývá MSC (*Mass Storage Class*) a přístroj připojený k PC pomocí sběrnice USB se chová jako standardní paměťové zařízení, se kterým je možné pracovat v operačním systému dle běžných zvyklostí. Lze jej využít například pro zálohování naměřených dat na pevný disk. V měřicím přístroji s integrovaným převodníkem impedance byla sběrnice USB využívána pro dobíjení vestavěného akumulátoru typu Li-Po. Laboratorní měřicí aparatura je napájena vestavěným olověným akumulátorem 6 V / 12 A/h. Vzhledem k napětí a k maximálnímu proudu,

který je schopna sběrnice poskytnout (5 V / 500 mA), by bylo využití USB pro nabíjení neefektivní. Navíc by bylo třeba napětí transformovat pomocí zvyšujícího spínaného měniče. Z výše popsaného důvodu byla zvolena možnost dobíjení vestavného akumulátoru pomocí konektoru a externí nabíječky.

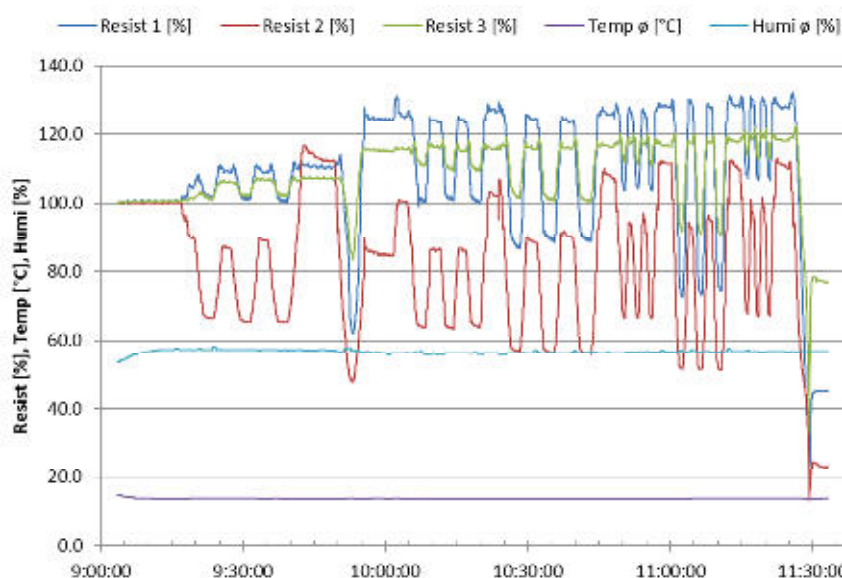
Topologie napájecí části přístroje je znázorněna na obr. 84. Hlavní vypínač umístěný na levém boku přístroje přepíná svorky akumulátoru mezi napájecí částí přístroje (stav „zapnuto“) a nabíjecím konektorem (stav „vypnuto“). Akumulátor lze tedy nabíjet pouze v případě, že je přístroj vypnutý. Vzhledem k problémům se šumem, které se vyskytly v konstrukci měřicího modulu a jsou popsány v kap. 5.2.8, bylo zcela upuštěno od využití jakéhokoliv spínaného zdroje, který by mohl být potenciálním zdrojem rušení. Jsou využity pouze napěťové stabilizátory a zdroje referenčního napětí pracující na lineárním principu. V topologii napájecí části lze rozlišit tři různé napájecí větve, které byly vytvořeny z důvodu minimalizace rizika přenosu rušení rozvodem napájení. Je zde napájecí větev pro digitální obvody, která vytváří napájecí napětí 3,3 V a 5 V. Napájí všechny digitální obvody, případně digitální části smíšených analogově-digitálních obvodů, signálová relé v digitálně řízeném bočníku a v přepínači kanálů. Napájení analogových obvodů bylo rozděleno na dvě oddělené větve, z nichž jedna napájí dvojici výkonových operačních zesilovačů OPA567 napětím o velikosti 3 V a druhá zajišťuje napájení citlivých analogových obvodů měřicího řetězce. Ta vytváří napětí 5 V pro napájení analogové části přístrojového zesilovače LMP8358, převodníku ADC161S626 a pro trojici referenčních zdrojů, které generují napětí 1,5 V, 2,5 V a 3 V. Referenční napětí 1,5 V a 2,5 V jsou použita pro vytvoření virtuální země operačních zesilovačů. Referenční napětí 3 V slouží k nastavení výstupního rozsahu převodníku MCP4921. Uspořádání všech bloků topologie napájecí části přístroje je provedeno s ohledem na minimalizaci výkonové ztráty na lineárních prvcích.

Dalším faktorem, který negativně ovlivnil šumové vlastnosti měřicího modulu, bylo nesprávné vedení zemních ploch. Návrh desek plošných spojů laboratorní aparatury je proveden s ohledem na dodržení návrhových pravidel a doporučení pro minimalizaci šumu. Zařízení obsahuje dvě desky plošných spojů. Spodní deska (vzhledem k uspořádání v konstrukční krabici) obsahuje napájecí část přístroje a citlivé analogové, či analogově-digitální obvody měřicího řetězce. Vrchní deska pak obsahuje veškeré digitální obvody, které mohou být zdrojem impulsního rušení. Spodní deska je stíněna polygonem analogové země, vrchní polygonem digitální země. Obě země jsou spojeny pomocí distančního sloupku mezi deskami a tvoří zemnicí uzel přístroje, do kterého je přiveden záporný pól napájecí baterie. Konstrukční uspořádání umožňuje vložení stínícího plechu mezi spodní a vrchní desku. Toto opatření však nebylo nutné.



**Obr. 84** Topologie napájecí části přístroje

Příklad dat naměřených laboratorní aparaturou je uveden na obr. 85. Graf zachycuje celkem pět průběhů, které byly měřeny a ukládány na kartu SD v průběhu cca 150 minut. Červený, zelený a modrý průběh zachycují změnu reálné složky impedance na třech měřicích elementech, zalitých v betonovém bloku, který byl namáhán v lisu periodickým zatěžováním a odlehčováním. Velikost zatížení se měnila vždy po třech cyklech a byly používány různé rychlosti náběhu zatížení a odlehčení. Při posledním zatížení byl betonový blok rozdrcen. Fialový a světle modrý průběh jsou záznamy teploty a relativní vlhkosti v průběhu měření, které lze použít k doložení okolních podmínek, za nichž bylo měření provedeno.



**Obr. 85** Příklad dat naměřených pomocí laboratorní aparatury

Soubor s příponou „\*.csv“ byl z karty SD zkopírován na pevný disk počítače a následně otevřen v programu Microsoft Excel. Výsledný graf z obrázku vznikl

upravením absolutních hodnot reálné části impedance na relativní tak, aby bylo možné vzájemně porovnat citlivost na změnu zatížení u jednotlivých elementů.

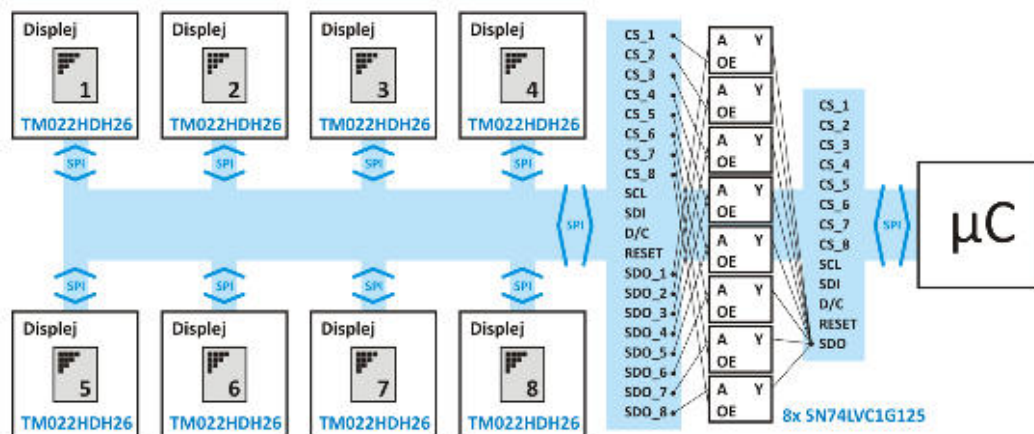
### 5.3.1 Mikrokontrolér MSP430F5529

Všechny mikrokontroléry řady MSP430 mají společnou architekturu, která byla stručně popsána v kap. 5.1.1. Jednotlivé typy se liší různým počtem integrovaných komponent, velikostí paměti, různým počtem vstupně-výstupních bran a typem pouzdra. Důvodem použití jiného typu mikrokontroléru než v případě předchozí konstrukce, byla možnost využití bloku fyzické vrstvy komunikační sběrnice USB, který přináší výhodu v podobě možnosti naprogramovat chování sběrnice dle aktuální potřeby. Mikrokontrolér MSP430F5438A neobsahoval blok fyzické vrstvy USB. Implementace sběrnice do přístroje byla možná díky využití specializovaného obvodu FT323RL, který však dokáže pracovat pouze v režimu CDC. Bylo tak možné přenášet naměřená data do aplikace v PC, ale nebylo možné prostřednictvím USB zpřístupnit kartu SD jako paměťové zařízení (režim MSC).

Nevýhodou mikrokontroléru MSP430F5529 [54] oproti MSP430F5438A je menší kapacita paměti typu Flash pro uložení řídicího programu a paměti typu RAM pro ukládání dočasných proměnných. Velkost paměti Flash je zde 128 kB oproti 256 kB a velikost paměti RAM je 10 kB oproti 16 kB u obvodu MSP430F5438A. Tato nevýhoda však nepředstavuje pro konstrukci přístroje žádné závažné omezení, protože i tak je kapacita obou pamětí více než dostatečná.

### 5.3.2 Zobrazovací panel

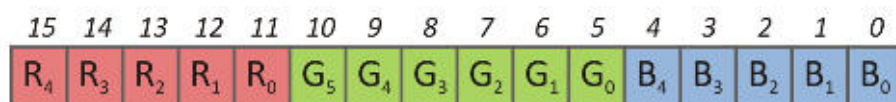
Pro konstrukci zobrazovacího panelu bylo využito osm barevných grafických displejů TM022HDH26 [55] s rozlišením  $240 \times 320$  obrazových bodů a technologií TFT. Displeje jsou umístěny na společné desce plošných spojů těsně pod transparentním krytem přístroje. Toto netypické řešení přináší výhodu v podobě velké zobrazovací plochy, kterou lze řídit prostřednictvím sériové komunikační sběrnice SPI. Konvenční displeje, které mají zobrazovací plochu úměrnou tomuto panelu ( $960 \times 640$  obrazových bodů), jsou neúměrně drahé a jsou řízeny způsobem, který klade extrémní nároky na časování a počet komunikačních vodičů.



**Obr. 86** Blokové schéma zobrazovacího panelu

Displej TM022HDH26 obsahuje řadič ILI9340C [56], který obstarává funkci budiče matice TFT, grafické paměti GRAM (*Graphics Random Access Memory*) a komunikačního rozhraní SPI, jež lze použít bez velkých nároků na strojový čas mikrokontroléru. Adresování jednotlivých displejů v rámci panelu je realizováno pomocí signálu CS (*Chip Select*), jež určuje, který z displejů bude reagovat na příkazy vysílané mikrokontrolérem na sběrnici.

Funkce pro vykreslování textu a základních grafických objektů (čára, obdélník, kružnice atd.) jsou implementovány v řídicím programu přístroje. Znaková sada musí být uložena v paměti programu mikrokontroléru. Pro každý obrazový bod je přenášena informace o jeho barvě, která se skládá z celkem šestnácti bitů (obr. 87). Použitý formát umožňuje na matici TFT rozlišit až 65536 různých barev.

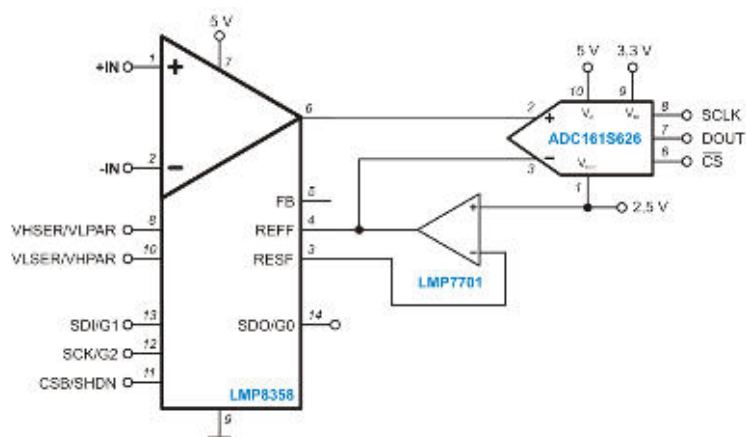


**Obr. 87** Datový formát zápisu barevné hodnoty jednoho bodu displeje [56]

Matice TFT je podsvícená čtveřicí bílých diod LED (*Light Emitting Diode*), které jsou integrovány v displeji. V rámci panelu je spínáno podsvícení všech displejů společným signálem. Proudová spotřeba podsvícení je až 60 mA pro jeden displej, tedy až 480 mA pro celý panel. Při testování displejů se ukázala intenzita svitu při proudu 480 mA jako zbytečně velká. S ohledem na minimalizaci proudové spotřeby byl proud do jednotlivých displejů snižen na 40 mA (celkem 320 mA) při zachování velmi dobré čitelnosti. I přes to je podsvícení panelu energeticky nejnáročnějším blokem celého přístroje a při provozu z vestavěného akumulátoru musí být při nečinnosti obsluhy programově vypínáno.

### 5.3.3 Převodník A/D ADC161S626

Problémy se šumem, které provázely konstrukci měřicího modulu, byly odstraněny díky odlišnému přístupu ke konstrukci zdroje a dodržení návrhových pravidel desek plošných spojů. V nové verzi přístroje tak vznikl prostor pro využití převodníku A/D, který umožní výstupní napětí z přístrojového zesilovače zpracovat s větším rozlišením. Použitý obvod ADC161S626 [57] pracuje s rozlišením 16 bitů, díky kterým lze pracovní rozsah rozlišit na 65536 hodnot (namísto 4096 hodnot z dvanáctibitového převodníku A/D, vestavěného v mikrokontroléru). Pracuje na principu postupné aproximace (SAR) a je schopen zpracovat až 250 tisíc vzorků za jednu vteřinu (250 kSPS). Chyba způsobená diferenciální nelinearitou může být v rozsahu 0,8 LSB až -0,5 LSB. Chyba způsobená integrální nelinearitou se pohybuje v rozmezí  $\pm 0,8$  LSB. Chyba způsobená posunutím převodní charakteristiky (*offset error*) je maximálně  $\pm 1$  mV, s teplotní závislostí max.  $3,7 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , a chyba zisku je maximálně  $\pm 0,02\%$  z rozsahu, s teplotní závislostí  $0,3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . Svými parametry se použitý převodník A/D řadí mezi precizní obvody.



**Obr. 88** Připojení diferenciálního vstupu převodníku k výstupu LMP8358 [49]

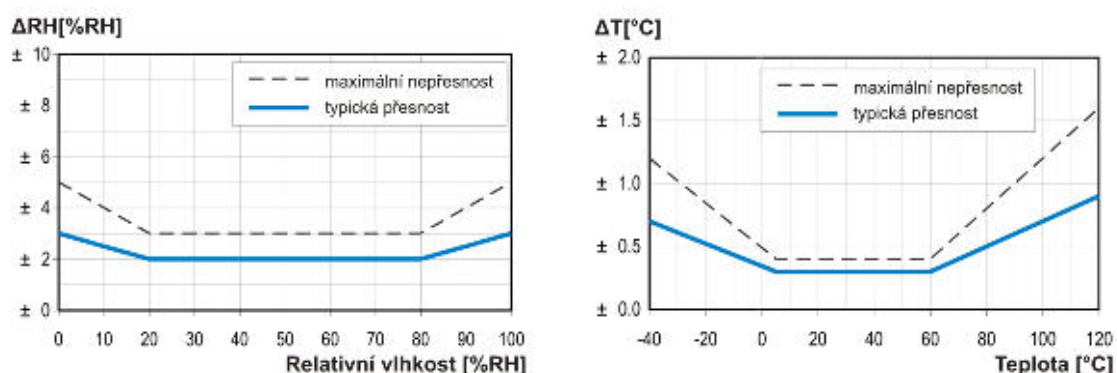
Převodník má diferenciální vstup, který pokud je připojen k diferenciálnímu zdroji signálu, dokáže účinně potlačovat souhlasné rušení indukované do přenosové cesty. Výstup z přístrojového zesilovače LMP8358 diferenciální není. Princip propojení využívá možnosti stejnosměrného posunutí klidového stavu výstupu přístrojového zesilovače na hodnotu 2,5 V, přičemž diferenciální vstup rozvažuje výstup zesilovače od hodnoty (téměř) 0 V do hodnoty (téměř) 5 V. Pokud je invertující vstup převodníku A/D připojen na zdroj referenčního napětí 2,5 V, dojde ke stejnosměrnému posunutí převodní charakteristiky. Ve výstupním slově převodníku je hodnotou „0“ reprezentováno právě toto referenční napětí. Rozvážením přístrojového zesilovače do kladné oblasti (od 2,5 V do 5 V) je převodníkem reprezentováno číslem v rozsahu 0 až 32767, rozvážení do záporné oblasti (od 2,5 V do 0 V) záporným číslem v rozsahu 0 až -32768 ve formě dvojkového doplňku.



Mikrokontrolér komunikuje s obvodem po sběrnici SPI, která je sdílena společně s přístrojovým zesilovačem LMP8358 a převodníkem D/A. Přenos je synchronizován celkem osmnácti periodami hodinového signálu *SCLK*. Přenos každého datového bitu probíhá na sestupnou hranu. První perioda slouží k synchronizaci, na druhou periodu je vyčten datový bit, který je vždy 0. Poté následuje šestnáct bitů výsledku převodu, který je ve formátu dvojkového doplňku a je řazen od nejvýznamnějšího bitu (MSB) po nejméně významný (LSB).

#### 5.3.4 Senzor teploty a vlhkosti SHT21

Jedním z požadavků na konstrukci laboratorní aparatury byla možnost měřit doplňkové veličiny v podobě teploty a relativní vlhkosti. Pro charakterizaci kompozitních materiálů jsou zajímavé jak okolní klimatické podmínky, tak i podmínky uvnitř měřeného materiálu. Bylo tedy třeba najít takové senzory, které budou dostatečně přesné a zároveň svými rozměry umožní snadnou integraci do objemu měřeného materiálu. Byly zvoleny senzory SHT21 od společnosti Sensirion [52], které integrují v jednom miniaturním pouzdře snímač teploty, vlhkosti, obvody analogového přizpůsobení, obvody digitálního vyhodnocení, kalibrace a sériové komunikační rozhraní I<sup>2</sup>C. Rozlišení teploty může být nastaveno na 12 bitů nebo 14 bitů. Při dvanáctibitovém rozlišení odpovídá nejméně významný bit (LSB) hodnotě 0,04 °C, při čtrnáctibitovém rozlišení hodnotě 0,01 °C. Absolutní přesnost měření teploty je v rozmezí běžných kladných teplot typicky ±0,3 °C. Rozlišení relativní vlhkosti může být nastaveno na 8 bitů nebo 12 bitů. Při osmibitovém rozlišení odpovídá nejméně významný bit hodnotě 0,7 %, při dvanáctibitovém rozlišení hodnotě 0,04 %. Absolutní přesnost měření relativní vlhkosti je při teplotě 25 °C typicky ±2 %, maximálně ±3 % v rozmezí relativní vlhkosti 20 % až 80 %. Na krajích rozsahu chyba stoupá (viz obr. 89).



**Obr. 89** Přesnost měření vlhkosti a teploty pomocí SHT21 [52]

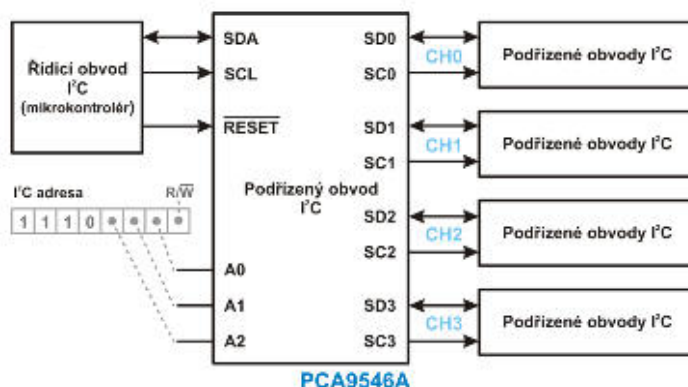
Senzory SHT21 dosahují ve své kategorii integrovaných snímačů velmi dobrých parametrů nejen v absolutní přesnosti, ale zároveň mají velmi malou spotřebu a jsou vyráběny v malém pouzdře. Výrobce senzor integroval do pouzdra typu DFN (*Dual-*

*Flat No-Leads*) o rozměrech 3 mm × 3 mm × 1 mm se šesti vývody. Aby jej bylo možné použít pro měření venkovních klimatických podmínek a podmínek uvnitř objemu materiálu, bylo třeba vytvořit miniaturní desku plošných spojů, na kterou je senzor osazen přetavením. Výrobce nabízí krycí čepičku SF2 [58], která díky speciální membráně zamezuje vniknutí vody a prachu do senzoru. Při vhodném umístění a utěsnění prostoru mezi čepičkou a deskou plošných spojů dosahuje stupeň krytí až IP67. Propojením osazené desky s konektorem a kabelem vznikne sonda (obr. 90), kterou lze buď ponechat v prostředí pro měření okolních klimatických podmínek, nebo zasunout do otvoru o průměru 8 mm.



**Obr. 90** Sonda pro měření teploty a vlhkosti s SHT21 a SF2

Nevýhodou SHT21 je jeho pevná adresa na komunikační sběrnici I<sup>2</sup>C, kterou nelze ovlivnit. V praxi to znamená, že na jednu sběrnici I<sup>2</sup>C lze připojit pouze jeden obvod. Vzhledem k omezenému počtu komunikačních jednotek použitého mikrokontroléru musel být problém s adresováním vyřešen použitím čtyřkanálového přepínače sběrnice PCA9546A [53].



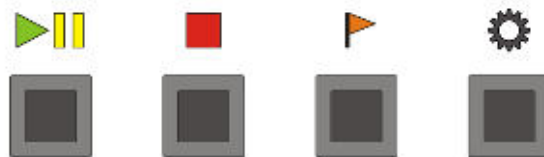
**Obr. 91** Přepínač sběrnice I<sup>2</sup>C PCA9546A [53]

Přepínač má vlastní unikátní adresu pro sběrnici I<sup>2</sup>C, u které lze dolní tři bity nastavit přivedením příslušné logické úrovně na vstupní svorky (A2, A1 a A0). Důležité je odlišit adresu přepínače a adresu připojených zařízení tak, aby nebyly ve shodě.

Zápisem příslušné hodnoty do vnitřního registru přepínače je vybrán jeden ze čtyř kanálů (obr. 91 – vpravo), který se poté chová transparentně vůči sběrnici I<sup>2</sup>C mikrokontroléru (obr. 91 – vlevo). Pokud jsou ke kanálům přepínače připojeny jednotlivé snímače SHT21, je jejich adresování v rámci sběrnice I<sup>2</sup>C vyřešeno přepínáním kanálů obvodu PCA9546A.

### 5.3.5 Programové vybavení

Řídicí program mikrokontroléru MSP430F5529 zajišťuje všechny funkce spojené s provozem laboratorní měřicí aparatury. Na zobrazovacím panelu, složeném z osmi displejů TFT, jsou vykreslovány hodnoty aktuálně změřených veličin a v případě velikosti reálné složky impedance i historie několika předešlých hodnot. Každý displej zobrazuje informace vztažené k jednomu z osmi měřicích kanálů, které jsou odlišeny barvou grafiky. Zbývající plocha je využita pro zobrazení doplňkových informací v podobě teploty a relativní vlhkosti z připojených sond, aktuálního data, času, názvu souboru na kartě SD apod. Ovládání přístroje je maximálně zjednodušeno. K dispozici jsou čtyři ovládací tlačítka, na přední straně přístroje (obr. 92), označená piktogramy.



**Obr. 92** Tlačítka pro ovládání laboratorní měřicí aparatury

Prvním tlačítkem (zleva) lze spustit měření s aktuálně nastavenými parametry. Při stisku tlačítka je na kartě SD vytvořena složka, jejíž název odpovídá aktuálnímu datu (např.: „12042015“ pro datum 12. 4. 2015). Ve složce je vytvořen nový soubor, jehož název je odvozen od aktuálního času v okamžiku stisku tlačítka (např.: „110235.csv“ pro čas 11 hodin, 2 minuty a 35 sekund). Každý měřený vzorek je ukládán do tohoto souboru ve formátu „\*.csv“. Měření lze kdykoliv přerušit a zase spustit opětovnými stisky stejného tlačítka. V případě, že je stisknuto druhé tlačítko, měření je ukončeno a při dalším stisku prvního tlačítka je vytvořen nový soubor s názvem, který odpovídá aktuálnímu času. V průběhu měření lze využít třetí tlačítko pro vložení „značky“ do záznamu. Značkou je možné označit důležité okamžiky, například při změně měřicích podmínek. Poslední tlačítko slouží ke konfiguraci parametrů měření. Jeho stiskem je na displeji vykreslen kurzor u prvního parametru. Pozici kurzoru lze posouvat opětovnými stisky. Na každé pozici lze měnit příslušné hodnoty pomocí dvou prvních tlačítek. Navigaci během konfigurace usnadňuje grafika na displeji, která signalizuje aktuální funkci každého tlačítka.

## 6 Monitorovací systém

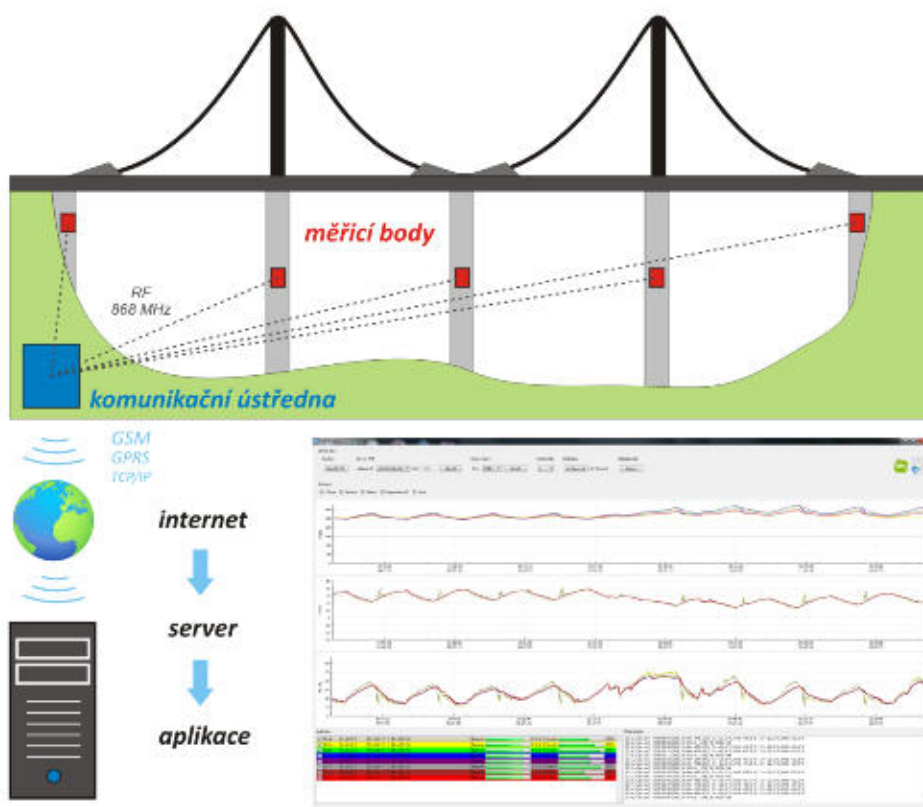
*„Jsou-li všichni odborníci za jedno, je na místě opatrnost.“*

Bertrand Russell

V kapitole 5 byl podrobně popsán vývoj aparatury vhodné pro laboratorní měření kompozitních vzorků. Dalším krokem bylo navrhnout a zrealizovat ucelené řešení, které umožní praktické použití funkčního kompozitního materiálu. Vznikla myšlenka monitorovacího systému, který by umožnil dlouhodobý dohled nad stavebními konstrukcemi z betonu.

### 6.1 Topologie monitorovacího systému

Topologii monitorovacího systému lze zobecnit do tří úrovní. První úroveň se sestává z množiny měřicích bodů, které jsou umístěny v těsné blízkosti sledovaného objektu. Každý měřicí bod je napojen na elektroodový systém měřicího elementu, který je integrován v betonové konstrukci. Zajišťuje periodické měření elektrických parametrů a doplňkových informací v podobě teploty a relativní vlhkosti. Naměřená data odesílá pomocí vestavěného bezdrátového rozhraní do komunikační ústředny, která je druhou úrovní systému (obr. 93).



Obr. 93 Topologie monitorovacího systému

Komunikační ústředna sbírá informace od jednotlivých měřicích bodů, skládá je do komunikačních rámců (paketů) a odesílá prostřednictvím bezdrátové komunikační technologie GSM (*Global System for Mobile Communications*) do sítě Internet. Využívá při tom službu pro datové přenosy GPRS (*General Packet Radio Service*). Při této komunikaci je využit primární přenosový protokol sítě Internet TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). Ten zajišťuje bezpečný přenos informací do třetí úrovně systému, která je tvořena serverem. Server byl integrován do uživatelské aplikace „*Selfmonitoring Control Platform*“, která umožňuje sběr naměřených dat vysílaných ústřednou, jejich archivaci a vizualizaci v podobě grafů sledovaných veličin (kap. 6.5).

Topologie monitorovacího systému využívá hierarchické uspořádání, které umožňuje bezpečný dlouhodobý provoz. Při výpadku jednoho či více měřicích bodů není ohrožena funkcionality celého systému. Komunikační ústředna je vybavena možností napájení pomocí záložního zdroje, který udrží systém v činnosti i v případě výpadku elektrické rozvodné sítě. Při návrhu systému byla zohledněna výrobní cena, která hraje důležitou roli v případě komerčního využití.

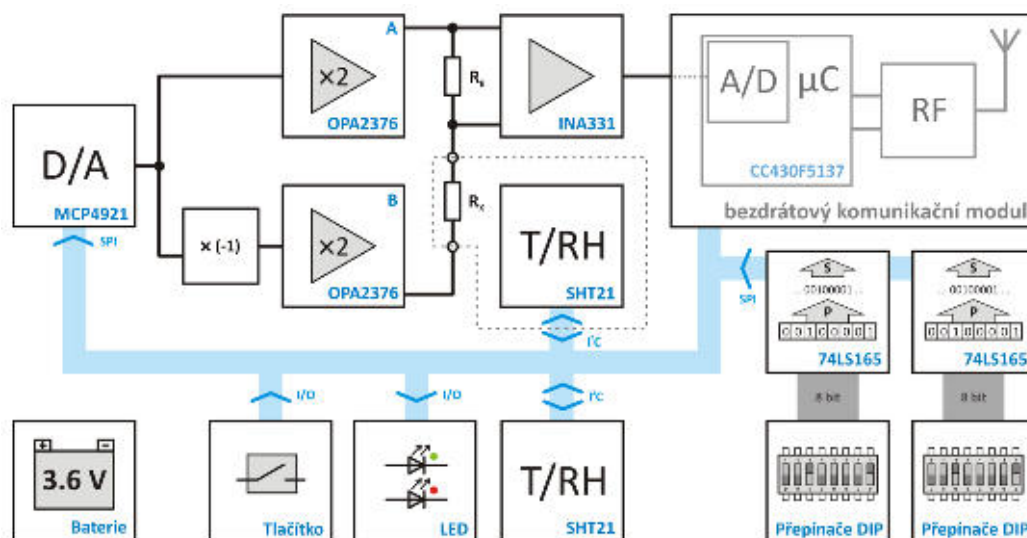
## **6.2 Měřicí bod**

Měřicí bod je první, nejnižší úrovní monitorovacího systému. Jeho úkolem je periodicky měřit velikost reálné složky impedance sledovaného prvku, aktuální teplotu a relativní vlhkost. Naměřená data jsou na konci každé měřicí periody odeslána do komunikační ústředny. Na konstrukci měřicího bodu byly kladeny tyto požadavky:

- implementace měřicí metody dle kapitoly 5.2.1,
- možnost dlouhodobého provozu (více než 5 let),
- možnost konfigurace měřicí periody a síťové adresy v místě instalace,
- odesílání stavových informací pro sledování činnosti,
- odolné konstrukční provedení, které umožní provoz měřicího bodu ve venkovních podmínkách (IP67),
- co nejnižší výrobní cena.

Kvůli výše uvedeným požadavkům bylo třeba pro konstrukci měřicího bodu vyhledat alternativní komponenty k těm využitým v konstrukci měřicí aparatury. U přístroje pro laboratorní měření bylo potřeba dosáhnout co možná nejlepších parametrů (minimalizace šumu, velké rozlišení převodníku A/D, přepínání měřicích rozsahů atd.). U měřicího bodu lze z těchto nároků mírně slevit z důvodu zjednodušení konstrukce, minimalizace proudové spotřeby komponent a snížení výrobní ceny. Napomáhá tomu fakt, že u měřicího bodu není vyžadována tak velká míra univerzality jako v případě

laboratorního přístroje. Přepínání měřicích rozsahů není důležité, protože lze nastavení parametrů analogové části měřicího bodu přizpůsobit konkrétnímu měřicímu elementu. Blokové schéma měřicího bodu je uvedeno na obr. 94. Hlavním řídicím prvkem je mikrokontrolér CC430F5137 [59] osazený v bezdrátovém komunikačním modulu. Popisu komunikačního modulu se věnuje kap. 6.4. Pro funkci měřicí části je využit převodník A/D integrovaný ve vnitřní struktuře mikrokontroléru. Dosahuje rozlišení 12 bitů a jeho parametry jsou popsány v kap. 5.2.6. Pro buzení komplementární dvojice byl použit převodník D/A s rozlišením 12 bitů MCP4921, který je popsán v kap. 5.2.5. Komplementární dvojice operačních zesilovačů byla sestavena pomocí obvodu OPA2376, který v jenom pouzdře integruje dva shodné operační zesilovače. Jejich buzení v protifázi je zajištěno stejným způsobem jako v případě laboratorního přístroje (obr. 74). Přístrojový zesilovač LMP8358 byl nahrazen typem INA331, který je popsán v kap. 6.2.1.



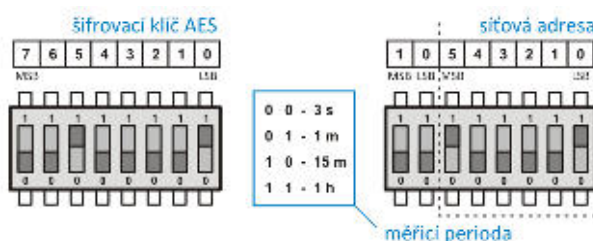
Obr. 94 Blokové schéma měřicího bodu

Měřicí bod byl vybaven jedním interním a jedním externím čidlem teploty a relativní vlhkosti SHT21, které bylo popsáno v kapitole 5.3.4. Externí čidlo je realizováno formou sondy, která se osvědčila u laboratorního měřicího přístroje. Slouží k měření doplňkových veličin v podobě teploty a relativní vlhkosti v objemu sledovaného materiálu. Interní čidlo slouží ke sledování provozního stavu měřicího bodu. Informace o teplotě a relativní vzdušné vlhkosti uvnitř konstrukční krabice jsou odesílány v datovém rámci do ústředny (viz kap. 6.2.3).

Vzhledem k požadavku na možnost konfigurace síťové adresy a měřicí periody v místě instalace jsou na desce plošných spojů měřicího bodu umístěny dva přepínače DIP (*Dual In-line Package*). Každý umožňuje manuálně nastavit celkem osm konfiguračních bitů. Význam jednotlivých bitů popisuje obr. 95. Osm bitů na dolním



přepínači DIP (z pohledu na obr. 96) slouží k nastavení šifrovacího klíče algoritmu AES128 (viz kap. 6.2.3). Popisu algoritmu AES128 použitým v bezdrátovém komunikačním modulu se podrobně věnuje publikace [60]. Horní přepínač DIP je rozdělen na dvě funkční části. Dvěma prvními bity zleva lze nastavit jednu ze čtyř přednastavených period měření. Lze vybrat periodu 3 s (nejrychlejší možné opakování měření), 1 minuta, 15 minut a 1 hodina. Bity 0 až 5 lze nastavit síťovou adresu měřicího bodu ve vztahu ke komunikační ústředně. Celkem šest bitů umožňuje rozlišit až 64 síťových adres. Tím je dán maximální počet měřicích bodů, které mohou být současně připojeny k jedné komunikační ústředně.



**Obr. 95** Význam jednotlivých bitů na přepínačích DIP

Stav jednotlivých konfiguračních bitů je programově vyčítán pomocí posuvných registrů 74LS165 [61]. Ty pracují jako převodníky paralelní informace na sériový datový tok. Vyčítání všech šestnácti bitů je tak možné realizovat pouze pomocí tří vodičů komunikační sběrnice SPI. Na desku plošných spojů bylo umístěno tlačítko, které slouží pro servisní zásah a v současné verzi programového vybavení vkládá do odesílaného datového rámce takzvanou „značku“. Pomocí značky lze v odesílaných datech označit časový úsek, kdy došlo během servisního zásahu k nějaké důležité změně. Signalizační diody umístěné na desce plošných spojů slouží k vizuální signalizaci důležitých stavů měřicího bodu (odesílání datového rámce, výstraha konce kapacity napájecího článku apod.). Konstrukční krabička je vybavena transparentním krytem, který umožňuje sledovat světelnou signalizaci a stav konfiguračních přepínačů bez nutnosti jeho demontáže.

Pro splnění požadavku na dlouhodobý provoz byl jako zdroj energie zvolen primární lithiový článek s výstupním napětím 3,6 V a kapacitou 19 A/h. Napájecí článek je velikosti D (velký monočlánek) a vyplňuje prostor v konstrukční krabičce pod deskou plošných spojů. Napájecí napětí je do desky přivedeno prostřednictvím konektoru (obr. 96). Všechny obvody použité při návrhu zařízení mohou pracovat s napájecím napětím v rozsahu 2,5 V až 3,6 V. To umožňuje připojit napájecí větev přístroje přímo na napájecí článek bez nutnosti transformace napětí. Distribuci napájecího napětí do jednotlivých komponent měřicího bodu řídí mikrokontrolér pomocí tranzistorového spínače.

Činnost měřicího modulu lze rozdělit do dvou režimů, které se střídají během nastavené periody měření – aktivní a úsporný režim. Cílem je minimalizovat spotřebu elektrické energie. V časovém úseku, kdy není požadována žádná činnost, pracuje měřicí bod v úsporném režimu. Napájecí napětí je přivedeno pouze do mikrokontroléru bezdrátového komunikačního modulu, který pracuje v režimu se sníženou spotřebou LPM3 [59]. V tomto režimu jsou vypnuty všechny vnitřní periferie až na časovač, který autonomně odměřuje dobu do přerušení a následného uvedení do aktivního módu (AM). Proudová spotřeba mikrokontroléru v úsporném režimu LPM3 se pohybuje v závislosti na velikosti napájecího napětí a okolní teplotě od 2  $\mu\text{A}$  do 4  $\mu\text{A}$ .



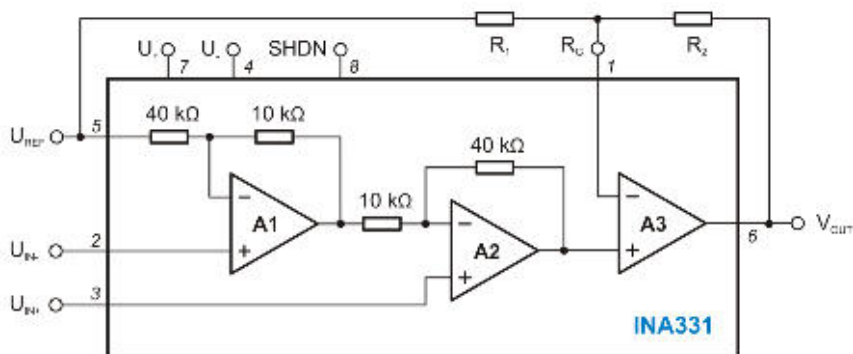
**Obr. 96** Měřicí bod

Perioda, se kterou nastává probouzení měřicího bodu, je dána nastavením hodnoty časovače. Po uplynutí nastavené doby přechází měřicí bod do aktivního režimu. Mikrokontrolér je probuzen z režimu se sníženou spotřebou, jsou zapnuty používané vnitřní periferie a pomocí tranzistorového spínače je přivedeno napájecí napětí do všech komponent měřicího bodu. Následuje změření sledovaných veličin a jejich odeslání do ústředny. Po úspěšném odeslání naměřených dat přechází měřicí bod opět do úsporného režimu. Proudová spotřeba během aktivního režimu je proměnlivá v závislosti na právě probíhající činnosti. Nejnáročnější je měření reálné složky impedance a odesílání dat pomocí bezdrátového rozhraní. Z hlediska dlouhodobého provozu je důležité minimalizovat čas, po který se měřicí bod nachází v aktivním režimu. Energie spotřebovaná měřicím bodem během jedné měřicí periody je dána plochou pod křivkou proudové spotřeby. Vzhledem k tomu, že se většinu času nachází měřicí bod v úsporném režimu, je nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím délku

nepřetržitého provozu proudová spotřeba mikrokontroléru v režimu se sníženou spotřebou. Naměřená velikost proudové spotřeby v režimu spánku měřicího bodu je  $5,7 \mu\text{A}$  (ke spotřebě mikrokontroléru v LPM3 se přičítají svodové proudy). V aktivním režimu je průměrná velikost proudové spotřeby  $33 \text{ mA}$  po dobu  $95 \text{ ms}$  (probuzení mikrokontroléru, změření velikosti reálné složky impedance, vyčtení informací ze senzorů SHT21, odeslání datových rámců, čekání na potvrzení ústřednou, návrat do režimu spánku). Při periodě měření 1 minuta je kapacita spotřebovaná z napájecího článku  $58 \mu\text{A/h}$ . Při ideální kapacitě článku  $19 \text{ A/h}$  by mohl bezdrátový měřicí bod pracovat nepřetržitě 37 let. Vzhledem k omezené životnosti článku (výrobce garantuje 10 let) bude tato doba kratší.

### 6.2.1 Přístrojový zesilovač INA331

Přístrojový zesilovač INA331 byl zvolen jako ekonomická varianta typu LMP8358 použitého v laboratorním přístroji. Hlavním rozdílem typu INA331 oproti LMP8358 je absence digitálního rozhraní, které bylo využito pro nastavení zesílení a dalších provozních parametrů (frekvenční kompenzace, režim se sníženou spotřebou atd.). Zesílení INA331 lze nastavit prostřednictvím rezistorů  $R_1$  a  $R_2$  připojených do zpětné vazby – mezi svorky  $V_{\text{OUT}}$ ,  $R_G$  a  $V_{\text{REF}}$  (obr. 97).



**Obr. 97** Blokové schéma přístrojového zesilovače INA331 [62]

Závislost napětového zesílení  $A_U$  na hodnotách rezistorů  $R_1$  a  $R_2$  je dána vztahem:

$$A_U = 5 + \left( \frac{5 \cdot R_2}{R_1} \right) \quad [-] \quad (20)$$

Pro potřeby dlouhodobého měření elektrických parametrů senzorů, popsaného v kap. 4.4.3), bylo zvoleno napětové zesílení  $A_U = 100$ . Hodnota rezistoru  $R_1$  byla zvolena dle doporučení výrobce  $10 \text{ k}\Omega$  [62]. Úpravou rovnice (20) pro výpočet hodnoty rezistoru  $R_2$  vznikne vztah:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot (A_U - 5)}{5} \quad [\Omega] \quad (21)$$

Z rovnic (11, 12 a 13) vyplývá, že pro dosažení zesílení  $A_U = 100$  je třeba použít rezistor  $R_2$  s hodnotou 190 k $\Omega$ . Přesná hodnota 190 k $\Omega$  není obsažena v žádné z dostupných rezistorových řad. Dokonce i řada E192 obsahuje buď hodnotu 189 k $\Omega$ , nebo 191 k $\Omega$ . Byla zvolena nejbližší hodnota rezistoru z běžné řady E12, která vede k celočíselnému výsledku hodnoty napětového zesílení (pro uložení konstanty a jejím zahrnutí do výpočtu v programu mikrokontroléru lze použít celočíselný datový typ). Pomocí hodnot  $R_1 = 10$  k $\Omega$  a  $R_2 = 180$  k $\Omega$ , bylo dosaženo napětového zesílení  $A_U = 95$ .

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot (A_U - 5)}{5} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot (95 - 5)}{5} = 180 \text{ k}\Omega \quad (22)$$

Důležité parametry přístrojového zesilovače s ohledem na aplikaci jsou především rozsah napájecího napětí 2,5 V až 5,5 V, šířka pásma 2 MHz (pro pokles o 3 dB) a rychlost přeběhu 5 V/ $\mu$ s. Zesilovač je typu „rail-to-rail“ a výstupní napětí v saturaci je vůči napájecímu napětí omezeno pouze o 20 mV. Klidový odběr obvodu je pouze 490  $\mu$ A a v případě úsporného režimu (signál SHDN) klesá na hodnotu 0,01  $\mu$ A. Činitel potlačení souhlasného signálu (CMRR) dosahuje na pracovní frekvenci 1 kHz hodnoty 94 dB. Výstup přístrojového zesilovače je přiveden na vstup převodníku A/D integrovaného v mikrokontroléru bezdrátového komunikačního modulu (kap. 6.4). Motiv vytvořený na desce plošných spojů umožňuje mezi výstup přístrojového zesilovače a vstup převodníku A/D zařadit dolnofrekvenční propust tvořenou článkem RC. V případě potřeby lze dolnofrekvenční propust z výstupu přístrojového zesilovače odstranit vysokofrekvenční rušivé složky. Během testování měřicího bodu bylo ověřeno, že použití filtru není nutné, proto není článek RC na desce plošných spojů osazen.

### 6.2.2 Operační zesilovač OPA2376

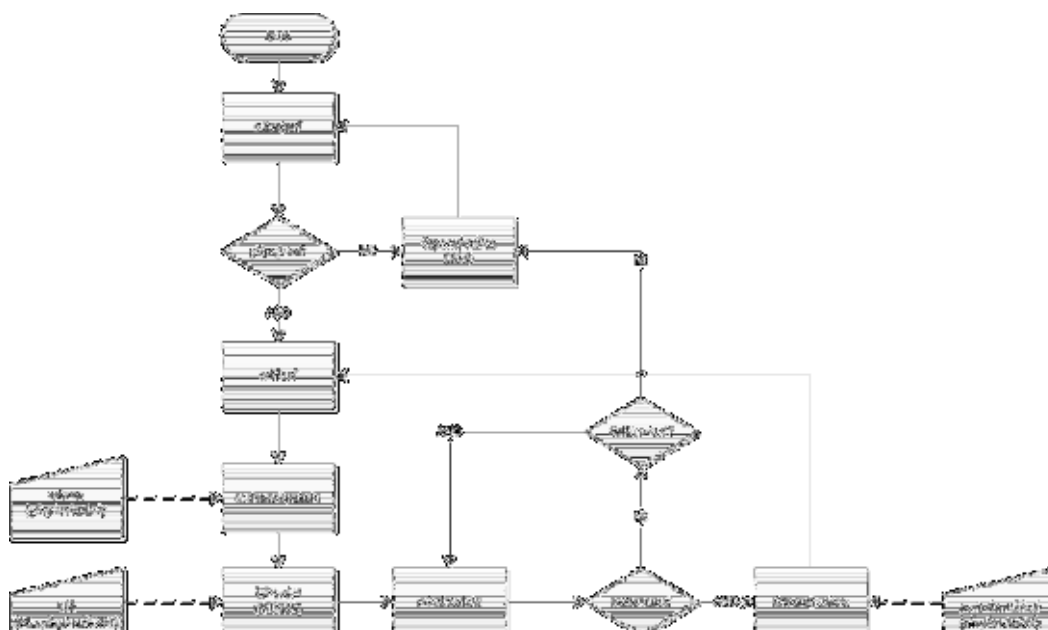
Komplementární dvojice operačních zesilovačů v zapojení „push-pull“ byla vytvořena pomocí dvou operačních zesilovačů integrovaných v jednom pouzdře. Obvod OPA2376 [63] obsahuje dva precizní, nízkošumové operační zesilovače s šířkou pásma 5,5 MHz. Zesilovač má klidový odběr proudu pouze 760  $\mu$ A a je schopen pracovat v rozsahu napájecího napětí od 2,2 V do 5,5 V. Vstup i výstup zesilovače je typu „rail-to-rail“. Výstupní napětí zesilovače v saturaci je vůči rozsahu použitého napájecího napětí omezeno typicky pouze o 20 mV při zátěži 10 k $\Omega$ . Zesilovač je schopen do zátěže dodávat trvalý proud až 30 mA a je odolný proti trvalému zkratu výstupu jednoho ze zesilovačů se zemí. Rychlost přeběhu dosahuje hodnoty 2 V/ $\mu$ s. Operační zesilovač OPA2376 byl pro tuto aplikaci zvolen především kvůli vysoké rychlosti přeběhu, dostatečné šířce pásma a malému šumu. Důležitým parametrem je rozsah napájecího napětí, který dovoluje zesilovač napájet napětím již od 2,2 V.

Díky standardnímu zapojení vývodů pouzdra lze v případě potřeby nahradit použitý zesilovač typem s odlišnými vlastnostmi, případně nižší cenou.

### **6.2.3 Programové vybavení**

S ohledem na minimalizaci spotřeby elektrické energie při dlouhodobém provozu není možné monitorovací systém provozovat v režimu, kdy by měřicí body nepřetržitě přijímaly povely od komunikační ústředny, která by koordinovala jednotlivá měření. Spotřeba měřicího bodu v přijímacím režimu je přibližně 30 mA. Pokud by dosahovala dlouhodobá spotřeba energie takto velké hodnoty, tak by při dané kapacitě napájecího článku mohl měřicí bod pracovat pouze 630 hodin (26 dnů). Do této kalkulace však není započítána závislost kapacity článku na trvalém proudovém odběru. Z vybíjecích charakteristik článku uvedených v katalogovém listu [64] vyplývá, že využitelná kapacita při trvalém proudovém odběru 30 mA je pouze cca 16 A/h. Doba provozu by tak byla ještě o 100 hodin kratší (22 dnů).

Pro provoz monitorovacího systému byl zvolen energeticky nejméně náročný způsob činnosti. Ten spočívá v minimalizaci dlouhodobé spotřeby v úsporném režimu a minimalizaci času, po který je měřicí bod v aktivním režimu. Měřicí body nejsou vzájemně časově synchronizovány. Každý bod může být spuštěn v libovolný čas (připojení napájecího článku) a od té doby si sám odměřuje časový interval, který je dán nastavenou měřicí periodou. Vlivem nepřesnosti frekvence oscilátoru jednotlivých měřicích bodů (výrobní odchylka, teplotní drift) dochází k vzájemnému časovému posunu úseků, kdy daný měřicí bod vysílá naměřená data do komunikační ústředny. Z hlediska dlouhodobého provozu monitorovacího systému může nastat situace, kdy se vysílání dvou či více měřicích bodů začne časově překrývat. Vzhledem k tomu, že všechny komunikační moduly pracují na stejné frekvenci, dojde k vzájemnému překrytí vysílaných dat, které vede k tomu, že ústředna nepřijme platná data. Nejenom kvůli této situaci, ale obecně kvůli jistotě, že ústředna data přijme v pořádku a nedojde ke ztrátě naměřených dat, je komunikace ústřednou potvrzována. Po tom, co měřicí bod odešle svá data do ústředny, čeká po určitou dobu v přijímacím režimu a očekává její odpověď. Pokud tuto odpověď do časového limitu neobdrží, vygeneruje náhodné číslo, kterým si sám ovlivní délku časového intervalu do opakování pokusu odeslání dat. To dělá tak dlouho, dokud mu ústředna nepotvrdí platné přijetí vysílaných dat. Vygenerováním náhodného čísla dojde k časovému posunu okamžiku odeslání, a pokud byla důvodem neúspěšného odeslání časová shoda s jiným měřicím bodem, v příští vysílací periodě ke kolizi dojde s menší pravděpodobností.



**Obr. 98** Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér měřicího bodu

Činnost programového vybavení mikrokontroléru měřicího bodu je popsána vývojovým diagramem na obr. 98. Po připojení napájecího napětí je měřicí bod uveden do aktivního režimu. Nejprve provede pokus o navázání bezdrátového spojení s komunikační ústřednou. Pokud se připojení nezdaří, přechází měřicí bod do úsporného režimu a za jednu minutu je pokus o navázání spojení opakován. Pokud je pokus úspěšný, následuje proces měření sledovaných veličin. Poté je sestaven komunikační rámec (paket), který se skládá z datového rámce a stavového rámce, jejichž obecný formát je uveden na obr. 99.

#### Datový rámec

| [0]  | [1]           | [2]          | [3] | [4] | [5] | [6]                     | [7] | [8]                      | [9] | [10]                    | [11] | [12]                     | [13] | [14]   |
|------|---------------|--------------|-----|-----|-----|-------------------------|-----|--------------------------|-----|-------------------------|------|--------------------------|------|--------|
| 0xDD | síťová adresa | Re Z (float) |     |     |     | T <sub>EXT</sub> (uint) |     | RH <sub>EXT</sub> (uint) |     | T <sub>INT</sub> (uint) |      | RH <sub>INT</sub> (uint) |      | značka |

#### Stavový rámec

| [0]  | [1]           | [2]  | [3] | [4]              |
|------|---------------|------|-----|------------------|
| 0xAA | síťová adresa | RSSI | LQI | U <sub>SAT</sub> |

**Obr. 99** Formát komunikačních rámců odesílaných měřicím bodem

Datový rámec obsahuje celkem patnáct bytů. Začátek datového rámce je označen jedním bytem s konstantní hodnotou 0xDD (hexadecimálně). Následuje byte se síťovou adresou, která je vyčtena z aktuální konfigurace příslušného přepínače DIP. Další čtyři byty jsou vyhrazeny pro hodnotu relativní hodnoty změřené impedance. Hodnota je reprezentována datovým typem s plovoucí desetinnou čárkou „float“. Přepočet výstupní hodnoty z převodníku A/D na reálnou hodnotu impedance je proveden těsně před sestavením rámce a do ústředny je přenášena výsledná hodnota. Tento postup



umožňuje provést numerickou kalibraci hodnoty s použitím údajů o teplotě a vlhkosti ještě v měřicím bodu a zohlednit tak nežádoucí vlivy působící na konkrétní měřicí element. V datovém rámci následují informace o teplotě (T) a relativní vlhkosti (RH). Nejprve jsou přenášeny informace získané z externí sondy, poté informace získané z interního čidla. Pro každou měřenou veličinu jsou vyhrazeny dva byty a hodnota je reprezentována celočíselným datovým typem „*unsigned integer*“. Údaje o teplotách a relativních vlhkostech jsou na reálné hodnoty (s desetinnou čárkou) přepočítány až na úrovni serveru – aplikace „*Selfmonitoring Control Platform*“ popsané v kap. 6.5. Datový rámec je zakončen posledním bytem „značka“, který umožňuje připojit k danému komunikačnímu rámci informaci o důležitém servisním zásahu.

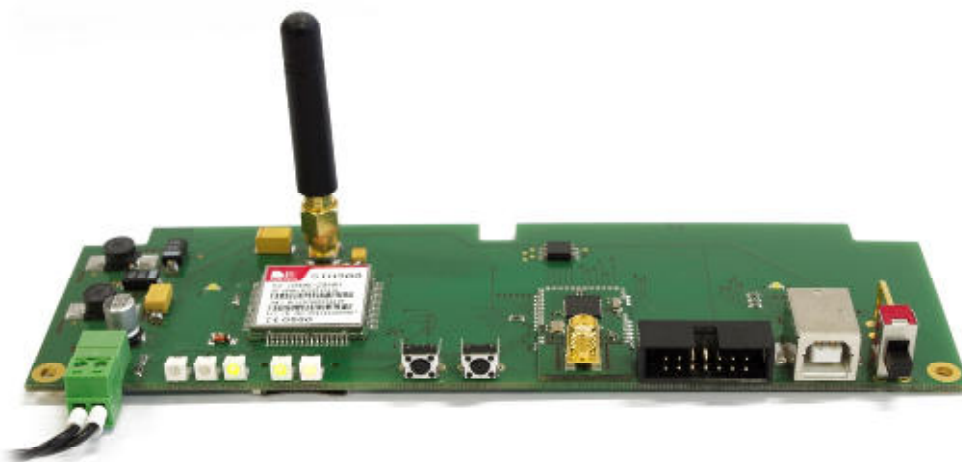
Stavový rámec je složen celkem z pěti bytů. První byte označuje začátek rámce a má konstantní hodnotu 0xAA (hexadecimálně). Následuje jeden byte se síťovou adresou, která je vyčtena z aktuální konfigurace příslušného přepínače DIP. Další dva byty poskytují komunikační ústředně informace o jakosti bezdrátového spojení s měřicím bodem. Byte RSSI (*Received Signal Strength Indication*) udává intenzitu přijímaného signálu bez ohledu na jeho kvalitu, byte LQI (*Line Quality Indicator*) naopak udává kvalitu přijímaného signálu, která je úzce spjata s intenzitou přijímaného signálu. Díky těmto indikátorům lze přenášet do aplikace údaje o jakosti a stabilitě bezdrátového spojení. Posledním bytem stavového rámce je informace o napětí napájecího článku. Z hodnoty napětí lze odhadnout zbývající provozní dobu do okamžiku, kdy bude potřeba servisní zásah.

Po sestavení komunikačního rámce jsou přenášena data zašifrována pomocí algoritmu AES128 [60]. Algoritmus využívá šifrovací klíč, který má délku 128 bitů. V dané aplikaci je šifrovací klíč sestaven tak, že jedna jeho část je pevně daná (vestavěná v řídicím programu mikrokontroléru) a posledních osm bitů lze ovlivnit nastavením příslušných bitů na přepínači DIP. Před odesláním každého komunikačního rámce je informace z přepínače DIP načtena a je sestaven aktuální šifrovací klíč. Následuje zašifrování dat a jejich odeslání. Poté, co je celý komunikační rámec odeslán, je komunikační modul přepnut do režimu přijímání. V něm setrvá po nastavenou dobu a očekává potvrzení o úspěšném přijetí a dekodování dat komunikační ústřednou. Pokud toto potvrzení měřicí bod přijme v časovém limitu, jedna měřicí perioda úspěšně končí. Z přepínače DIP je načteno aktuální nastavení měřicí periody, které je promítnuto do nastavení časovače. Měřicí bod přechází do úsporného režimu, při kterém je ukončeno napájení komponent umístěných na desce plošných spojů a řídicí mikrokontrolér přechází do režimu se sníženou spotřebou LPM3. Běžící časovač je připraven po uplynutí nastavené periody měřicí bod opět uvést do aktivního režimu a provést další měření.

Pokud v nastaveném časovém limitu měřicí bod neobdrží platné potvrzení o úspěšném přijetí dat ústřednou, tak ukončí režim přijímání a stejně jako v úspěšném případě přejde do úsporného režimu. Před tím ale řídicí mikrokontrolér vygeneruje náhodné číslo, kterým upraví hodnotu časovače tak, aby vytvořil náhodné zpoždění v určitém časovém intervalu. Po uplynutí takto nastavené doby je měřicí bod probuzen a pokus o odeslání dat je opakován. V případě, že je pokus úspěšný, tak je před přechodem do úsporného režimu načtena hodnota, která odpovídá nastavenému intervalu přepínačem DIP. V případě, že je pokus opět neúspěšný, je vygenerováno nové náhodné číslo a pokus o odeslání je opakován. Řídicí program mikrokontroléru umožňuje omezit počet těchto opakování, čímž lze zabránit vybití napájecího článku v případě systematické chyby (rušení, odstínění signálu, výpadek komunikační ústředny). V současné verzi programového vybavení není počet opakování omezen.

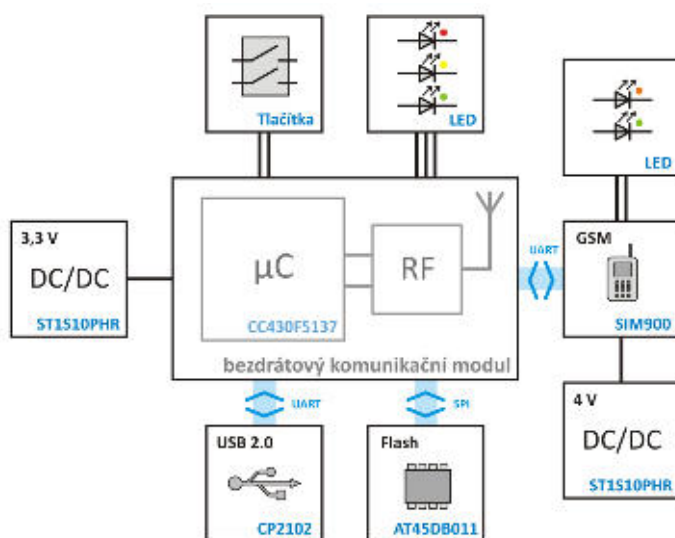
### 6.3 Komunikační ústředna

Komunikační ústředna je druhou úrovní v hierarchii monitorovacího systému. Její funkčnost je pro monitorovací systém klíčová. Funkce ústředny může být zálohována pomocí přídavného akumulátoru, který zajistí nepřetržitý provoz i v případě výpadku elektrické rozvodné sítě. Stejně jako bezdrátové měřicí body je i ústředna vybavena bezdrátovým komunikačním modulem popsáním v kap. 6.4. Na rozdíl od komunikačních modulů použitých v bezdrátových měřicích bodech je pro komunikační ústřednu použita varianta modulu s vysokofrekvenčním konektorem typu SMA, sloužícím k připojení všesměrové prutové antény ve frekvenčním pásmu 868 MHz. Vyzařovací charakteristika tohoto typu antény umožňuje lepší pokrytí signálem pro bezdrátové měřicí body rozmístěné v okolí komunikační ústředny. Systém propojení pomocí konektorů SMA umožňuje vyvést konektor na stěnu konstrukční skříně pro připojení antény z vnější strany.



*Obr. 100 Komunikační ústředna*

Deska plošných spojů komunikační ústředny (obr. 100) je svým tvarem přizpůsobena pro vestavbu do konstrukční skříně. Výřezy v horní části desky zapadají do drážek v konstrukční skříně. V případě jiného způsobu uchycení lze redukovat její plochu až o polovinu, čímž dojde k výrazné redukci výrobní ceny. Blokové schéma je uvedeno na obr. 101. Hlavním řídicím prvkem je mikrokontrolér CC430F5137 integrovaný v bezdrátovém komunikačním modulu. Obslužný program mikrokontroléru ovládá připojené periferie, sbírá data od jednotlivých měřicích bodů a zpracované rámce předává do třetí úrovně monitorovacího systému, kterou je server integrovaný v aplikaci „Selfmonitoring Control Platform“. Konektivita do sítě Internet je zajištěna pomocí bezdrátové technologie GSM. Integrace rozhraní GSM je realizována modulem SIM900 (kap. 6.3.1), který je k mikrokontroléru připojen prostřednictvím sériového komunikačního rozhraní UART. Modul má specifické požadavky na napájení, proto je připojen na samostatný snižující měnič s výstupním napětím 4 V. Zbývající komponenty ústředny, včetně bezdrátového komunikačního modulu, jsou napájeny snižujícím měničem s výstupním napětím 3,3 V. Vstupní napětí obou snižujících měničů s řídicím obvodem ST1S10PHR [51] může být v rozsahu 5 V až 18 V. Napájení komunikační ústředny tak může být zálohováno akumulátorem s výstupním napětím 6 V nebo 12 V. Vhodným typem je bezúdržbový hermeticky uzavřený olověný akumulátor. Diody LE (*Light Emitting*) umístěné na desce plošných spojů v těsné blízkosti modulu (oranžová, zelená) jsou ovládány modulem GSM a vizuálně signalizují jeho aktuální stav. Deska plošných spojů ústředny byla vybavena trojicí LED, připojených k branám mikrokontroléru. Slouží pro signalizaci důležitých stavů a jsou ovládány řídicím programem. Pro ovládání ústředny v místě instalace slouží dvojice tlačítek. Ta jsou využita například pro přepínání mezi provozním a servisním režimem činnosti ústředny.



Obr. 101 Blokové schéma komunikační ústředny

Sériové komunikační rozhraní USB bylo do ústředny implementováno ze dvou různých důvodů. Prvním důvodem je možnost alternativního přenosu dat z ústředny do aplikace „*Selfmonitoring Control Platform*“ pomocí přímého propojení kabelem USB mezi ústřednou a PC, na kterém je program nainstalován. Druhým důvodem je servisní režim ústředny, při kterém lze konfigurovat různé parametry modulu GSM (síťová adresa serveru, komunikační port atd.). Rozhraní USB je integrováno pomocí obvodu CP2102 [65], který pracuje na stejném principu, jako obvod FT232RL [39] popsany v kap. 5.1. Dalším obvodem integrovaným na desce plošných spojů ústředny je externí paměť typu „*Flash*“. Obvod AT45DB011 [66] je k mikrokontroléru připojen prostřednictvím sériového komunikačního rozhraní SPI. Obsahuje celkem 1 Mb paměti, která může být využita pro ukládání velkého množství dat. Původní záměr bylo využít paměť jako zásobník, který by akumuloval data přijatá z bezdrátových měřicích bodů v případě výpadku datového připojení sítě GSM, pro jejich odložené odeslání. Během vývoje řídicího programu ústředny bylo ověřeno, že je datové připojení pomocí technologie GPRS stabilní. Pro pokrytí krátkodobých výpadků a zpoždění přenosu byl zásobník realizován ve vnitřní paměti RAM použitého mikrokontroléru. Během testování spolehlivosti komunikační ústředny se použité řešení ukázalo jako dostatečné. Externí paměť není v současné verzi řídicího programu mikrokontroléru využita. Může sloužit pro případné budoucí rozšíření funkcionality.

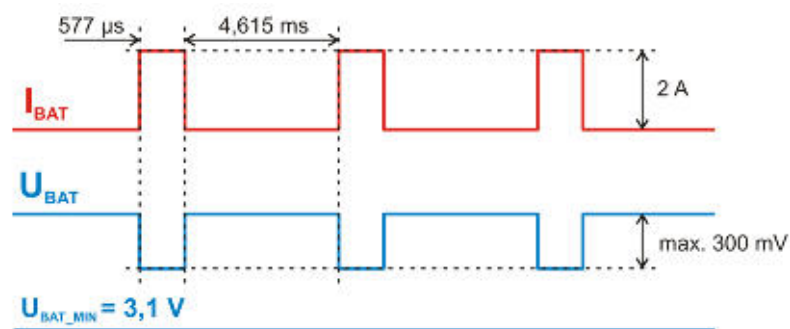
### **6.3.1 Komunikační modul SIM900**

Modul SIM900 v sobě integruje všechny bloky potřebné pro integraci technologie GSM do koncového zařízení. Je homologován pro použití nejen v České Republice, ale prakticky po celém světě. Podobné komunikační moduly používají komerční výrobci mobilních telefonů, kteří je integrují na desky plošných spojů svých výrobků. Modul je tzv. „*Quad-band*“, což znamená, že je schopen pracovat ve čtyřech frekvenčních pásmech. Dle specifikace standardu GSM 2/2+ dosahuje výstupní výkon vysílače hodnoty 2 W pro frekvenční pásma 850 MHz a 900 MHz (třída 4). Pro frekvenční pásma 1,8 GHz a 1,9 GHz je výstupní výkon 1 W (třída 1). Pro sestavení datového připojení do sítě internet je modul vybavený technologií GPRS třídy 10, která dosahuje maximální rychlosti přenosu dat 85,6 kb/s. Modul dále obsahuje celou řadu funkcí pro přenos hlasu, faxové služby, službu SMS (*Short Message Service*) atd. Ty však nejsou v aplikaci komunikační ústředny využity, proto jim nebude věnována pozornost.

Pro připojení do sítě GSM musí být k modulu připojena karta SIM (*Subscriber Identity Module*), která uživatele jednoznačně identifikuje v rámci sítě mobilního operátora. Služby, které lze v síti využívat jsou navázány na kartu SIM a jejich použití bývá obvykle zpoplatněno. Pro funkci komunikační ústředny je nezbytné mít u operátora aktivované datové služby (fixní cena za jednotku dat nebo paušální

zpoplatnění). Pro připojení karty SIM má modul vyvedené rozhraní. Na desce plošných spojů ústředny je umístěn slot pro vložení karty SIM standardního provedení.

Vzhledem k velkému vysílacímu výkonu (až 2 W) má modul poměrně specifické nároky na napájení. Primárně je modul určen pro napájení jedním článkem typu Li-Ion (*Lithium-ion battery*) nebo Li-Po (*Lithium-ion polymer battery*). Uvedené články jsou zdrojem napětí v rozsahu 3,2 V až 4,2 V a jsou schopny dodávat velké proudy do zátěže bez výrazného poklesu výstupního napětí (tvrdý zdroj). V případě použití jiného zdroje, je třeba dodržet parametry napájení, které udává výrobce v katalogovém listu [67].



**Obr. 102** Definice napájecích nároků modulu SIM900 [67]

Modul při vysílání odebírá z napájení špičkový proud až 2 A (obr. 102). Délka trvání špičkového odběru je 577  $\mu s$ . Poté následuje časový úsek 4,615 ms, ve kterém proudová spotřeba dosahuje velmi malých hodnot (řádově desítky mA). Důležité je, aby napájecí napětí modulu během špičkového odběru nepokleslo o více jak 300 mV nebo pod minimální napájecí napětí 3,1 V. Pokud nejsou tyto podmínky dodrženy, modul nepracuje korektně. V komunikační ústředně je modul napájen snižujícím měničem s výstupním napětím 4 V (viz kap. 6.3), které zajišťuje dostatečný odstup od minimální napájecí úrovně modulu o hodnotě 3,1 V. Napájecí cesta na desce plošných spojů je krátká, s minimálním ohmickým odporem. V bezprostřední blízkosti modulu je napájení dle doporučení výrobce blokováno paralelní kombinací kondenzátorů. Kondenzátory, v roli zásobníku energie se schopností dodat krátkodobě velký proud do zátěže, zajišťují splnění napájecích podmínek.

Modul GSM je vybaven komunikačním rozhraním UART. Napěťové úrovně rozhraní jsou odvozeny od napájecího napětí 3,3 V, kterým jsou napájeny zbývající obvody ústředny. Komunikace s modulem probíhá prostřednictvím tzv. „příkazů AT“. Jedná se o předávání textových řetězců mezi modulem a nadřazeným systémem (v tomto případě mikrokontrolérem). Prostřednictvím textových řetězců lze modulu posílat příkazy a parametry. Modul textové řetězce přeloží, provede požadovanou operaci a odešle zpět do mikrokontroléru odpověď, opět formou textového řetězce. Tento způsob komunikace byl pro použití v modulech GSM unifikován a s menšími

odlišnostmi jej využívají všichni výrobci v oblasti GSM. Seznam příkazů AT pro modul SIM900 udává výrobce v katalogovém listu [67]. Výhodou tohoto způsobu komunikace je snadná čitelnost a pochopitelnost pro člověka, nevýhodou jsou velké nároky na paměť mikrokontroléru, protože jednotlivé řetězce musí být uchovány v paměti programu.

### 6.3.2 Programové vybavení

Vývojový diagram řídicího programu mikrokontroléru ústředny je uveden na obr. 103. Po připojení napájecího napětí nebo restartování ústředny, je nejprve zjišťován stav tlačítka, které slouží pro volbu konfiguračního „režimu AT“. V něm ústředna očekává sekvence textových řetězců a přidružených parametrů. Ke komunikaci v tomto případě slouží výhradně rozhraní USB. Seznam příkazů AT, které komunikační ústředna podporuje, je uveden v tab. 10. Aplikace „Selfmonitoring Control Platform“ obsahuje funkci, která umožňuje provést tuto konfiguraci uživatelsky přívětivým způsobem (viz kap. 6.5).

Pokud není při startu programu zvolen režim AT, ústředna vyčte ze své vnitřní paměti informaci o tom, jaké bylo při posledním programovém běhu zvoleno komunikační rozhraní pro výměnu dat. V případě, že byl zvolen režim „online“, ústředna začne inicializovat modul GSM a sestaví datové připojení prostřednictvím technologie GPRS. Pokud není datové připojení navázáno úspěšně, je pokus opakován, dokud k sestavení nedojde. V případě úspěšně sestaveného datového spojení se ústředna pokusí připojit k serveru – aplikaci „Selfmonitoring Control Platform“ – prostřednictvím internetového protokolu TCP.

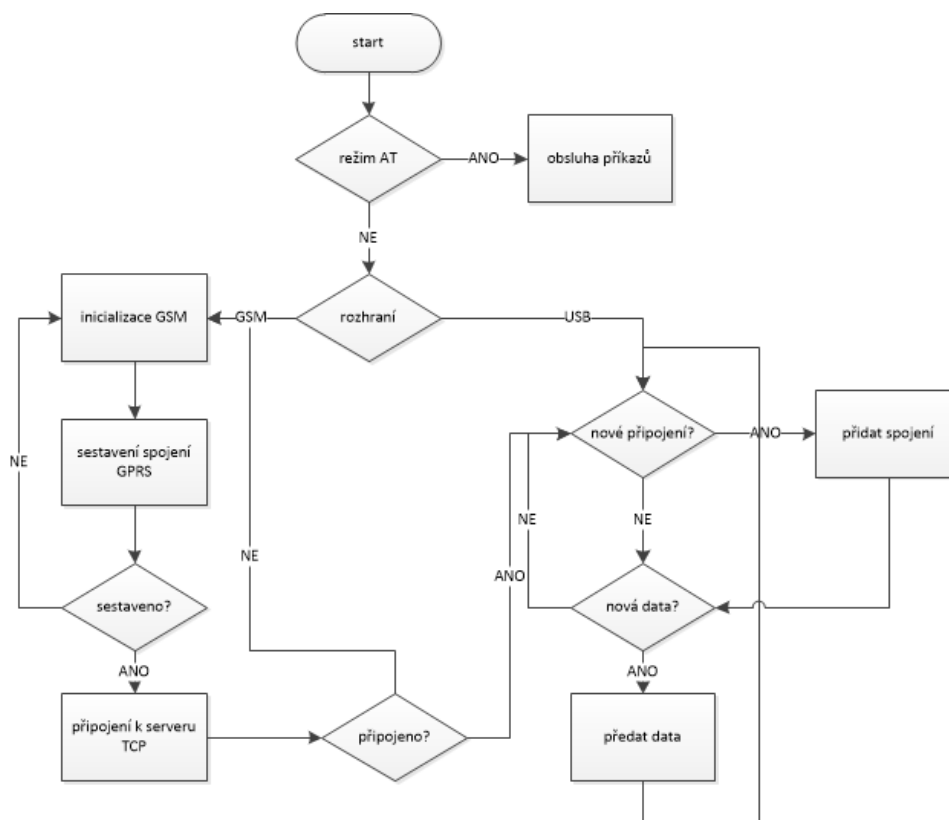
**Tab. 10** Seznam použitých příkazů AT

| Příkaz                | Příklad               | Odpověď                       | Popis                                                                                                     |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SETIP=xxx.xxx.xxx.xxx | SETIP=213.226.252.167 | OK                            | nastaví adresu IP serveru                                                                                 |
| IP                    | IP                    | ADDRESS<br>IP:213.226.252.167 | vrátí adresu IP                                                                                           |
| SETPORT=xxxxx         | SETPORT=3000          | OK                            | nastaví port IP                                                                                           |
| PORT                  | PORT                  | PORT IP: 3000                 | vrátí port IP                                                                                             |
| SETKEY=0xXX           | SETKEY=0x01           | OK                            | nastaví kód kanálu                                                                                        |
| KEY                   | KEY                   | KEY=0x01                      | vrátí kód kanálu                                                                                          |
| SETOFFLINE=x          | SETOFFLINE=1          | OK                            | nastaví jednotku do režimu „offline“                                                                      |
| OFFLINE               | OFFLINE               | OFFLINE:1                     | vrátí nastavení „offline“ (1 – komunikace se serverem probíhá přes USB, 0 – komunikace probíhá přes GPRS) |
| EXIT                  | EXIT                  |                               | opustí konfigurační režim ústředny a podle nastavení OFFLINE naváže komunikaci                            |

Pokud se připojení nezdaří, algoritmus provede obnovení výchozího nastavení modulu GSM a celá výše popsaná sekvence se opakuje. V případě, že byl v předchozím



programovém běhu zvolen režim „offline“, tak je k výměně dat využito výhradně rozhraní USB, které využívá pro připojení k serveru (aplikaci) virtuální sériové rozhraní vytvořené na úrovni ovladačů operačního systému.



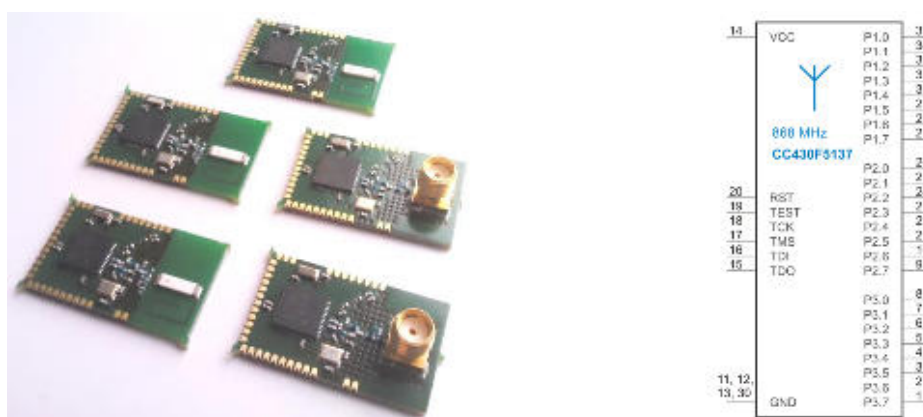
**Obr. 103** Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér komunikační ústředny

Ať už v režimu „online“ – po sestavení datového připojení pomocí protokolu TCP, nebo v režimu „offline“ – po navázání komunikace prostřednictvím rozhraní USB, se algoritmus dostává do stejného místa. Rozdíl je pouze v rozhraní, kterým budou získaná data odesílána do aplikace. V této fázi programu ústředna cyklicky zjišťuje nové bezdrátové měřicí body, které jsou v dosahu a mají korektně nastavený šifrovací klíč. Každý nový bezdrátový měřicí bod je aplikací „Selfmonitoring Control Platform“ registrován a přidán do seznamu v panelu „Jednotky“ (viz kap. 6.5, obr. 110). Příchozí komunikační rámce od jednotlivých měřicích bodů jsou jednotkou zpracovány a odesílány pomocí zvoleného komunikačního rozhraní.

## 6.4 Bezdrátový komunikační modul s CC430F5137

Bezdrátový komunikační modul pracující ve frekvenčním pásmu 868 MHz byl vyvinut speciálně pro potřeby monitorovacího systému. Důvodem byla minimalizace spotřeby elektrické energie. Použitý obvod CC430F5137 [59] obsahuje ve své vnitřní struktuře mikrokontrolér s jádrem MSP430 a vysokofrekvenční komunikační modul, který existuje také jako samostatná součástka s označením

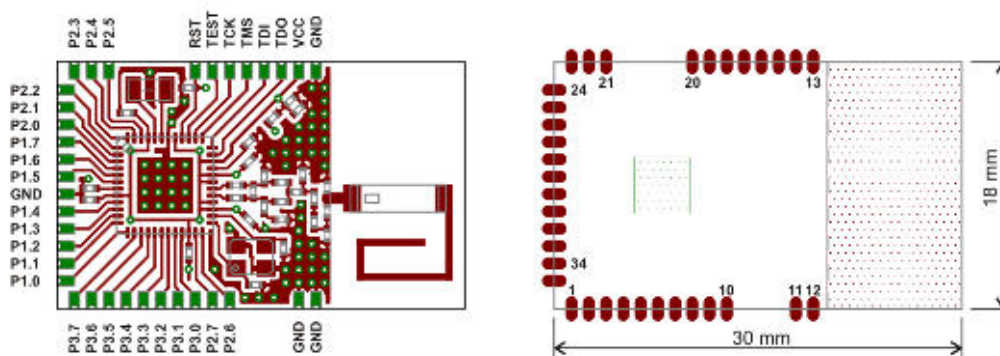
CC1101[68]. Díky integraci mikrokontroléru a komunikačního modulu do jednoho pouzdra dochází k významné úspoře místa na desce plošných spojů komunikačního modulu. Na rozdíl od většiny komerčně dostupných bezdrátových modulů lze přistupovat pomocí vnitřních registrů mikrokontroléru až na nejnižší úroveň řízení komunikace. Komunikační protokol může být optimalizován tak, aby byla energie potřebná k odesílání či přijímání dat využita s co největší efektivitou (odstranění zbytečné režie komunikačního protokolu). Návrh desky plošných spojů byl realizován na čtyřvrstvé desce plošných spojů a vychází z referenčního návrhu, který poskytuje výrobce obvodu [69].



**Obr. 104** Bezdrátové komunikační moduly s CC430F5137 a jejich schematický symbol

Důvodem využití referenčního návrhu byla možnost vytvořit desku respektující návrhová pravidla pro vysoké frekvence s co možná nejlepším impedančním přizpůsobením signálové cesty k anténě, bez použití sofistikovaných návrhových nástrojů či simulací. Komunikační moduly byly vytvořeny ve dvou různých variantách. Liší se způsobem připojení antény. Zatímco moduly určené do bezdrátových měřicích jednotek byly vybaveny keramickou anténou, integrovanou na desce plošných spojů, moduly určené do komunikační ústředny byly vybaveny vysokofrekvenčním konektorem typu SMA, který umožňuje připojení libovolné externí antény. Deska plošných spojů obou variant modulu je navržena tak, aby ji bylo možné osadit technologií SMT (*Surface Mount Technology*) obdobně jako ostatní součástky použité v konstrukci bezdrátového měřicího bodu a komunikační ústředny. Propojení jednotlivých signálů mezi modulem a deskou plošných spojů koncového zařízení je realizováno pomocí prokovených pájecích plošek, umístěných po obvodu modulu. Tento způsob propojení je v současné době využíván komerčními výrobci a je využit například u modulu GSM osazeného v komunikační ústředně (viz kap. 6.3.1). Deska plošných spojů modulu a doporučený motiv pro jeho osazení do koncového zařízení jsou uvedeny na obr. 105. V doporučeném motivu jsou vyznačeny dvě oblasti, které upravují návrhová pravidla desky plošných spojů koncového zařízení. V prostoru zeleně označené oblasti jsou ze spodní strany desky plošných spojů modulu umístěny

prokovené otvory vodivě spojené s elektrickou zemí (GND), které nejsou kryty nepájivou maskou. Prostor vznikl z technologických důvodů, prokovy napomáhají správnému osazení mikrokontroléru při výrobě modulu. Na desce plošných spojů koncového zařízení nesmí být v této oblasti obnažené prokovy nebo obecně vodivé části, které nejsou překryty maskou. Druhá oblast, vyznačená červeně, se nachází v oblasti kolem integrované keramické antény. Výrobce antény doporučuje ponechat tuto oblast bez jakékoliv vodivé cesty. Na komunikačním modulu je v tomto prostoru pod anténou pouze substrát FR4 (*Flame Retardant 4*). Na desce plošných spojů koncového zařízení je vhodné modul umístit na hranu substrátu, kdy buď vyznačená část vyčnívá z desky ven, nebo hrana modulu lícuje s hranou desky. V případě, že modul touto částí nevyčnívá ven, nesmí být v tomto prostoru na desce zařízení vodivé spoje. Tím je zajištěno, že vyzařovací charakteristika antény není ovlivněna okolními komponenty na desce plošných spojů koncového zařízení.



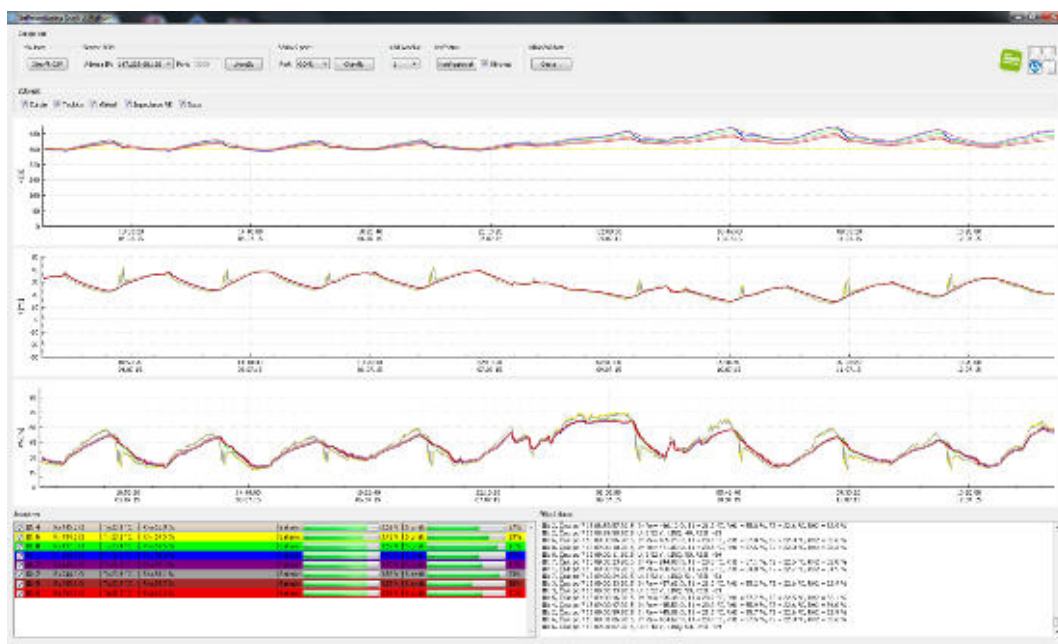
**Obr. 105** Návrh desky plošných spojů modulu a doporučený motiv pro jeho osazení

Označení signálů bezdrátového komunikačního modulu koresponduje s označením bran obvodu CC430F5137. Na desce plošných spojů modulu jsou umístěny pouze součástky nezbytné pro funkci vysokofrekvenční části a součástky, které je třeba umístit co nejbližší k pouzdru mikrokontroléru (krystalový oscilátor, odrušovací kondenzátory napájecí větve apod.). Cílem návrhu bylo poskytnout co největší počet vstupně-výstupních bran mikrokontroléru pro použití v koncovém zařízení.

## 6.5 Aplikace pro PC

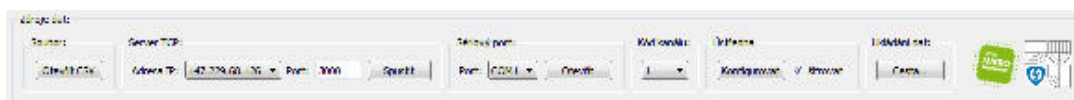
Aplikace „Selfmonitoring Control Platform“ integrující vícevláknový server, je třetí a zároveň nejvyšší úroveň v hierarchii monitorovacího systému. Data odesílaná komunikační ústřednou do sítě Internet, anebo po sériovém komunikačním rozhraní USB, jsou sbírána serverem a v reálném čase zobrazována v uživatelsky přívětivém aplikačním prostředí GUI (*Graphical User Interface*). Okno aplikace se skládá ze čtyř panelů. První panel byl nazván „Zdroje dat“ (obr. 107). Slouží ke konfiguraci zdroje, odkud budou získána data. První možností je načíst data ze souboru uloženého

na pevném disku počítače nebo přenosného datového nosiče. Očekáván je formát souboru „\*.csv“. Aplikace tak dokáže načíst záznamy z karty SD laboratorního přístroje (kap. 5).



Obr. 106 Okno aplikace „Selfmonitoring Control Platform“

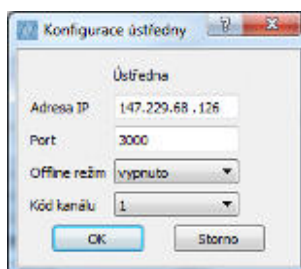
Nezávisle na zdroji jsou všechna příchozí data zálohována na pevný disk počítače právě v tomto formátu. Pro nastavení adresáře, kam bude aplikace tyto záznamy ukládat, slouží volba „Ukládání dat“. Kliknutím na tlačítko „Cesta“ je otevřeno standardní dialogové okno operačního systému pro volbu adresáře. Tlačítkem „Otevřít CSV“ mohou být načtena i data z této zálohy.



Obr. 107 Panel „Zdroje dat“

Další možností je načítání dat ze serveru TCP. Lze zvolit aktuální adresu IP a port, ke kterému se připojuje komunikační ústředna. Podmínkou správné funkce tohoto typu spojení je konfigurace komunikační ústředny na shodné parametry připojení. Server je spuštěn tlačítkem „Spustit“. Poslední možností načítání dat je sériový port. Pro výběr konkrétního sériového portu slouží nabídka „Port“. Kliknutím na šipku v pravé části objektu dojde k „rozbalení“ nabídky. Počet položek odpovídá aktuálnímu seznamu využívaných sériových portů, který je načten z operačního systému. Pro připojení laboratorního přístroje je nutné zjistit aktuální číslo portu, které operační systém přidělil pro sestavení spojení pomocí virtuálního sériového rozhraní. Funkce obvodů FT232RL a CP2102, které tento typ připojení umožňují, byla popsána v kap. 5. Komunikační port

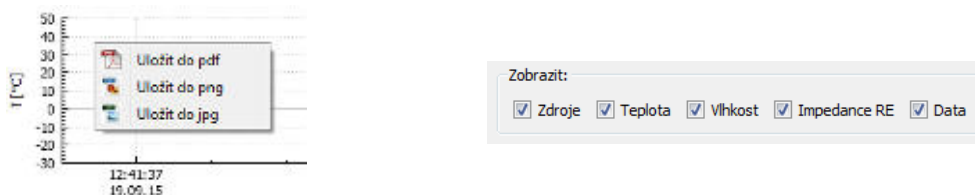
je otevřen (a rezervován) stiskem tlačítka „Otevřít“. Volba „Kód kanálu“ umožňuje nastavit šifrovací klíč algoritmu AES128, který je využíván v případě spojení s komunikační ústřednou. Aby byla data správně dešifrována, musí toto nastavení odpovídat číslu nastavenému na konfiguračním přepínači DIP uvnitř každého bezdrátového měřicího bodu (kap. 6.2). V případě nesprávné konfigurace klíče jsou přijatá data neplatná a aplikace je ignoruje. Poslední část panelu je nazvána „Ústředna“. Kliknutím na tlačítko „Konfigurovat“ je otevřeno okno, které umožňuje uživatelsky přívětivou konfiguraci komunikační ústředny (obr. 108). Komunikační ústředna musí být připojena pomocí rozhraní USB a musí být uvedena do servisního „režimu AT“ (viz kap. 6.3.2).



**Obr. 108** Konfigurace komunikační ústředny z prostředí aplikace

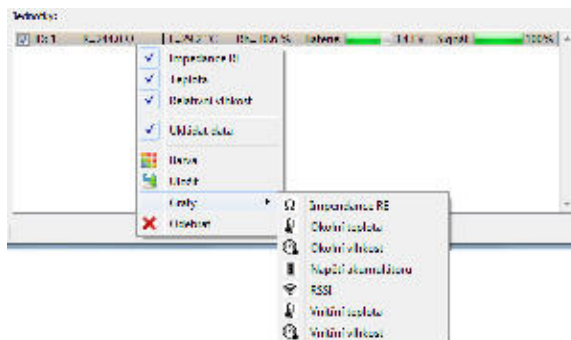
Nastavit lze adresu IP, port a šifrovací klíč AES128. Nabídka „Offline režim“ umožňuje nakonfigurovat ústřednu buď na komunikaci prostřednictvím Internetu („vypnuto“), nebo prostřednictvím rozhraní USB („zapnuto“). Stiskem tlačítka „OK“ je vygenerovaná sekvence příkazů AT, které jsou odeslány do komunikační ústředny.

Hlavní panel se nachází ve střední části okna aplikace. Slouží k vizualizaci načítaných dat formou grafů. Hodnoty jednotlivých veličin jsou vyneseny v časové závislosti. Ke vzájemné synchronizaci je využit čas operačního systému. Každý vzorek, který server řijme, je opatřen časovou značkou, která určuje jeho pozici na ose X. Hodnota na ose Y je dána velikostí sledované veličiny. Pozice jednotlivých bodů jsou spojeny pomocí lomené čáry, jejíž barva odpovídá označení konkrétního měřicího bodu v panelu „Jednotky“. Kliknutím pomocí pravého tlačítka myši po prostoru hlavního panelu je vyvolána kontextová nabídka, která umožňuje výběr formátu pro uložení stávající podoby grafu (obr. 109 – vlevo).



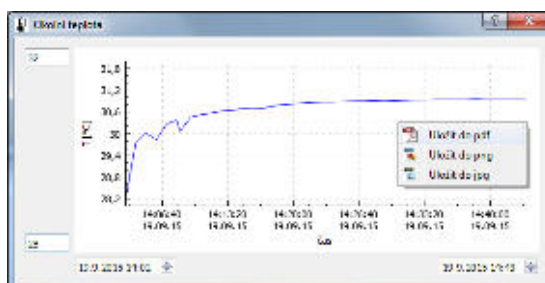
**Obr. 109** Kontextová nabídka pro uložení grafu (vlevo) a filtr zobrazení (vpravo)

Vzhled hlavního panelu s grafy lze ovlivňovat pomocí filtru „Zobrazit“ (Obr. 109 – vpravo), který je umístěn nad grafy. Nastavením filtru lze i vypnout, případně zapnout, zobrazení dalších dvou panelů „Jednotky“ – volbou „Zdroje“ a „Přijátá data“ – volbou „Data“. Na obr. 110 je detail panelu „Jednotky“, který slouží k přehlednému zobrazení všech aktuálně připojených bezdrátových měřicích bodů. Každý měřicí bod je zastoupen jedním řádkem, kterému je aplikací přidělena unikátní barva.



**Obr. 110** Panel „Jednotky“ s výpisem aktuálně připojených měřicích bodů

Řádek začíná „zatržítkem“, kterým lze aktivovat, či deaktivovat výpis dat přijatých od konkrétního měřicího bodu do grafu v hlavním panelu. Následuje hodnota „ID“, která identifikuje konkrétní měřicí bod. Hodnota je získána z nastavení přepínače DIP v měřicím bodu, který slouží k nastavení síťové adresy (1 až 64). Další tři hodnoty zobrazují aktuální velikost měřených veličin, které byly přijaty v doposud posledním platném datovém rámci (viz kap. 6.2.3). Zobrazené informace o teplotě (T) a relativní vlhkosti (RH) jsou získané z externí sondy umístěné v objemu sledovaného materiálu. Poslední dvě informace v řádku slouží k servisním účelům. Jsou zobrazovány informace o napětí napájecího článku a síle signálu, které byly přijaty v doposud posledním platném stavovém rámci. Kliknutím pravým tlačítkem myši na příslušný řádek je vyvolána kontextová nabídka. V ní lze například zapnout či vypnout zálohování přijatých dat od daného měřicího bodu na pevný disk, změnit barvu označení, uložit data do konkrétního adresáře nebo odebrat měřicí bod ze seznamu.



**Obr. 111** Podrobný graf veličiny

Jednou z voleb je položka „Grafy“, která umožňuje ke každé ze sledovaných veličin zobrazit podrobný graf (obr. 111). Podrobný graf umožňuje nastavovat libovolné



rozsahy osy X a Y. Díky tomu je možné zvětšit oblast zájmu a prostřednictvím kontextové nabídky uložit graf do jednoho z nabízených grafických formátů.



**Obr. 112** Panel „Přijátá data“

Posledním panelem aplikace je textový výpis přijatých dat (obr. 112). Panel „Přijátá data“ zobrazuje všechny důležité stavy serveru. Je zde zobrazen každý platný přijatý komunikační rámec (datový i stavový), informace o navázání spojení se serverem a informace o spuštění, či ukončení činnosti serveru. Panel byl primárně využíván při ladění funkce monitorovacího systému. V aktuální verzi aplikace byl ponechán, protože poskytuje komplexní přehled o činnosti serveru.

## 7 Závěr

*Může být něco krásnějšího než dělat to, co máte rád a vědět, že to má význam?*

Katharine Graham

V dizertační práci byla rozpracována problematika využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s cementovou matricí. Práce byla řešena v úzké návaznosti na projekt „*Multifunkční kompozity mimořádných vlastností na bázi anorganických nanosložek (KOMPOZITY)*“, jehož výstupem byla původní patentovaná receptura přípravy kompozitní směsi s tenzometrickými vlastnostmi, a na projekt „*Sledování stavu stavebních konstrukcí pomocí elektricky vodivých prvků s modifikovanou cementovou matricí*“, během jehož řešení byla původní receptura optimalizována pro zvýšení citlivosti reálné složky impedance na poměrné přetvoření objemu materiálu. Vzhledem k rozsáhlosti tematiky a její interdisciplinární povaze byly projekty řešeny ve spolupráci s dalšími partnery. Výzkum korozního působení prostředí cementové matrice na vybrané materiály byl proveden ve spolupráci s Ústavem elektrotechnologie VUT v Brně. Zkušenosti pracovníků ústavu s korozí v alkalickém prostředí akumulátorů mi pomohly stanovit správnou metodiku měření. Přípravu kompozitního materiálu a technologickou podporu výroby senzorů zajistil Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s. (VUSTAH). Výrobu betonových prvků s železnou výztuží a integrovanými senzory zrealizovala společnost DAKO, spol. s r. o. Měření odezvy vyrobených betonových prvků – nosníku a pilíře, bylo realizováno v brněnské pobočce Technického a zkušebního ústavu stavebního Praha, s. p., který je certifikovanou zkušebnou pro měření mechanických vlastností a odolnosti betonových stavebních prvků.

Na základě provedené úvodní rešerše, která přispěla k důkladnému poznání současného stavu problematiky v oblasti původních znalostí o kompozitních materiálech s cementovou matricí, včetně výhodných vlastností materiálů s modifikovanou matricí, jsem vybral vědecky nejzajímavější oblast využití materiálu se zvýšenou citlivostí elektrických vlastností na jeho poměrném přetvoření. Za pomoci všech získaných informací jsem sestavil jednotlivé cíle řešení dizertační práce.

V experimentální části práce byl zkoumán vliv působení korozního prostředí betonu a cementové matrice na materiály vhodné ke konstrukci senzoru. Na základě výsledků korozních měření a expozičních testů byla jako vhodný materiál pro realizaci elektrodového systému senzoru vybrána měď. Bylo zjištěno, že použitím organického inhibitoru koroze Slovasol 2520/2 jsou účinky korozního působení prostředí na měď zcela potlačeny. Při sledování účinků korozního působení prostředí betonu na uhlík, který tvoří funkční složku kompozitní směsi, byla na základě provedeného potenciodynamického měření stanovena mez bezpečného potenciálu na 1 V. Senzory

byly vyrobeny s použitím známého složení receptury a výrobního postupu kompozitní směsi. Do směsi bylo přidáno aditivum Slovasol 2520/2 a elektrody byly vyrobeny z mědi. Senzory vyrobené ve tvaru kvádrů o rozměrech 100 mm × 20 mm × 20 mm, byly integrovány do betonových nosníků a pilířů. Elektrická odezva integrovaných senzorů byla měřena při cyklickém zatěžování a odlehčování prvků. Na základě prostorového umístění senzorů v objemu betonových prvků jsem stanovil hypotézy o rozložení vnitřních sil a jejich účinkům na integrované senzory. U obou prvků naměřené průběhy potvrdily původní hypotézy. Pokud jsou senzory namáhány složením většího počtu vektorů působení síly, například stlačením a současným ohybem, vykazuje elektrická odezva vyšší citlivost na úroveň zatížení než u senzorů namáhaných pouze v jednom směru. Relativní změna reálné složky impedance dosahovala u senzorů integrovaných v pilíři hodnoty až 50 %. Senzory vyrobené ze stejné směsi, pouze s upraveným výrobním postupem, které byly integrovány do objemu nosníku, vykazovaly relativní změnu reálné složky impedance pouze do 2 %. Úpravou výrobního postupu s cílem vyrobit senzory s lepší mechanickou odolností a s dokonalejším povrchem došlo k většímu zhutnění kompozitní směsi a výraznému snížení schopnosti materiálu reagovat na poměrné přetvoření. Dlouhodobá měření, prováděná na nezatíženém nosníku ve venkovním prostředí, prokázala časově stálou závislost elektrické odezvy na změnách teploty a relativní vlhkosti.

Při vzájemné spolupráci s partnery VUSTAH a DAKO byl můj přínos ve stanovení metodiky jednotlivých pracovních úkonů a pracovního postupu, zatímco partneři se zabývali časově a materiálově náročnými rutinními činnostmi, spojenými s přípravou kompozitní směsi dle výrobní receptury, formováním a výrobou betonových konstrukčních prvků. S Ústavem elektrotechnologie VUT v Brně byla aktivně konzultována problematika korozního působení a potenciodynamických měření. Časově náročné expoziční a korozní testy, které jsem zpracoval a vyhodnotil, provedli pracovníci Ústavu elektrotechnologie.

Měření elektrické odezvy na dynamické zatěžování bylo umožněno díky konstrukci speciální laboratorní měřicí aparatury, jejímuž vývoji a konstrukci jsem věnoval v průběhu řešení dizertační práce velkou pozornost. Navrhl jsem nový měřicí princip, který jsem aplikoval do laboratorní měřicí aparatury a monitorovacího systému, který jsem v rámci dizertační práce navrhl a zkonstruoval. Monitorovací systém umožňuje praktické využití senzorů v reálné aplikaci.

Jádro dizertační práce bylo publikováno na konferenci ICONS 2015. Dílčí části byly průběžně prezentovány na prestižních mezinárodních konferencích EDS 2012, ICONS 2013, ICONS 2015, dále pak v časopise Advanced Materials Research (2015) a na několika národních konferencích.

Závěrem lze konstatovat, že tato práce přinesla nové významné poznatky v oblasti využití elektrických vlastností kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí. Byla provedena měření s cílem vybrat vhodné materiály pro konstrukci kompozitního tenzometru, s ohledem na dlouhodobou stabilitu elektrických vlastností a odolnost proti korozi. Unikátnost spočívá především v praktické aplikaci poznatků, vedoucích k vytvoření funkčního kompozitního tenzometru, aplikaci nového měřicího principu do laboratorního měřicího přístroje a vytvoření komplexního monitorovacího systému se sítí bezdrátových měřicích bodů pracujících na novém měřicím principu.

Výše popsanými závěry byly naplněny dizertabilní cíle práce, které jsem si stanovil. Provedené experimenty a měření vedly k výstupům práce, které posouvají původní teoretické znalosti o unikátním materiálu do nové roviny praktického využití a komercializace.

## Seznam použité literatury

- [1] OLESON, John Peter, Christopher BRANDON, Steven M. CRAMER, Roberto CUCITORE, Emanuele GOTTI a Robert L. HOHLFELDER. The ROMACONS Project: a Contribution to the Historical and Engineering Analysis of Hydraulic Concrete in Roman Maritime Structures. *International Journal of Nautical Archaeology*. 2004, 33(2): 199-229. DOI: 10.1111/j.1095-9270.2004.00020.x. ISSN 1057-2414. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1095-9270.2004.00020.x>.
- [2] ZAITSEV, Vladimir, Veniamin NAZAROV, Vitaly GUSEV a Bernard CASTAGNEDE. Novel nonlinear-modulation acoustic technique for crack detection: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS). *NDT*. 2006, 39(3): 184-194. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.07.007. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869505001039>.
- [3] MARTZ, HARRY E., DANIEL J. SCHNEBERK, G. PATRICK ROBERSON a PAULO J.M. MONTEIRO. COMPUTED TOMOGRAPHY ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 1992, 8-9(1-6): 1035-1047. DOI: 10.1080/10589759208952773. ISSN 1058-9759. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10589759208952773>.
- [4] HALLAJI, Milad a Mohammad POUR-GHAZ. A new sensing skin for qualitative damage detection in concrete elements: Rapid difference imaging with electrical resistance tomography. *NDT*. 2014, (68): 13-21. DOI: 10.1016/j.ndteint.2014.07.006. ISSN 0963-8695. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869514000942>.
- [5] SONG, G, H GU, Y L MO, T T C HSU a H DHONDE. Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers. *Smart Materials and Structures*. 2007, 16(4): 959-968. DOI: 10.1088/0964-1726/16/4/003. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/16/i=4/a=003?key=crossref.90cba9f03f27e225fd02d42bacf549a7>.
- [6] DEBORAH D.L. CHUNG. *Composite materials science and applications*. 2. London: Springer, 2010. ISBN 978-184-8828-315.
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] AJAYAN, Pulickel M., Linda S. SCHADLER a Paul V. BRAUN. *Nanocomposite science and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. ISBN 978-352-7605-170.
- [9] ČSN EN 197-1 (72 2101). *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2012. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Dostupné také z: [http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html\\_nahledy/72/90385/90385\\_nahled.htm](http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/72/90385/90385_nahled.htm).
- [10] CHUNG, D.D.L. Electrical Conduction Behavior of Cement-Matrix Composites. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2002, 11(2): 194-204. DOI: 10.1361/105994902770344268. ISSN 1544-1024. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1361/105994902770344268>.
- [11] CHUNG, D.D.L. *Functional Materials: Electrical, Dielectric, Electromagnetic, Optical and Magnetic Applications : (with Companion Solution Manual)*. 2. Singapore: World Scientific, 2010. ISBN 978-981-4287-15-9. Dostupné také z: [https://books.google.cz/books?id=sVw0Sc\\_LehQC](https://books.google.cz/books?id=sVw0Sc_LehQC).
- [12] CHUNG, D.D.L. Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material. *Composites Part B: Engineering*. 2000, 31(6-7): 511-526. DOI: 10.1016/S1359-8368(99)00071-2. ISSN 13598368. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836899000712>.

- [13] WEN, Sihai a D.D.L CHUNG. Carbon fiber-reinforced cement as a thermistor. *Cement and Concrete Research*. 1999, **29**(6): 961-965. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00075-7. ISSN 0008-8846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884699000757>.
- [14] CHEN, Bing, Keru WU a Wu YAO. Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*. 2004, **26**(4): 291-297. DOI: 10.1016/S0958-9465(02)00138-5. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946502001385>.
- [15] MCLACHLAN, David S. a Godfrey SAUTI. The AC and DC Conductivity of Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*. 2007, 1: 1-9. DOI: 10.1155/2007/30389. ISSN 1687-4110. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2007/030389/abs/>.
- [16] BRANKOV, Jordan G, Daniel M DANCHEV a Nicholai S TONCHEV. *Theory of critical phenomena in finite-size systems: scaling and quantum effects*. River Edge, NJ: World Scientific, 2000, xvii, 439 p. Series in modern condensed matter physics, 9. ISBN 98-102-3925-4.
- [17] KIRKPATRICK, Scott. Percolation and Conduction. *Reviews of Modern Physics*. 1973, **45**(4): 574-588. DOI: 10.1103/RevModPhys.45.574. ISSN 0034-6861. Dostupné také z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.45.574>.
- [18] EFROS, A. L. a B. I. SHKLOVSKII. Critical Behaviour of Conductivity and Dielectric Constant near the Metal-Non-Metal Transition Threshold. *Physica status solidi (b)*. 1976, **76**(2): 475-485. DOI: 10.1002/pssb.2220760205. ISSN 0370-1972. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pssb.2220760205>.
- [19] WEN, Sihai a D.D.L. CHUNG. The role of electronic and ionic conduction in the electrical conductivity of carbon fiber reinforced cement. *Carbon*. 2006, **44**(11): 2130-2138. DOI: 10.1016/j.carbon.2006.03.013. ISSN 0008-6223. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008622306001540>.
- [20] TIAN, Xin a Hu HU. Test and Study on Electrical Property of Conductive Concrete. *Procedia Earth and Planetary Science*. 2012, (5): 83-87. DOI: 10.1016/j.proeps.2012.01.014. ISSN 1878-5220. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187852201200015X>.
- [21] CHIARELLO, Manuela a Raffaele ZINNO. Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cement and Concrete Composites*. 2005, **27**(4): 463-469. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.09.001. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946504001374>.
- [22] LI, Hui, Hui-gang XIAO a Jin-ping OU. Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*. 2006, **28**(9): 824-828. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.004. ISSN 0958-9465. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946506000874>.
- [23] XIE, Ning, Xianming SHI, Decheng FENG, Boqiang KUANG a Hui LI. Percolation backbone structure analysis in electrically conductive carbon fiber reinforced cement composites. *Composites Part B: Engineering*. 2012, **43**(8): 3270-3275. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.02.032. ISSN 1359-8368. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812001886>.
- [24] PAVEL, Šteffan, Barath PETER, Stehlík JIŘÍ a Radimír VRBA. *Směs na bázi cementu ke zhotovení dílců pro měření odezvy při mechanickém namáhání a dílec z materiálu na bázi cementu*. Česká Republika. 22106 UV 2010-23325. Uděleno 12.10.2010. Zapsáno 21.04.2011. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0022/uv022106.pdf>.



- [25] ŠTEFFAN, Pavel, Peter BARATH, Jiří STEHLÍK a Radimír VRBA. *Směs na bázi cementu ke zhotovení dílců pro měření odezvy při mechanickém namáhání, dílec z materiálu na bázi cementu a způsob měření odezvy při mechanickém namáhání*. Česká Republika. 303207 P 2010-745. Uděleno 12.04.2012. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/Patents/FullDocuments/303/303207.pdf>.
- [26] ČSN EN 206-1. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001. Dostupné také z: [http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html\\_nahledy/73/62203/62203\\_nahled.htm](http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/73/62203/62203_nahled.htm).
- [27] JUNEK, Jiří, Pavel ŠTEFFAN, Ladislav MACHÁŇ, Ludvík LEDERER, Jiří LOSKOT a René ČECHMÁNEK. *Tenzometr určený do betonových konstrukcí*. Česká Republika. 28233 UV 2015-30870. Uděleno 19.03.2015. Zapsáno 19.05.2015. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0028/uv028233.pdf>.
- [28] CHANG, Christiana, Gangbing SONG, Di GAO a Y L MO. Temperature and mixing effects on electrical resistivity of carbon fiber enhanced concrete. *Smart Materials and Structures*. 2013, **22**(3): 035021. DOI: 10.1088/0964-1726/22/3/035021. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/22/i=3/a=035021?key=crossref.bbc90955cc1470bcba1c0d68f30c640e>.
- [29] BEVERSKOG, B. a I. PUIGDOMENECH. Revised Pourbaix diagrams for nickel at 25–300 °C. *Corrosion Science*. 1997, **39**(5): 969-980. DOI: 10.1016/S0010-938X(97)00002-4. ISSN 0010-938x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010938X97000024>.
- [30] BEVERSKOG, B. a I. PUIGDOMENECH. *Revised Pourbaix diagrams for Copper at 5-150 C: Technical Report* [online]. 1995 [cit. 2015-10-29]. Dostupné z: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/27/021/27021617.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/27/021/27021617.pdf).
- [31] STAUD, Norbert. The Corrosion of Carbon Black Anodes in Alkaline Electrolyte. *Journal of The Electrochemical Society*. 1989, **136**(12): 3570-3576. DOI: 10.1149/1.2096511. ISSN 0013-4651. Dostupné také z: <http://jes.ecsdl.org/cgi/doi/10.1149/1.2096511>.
- [32] ASSAAD ABDELMSEEH, V., J. C. JOFRIET, S. C. NEGI a G. HAYWARD. Sulphide, Sulphate and Sulphuric Acid a Corrosion of Concrete in Laboratory Tests. *Advances in Engineering Structures, Mechanics*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006, (140): 55. DOI: 10.1007/1-4020-4891-2\_4. ISBN 978-1-4020-4890-6. ISSN 0925-0042. Dostupné také z: [http://link.springer.com/10.1007/1-4020-4891-2\\_4](http://link.springer.com/10.1007/1-4020-4891-2_4).
- [33] FAN, Y.F., Z.Q. HU, Y.Z. ZHANG a J.L. LIU. Deterioration of compressive property of concrete under simulated acid rain environment. *Construction and Building Materials*. 2010, **24**(10): 1975-1983. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.002. ISSN 0950-0618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061810001224>.
- [34] SAETTA, Anna V., Bernhard A. SCHREFLER a Renato V. VITALIANI. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials. *Cement and Concrete Research*. 1993, **23**(4): 761-772. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90030-D. ISSN 0008-8846. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/000888469390030D>.
- [35] WINTER, Nicholas B. *Understanding cement: an introduction to cement production, cement hydration and deleterious processes in concrete*. Woodbridge: WHD Microanalysis consultants, 2012, 206 s. ISBN 978-0-9571045-2-5.
- [36] ZHANG, Ying-zi, Ying-fang FAN a Hong-nan LI. Influence of Simulated Acid Rain Corrosion on the Uniaxial Tensile Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Corrosion*. 2012, **2012**(1): 1-7. DOI: 10.1155/2012/172394. ISSN 1687-9325. Dostupné také z: <http://www.hindawi.com/journals/ijc/2012/172394/>.

- [37] ANALOG DEVICES. *AD5933, 1 MSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer* [online]. 2005, 2013, 40 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf>.
- [38] TEXAS INSTRUMENTS. *MSP430F543xA, MSP430F541xA Mixed-Signal Microcontrollers* [online]. 2010, 2015, 108 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5438a.pdf>.
- [39] FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL LTD. *FT232RL, USB UART IC* [online]. 2005, 2015, 47 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf).
- [40] FAUTEUX, D., A. MASSUCCO, M. MCLIN, M. VAN BUREN a J. SHI. Lithium polymer electrolyte rechargeable battery. *Electrochimica Acta*. 1995, **40**(13-14): 2185-2190. DOI: 10.1016/0013-4686(95)00161-7. ISSN 0013-4686. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0013468695001617>.
- [41] MICROCHIP. *MCP73861, Advanced Single or Dual Cell, Fully Integrated Li-Ion/Li-Polymer Charge Management Controllers* [online]. 2004, 2013, 34 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21893F.pdf>.
- [42] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS61130, Adjustable, 90% Efficient SEPIC Converter with 200-mA LDO for 1-Cell LiIon or Dual-Cell Applications* [online]. 2002, 2015, 33 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61130.pdf>.
- [43] ANALOG DEVICES. *ADR433, Ultralow Noise XFET Voltage References with Current Sink and Source Capability* [online]. 2003, 2015, 22 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADR430\\_431\\_433\\_434\\_435.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADR430_431_433_434_435.pdf).
- [44] TEXAS INSTRUMENTS. *REG710-5, 30-mA Switched-Cap DC-DC Converter with fixed 5-V Output* [online]. 2001, 2009, 26 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/reg710-5.pdf>.
- [45] TEXAS INSTRUMENTS. *MSP Low-Power Microcontrollers* [online]. 2005, 41 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/sg/slab034ab/slab034ab.pdf>.
- [46] GESCHIEDTOVÁ, Eva, Miloslav STEINBAUER a Jiří REZ. *Měření v elektrotechnice*. 1. Brno: VUTIUM, 2002, 182 s. ISBN 80-214-1990-3.
- [47] BARTUŠEK, Karel. *Měření v elektrotechnice*. 2., přeprac. a dopl. vyd. Brno: VUTIUM, 2010, 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [48] TEXAS INSTRUMENTS. *OPA567, Rail-to-Rail I/O, 2A Power Amplifier* [online]. 2005, 26 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa567.pdf>.
- [49] TEXAS INSTRUMENTS. *LMP8358, Zero-Drift, Programmable Instrumentation Amplifier with Diagnostics* [online]. 2010, 2013, 40 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmp8358.pdf>.
- [50] MICROCHIP. *MCP4921, 8/10/12-Bit Voltage Output Digital-to-Analog Converter with SPI Interface* [online]. 2010, 50 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22248a.pdf>.
- [51] ST MICROELECTRONICS. *ST1S10, 3 A, 900 kHz, monolithic synchronous step-down regulator IC* [online]. 2015, 30 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00169322.pdf>.

- [52] SENSIRION AG. *SHT21, Digital Humidity & Temperature Sensor (RH/T)* [online]. 2009, 2014, 14 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: [http://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion\\_Humidity\\_SHT21\\_Datasheet\\_V4.pdf](http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT21_Datasheet_V4.pdf).
- [53] TEXAS INSTRUMENTS. *PCA9546A, 4-Channel I2C And SMBus Switch With Reset Functions* [online]. 2005, 2014, 37 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pca9546a.pdf>.
- [54] TEXAS INSTRUMENTS. *MSP430F551x, MSP430F552x Mixed-Signal Microcontrollers* [online]. 2009, 2013, 122 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5529.pdf>.
- [55] SHANGHAI TIANMA MICRO-ELECTRONICS. *TM022HDH26, 2,2" TFT LCD module* [online]. 2011, 23 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: [http://www.adafruit.com/datasheets/TM022HDH26\\_V1.0.pdf](http://www.adafruit.com/datasheets/TM022HDH26_V1.0.pdf).
- [56] ILITEK. *ILI9340, a-Si TFT LCD Single Chip Driver* [online]. 2009, 2010, 233 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://dn.odroid.com/ODROID-SHOW/ILI9340.pdf>.
- [57] TEXAS INSTRUMENTS. *ADC161S626, 16-Bit, 50 to 250 kSPS, Differential Input, MicroPower ADC* [online]. 2008, 2014, 33 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ad161s626.pdf>.
- [58] SENSIRION AG. *SF2, Filter Cap for SHT2x and SHT3x Humidity and Temperature Sensors* [online]. 2010, 2011, 5 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: [http://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion\\_Humidity\\_SF2\\_Filter\\_Cap\\_Datasheet\\_V2.pdf](http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SF2_Filter_Cap_Datasheet_V2.pdf).
- [59] TEXAS INSTRUMENTS. *CC430F613x, CC430F612x, CC430F513x MSP430 SoC With RF Core* [online]. 2009, 2013, 119 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc430f5137.pdf>.
- [60] MILLER, Frederic, Agnes VANDOME a John MCBREWSTER. *Advanced Encryption Standard (AES)*. USA: Alpha Press, 2009. ISBN 6130268297, 9786130268299. Dostupné také z: <http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf>.
- [61] TEXAS INSTRUMENTS. *SN74LS165A, Serial-out shift registers* [online]. 1976, 2002, 16 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ls165a.pdf>.
- [62] TEXAS INSTRUMENTS. *INA331, Low-Power, Single Supply, CMOS, Instrumentation Amplifier* [online]. 2001, 2005, 22 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina331.pdf>.
- [63] TEXAS INSTRUMENTS. *OPA2376, Precision, Low Noise, Low Quiescent Current Operational Amplifier* [online]. 2007, 2013, 31 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2376.pdf>.
- [64] TEKCEL. *SB-D02, Lithium Primary Battery* [online]. 2015, 1 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/69a4b065e0660fedf2cdae1c1c0fb8d4/BAT-ER34615M.pdf>.
- [65] SILICON LABS. *CP2102, Single-Chip USB to UART Bridge* [online]. 2013, 26 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/CP2102-9.pdf>.
- [66] ATMEL. *AT45DB011B, 1-megabit, 2.7-volt Only, DataFlash®* [online]. 2006, 32 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc1984.pdf>.
- [67] SIMCOM. *SIM900, Hardware Design Manual v2.05* [online]. 2013, 51 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: [http://simcom.ee/documents/SIM900/SIM900\\_Hardware%20Design\\_V2.05.pdf](http://simcom.ee/documents/SIM900/SIM900_Hardware%20Design_V2.05.pdf).

- [68] TEXAS INSTRUMENTS. *CC1101, Low-Power Sub-1GHz RF Transceiver* [online]. 2015, 105 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/cc1101.pdf>.
- [69] TEXAS INSTRUMENTS. *Application note: DN016, Compact Antenna Solution for 868/915 MHz* [online]. 2007, 2009, 18 s. [cit. 2015-10-24]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/swra160b/swra160b.pdf>.

## Další publikační aktivity

### 2015

MACHAN, Ladislav a Pavel STEFFAN. Multichannel Laboratory Device for Measurement of Smart Concrete Material Properties. *Advanced Materials Research*. 2015, **1124**(1): 249-254. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1124.249. ISSN 1662-8985. Dostupné také z: <http://www.scientific.net/AMR.1124.249>

MACHÁŇ, L.; ŠTEFFAN, P. Multichannel Laboratory Equipment for Measurement of Smart Concrete Material Properties. In *The Tenth International Conference on Systems ICONS 2015*. Barcelona: 2015. s. 79-82. ISBN: 978-1-61208-399-5. ISSN: 2308-4243.

### 2014

ŠTEFFAN, P.; MACHÁŇ, L. Dílčí výzkumná zpráva k HS: HS18357021. Brno: VUT, 2014. s. 1-30.

### 2013

MACHÁŇ, L.; ŠTEFFAN, P. New Laboratory Equipment for Characterization of Smart Concrete Materials. In *The Eighth International Conference on Systems ICONS 2013*. Seville: 2013. s. 123-126. ISBN: 978-1-61208-246-2.

### 2012

MACHÁŇ, L.; ŠTEFFAN, P. LABORATORY EQUIPMENT FOR MEASURING CONCRETE COMPOSITES PROPERTIES. In *EDS '12 IMAPS CS INTERNATIONAL CONFERENCE PROCEEDINGS*. 1. Brno: LITERA, 2012. s. 279-282. ISBN: 978-80-214-4539-0.

### 2011

MACHÁŇ, L.; ŠTEFFAN, P. Modernization of the Digital circuits and microprocessors course. *Electronics*, 2011, roč. 5, č. 2, s. 88-90. ISSN: 1313- 1842.

MACHÁŇ, L.; ŠTEFFAN, P. Modernizace výuky laboratorních cvičení předmětu digitální obvody a mikroprocesory. In *Odborný seminář organizovaný International Microelectronics and Packaging Society. Sborník příspěvků*. Brno: NOVAPRESS s.r.o., 2011. s. 25-32. ISBN: 978-80-214-4404-1.

MACHÁŇ, L.; ŠTEFFAN, P. Inovace laboratorní výuky v předmětu digitální obvody. In *MIKROSYN. Nové trendy v mikroelektronických systémech a nanotechnologiích*. Brno: NOVAPRESS s.r.o., 2011. s. 56-63. ISBN: 978-80-214-4405-8.

### 2010

MACHÁŇ, L.; ŠTEFFAN, P. Accumulation Mode MOS Structure Usage in the Analog Design. *Electronics*, 2010, roč. 4, č. 1, s. 30-32. ISSN: 1313- 1842.

### 2009

MACHÁŇ, L.; ŠTEFFAN, P. The System for Detecting Lead in Solders. In *4th International Conference on Systems (ICONS 2009)*. 1. NEW YORK: IEEE, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2009. s. 170-172. ISBN: 978-1-4244-3469-5.

ŠTEFFAN, P.; MACHÁŇ, L. The Modern System for Analyzing and Detecting Lead in Solders. *Electronics*, 2009, roč. 9, č. 9, s. 68-70. ISSN: 1313- 1842.

MACHÁŇ, L.; ŠTEFFAN, P. Using MOS Gate Capacitance for Sigma-delta A/ D Converter Realization. In *Electronic Devices and Systems IMAPS CS International Conference 2009, Proceedings*. Brno: 2009. s. 331-334. ISBN: 978-80-214-3933-7.

## Seznam použitých zkratek

| Zkratka  | Význam                                                              |
|----------|---------------------------------------------------------------------|
| 3D       | (Three-dimensional space)                                           |
| ACLK     | (Auxiliary Clock)                                                   |
| CAD      | (Computer Aided Design)                                             |
| CAM      | (Computer Aided Manufacturing)                                      |
| CDC      | (Communications Device Class)                                       |
| CMC      | (Ceramic Matrix Composite)                                          |
| CMRR     | (Common Mode Rejection Ratio)                                       |
| CNC      | (Computer Numeric Control)                                          |
| CS       | (Chip Select)                                                       |
| CSB      | (Chip Select Bit)                                                   |
| CTAB     | (CetylTrimethylAmmonium Bromid)                                     |
| DDS      | (Direct Digital Synthesis)                                          |
| DFN      | (Dual-Flat No-Leads)                                                |
| DFT      | (Discrete Fourier Transform)                                        |
| DIP      | (Dual In-line Package)                                              |
| DMA      | (Direct Memory Access)                                              |
| DNL      | (Differential nonlinearity)                                         |
| DSP      | (Digital Signal Processor)                                          |
| FAT32    | (File Allocation Table)                                             |
| FR4      | (Flame Retardant 4)                                                 |
| GBW      | (Gain Bandwidth Product)                                            |
| GPIO     | (General Purpose Interface Bus)                                     |
| GPRS     | (General Packet Radio Service)                                      |
| GRAM     | (Graphics Random Access Memory)                                     |
| GSM      | (Global System for Mobile Communications)                           |
| GUI      | (Graphical User Interface)                                          |
| I2C      | (Inter-Integrated Circuit)                                          |
| INL      | (Integral Nonlinearity)                                             |
| JTAG     | (Joint Test Action Group)                                           |
| karta SD | (Secure Digital)                                                    |
| LCD      | (Liquid Crystal Display)                                            |
| LED      | (Light Emitting Diode)                                              |
| Li-Ion   | (Lithium-ion battery)                                               |
| Li-Po    | (Lithium-ion Polymer battery)                                       |
|          | trojrozměrný prostor                                                |
|          | pomocný hodinový signál                                             |
|          | návrh podporovaný počítačem                                         |
|          | počítačová podpora obrábění                                         |
|          | třída pro vytvoření komunikace mezi zařízeními                      |
|          | kompozit s keramickou matricí                                       |
|          | činitel potlačení souhlasného napětí                                |
|          | číslicové řízení počítačem                                          |
|          | signál pro povolení komunikace s obvodem                            |
|          | signál pro povolení komunikace s obvodem                            |
|          | chemická sloučenina cetyltrimetylamonium bromid                     |
|          | přímá digitální syntéza                                             |
|          | typ pouzdra součástky s dvěma řadami pájecích plošek                |
|          | diskrétní Fourierova transformace                                   |
|          | typ pouzdra součástky s dvěma řadami pájecích vývodů                |
|          | přímý přístup do paměti                                             |
|          | diferenciální nelinearita                                           |
|          | digitální signálový procesor                                        |
|          | alokační tabulka souborového systému                                |
|          | označení typu nehořlavého substrátu pro výrobu desek plošných spojů |
|          | šířka pásma                                                         |
|          | univerzální rozhraní pro komunikaci s měřicími přístroji            |
|          | obecné služby datového přenosu sítě GSM                             |
|          | grafická paměť s možností náhodného přístupu                        |
|          | bezdrátová síť pro mobilní komunikaci                               |
|          | grafické uživatelské rozhraní                                       |
|          | sériová komunikační sběrnice používaná mezi integrovanými obvody    |
|          | integrální nelinearita                                              |
|          | sběrnice používaná k programování a ladění mikrokontrolérů          |
|          | paměťová karta <i>Secure Digital</i>                                |
|          | technologie displeje založená na tekutých krystalech                |
|          | dioda emitující světlo                                              |
|          | lithium-iontový akumulátor                                          |
|          | lithium-polymerový akumulátor                                       |

|        |                                                            |                                                                            |
|--------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| LQI    | <i>(Line Quality Indicator)</i>                            | parametr signalizující kvalitu přijatého signálu při bezdrátové komunikaci |
| LSB    | <i>(Least Significant Bit)</i>                             | nejméně významný bit                                                       |
| MAB    | <i>(Memory Address Bus)</i>                                | adresová sběrnice                                                          |
| MCLK   | <i>(Main Clock)</i>                                        | hlavní hodinový signál                                                     |
| MDB    | <i>(Memory Data Bus)</i>                                   | datová sběrnice                                                            |
| MMC    | <i>(Metal Matrix Composite)</i>                            | kompozit s kovovou maticí                                                  |
| MSB    | <i>(Most Significant Bit)</i>                              | nejvýznamnější bit                                                         |
| MSC    | <i>(Mass Storage Class)</i>                                | třída pro práci s datovým uložištěm                                        |
| OCV    | <i>(Open Circuit Voltage)</i>                              | napětí na prázdko                                                          |
| OLED   | <i>(Organic Light-Emitting Diode)</i>                      | technologie displeje založená na organických diodách emitujících světlo    |
| PC     | <i>(Personal Computer)</i>                                 | osobní počítač                                                             |
| pH     | <i>(Potential of Hydrogen)</i>                             | vodíkový exponent                                                          |
| PMC    | <i>(Polymer Matrix Composite)</i>                          | kompozit s polymerní maticí                                                |
| ppm    | <i>(Parts Per Million)</i>                                 | miliónina                                                                  |
| PSRR   | <i>(Power Supply Rejection Ratio)</i>                      | činitel potlačení zvlnění                                                  |
| RAM    | <i>(Random Access Memory)</i>                              | paměť s možností náhodného přístupu                                        |
| RSSI   | <i>(Received Signal Strength Indication)</i>               | parametr signalizující sílu přijatého signálu při bezdrátové komunikaci    |
| SAR    | <i>(Successive Approximation Register)</i>                 | registr převodníku s postupnou aproximací                                  |
| SBW    | <i>(Spy-By-Wire)</i>                                       | sběrnice používaná k programování a ladění mikrokontrolérů                 |
| SCE    | <i>(Saturated Calomel Electrode)</i>                       | nasycená kalomelová elektroda                                              |
| SCK    | <i>(Serial Clock)</i>                                      | hodinový signál sériové komunikace                                         |
| SDI    | <i>(Serial Data Input)</i>                                 | vstup sériových dat                                                        |
| SEPIC  | <i>(Single-Ended Primary-Inductor Converter)</i>           | spínaný měnič s jednopólovou cívkou                                        |
| SHE    | <i>(Standard Hydrogen Electrode)</i>                       | standardní vodíková elektroda                                              |
| SIM    | <i>(Subscriber Identity Module)</i>                        | karta pro identifikaci uživatele v rámci sítě GSM                          |
| SMA    | <i>(Subminiature Version A)</i>                            | miniaturní vysokofrekvenční konektor typu A                                |
| SMCLK  | <i>(Sub-Main Clock)</i>                                    | přidružený hodinový signál                                                 |
| SMS    | <i>(Short Message Service)</i>                             | služba sítě GSM pro zasílání krátkých textových zpráv                      |
| SMT    | <i>(Surface Mount Technology)</i>                          | technologie povrchové montáže                                              |
| SPI    | <i>(Serial Peripheral Interface)</i>                       | sériová periferní komunikační sběrnice                                     |
| SR     | <i>(Slew Rate)</i>                                         | rychlost přeběhu                                                           |
| TCP/IP | <i>(Transmission Control Protocol / Internet Protocol)</i> | komunikační protokol využívaný v síti Internet                             |
| TFT    | <i>(Thin-Film Transistor)</i>                              | technologie displeje založená na tenkovrstvých tranzistorech               |
| TMT    | <i>(Tri-Mercapto Triazin)</i>                              | chemická sloučenina tri-mercapto triazin                                   |
| UART   | <i>(Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)</i>   | univerzální asynchronní komunikační sběrnice                               |
| UCS    | <i>(Unified Clock System)</i>                              | sdrúžený systém distribuce hodinového signálu                              |
| USB    | <i>(Universal Serial Bus)</i>                              | univerzální sériová sběrnice                                               |
| USCI   | <i>(Universal Serial Communication Interface)</i>          | univerzální sériové komunikační rozhraní                                   |



## Seznam použitých symbolů

| Symbol        | Význam                                    | Jednotka               |
|---------------|-------------------------------------------|------------------------|
| A             | zesílení                                  | -                      |
| $A_r$         | relativní atomová hmotnost                | -                      |
| BW            | šířka pásma                               | Hz                     |
| C             | kapacita                                  | F                      |
| CMRR          | činitel potlačení souhlasného napětí      | dB                     |
| E             | elektrický potenciál                      | V                      |
| E             | modul pružnosti v tahu (Youngův modul)    | Pa                     |
| $E_{COR}$     | korozní potenciál                         | V                      |
| f             | frekvence                                 | Hz                     |
| F             | Faradayova konstanta                      | C/mol                  |
| F             | síla                                      | N                      |
| GBW           | šířka přenášeného pásma                   | Hz                     |
| I             | elektrický proud                          | A                      |
| $I_{COR}$     | korozní proud                             | A                      |
| J             | proudová hustota                          | A/m <sup>2</sup>       |
| l             | délka                                     | m                      |
| m             | hmotnost                                  | kg                     |
| n             | látkové množství                          | mol                    |
| p             | tlak                                      | Pa (N/m <sup>2</sup> ) |
| pH            | vodíkový exponent                         | -                      |
| ppm           | označení miliontiny (1/10 <sup>-6</sup> ) | -                      |
| PSRR          | činitel potlačení zvlnění                 | dB                     |
| $Q_v$         | objemový průtok                           | m <sup>3</sup> /s      |
| R             | elektrický odpor                          | $\Omega$               |
| RH            | relativní vlhkost                         | %                      |
| $R_m$         | pevnost v tahu                            |                        |
| S             | obsah (plocha)                            | m <sup>2</sup>         |
| SR            | rychlost přeběhu                          | V/ $\mu$ s             |
| t             | čas                                       | s                      |
| T             | teplota                                   | °C                     |
| U             | elektrické napětí                         | V                      |
| V             | objem                                     | m <sup>3</sup>         |
| Z             | elektrická impedance                      | $\Omega$               |
| $\beta_A$     | Tafelova směrnice                         | V/dek                  |
| $\varepsilon$ | poměrná deformace                         | -                      |
| $\rho$        | hustota                                   | kg/m <sup>3</sup>      |
| $\rho$        | měrný elektrický odpor (rezistivita)      | $\Omega \cdot m$       |
| $\sigma$      | měrná elektrická vodivost (konduktivita)  | S/m                    |
| $\sigma$      | vnitřní mechanické napětí                 | Pa (N/m <sup>2</sup> ) |

## Seznam obrázků

|                |                                                                                                                                                            |    |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obr. 1</b>  | Synergický efekt [6] .....                                                                                                                                 | 12 |
| <b>Obr. 2</b>  | Písek (vlevo) a kamenivo (vpravo) na snímcích z optického mikroskopu .....                                                                                 | 14 |
| <b>Obr. 3</b>  | Skleněná (vlevo) a uhlíková vlákna (vpravo) na snímku z optického mikroskopu .....                                                                         | 15 |
| <b>Obr. 4</b>  | Uhlíkové materiály (zleva: mikromletá vlákna, vločky, saze) .....                                                                                          | 16 |
| <b>Obr. 5</b>  | Laboratorní přípravek pro měření vodivosti uhlíkových materiálů .....                                                                                      | 16 |
| <b>Obr. 6</b>  | Závislost měrné elektrické vodivosti materiálu na objemovém množství uhlíkových vláken [14] .....                                                          | 19 |
| <b>Obr. 7</b>  | Odezva reálné složky impedance na cyklické zatěžování desky vyrobené z materiálu 1 (zatížení hmotností 0,4 t až 4 t s frekvencí cyklování 1 Hz) [25] ..... | 21 |
| <b>Obr. 8</b>  | Mikrovýbrus kompozitní směsi .....                                                                                                                         | 22 |
| <b>Obr. 9</b>  | Vzorky kovů pro přípravu elektrod (mosaz, měď, nerez, nikl a titan) před a po měření potenciodynamickou metodou .....                                      | 25 |
| <b>Obr. 10</b> | Konfigurace aparatury pro potenciodynamická měření .....                                                                                                   | 26 |
| <b>Obr. 11</b> | Ustálení potenciálu měřených materiálů vůči potenciálu SCE .....                                                                                           | 27 |
| <b>Obr. 12</b> | Povrch vzorku z mědi před (vlevo) a po měření (vpravo) .....                                                                                               | 28 |
| <b>Obr. 13</b> | Potenciodynamická křivka mědi .....                                                                                                                        | 28 |
| <b>Obr. 14</b> | Povrch vzorku z mosazi před (vlevo) a po měření (vpravo) .....                                                                                             | 28 |
| <b>Obr. 15</b> | Potenciodynamická křivka mosazi .....                                                                                                                      | 28 |
| <b>Obr. 16</b> | Povrch vzorku z niklu před (vlevo) a po měření (vpravo) .....                                                                                              | 29 |
| <b>Obr. 17</b> | Potenciodynamická křivka niklu .....                                                                                                                       | 29 |
| <b>Obr. 18</b> | Povrch vzorku z nerezů před (vlevo) a po měření (vpravo) .....                                                                                             | 29 |
| <b>Obr. 19</b> | Potenciodynamická křivka nerezů .....                                                                                                                      | 29 |
| <b>Obr. 20</b> | Povrch vzorku z titanu před (vlevo) a po měření (vpravo) .....                                                                                             | 30 |
| <b>Obr. 21</b> | Potenciodynamická křivka titanu .....                                                                                                                      | 30 |
| <b>Obr. 22</b> | Vzájemné porovnání potenciodynamických křivek vybraných kovů .....                                                                                         | 30 |
| <b>Obr. 23</b> | Pourbaixův diagram pro nikl [29] .....                                                                                                                     | 31 |
| <b>Obr. 24</b> | Pourbaixův diagram pro měď [30] .....                                                                                                                      | 31 |
| <b>Obr. 25</b> | Vliv vybraných aditiv na potenciodynamické polarizační křivky nerezů .....                                                                                 | 32 |
| <b>Obr. 26</b> | Vliv aditiv CTAB, Lugalvan P a Lugalvan G-35 na potenciodynamické polarizační křivky mědi .....                                                            | 34 |
| <b>Obr. 27</b> | Pourbaixův fázový diagram pro měď v prostředí hydroxidu sodného [30] .....                                                                                 | 34 |
| <b>Obr. 28</b> | Vliv aditiv Slovasol 2520/2 a Tween 20 na potenciodynamické polarizační křivky mědi ..                                                                     | 35 |
| <b>Obr. 29</b> | Expoziční test (bez aditiva, Slovasol 2520/2, Lugalvan G-35, Lugalvan P, CTAB) .....                                                                       | 37 |
| <b>Obr. 30</b> | Expoziční test (galvanická měď bez aditiva, Tween 20, Spolapon AES 232, Alfonal K a TMT) .....                                                             | 38 |

|                |                                                                                                                               |    |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obr. 31</b> | Nárůst hmotnosti vzorků v průběhu expozičního testu .....                                                                     | 39 |
| <b>Obr. 32</b> | Úbytek hmotnosti vzorků po stripování oxidové vrstvy.....                                                                     | 39 |
| <b>Obr. 33</b> | Úbytek hmotnosti vzorků po stripování oxidové vrstvy vůči počáteční hmotnosti.....                                            | 40 |
| <b>Obr. 34</b> | Snímky povrchu vzorků po expozičním testu (pokračování na obr. 35).....                                                       | 41 |
| <b>Obr. 35</b> | Snímky povrchu vzorků po expozičním testu .....                                                                               | 42 |
| <b>Obr. 36</b> | Průběhy korozních proudů vzorku uhlíku při potenciálech:1,25 V, 1,3 V, 1,4 V a 1,5 V..                                        | 44 |
| <b>Obr. 37</b> | Mikroskopické fotografie povrchu uhlíkové elektrody po ukončení měření.....                                                   | 45 |
| <b>Obr. 38</b> | Síranová koroze betonu [35] .....                                                                                             | 46 |
| <b>Obr. 39</b> | Formy pro výrobu kvádrů (vpravo – zalité vzorky s měděnými elektrodami) .....                                                 | 47 |
| <b>Obr. 40</b> | Návrh mechanického provedení senzoru a umístění elektrod .....                                                                | 47 |
| <b>Obr. 41</b> | Míchání směsi a její vzhled před formováním .....                                                                             | 48 |
| <b>Obr. 42</b> | Vyrobený senzor a detail způsobu připojení vodiče k elektrodám .....                                                          | 48 |
| <b>Obr. 43</b> | Formování betonového pilíře, způsob fixace výztuže a senzorů .....                                                            | 49 |
| <b>Obr. 44</b> | Formování betonového nosníku, způsob fixace výztuže a senzorů.....                                                            | 49 |
| <b>Obr. 45</b> | Vyrobené betonové pilíře s integrovanými senzory .....                                                                        | 50 |
| <b>Obr. 46</b> | Měření statických elektrických parametrů vyrobených senzorů .....                                                             | 51 |
| <b>Obr. 47</b> | Ověření funkce laboratorní měřicí aparatury při dynamickém měření.....                                                        | 52 |
| <b>Obr. 48</b> | Pracoviště pro měření elektrických parametrů v průběhu dynamického namáhání betonového pilíře s integrovanými senzory .....   | 53 |
| <b>Obr. 49</b> | Odezva senzoru integrovaného v betonovém pilíři na cyklické namáhání.....                                                     | 54 |
| <b>Obr. 50</b> | Vzhled pilíře před (vlevo) a po porušení struktury (vpravo).....                                                              | 55 |
| <b>Obr. 51</b> | Geometrické uspořádání senzorů v objemu materiálu pilíře (vlevo) a předpokládané působení sil během zatěžování (vpravo) ..... | 57 |
| <b>Obr. 52</b> | Odezva senzorů integrovaných v betonovém pilíři na cyklické namáhání.....                                                     | 57 |
| <b>Obr. 53</b> | Pracoviště pro měření elektrických parametrů v průběhu dynamického namáhání betonového nosníku s integrovanými senzory .....  | 59 |
| <b>Obr. 54</b> | Způsob uložení nosníku, provedení styčných ploch a místa působení síly .....                                                  | 60 |
| <b>Obr. 55</b> | Schematické znázornění uložení senzorů v objemu materiálu nosníku.....                                                        | 61 |
| <b>Obr. 56</b> | Předpokládané rozložení sil během zatěžování nosníku.....                                                                     | 61 |
| <b>Obr. 57</b> | Deformace nosníku během zatěžování (vlevo) a detail vznikajících trhlin v jeho spodní části (vpravo) .....                    | 62 |
| <b>Obr. 58</b> | Odezva senzorů integrovaných v betonovém nosníku na cyklické namáhání.....                                                    | 63 |
| <b>Obr. 59</b> | Porušení strukturální integrity nosníku .....                                                                                 | 63 |
| <b>Obr. 60</b> | Pracoviště pro dlouhodobé měření elektrických parametrů .....                                                                 | 65 |
| <b>Obr. 61</b> | Detail způsobu instalace bezdrátových měřicích bodů.....                                                                      | 65 |
| <b>Obr. 62</b> | Odezva senzorů integrovaných v objemu pilíře na změnu teploty a relativní vlhkosti v průběhu jednoho letního dne .....        | 66 |

|                |                                                                                                            |     |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Obr. 63</b> | Odezva senzorů integrovaných v objemu pilíře na změnu teploty a relativní vlhkosti v průběhu tří dnů ..... | 67  |
| <b>Obr. 64</b> | Měřicí pracoviště s přístroji Agilent ovládaných pomocí softwaru VEE .....                                 | 68  |
| <b>Obr. 65</b> | Vzájemné ovlivňování měřicích stanic Agilent.....                                                          | 71  |
| <b>Obr. 66</b> | Blokové schéma přístroje s integrovaným převodníkem impedance .....                                        | 72  |
| <b>Obr. 67</b> | Desky plošných spojů přístroje s integrovaným převodníkem impedance.....                                   | 74  |
| <b>Obr. 68</b> | Měřicí přístroj s integrovaným převodníkem impedance .....                                                 | 75  |
| <b>Obr. 69</b> | Blokové schéma převodníku impedance AD5933 [37].....                                                       | 76  |
| <b>Obr. 70</b> | Budicí část obvodu AD5933 [37].....                                                                        | 77  |
| <b>Obr. 71</b> | Snímací část obvodu AD5933 [37] .....                                                                      | 77  |
| <b>Obr. 72</b> | Nastavení budicí frekvence v menu měřicího přístroje .....                                                 | 78  |
| <b>Obr. 73</b> | Využití Ohmovy metody měření elektrického odporu .....                                                     | 79  |
| <b>Obr. 74</b> | Princip měření odporu pomocí střídavého buzení zátěže .....                                                | 80  |
| <b>Obr. 75</b> | Budicí signál ( $U_{OZ}$ ) a reakce měřeného prvku snímaná na bočníku ( $U_B$ ).....                       | 82  |
| <b>Obr. 76</b> | Integrace měřicího modulu do zapojení původního přístroje .....                                            | 83  |
| <b>Obr. 77</b> | Měřicí modul připojený k původní desce plošných spojů .....                                                | 84  |
| <b>Obr. 78</b> | Výkonový operační zesilovač OPA567 [47] .....                                                              | 85  |
| <b>Obr. 79</b> | Precizní přístrojový zesilovač LMP8358 [49].....                                                           | 86  |
| <b>Obr. 80</b> | Blokové schéma převodníku D/A MCP4921 [50].....                                                            | 87  |
| <b>Obr. 81</b> | Odezva vzorku na zatěžování v lisu – program Custom Serial Plot.....                                       | 89  |
| <b>Obr. 82</b> | Laboratorní měřicí aparatura .....                                                                         | 90  |
| <b>Obr. 83</b> | Blokové schéma laboratorní měřicí aparatury.....                                                           | 91  |
| <b>Obr. 84</b> | Topologie napájecí části přístroje.....                                                                    | 94  |
| <b>Obr. 85</b> | Příklad dat naměřených pomocí laboratorní aparatury.....                                                   | 94  |
| <b>Obr. 86</b> | Blokové schéma zobrazovacího panelu.....                                                                   | 96  |
| <b>Obr. 87</b> | Datový formát zápisu barevné hodnoty jednoho bodu displeje [56] .....                                      | 96  |
| <b>Obr. 88</b> | Připojení diferenciálního vstupu převodníku k výstupu LMP8358 [49] .....                                   | 97  |
| <b>Obr. 89</b> | Přesnost měření vlhkosti a teploty pomocí SHT21 [52].....                                                  | 98  |
| <b>Obr. 90</b> | Sonda pro měření teploty a vlhkosti s SHT21 a SF2.....                                                     | 99  |
| <b>Obr. 91</b> | Přepínač sběrnice I <sup>2</sup> C PCA9546A [53] .....                                                     | 99  |
| <b>Obr. 92</b> | Tlačítka pro ovládání laboratorní měřicí aparatury .....                                                   | 100 |
| <b>Obr. 93</b> | Topologie monitorovacího systému .....                                                                     | 101 |
| <b>Obr. 94</b> | Blokové schéma měřicího bodu .....                                                                         | 103 |
| <b>Obr. 95</b> | Význam jednotlivých bitů na přepínačích DIP.....                                                           | 104 |
| <b>Obr. 96</b> | Měřicí bod .....                                                                                           | 105 |
| <b>Obr. 97</b> | Blokové schéma přístrojového zesilovače INA331 [62].....                                                   | 106 |

|                 |                                                                               |     |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Obr. 98</b>  | Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér měřicího bodu .....              | 109 |
| <b>Obr. 99</b>  | Formát komunikačních rámců odesílaných měřicím bodem .....                    | 109 |
| <b>Obr. 100</b> | Komunikační ústředna .....                                                    | 111 |
| <b>Obr. 101</b> | Blokové schéma komunikační ústředny .....                                     | 112 |
| <b>Obr. 102</b> | Definice napájecích nároků modulu SIM900 [67] .....                           | 114 |
| <b>Obr. 103</b> | Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér komunikační ústředny .....       | 116 |
| <b>Obr. 104</b> | Bezdrátové komunikační moduly s CC430F5137 a jejich schematický symbol .....  | 117 |
| <b>Obr. 105</b> | Návrh desky plošných spojů modulu a doporučený motiv pro jeho osazení .....   | 118 |
| <b>Obr. 106</b> | Okno aplikace „Selfmonitoring Control Platform“ .....                         | 119 |
| <b>Obr. 107</b> | Panel „Zdroje dat“ .....                                                      | 119 |
| <b>Obr. 108</b> | Konfigurace komunikační ústředny z prostředí aplikace .....                   | 120 |
| <b>Obr. 109</b> | Kontextová nabídka pro uložení grafu (vlevo) a filtr zobrazení (vpravo) ..... | 120 |
| <b>Obr. 110</b> | Panel „Jednotky“ s výpisem aktuálně připojených měřicích bodů .....           | 121 |
| <b>Obr. 111</b> | Podrobný graf veličiny .....                                                  | 121 |
| <b>Obr. 112</b> | Panel „Přijátá data“ .....                                                    | 122 |

## Seznam tabulek

|                |                                                                            |     |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tab. 1</b>  | Výsledky měření vodivosti uhlíkových materiálů.....                        | 17  |
| <b>Tab. 2</b>  | Receptura pro přípravu směsi NKT 1[25] .....                               | 20  |
| <b>Tab. 3</b>  | Receptura pro přípravu směsi SK9-1 [27].....                               | 21  |
| <b>Tab. 4</b>  | Kovové materiály pro přípravu vzorků .....                                 | 25  |
| <b>Tab. 5</b>  | Korozní parametry nerezového materiálu s různými typy aditiv .....         | 33  |
| <b>Tab. 6</b>  | Výsledky expozičního testu.....                                            | 39  |
| <b>Tab. 7</b>  | Typické parametry řady MSP430 [45] .....                                   | 75  |
| <b>Tab. 8</b>  | Význam jednotlivých bitů konfiguračního registru obvodu LMP8358 [49] ..... | 87  |
| <b>Tab. 9</b>  | Význam jednotlivých bitů konfiguračního registru obvodu MCP4921 [50] ..... | 88  |
| <b>Tab. 10</b> | Seznam použitých příkazů AT .....                                          | 115 |

## Curriculum Vitae

Jméno: Ladislav MACHÁŇ  
Narozen: 5. 7. 1984 v Náchodě  
Kontakt: machan@feec.vutbr.cz



### Vzdělání

- 2008 – dosud **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**  
Postgraduální doktorské studium, obor Mikroelektronika a technologie, Státní doktorská zkouška vykonána v prosinci 2010.
- 2006 – 2008 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**  
Magisterské studium, obor Mikroelektronika, Státní zkouška vykonána v červnu 2008, Diplomová práce: Detekce přítomnosti olova v pájkách používaných v elektrotechnice.
- 2003 – 2006 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**  
Bakalářské studium, obor Mikroelektronika a technologie, Státní zkouška vykonána v červnu 2006, Bakalářská práce: Digitální záznamník teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku s možností dvoupolohové regulace.

### Praxe

- 2010 – dosud **Vysoké učení technické v Brně / Ústav mikroelektroniky**  
Technicko-hospodářský pracovník
- 2015 – dosud **Vysoké učení technické v Brně / Centrum Transferu Technologí**  
Manažer transferu technologií pro Fakultu elektrotechniky a komunikačních technologií

### Jazyky

Angličtina

### Dovednosti a znalosti

Vývoj elektronických zařízení, laboratorních měřicích přístrojů a embedded systémů. Programování v jazyce C a Assembler se zaměřením na mikrokontroléry. Návrh desek plošných spojů a kompletní technická příprava výroby. Návrh mechanického řešení přístrojů s využitím 3D CAD. Technologická příprava výroby mechanických dílů v softwaru CAM. Obrábění mechanických součástí na CNC.



## **Ocenění**

- 2008                      Cena děkana FEKT VUT v Brně za vynikající teoretické a praktické zkušenosti prokázané v diplomové práci

## **Další aktivity**

### *Spolupráce s průmyslem:*

- 2012 – dosud      spolupráce s firmou TOKOZ a.s., Žďár nad Sázavou – vývoj mechatronické zámkové vložky
- 2012 – 2015      spolupráci s firmou DAKO Brno, spol. s.r.o. – spolupráce v rámci projektu Selfmonitoring

### *Spolupráce s jinými institucemi:*

- 2012 – dosud      Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s. (VUSTAH) - spolupráce v oblasti kompozitních materiálů s modifikovanou cementovou matricí, spolupráce v rámci projektu Selfmonitoring

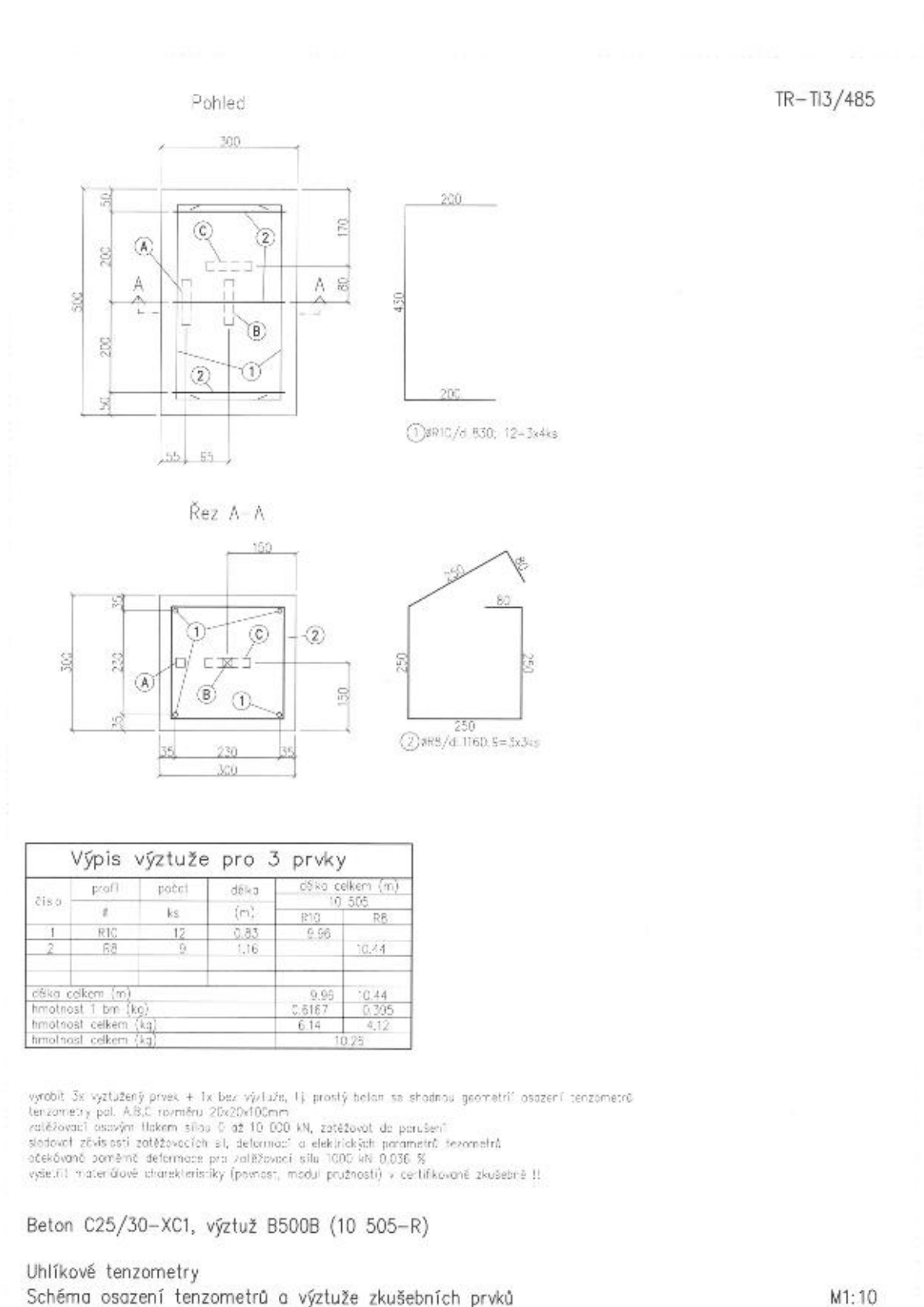
### *Odborné stáže a kurzy:*

- 06/2009              Kurz  $\mu$ Builder: Design your own microsystem, Budapešť, Maďarsko,
- 02/2013              Kurz FSRM: Energy harvesting, Zürich, Švýcarsko,
- 04/2013              Low-power MCU workshop, ST microelectronics, Praha,
- 09/2013              Stáž na TU Ilmenau, Ilmenau, Německo - Výzkum v oblasti mikro- a nanoobrábění s využitím nejmodernějšího technologií (FIB, RIE/DRIE, NIL).

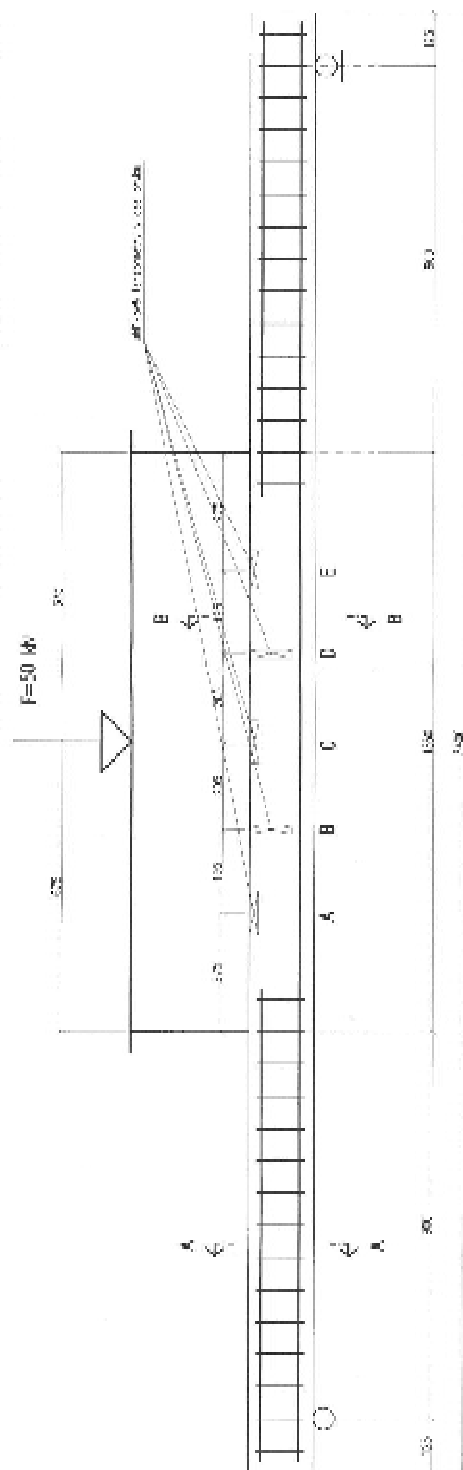
### *Účast na řešení projektů:*

- 2010                      Polovodičové struktury připravené s využitím nanotechnologií, FEKT-S-11-1,
- 2011                      Organická elektronika - vývoj a charakterizace materiálů a organických elektronických prvků pro multikomponentní hybridní elektroniku, FCH/FEKT-S-11-2,
- 2011 – 2014          Perspektivní využití nových senzorických technologií a obvodů pro zpracování senzorických signálů, FEKT-S-11-16,
- 2011 – 2015          Sledování stavu stavebních konstrukcí pomocí elektricky vodivých prvků s modifikovanou cementovou matricí, FR-TI3/485.

## Příloha



TR=13/485



1.0m 0.5m 10.0m

1.0m 0.5m 10.0m

| Výpis výkresu |          |      |      |
|---------------|----------|------|------|
| Číslo         | Velikost | Stav | Stav |
| 1             | 1:1      | 1:1  | 1:1  |
| 2             | 1:1      | 1:1  | 1:1  |
| 3             | 1:1      | 1:1  | 1:1  |
| 4             | 1:1      | 1:1  | 1:1  |
| 5             | 1:1      | 1:1  | 1:1  |
| 6             | 1:1      | 1:1  | 1:1  |
| 7             | 1:1      | 1:1  | 1:1  |
| 8             | 1:1      | 1:1  | 1:1  |
| 9             | 1:1      | 1:1  | 1:1  |
| 10            | 1:1      | 1:1  | 1:1  |

Technická zpráva o výsledcích zkoušek  
materiálu C16/20-30C, vyšetřování a zkoušení  
materiálu C16/20-30C, vyšetřování a zkoušení  
materiálu C16/20-30C, vyšetřování a zkoušení  
materiálu C16/20-30C, vyšetřování a zkoušení

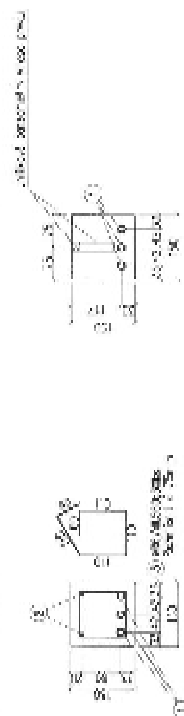
Beton C16/20-30C, vyšetřování a zkoušení (IC 5/5-2)

Uhlíkové senzory – ověřovací prvek

Schéma osazení betonového a výkresu součástí prvků

Fig. 3-9

Fig. 3-4



9/10