

POSOUZENÍ KVALITY ČASTO POUŽÍVANÝCH SENZORŮ PRO IOT APLIKACE (QUALITY ASSESSMENT OF COMMON IOT SENSORS)

Martin Doubek¹, Michal Haubner¹, Václav Vacek¹

¹ Ústav fyziky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze, martin.doubek@cern.ch

Abstrakt: Pro účely kalibrace nejčastěji užívaných čidel teploty a vlhkosti pro IoT byla sestavena měřicí trať s precizním DAQ systémem. V článku je stručně nastíněna důležitost ověřování přesnosti měření v rámci IoT aplikací. Je popsán princip nastavení a kontroly teploty a relativní vlhkosti (RH) v aparatuře. Kalibrace referenčních teplotních čidel byla provedena pomocí ultratermostatu a referenčních senzorů vlhkosti pomocí solných roztoků. Sada vybraných senzorů pro IoT aplikace pak byla ověřena vůči těmto zkalibrovaným referenčním senzorům.

Klíčová slova: internet věcí, senzory prostředí, verifikační měření, SCADA

Abstract: The precision of common and frequently used environmental sensors for IoT applications is verified on a newly commissioned measurement setup, which is based on a top-class SCADA system. The relevance of such measurements is briefly outlined with a focus on IoT framework. The working principle of temperature and relative humidity (RH) control within the setup is described. Calibration procedure for temperature and RH reference sensors is presented, using an ultra-thermostat and saturated salts, respectively. A set of IoT sensors was then tested against the calibrated reference sensors.

Keywords: internet of things, environmental sensors, verification measurement, SCADA

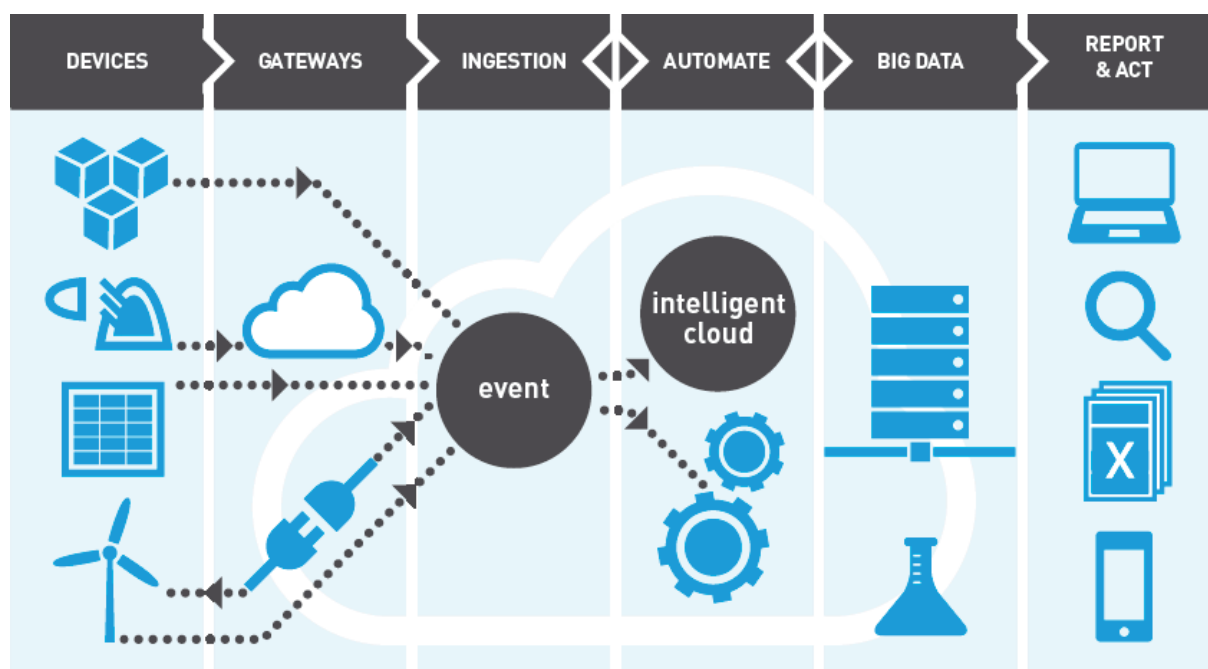
1. Úvod

Aplikace a řešení označované jako internet věcí (Internet of Things, IoT) se v posledních 5 letech vyskytují v praxi stále častěji, a to především díky cenové dostupnosti elektronických komponent a zlepšující se dostupnosti síťového připojení. S nárůstem počtu nainstalovaných IoT zařízení roste množství připojených senzorů a jimi vyprodukovaných dat (Big-Data). Kvalitní data naměřená v rámci budov, elektráren, průmyslových provozů, či zemědělství jsou v dnešní době velmi ceněna, jelikož poskytují nástroj k optimalizaci chodu provozu, výnosů či energetické úspornosti zmíněných aplikací. Koncept IoT se tak stal odezvou výrobců elektrotechniky na jasné tendence v mnoha oborech, které tímto způsobem přecházejí na data-driven přístup k řízení mnoha skutečných instalací v technické praxi.

IoT se svou univerzálností, dostupností a modularitou zaplňuje širokou vývojovou mezeru, která existuje mezi průmyslovou a domácí automatizací. Na jedné straně spektra stojí některé poměrně pokročilé funkce senzorů a DAQ systémů, které jsou typické např. pro průmyslové programovatelné kontroléry (PLC) řízené přes SCADA systémy. Na druhé straně spektra stojí modulární stavebnice postavené na integrovaných mikrokontrolerech typu Arduino a Raspberry PI. Obvykle jsou tato zařízení charakterizována nízkou pořizovací cenou elektroniky a přístupným open-source vývojovým prostředím, což jsou nezbytné podmínky pro jejich masové rozšíření. Funkcionalita u IoT zařízení tedy míří mezi tyto dva extrémy, přičemž spojuje výhody obou dvou. Běžně dostupné a populární jsou tak bezdrátově fungující zařízení, která používají relativně levný hardware a uživatelsky přístupné softwarové prostředí. Takovou kombinací vlastností se produkt spadající do kategorie IoT stává dostupným pro široké užití mimo průmysl.

1.1 IoT aplikace

Příkladem středně komplexní aplikace může být sběr dat senzorů prostředí v inteligentní budově, která jsou pak vyhodnocena a zpětně využita při řízení vytápění, větrání a klimatizaci (HVAC) budov. Bezdrátově připojené IoT zařízení osazené patřičnými moduly tak měří a odesílají na server časově proměnné hodnoty teploty, tlaku, vlhkosti, prašnosti, koncentrace CO₂, hluku, atd., které charakterizují lokální podmínky v místě měření. Obrázek o celkovém stavu dané budovy, či jiného objektu vznikne vysokoúrovňovým vyhodnocením dat z jednotlivých senzorů.



Obr. 1: Možné schéma implementace IoT: Zařízení vybavené senzory různých veličin jsou připojeny na internet, kde dochází k archivaci, vizualizaci a vyhodnocení produkovaných dat. Schéma pochází ze zdroje [3].

Síťové připojení lze realizovat jak přes bezdrátové sítě s krátkým dosahem, jako je např. ZigBee, tak přes dedikované datové sítě v pásmu GSM, jako jsou LoRa nebo SigFox. Probíhající přechod k implementaci protokolu IPv6 rozšiřujícím rozsah IP adres na prakticky nevyčerpatelné množství vytváří podmínky k dalšímu růstu počtu IoT zařízení připojených k internetu.

Množství použitých senzorů by v klasickém zapojení vyprodukovalo značné množství dat, a tak samo IoT zařízení filtruje data ze senzoru a odesílá je pouze pokud změna měřené veličiny překročila určité předem definované pásmo hodnot. Tento přístup významně snižuje datový tok z IoT zařízení a jejich energetickou náročnost. Tím se snižuje zatížení datové sítě, která musí obvykle obsluhovat velké množství koncových zařízení produkujících jen malý datový tok. Dalším významným efektem je snížení odběru elektrického proudu zařízení na minimum, takže bateriově či solárně napájené zařízení mohou fungovat v řádu let bez potřeby údržby.

1.2 Senzory pro IoT

Citlivým místem rychle rostoucí IoT architektury zůstává, hned po nezbytné bezpečnosti nových a stále početnějších IoT instalací, přesnost senzorů, což je parametr přehlížený řadou koncových uživatelů. Nepřesně měřící senzor nelze plnohodnotně využívat a data jím produkovaná nelze spolehlivě použít pro potřeby měření a řízení. Nepřesnosti v měření mohou vzniknout jednak nízkou kvalitou, či chybějící kalibrací použitého senzoru na straně výrobce a nebo špatnou implementací zařízení na straně uživatele. Výsledkem je, že široké spektrum měřených veličin a množství naměřených dat má diskutabilní vypovídající hodnotu.

1.3 Testované IoT řešení

Průzkum trhu a první pokusy s levnými senzory a elektronikou (Arduino a levné sady čidel dostupné z běžných eshopů) ukázaly, že dlouhodobě perspektivní pro další výzkum jsou kvalitní produkty vyšší střední třídy pocházející od renomovaných firem, spíše než nejlevnější čínské produkty. S ohledem na minimální zručnost převážně většiny

dnešních uživatelů bylo k testování vybráno komplexní modulární řešení pro IoT aplikace vyvinuté českým startupem Hardwarío pod obchodním názvem BigClown.

Modulárně řešený systém sestává z CORE modulu, který funguje na 32-bitovém ARM mikrokontroléru se 192 kB flash pamětí. Tento CORE modul je vybaven sub-GHz rádiovým modulem operujícím v pásmu 868/915 MHz, přes který probíhá plně duplexní bezdrátová komunikace s rádiovým USB zařízením připojeným do PC. Dále je CORE modul vybaven dvěma separátními digitálními I²C sběrnicemi, přes které se připojují další vstupní a výstupní periferie, jako jsou senzory a akuátory, ale i SigFox modul či LoRa modul pro komunikaci v pásmu GSM.

Senzory včetně podpůrné elektroniky a A/D převodníku jsou umístěny na tzv. tagu. Tyto tagy lze volitelně připojovat ke CORE modulu, který z nich odečítá data a dále je zpracovává a odesílá. Samotné senzory neelektrických veličin pro BigClown jsou výrobcem záměrně vybrány od výrobců preferující kvalitu a jsou poměrně přesné.



Obr. 2: Vlevo: základní senzory prostředí modulárního IoT systému BigClown firmy Hardwarío. Vpravo: Příklad sestavy pro měření teploty, barometrického tlaku, relativní vlhkosti a koncentrací CO₂ vybavené bateriovým modulem a displayem.

2. Měřicí trať

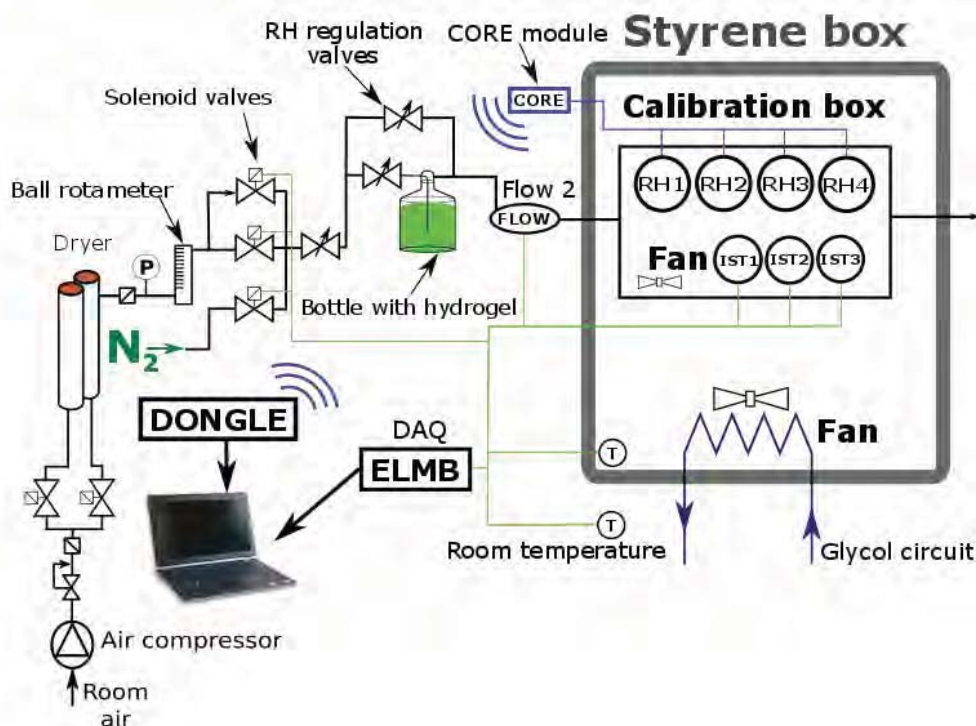
V první fázi projektu jsme se soustředili na ověření přesnosti měření teploty a vlhkosti IoT senzorů v modulech BigClown, což jsou nejčastěji měřené veličiny prostředí na nichž přímo závisí tepelná pohoda osob. Za tímto účelem ověření kvality byla postavena měřicí trať, Obr. 3, schopná vytvořit podmínky prostředí v rozsahu běžných hodnot teploty a vlhkosti. Toto rozmezí se pro teplotu pohybuje od 2 °C do 50 °C a pro relativní vlhkost od 0 % RH do 100 % RH. Pomocí měřicí tratě Error! Reference source not found. je možné dosáhnout velmi přesných hodnot teploty a relativní vlhkosti v kontrolované oblasti. Stabilita i opakovatelnost je pro teplotu 0.5 °C a pro relativní vlhkost 2 % RH. Tato přesnost je na hranici přesnosti RH senzorů.

2.1 Princip funkce

Princip funkčnosti kalibrační tratě je následující. Kompresor nasává atmosférický vzduch, který přes filtr prašných částic vstupuje do sušičky vzduchu naplněné silikagelem. Sušička pracuje ve střídavém režimu, tzn. v případě nasycení silikagelu v jedné patroně se proud vzduchu přesměruje do patrony druhé. První patrona se zahřívá, přičemž dochází k regeneraci silikagelu. Suchý vzduch poté prochází přes odstředivý odlučovač prachových částic s filtrem. Dále proudí přes kuličkový rotametr k sérii solenoidových ventilů, které suchý vzduch distribuují do měřicí tratě. Následně je vzduch zvlhčován pomocí bubleru naplněného kuličkovým hydrogelem (sítí vodou nasycených hydrofilních polymerních řetězců). Je možné použít i vodu bez hydrogelu, avšak za cenu vysokých oscilací tlaku, průtoku a vlhkosti, způsobené nerovnoměrnou tvorbou různě velkých bublin. Okolo bubleru s hydrogelem je obtokový ventil, který reguluje množství vzduchu proudícího přes hydrogel, a tak i vlhkost vzduchu na výstupu. Poté vzduch vstupuje přes elektronický průtokoměr Honeywell AWM5104VN do kalibračního boxu, v němž jsou umístěny referenční senzory relativní vlhkosti IST P-14 spolu s kalibrovanými senzory BigClown. Teplota uvnitř polystyrenového boxu je kontrolována utermostatem s glykolovým oběhem připojeným na tepelný výměník. Výměník je opatřen ventilátorem pro dosažení homogenního teplotního pole v boxu se senzory. Vstupující vzduch je temperován na teplotu boxu průchodem sérií měděných spirál, které jsou umístěny před vstupem do kalibračního boxu. Přesnost udržení teploty v boxu je stěžejní, neboť přímo ovlivňuje relativní vlhkost, která je při dané absolutní vlhkosti funkcí teploty, viz. [1, 2].

2.2 SCADA systém

Referenční senzory teploty Pt1000, relativní vlhkosti IST P-14 a průtoku AWM5104VN jsou připojené do Embedded Local Monitor Board (ELMB) modulu sběru dat, z něhož jsou data přenášena přes OPC server do SCADA prostředí WinCC firmy Siemens. Modul ELMB je jádrem přesného referenčního měřicího systému. Jedná se o zařízení pro sběr dat, které je založeno na mikroprocesoru ATMEL Mega 128. Ten zpracovává data z 16-bitového sigma-delta A/D převodníku, který je vybaven stabilizovaným kalibrovaným napěťovým zdrojem s teplotně-kompenzačními obvody. Připojení měřicích kanálů do převodníku zprostředkovává digitální filtr napojený na 64-kanálový multiplexer. Vnitřní a vnější kalibrace jednotlivých analogových měřicích kanálů byla provedena v rámci návrhu a realizace systému. Dále modul ELMB nabízí po 16 vstupních a výstupních digitálních signálech, které slouží k ovládní relé spínajících výkonové prvky. Nastavení teploty uvnitř polystyrenového boxu, otevření/zavření solenoidových ventilů a řízení ventilátorů uvnitř kontrolované oblasti je rovněž realizováno v prostředí WinCC. V něm je možné naprogramovat časovou sekvenci teplot a spínání, tj. otevření/zavření ventilů pro automatizované měření.



Obr. 3: Schéma měřicí trati postavené pro kalibrace teplotních a vlhkostních senzorů. Vlevo je sestava upravující průtok a vlhkost vzduchu před vstupem do kalibračního boxu. Vpravo je tepelný výměník s ventilátory, který temperuje polystyrenový box. Zeleně je vyznačen SCADA systém, modře bezdrátové připojení IoT senzorů do DAQ počítače.

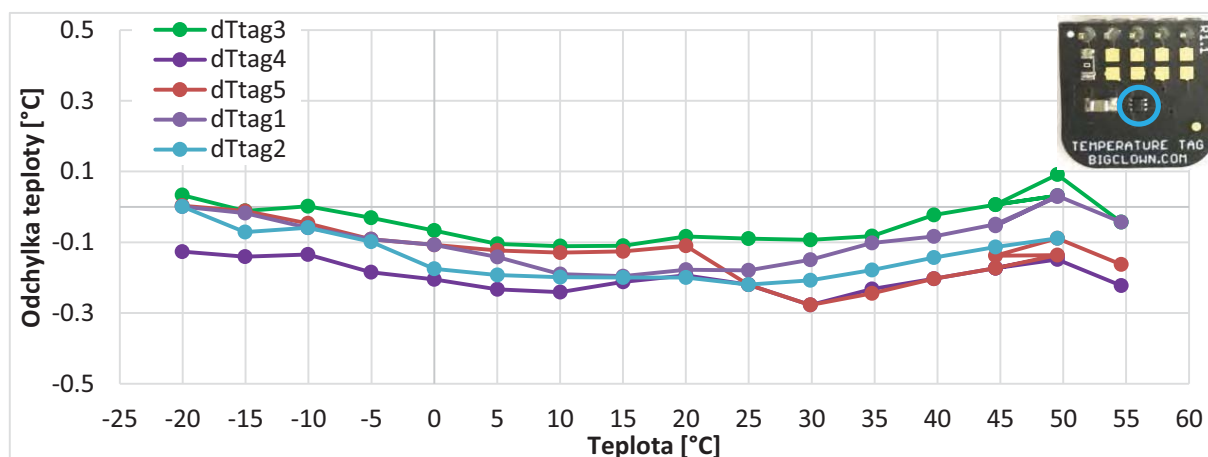
3. Vyhodnocení přesnosti IoT senzorů

Senzory relativní vlhkosti dodané společností Hardwario jsou připojené do jednotky CORE module, který pomocí radiového signálu odesílá naměřená data do PC přes USB dongle, viz. Obr. 3. Toto USB zařízení vytvoří v PC virtuální seriový port, ze kterého se data odečítají pomocí software vytvořeném v jazyce Python. Data jsou ve formátu textových řetězců ukládána do .csv souborů. Přenos mezi PC a USB donglem probíhá v sub-GHz rádiovém pásmu. Vzhledem k extrémně nízké spotřebě elektrické energie IoT zařízení, která je v řádu μA , lze zanedbat vlastní ohřev elektroniky joulovým teplem, a tak i jeho možný nežádoucí vliv na měření.

3.1 Teplota

IoT senzory teploty, tzv. teplotní tagy IoT systému BigClown používají digitální teplotní senzor TMP112 s rozlišením převodníku $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ (jedná se o rozlišení, tedy krok měření, nikoliv absolutní přesnost). Pro potřeby ověřovacího, resp. kalibračního měření jsou tagy opatřeny kabelem pro prodloužení I²C sběrnice CORE modulu a možnosti zavedení tagů přímo do jímky ultratermostatu. Jímka je pro lepší vedení tepla vyplněna dielektrickou fluorinertní

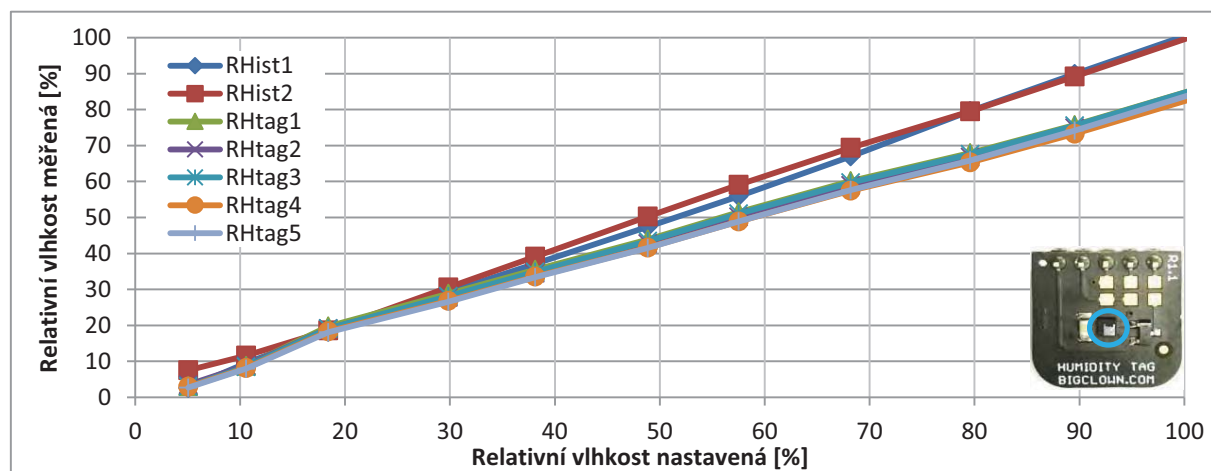
kapalinou, která v jímce ultratermostatu vytvářet stabilní a homogenní teplotní pole, avšak nevede elektrický proud. Kalibrační měření bylo provedeno pro 5 tagů současně v jedné dávce a v rozsahu teplot od -20 °C do 55 °C s krokem 5 °C . Vybrané rozpětí s rezervou pokrývá běžné teploty, kterým jsou tato zařízení v provozu vystavena. V jímce se kromě ověřovaných tagů, nacházel i referenční 4-vodičově zapojený teploměr Pt100, vůči kterému byly tagy vyhodnocovány. Zpracováním výsledků měření dostáváme teplotní závislost odchylky teplotních tagů od referenčního senzoru Pt100, která je vynesena na Obr. 4. Z odchylek senzorů je patrné, že rozdíl měřen a referenční teploty dosahuje v průměru $0.1 \div 0.2\text{ °C}$ a maximálně 0.3 °C . Tato přesnost je pro běžné IoT aplikace více než dostačující.



Obr. 4: Graf měření teplot mezi -20 °C a $+55\text{ °C}$ pro BigClown tagy vůči referenční 4-vodičové Pt100. Odchylky teploty dosáhly v průměru 0.11 °C a maximálně 0.30 °C . Na fotografii je vyznačen samotný digitální teplotní senzor umístěný na PCB desce.

3.2 Vlhkost

Jako další byly proměřeny tagy systému BigClown, které měří relativní vlhkost a fungují na kapacitním principu. Tag je vybaven digitálním senzorem s integrovaným AD převodníkem, který pracuje s rozlišením odpovídajícím teplotnímu rozdílu 0.1 \%RH , ale přesnost a opakovatelnost senzoru jsou v praxi řádově 2 \%RH . Senzor odesílá po I²C sběrnici hodnoty vlhkosti do Core modulu v intervalech definovaných v aktuálně nahraném firmwaru. Z principu fungování kapacitního senzoru vlhkosti plyne horší přesnost měření v extrémních hodnotách. V rozmezí $0\div 10\text{ \%RH}$ a $85\div 100\text{ \%RH}$ je měření vlhkosti problematické. Výrobce senzoru v doprovodné technické dokumentaci udává, že nejistota měření roste v těchto intervalech z jednotek na desítky procent.



Obr. 5: Naměřená závislost relativní vlhkosti naměřené tagy (viz. foto autora) systému BigClown vůči referenčnímu čidlu IST. Měření bylo provedeno v rozsahu $5\div 90\text{ \%RH}$ s krokem 10 \% . Na fotografii je vyznačen samotný kapacitní RH digitální senzor připojený na PCB desce.

Výsledek provedeného měření je zobrazen v grafu na Obr. 5 a potvrzuje obtížnost měření vysokých relativních vlhkostí. Pro relativní vlhkost vyšší než 70 % RH již nepřesnost měření tagů přesahuje hodnotu 10 % RH. Tato nepřesnost je obdobná u všech tagů, je tedy systematická a opakovatelná s lineární tendencí, takže může být opravena (kompenzována) kalibrací senzoru.

4. Závěr

4.1 Měřicí trať

Postavená měřicí trať umožňuje ověřovací, resp. kalibrační měření nejen IoT senzorů v širokém a nastavitelném rozsahu teplot a vlhkostí, v rozsahu teplot do 50 °C a relativní vlhkosti prakticky od 0 % RH do 100 % RH. Podmínky měření je možné přesně reprodukovat a udržet stabilní s přesností lepší než 0.5 °C pro teplotu a 2 % RH pro relativní vlhkost. Hodnoty teploty a vlhkosti ve vlastním kalibračním boxu jsou odečítány pomocí předem přesně kalibrovaného řetězce sběru dat, a to v rozsahu běžném pro IoT senzory. Použité referenční senzory teploty byly přesně zkalibrovány v rozsahu teploty od -20 °C do 55 °C oproti certifikovanému referenčnímu senzoru Pt100. Senzory vlhkosti byly kalibrovány nad nasycenými roztoky solí, především se to týkalo hlavního referenčního kapacitního čidla IST. Prostředí WinCC firmy Siemens a použitý modul pro sběr dat ELMB umožňuje ovládání aparatury a automatizaci měření, včetně ovládání ventilů, čerpadel, ventilátorů a termostatu.

4.2 IoT senzory

Z hlediska přesnosti a stability byly na sestavené měřicí trati proměřeny senzory vlhkosti systému BigClown, tzv. tagy, v rozsahu 5 ÷ 90 % RH s krokem 10 %. Do relativní vlhkosti 60 % měří tagy s odchylkou měření do 10 %, což je dostatečná přesnost pro běžné IoT aplikace. Zvláště pak se zřetelem na obtížnost kapacitního měření vlhkosti, které je z principu nepřímé. Prakticky dosažitelná přesnost běžných RH senzorů se pohybuje v řádu jednotek procent. Odchylka měření tagů se jeví jako systematická, opakovatelná a s lineárním trendem. Bylo by tedy možné senzor zkalibrovat a dosáhnout tak o řád lepší přesnosti.

Teplotní tagy v počtu 5 kusů systému BigClown byly proměřeny v rozsahu teplot od -20 °C do 55 °C s krokem po 5 °C. Tagy vykazují průměrnou přesnost v řádu 0.1 °C, což je dáno v podstatě přímým měřením této stavové veličiny. Bez výtky jsou tak testované tagy vhodné i pro relativně přesné aplikace nejen v doméně IoT.

Problémem by v praxi mohla být digitální podstata testovaných senzorů BigClown, ve kterých probíhá převod měřené fyzikální veličiny na digitální hodnotu ještě v samotném senzoru a poté je po I²C sběrnici hodnota poslána do CORE modulu. Kalibrační fit tedy nelze aplikovat na nízké úrovni ještě před digitalizací měřené veličiny.

Poděkování

Práce byla podpořena grantem ČVUT v Praze č.: SGS18/058/OHK2/1T/12, Experimentální zařízení pro kalibrace širokého spektra senzorů pro IoT.

Literatura

- [1] NOŽICKA, J., *Základy termomechaniky. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 187 s. ISBN 80-01-02409-1.*
- [2] ŠAFARÍK, P., VESTFÁLOVÁ, M.: *Termodynamika vlhkého vzduchu.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 9788001060209.
- [3] Web prezentace firmy CODIT. Dostupné online: <https://www.codit.eu/how-can-we-help/internet-of-things>
- [4] Hallgren, B.I., Kvedalen, H., Burckhart, H.J. and Boterenbrood, H., 2001. The embedded local monitor board (ELMB) in the LHC front-end I/O control system. CERN Document Server.



Selected article from
Tento dokument byl publikován ve sborníku

**Nové metody a postupy v oblasti přístrojové techniky,
automatického řízení a informatiky 2018**
**New Methods and Practices in the Instrumentation,
Automatic Control and Informatics 2018**
28. 5. – 30. 5. 2018, Příbram - Podlesí

ISBN 978-80-01-06477-1

Web page of the original document:
<http://control.fs.cvut.cz/nmp>
<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2018.pdf>

Obsah čísla/individual articles:
<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2018/>