

DG16P02M050-1 MĚŘICÍ A REGULAČNÍ SYSTÉM VNITŘNÍHO MIKROKLIMATU

KONCEPČNÍ NÁVRH

Pro monitorování konstrukcí in situ využívá v současné době Kloknerův ústav ČVUT měřicí a regulační ústřednu MS6D Comet. Používaná komerční varianta je vhodná pro celou řadu čidel a snímačů a má integrované připojení přes různá rozhraní včetně internetu. Je však vhodná spíše pro regulaci prostředí se stabilní teplotou, ve kterém je parametrem pro regulaci (spínání jednotlivých topných, sušících a vlhčících zařízení) relativní vlhkost prostoru. Pokud je teplota měřeného prostředí nestabilní a pohybuje se v širokém rozmezí mezi -5 až 30 °C, dochází k významné změně kapacity vzduchu absorbovat vodní páry. V památkových objektech, zejména v případě, jsou-li v nich uchovávány vzácné relikvie či umělecká díla, je v daném prostoru vysoce žádoucí vytvoření stabilního prostředí. Proto je nezbytná změna regulačního parametru z relativní vlhkosti vzduchu (% rel.) na jeho měrnou vlhkost $g/kg_{\text{such.vzd}}$ a dále zajištění přísunu vzduchu do prostoru. Vytvořený funkční vzorek je regulační jednotka s malou energetickou náročností a bezdrátovým přepojením do sítě WiFi nebo budované sítě LoRa pro internet věcí, která je schopna vyhodnocovat parametry měrné vlhkosti v různých místech a zároveň ovládat činnost dvou připojených přístrojů. Zařízení monitoruje parametry vnitřního mikroklimatu, ukládá data do vnitřní paměti a dává impuls k sepnutí příslušné zásuvky dle předem definovaných mezních hodnot (měrných vlhkostí). Zařízení disponuje dvěma samostatnými čidly, která monitorují:

- teplotu (°C),
- relativní vlhkost (% rel.),
- rychlost proudění vzduchu (m/s),
- měrnou vlhkost (g/kg_{sv}).

POPIS VZORKU

Pro vytvoření vhodné měřicí ústředny byly otestovány různé komponenty a připraveno několik zkušebních sestav s procesory Tensilica Espressiv ESP8266, vhodnými pro miniaturní bateriemi napájené aplikace. Mají dostatečnou operační rychlost i paměť, řadu zabudovaných periférií (Wi-Fi 802.11 b/g/n/e/i 2.4GHz, SPI, I2C, I2S, UART, Ethernet), podporu CAN2, PWM, A/D převodník SAR, PWM pro motory atd.

Řídící jednotka je tvořena 32 bitovým procesorem ESP8266, černobílým displejem 84x48 a dalšími komponenty. Měření je řízeno dvěma senzory DHT22 teploty a vlhkosti a měřené veličiny jsou dále filtrovány pro vyloučení chybných měření. Lze nastavit na libovolnou dobu a periodu ukládání dat. Pomocí terminálové aplikace je možné nastavení spodního limitu měrné vlhkosti (0 až 10 g/kg_{sv}) a horního limitu vlhkosti v rozsahu (5 až 15 g/kg_{sv}).

Po sepnutí zařízení dochází k měření a ukládání výše uvedených parametrů do interní paměti přístroje a zároveň k automatickému řízení spínání proudových okruhů do dvou instalovaných zásuvek (obr. 1) napojených na komerčně vyráběná zařízení upravující vnitřní klima místností (zvlhčovací jednotka, vysušovací jednotka, ventilátor aj.). Měření je realizováno dvěma čidly

umístěnými do vybraných míst daného prostoru, případně do dvou sousedících prostorů. Spínání proudových okruhů do jednotlivých zásuvek je řízeno vloženým algoritmem dle nastavených kritérií měrných vlhkostí (horní a dolní mezí). V případě napojení zásuvek 1 a 2 na zvlhčovač a vysoušeč vzduchu bude čidlo č. 2 uloženo v trvale suché expozici. V případě napojení zásuvek 1 a 2 na zvlhčovač a ventilátor přívodu vzduchu z exteriéru bude čidlo 1 umístěno v interiéru a čidlo 2 v exteriéru. Pokud se zvolené limity nepřekročí, neděje se nic. Pokud je ve sledovaném prostoru menší nebo větší měrná vlhkost, než jsou nastavené limity, dochází ke spínání zásuvek dle následujícího algoritmu.

Čidlo 1 hodnota pod dolním nastaveným limitem=0 hodnota nad horním nastaveným limitem=1	Čidlo 2 hodnota pod dolním nastaveným limitem=0 hodnota nad horním nastaveným limitem=1	Zásuvka 1 (zvlhčovač) vypnuto=0 zapnuto=1	Zásuvka 2 (vysoušeč, ventilátor) vypnuto=0 zapnuto=1
0	0	1	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	1	0	0



Obr. 1. Zařízení pro měření a regulaci vnitřního mikroklimatu JP001.

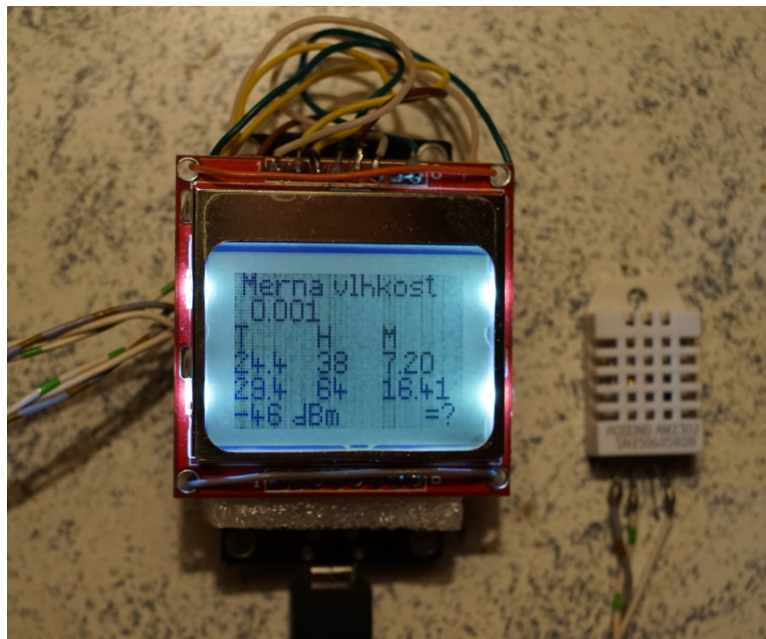
Zařízení je programovatelné a ovladatelné prostřednictvím programu Tera Therm v následujícím rozsahu:

- volba intervalu zápisu dat (s)
- vypsání nápovědy
- povolení / zakázání výpisu na sériovou linku
- povolení / zakázání zápisu do paměti
- mazání dat

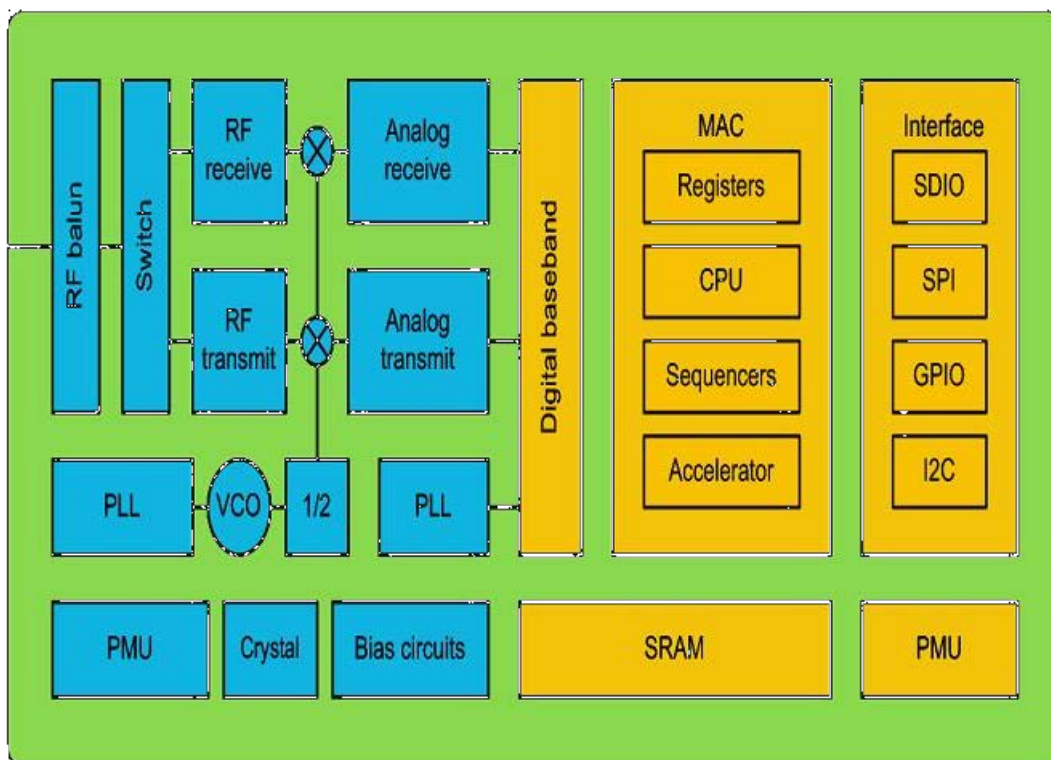
- vypísání změřených dat
- nastavení adresy UDP serveru pro případný přenos dat po síti
- nastavení jména WiFi sítě
- nastavení hesla WiFi sítě

Intervaly měření a doba jejich průměrování jsou pevně nastaveny v programu. Každých 6 vteřin měří zařízení dvě teploty a vlhkosti a zobrazuje je na displej a sériovou linku. Měřené veličiny teploty a vlhkosti jsou průměrovány a z nich je pomocí algoritmu vypočítávána měrná vlhkost. Na základě vyhodnocení dat ze sledovaných dvou prostředí je koordinováno spouštění větrání, topení, či jiný komponent. Měřené veličiny jsou zobrazovány na kontrolním LCD displeji (obr. 2). Zařízení umožňuje pro další vyhodnocení přenášet data pomocí USB v textovém tvaru jako řádky obsahující analogový vstup. Měřené veličiny a stavy je možno dále přenášet pomocí lokální sítě Wi-Fi 2.4GHz. Ve volitelných intervalech bude dále možno data zapisovat do vnitřní paměti typu Flash pro další zpracování. Zařízení bez silových komponentů má spotřebu asi 100mA ze standardního zdroje s mikroUSB konektorem 5V. Pro řízení dalších komponentů bude k dispozici několik digitálních portů, různě konfigurovatelných.

Funkční schémata jsou znázorněna na obr. 3. Vývojové nástroje a programování zařízení budou nejspíš směřovat do perspektivní oblasti Open Source. Existují detailní popisy i odkazy na vývojové nástroje založené na GNU C, Mingw32, C++, Arduino, případně Lua a Python.



Obr. 2: LCD černobílý displej Nokia 5110 84x48



Obr. 3: Funkční diagram Tensilica Espressiv ESP8266

Komunikace PC se zařízením je řešena pomocí sériové linky a USB (využito zejména pro programování), ale také pomocí zabudovaného Wi-Fi, které je využíváno zejména při vlastním měření. Pro síťový zápis dat byla testována platforma api.thingspeak.com. Na lokální síti je testováno několik aplikací pro soketovou komunikaci, UDP a jiné způsoby komunikace. Aplikace pro ně jsou v jazyce Python 3. Aplikace umožňují zápis dat do souborů většinou v textové podobě, případně ve formátu JSON pro další zpracování. Pro data je používána vnitřní Flash paměť v procesorech a je uvažováno o dalších Flash pamětech, jako jsou třeba SD karty apod. Pro napájení je používáno síťové připojení. Spotřeba při plném provozu je v průměru asi 100 mA.

POPIS DAT A PŘÍPADOVÝCH STUDIÍ PRO PŘÍPRAVU A OVĚŘENÍ

V listopadu a prosinci 2018 a v průběhu roku 2019 je funkční vzorek ověřován (validován) při dlouhodobém monitorování prostoru místnosti klenotnice v katedrále Nanebevzetí panny Marie v Kutné Hoře – Sedlci. Pilotně se zkouší technologie LoRa pro internet věcí (Long Range).

POPIS ZMĚN A ÚPRAV ZAŘÍZENÍ V NÁVAZNOSTI NA ANALÝZY VÝSLEDKŮ OVĚŘOVÁNÍ

V návaznosti na měřená data a získané podklady během roku 2019 došlo k úpravám zařízení JP001 a byl průběžně prováděn jeho technický upgrade a postupně došlo k jeho výměně za dokonalejší systém JP002. V rámci úprav došlo ke změnám v časování řídicích modulů a dalších částí softwaru pro obsluhu obvodů pro měření teploty a vlhkosti HTU21, které jsou rychlejší než dosud používané. Těž došlo k instalaci nových modulů s ESP32, které obsahují hodiny reálného času zálohované baterií. Pro účely zapínání větrání a zvlhčování byly posíleny výkonové prvky. V otázce algoritmů na řízení přístroje došlo k jejich rozšíření takovému, aby bylo možno jednoduše vybírat a zadávat z několika různých předprogramovaných variant. Druhá verze zařízení JP2 se od první liší v těchto vlastnostech:

- Je použit novější dvoujádrový procesor ESP32 s jiným displejem, A/D převodníkem s vyšším rozlišením a více měřícími vstupy.
- Pro data a program je k dispozici větší paměť FLASH.
- Pro lepší informaci o čase jsou použity samostatnou baterií zálohované hodiny reálného času. Pokud je k dispozici připojení k internetu, je z časových serverů čas synchronizován.
- Pro komunikaci pomocí WIFI je k dispozici víc typů protokolů a jejich zabezpečení.
- Pro účely regulace vlhkosti a teploty jsou připraveny různé algoritmy, které je možné softwarově přepínat. Jejich přesná podoba bude ještě průběžně doplňována podle potřeb v reálném prostředí. Jako v první variantě jsou použity dva výkonové spínače zásuvek.
- Obslužný software je přepracován a doplněn.

ODŮVODNĚNÍ JEDINEČNOSTI ŘEŠENÍ A VZTAH K PAMÁTKOVÝM STAVBÁM

Jedinečnost funkčního vzorku spočívá zejména v technickém vyřešení nového typu snímače pro měrnou vlhkost, která je zcela zásadním kritériem kontroly teplotně nestabilních prostor. Systematickým a regulovatelným vyhodnocováním parametrů vnitřního mikroklimatu ošetřovaného prostoru s návazností na spouštění samostatných jednotek schopných příznivě toto mikroklima ovlivnit může toto zařízení přispět ke stabilizaci vnitřního mikroklimatu bez nároku na instalaci mnohdy problémové a prostorově nepatřičné klimatizační soustavy.



Ověřovací protokol

1. Měřicí systémy

Tab. 1: Systém kontroly měřených parametrů (teploty, relativní vlhkosti, měrné vlhkosti a rychlosti proudění vzduchu)

Ověřovaný systém	Ověřovací systém	Ověřovaná veličina	Datum ověřování	Místo ověřování	Podrobnější specifikace
JP001 čidlo 1	Comet S3631 (metrologické číslo P10020M)	teplota (°C)	4.12. až 27. 12. 2018	kostel Nanebevzetí Panny Marie a sv. Jana Křtitele v Kutné Hoře - Sedlci	1 m nad podlahou
		relativní vlhkost (% rel.)			
		měrná vlhkost (g/kg such. vzd.)			
JP001 čidlo 2	Comet S3631 (metrologické číslo P10021M)	teplota (°C)	4.12. až 27. 12. 2018	kostel Nanebevzetí Panny Marie a sv. Jana Křtitele v Kutné Hoře - Sedlci	suchá expozice v boxu
		relativní vlhkost (% rel.)			
		měrná vlhkost (g/kg such. vzd.)			
JP001 čidlo 3	Comet měřicí a regulační ústředna MS6D	teplota (°C)	15. 11. až 20. 11. 2018	laboratoř Kloknerova ústavu	prostor před řízeně ovládaným ventilátorem

Tab. 2: Systém kontroly funkčnosti spínání systému JP001

Ověřovaný systém	Ověřovaná veličina	Nastavená dolní meze měrné vlhkosti (g/kg _{such.vzd.})	Nastavená horní meze měrné vlhkosti (g/kg _{such.vzd.})	Podrobnější specifikace	Místo testu
Jednotka JP001 zásuvka 1	Spínání zásuvky		8,9	spínání vysušovače vzduchu	Labroatoř Kloknerova ústavu - Zkušební klimatotechnologická komora KPK 400 U / Mytron Bio (metrologické číslo P 10 011 M)
Jednotka JP001 zásuvka 2	Spínání zásuvky	6,5		spínání zvlhčovače vzduchu	

2. Kalibrace měřicích systémů

Ověřovací systém tvoří standardně metrologicky udržovaný komerčně vyráběný měřicí systém s platnými kalibračními listy. **Ověřovaný systém** je složen z nových snímačů (čidla 1 až 3) zařízení JP001, které byly kalibrovány a ověřeny u výrobce. V budoucnu bude ověřované zařízení standardně kalibrováno.

3. Způsob ověření funkce

Způsob ověření: referenční porovnávání měřených hodnot ověřovaného a ověřovacího systému s číselným a grafickým výstupem;

Předmět ověřování: teplota (°C), relativní vlhkost, (% rel.), měrná vlhkost (g/kg such. vzd.), rychlost proudění vzduchu (m/s) a spínání zásuvek;

Místo ověřování: prostor sakrální stavby, laboratoř Kloknerova ústavu (místnost B1-s106).

4. Doplnující informace

a) V případě prostoru sakrální stavby (čidla JP001 a 002) byla volena místa pro instalaci snímačů tak, aby a) bylo charakterizováno standardní mikroklima místnosti a b) bylo charakterizováno nestandardní (přesušené) mikroklima místnosti;

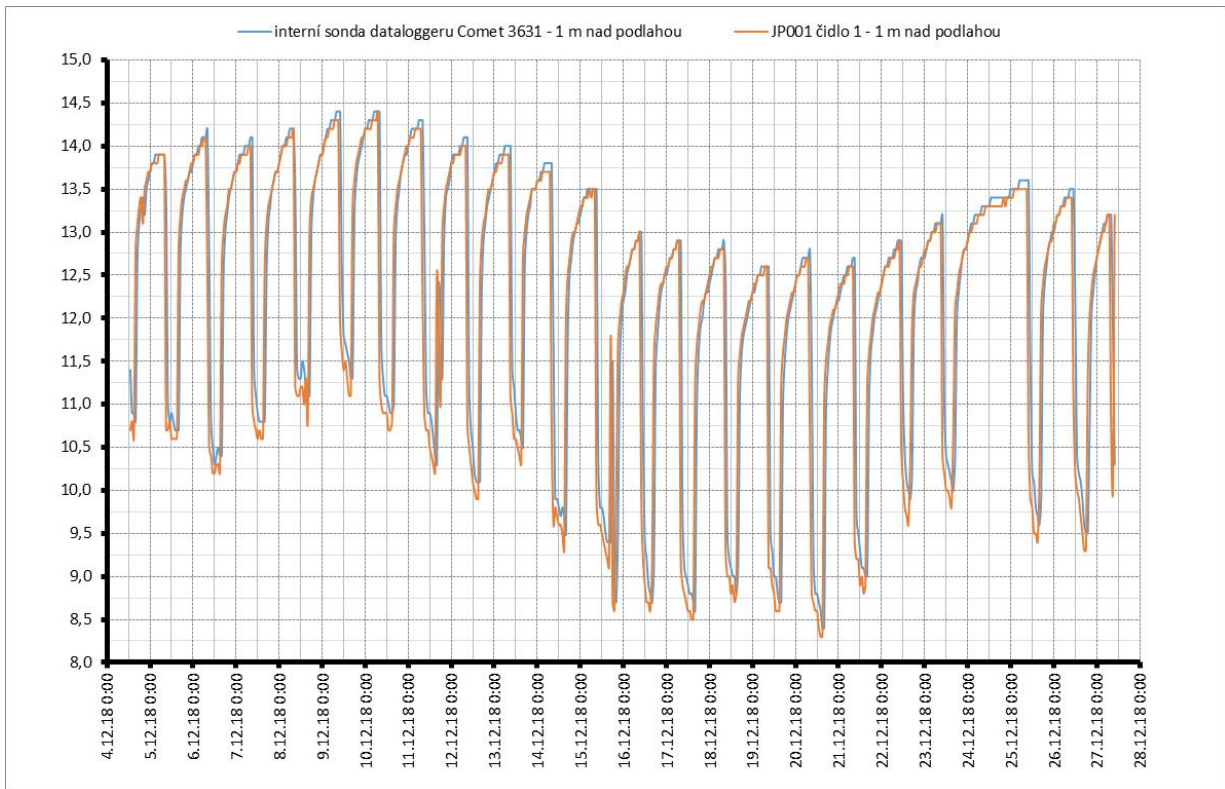
b) V případě laboratoří Kloknerova ústavu bylo vytvořeno umělé prostředí s proudícím vzduchem s nuceným ovládním rychlosti ventilátoru.

5. Referenční měření vybraných parametrů

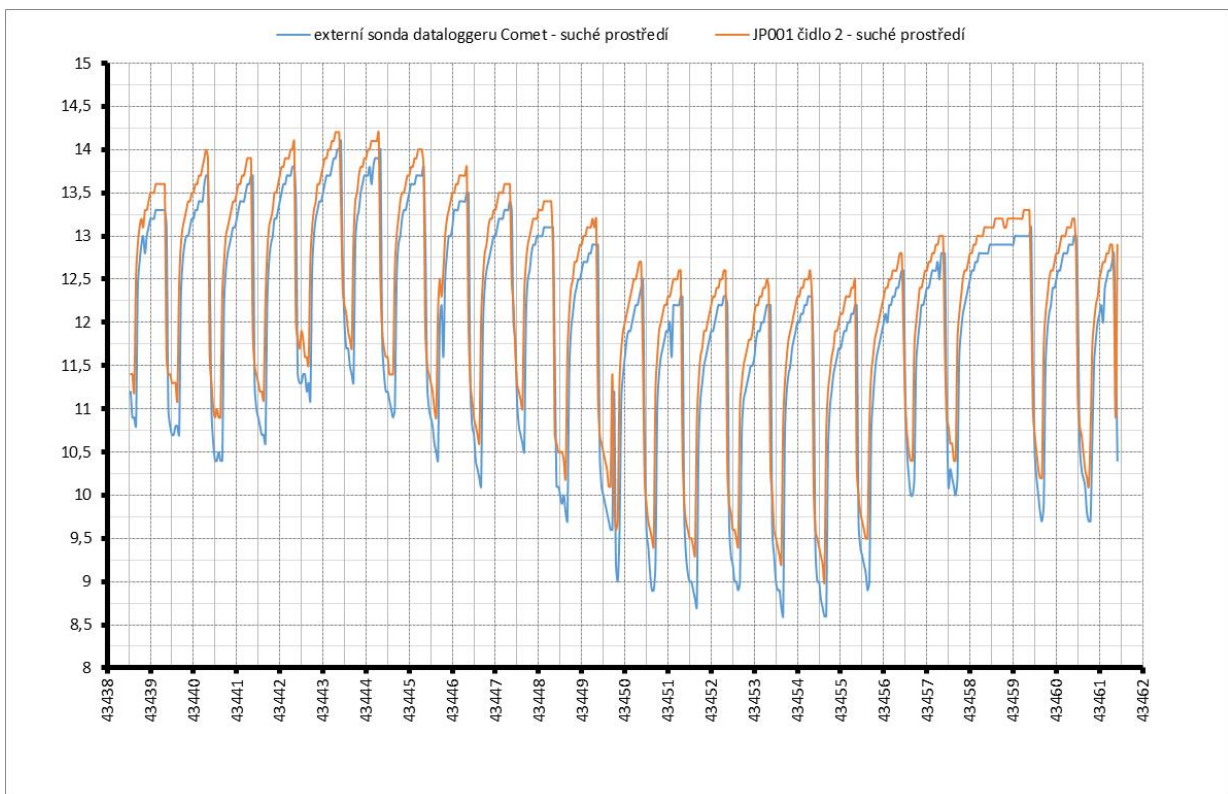
Záměrem referenčního měření bylo porovnání měřených parametrů u použitých a vestavěných čidel vyvinutého přístroje JP001 s výstupy čidel komerčně vyráběných a atestovaných jak v rámci komerční produkce, tak také v rámci vnitřního provozu akreditované laboratoře Kloknerova ústavu. Měření zahrnuje tři samostatné okruhy provedené v období listopadu a prosince 2018. Jednalo se o:

- 1) měření rychlosti proudění vzduchu (Graf 7),
- 2) kontrola funkčnosti spínání zásuvek přístroje JP001 (Tab. 3),
- 3) měření teploty (Grafy 1 a 2), relativní vlhkosti (Grafy 3 a 4) a měrné vlhkosti vzduchu (Grafy 5 a 6).

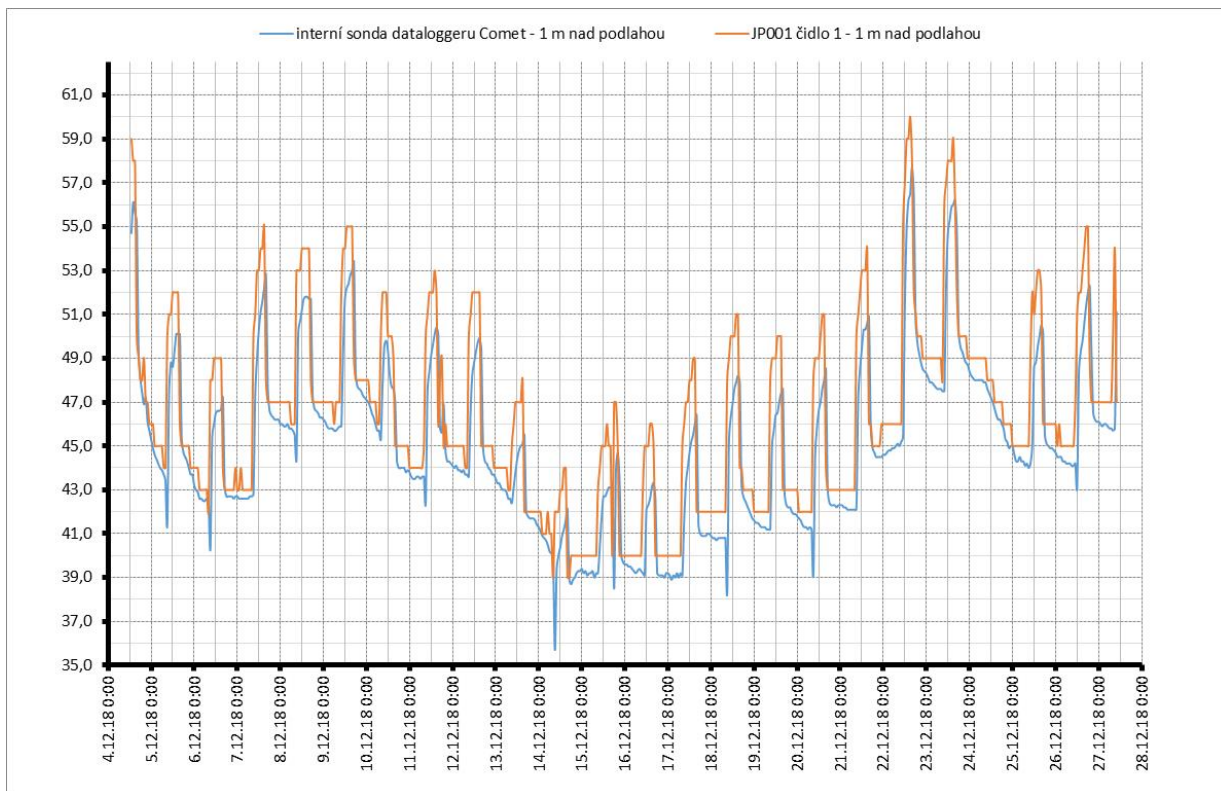
Základní parametr, který rozhoduje o funkčnosti zařízení a jeho použitelnosti v reálném prostředí je parametr měrné vlhkosti vzduchu. Tento parametr a jeho předem nastavené meze rozhodují o spínání napojených přístrojů na zásuvky a jejich funkci v rámci úpravy vnitřního mikroklimatu.



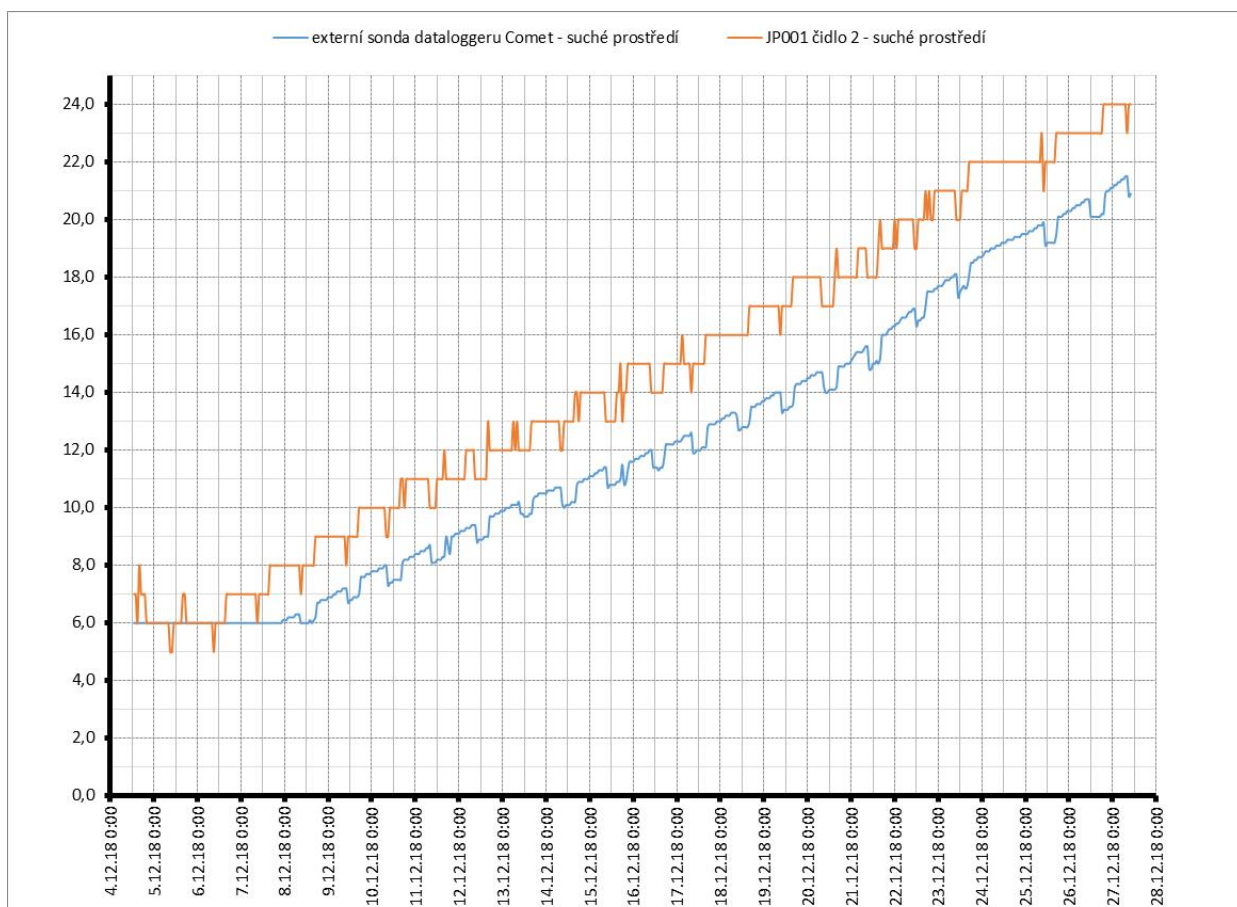
Graf 1: Porovnání průběhu teplot (°C) ověřovaného JP001 čidla 1 a ověřovací interní sondy dataloggeru Comet 3631



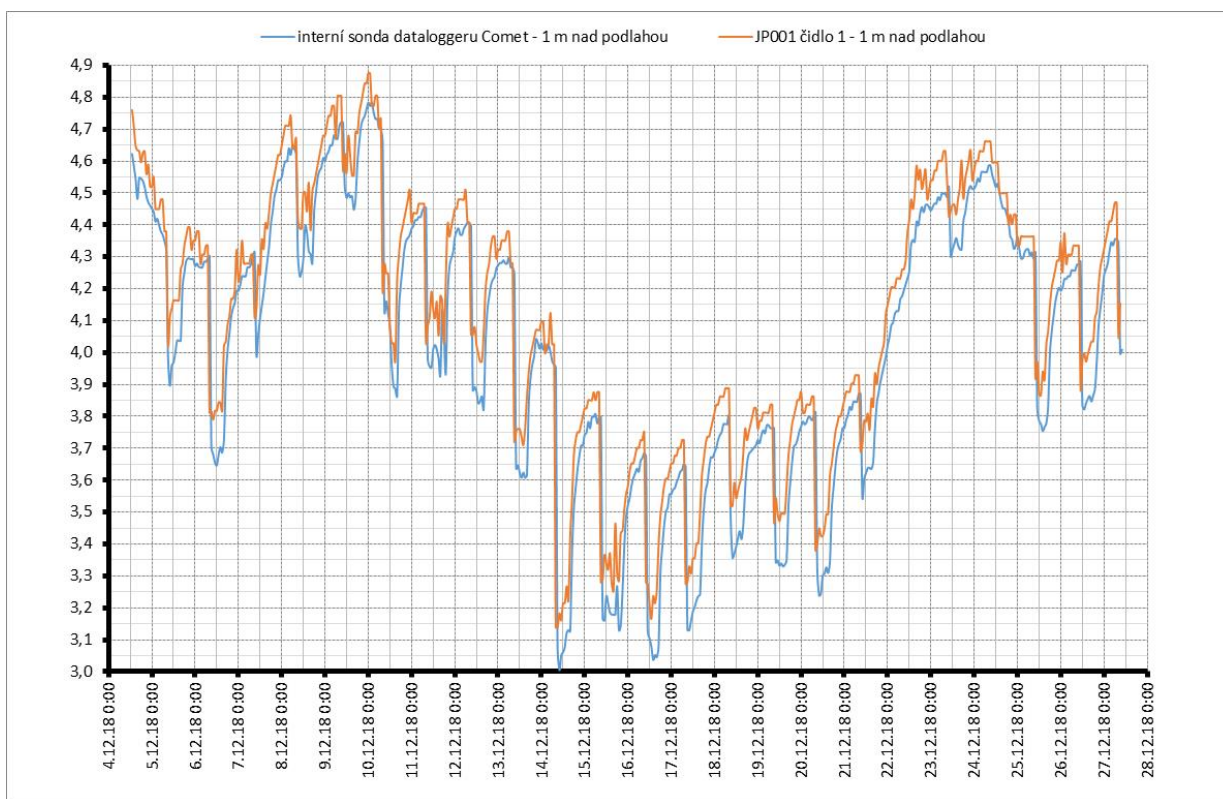
Graf 2: Porovnání průběhu teplot (°C) ověřovaného JP002 čidla 1 a ověřovacího čidla – externí sondy dataloggeru Comet 3631



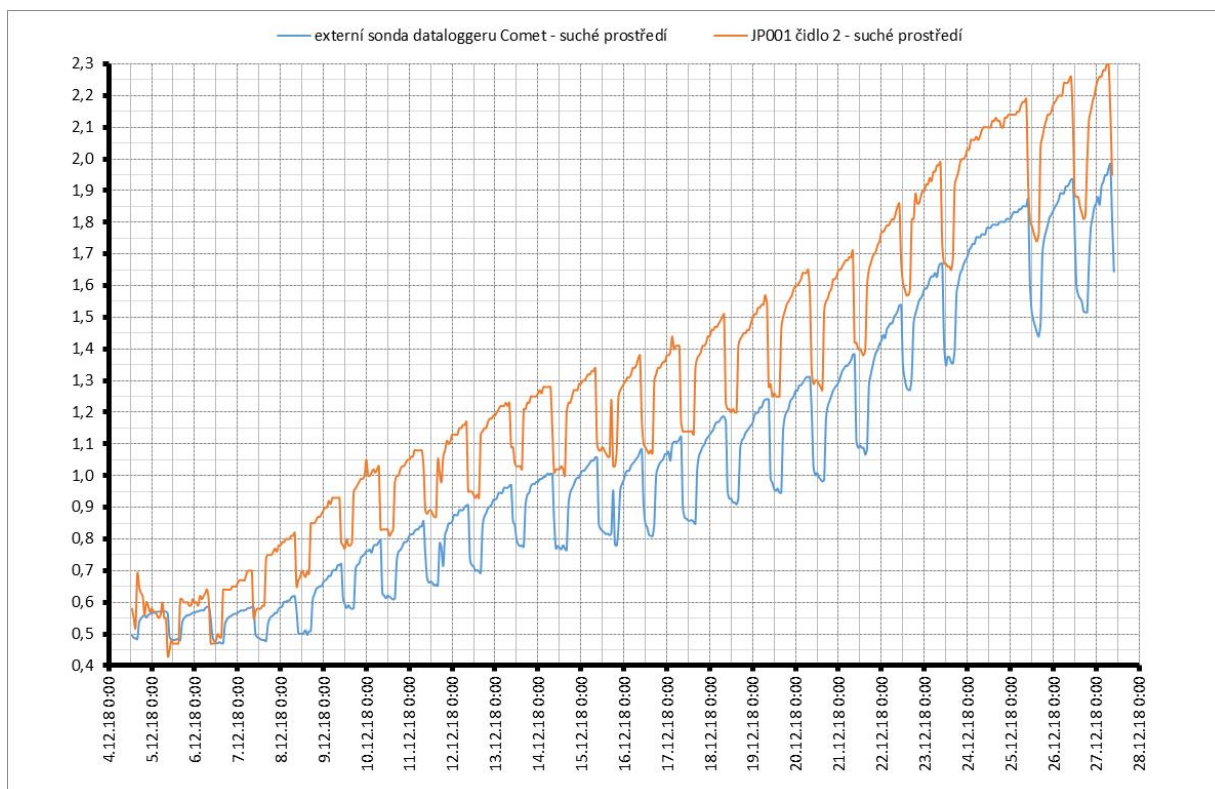
Graf 3: Porovnání průběhu relativních vlhkostí (% rel.) ověřovaného JP001 čidla 1 a ověřovací interní sondy dataloggeru Comet 3631



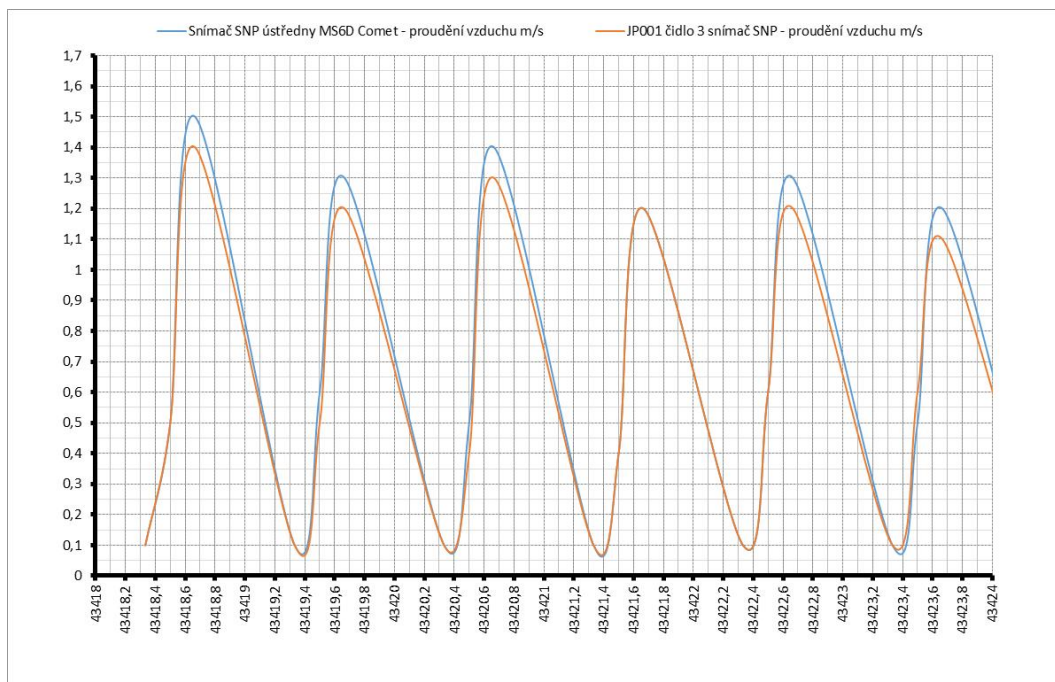
Graf 4: Porovnání průběhu relativních vlhkostí (% rel.) ověřovaného JP001 čidla 2 a ověřovací externí sondy dataloggeru Comet 3631



Graf 5: Porovnání průběhu měrných vlhkostí (g/kg such.vzd.) ověřovaného JP001 čidla 1 a ověřovací interní sondy dataloggeru Comet 3631



Graf 6: Porovnání průběhu měrných vlhkostí (g/kg such.vzd.) ověřovaného JP001 čidla 1 a ověřovací externí sondy dataloggeru Comet 3631



Graf 7: Porovnání průběhu rychlostí proudění vzduchu (m/s) ověřovaného JP001 čidla 3 a ověřovacího externího snímače dataloggeru Comet 3631 – SNP 120 – 0 až 10 V

Tab. 3: Kontrola funkce řídicí jednotky JP001 při nastavení hraničních hodnot měrné vlhkosti 6,5 (g/kg_{such.vzd.}) a 8,9 (g/kg_{such.vzd.})

Datum a čas	Měrná vlhkost prostředí (g/kg _{such.vzd.})	Sepnutí zásuvky 1 - vysušování vzduchu	Sepnutí zásuvky 2 - vlhčení vzduchu
26.11.18 8:00	4,8		X
26.11.18 9:00	5,5		X
26.11.18 10:00	6,3		X
26.11.18 11:00	7,2		
26.11.18 12:00	8,1		
26.11.18 13:00	9,1	X	
26.11.18 14:00	10,3	X	
26.11.18 15:00	9,2	X	
26.11.18 16:00	8,1		
26.11.18 17:00	7,2		
26.11.18 18:00	6,3		X

Grafy 1 a 2 porovnávají průběhy teplot mezi čidly 1 a 2 zařízení JP001 a čidly Comet. V případě standardního (běžného) prostředí prostoru staveb s relativní vlhkostí mezi 30 a 60 % rel. a teplotami mezi 8 a 14,5 °C byla zaznamenána velmi uspokojivá korelace křivek měření obou čidel (Graf 1), kde rozdíly v maximálních a minimálních hodnotách nepřekročily 0,3 °C (tj. do 3,6 % abs. hodnoty). V případě nestandardního prostředí prostoru staveb s relativní vlhkostí mezi 0 a 24 % rel. a teplotami mezi 8,5 a 14,5 °C byla zaznamenána méně příznivá avšak přijatelná korelace křivek měření obou čidel (Graf 2), kde rozdíly v maximálních a minimálních hodnotách dosáhly hodnot až 0,6 °C (tj. do 6,8 % abs. hodnoty). V obou případech hodnoty implementovaných čidel zařízení JP001 se pohybovaly nad hodnotami čidel referenčních – srovnávacích.

Grafy 3 a 4 porovnávají průběhy relativních vlhkostí mezi čidly 1 a 2 zařízení JP001 a čidly Comet. V případě standardního (běžného) prostředí prostoru staveb s relativní vlhkostí mezi 30 a 60 % rel. a teplotami mezi 8 a 14,5 °C byla zaznamenána velmi uspokojivá korelace křivek měření obou čidel (Graf 3), kde rozdíly v maximálních a minimálních hodnotách nepřekročily 3,7 % rel. (tj. do 10 % abs. hodnoty). V případě nestandardního prostředí prostoru staveb s relativní vlhkostí mezi 0 a 24 % rel. a teplotami mezi 8,5 a 14,5 °C byla zaznamenána méně příznivá korelace křivek měření obou čidel (Graf 4), kde rozdíly v maximálních a minimálních hodnotách dosáhly hodnot až 4 % rel. (tj. do 20 % abs. hodnoty). V obou případech hodnoty implementovaných čidel zařízení JP001 se pohybovaly nad hodnotami čidel referenčních – srovnávacích.

Grafy 5 a 6 porovnávají průběhy měrných vlhkostí mezi čidly 1 a 2 zařízení JP001 a čidly Comet. V případě standardního (běžného) prostředí prostoru staveb s relativní vlhkostí mezi 30 a 60 % rel. a teplotami mezi 8 a 14,5 °C byla zaznamenána velmi korelace křivek měření obou čidel (Graf 5), kde rozdíly v maximálních a minimálních hodnotách nepřekročily 0,2 g/kg_{such. vzd.} (tj. do 6,5 % abs. hodnoty). V případě nestandardního prostředí prostoru staveb s relativní vlhkostí mezi 0 a 24 % rel. a teplotami mezi 8,5 a 14,5 °C byla zaznamenána méně příznivá korelace křivek měření obou čidel (Graf 6), kde rozdíly v maximálních a minimálních hodnotách dosáhly hodnot až 0,3 g/kg_{such. vzd.} (tj. do 15 % abs. hodnoty). V obou případech hodnoty implementovaných čidel zařízení JP001 se pohybovaly nad hodnotami čidel referenčních – srovnávacích.

Shrnutí odchylek měření mezi čidly 1 a 2 zařízení JP001 a čidly Comet je patrné z následující tab. 4.

Tab. 4: Odchyly referenčního měření v maximech a minimech průběhů sledovaných funkcí

Místo referenčního měření	Teplota (°C)		Relativní vlhkost (% rel.)		Měrná vlhkost (g/kg _{such.vzd.})		Proudění vzduchu (m/s)	
	max. peak	min. peak	max. peak	min. peak	max. peak	min. peak	max. peak	min. peak
Klenotnice - kostel Nanebevzetí Panny Marie a sv. Jana Křtitele v Kutné Hoře - Sedlci - 1 m nad podlahou	0,1	0,3	3,1	3,7	0,1	0,2		
Klenotnice - kostel Nanebevzetí Panny Marie a sv. Jana Křtitele v Kutné Hoře - Sedlci - suchá expozice v boxu	0,3	0,6	4	3,3	0,3	0,3		
Laboratoř Kloknerova ústavu							0,1	0

Graf 7 porovnává průběhy rychlosti proudění vzduchu implementovaného čidla 3 zařízení JP001 a čidla Comet. V případě standardního prostředí prostoru staveb, kde se hodnoty proudění vzduchu pohybují v mezích 0 až 1,5 m/s byla zaznamenána uspokojivá korelace křivek měření obou čidel (Graf 7), kde rozdíly v maximálních hodnotách nepřekročily 0,1 m/s (tj. do 7 % abs. hodnoty).

Tab. 3 shrnuje výsledky spínání zásuvek řídicí jednotky JP001 při nastavení hraničních hodnot měrné vlhkosti 6,5 (g/kg_{such.vzd.}) a 8,9 (g/kg_{such.vzd.}). Čidlo 1 bylo umístěno do měřeného (ovládaného) prostoru a čidlo 2 do chráněné suché expozice (tj. prostředí, kde měrná vlhkost nepřekročila spodní hranici nastavení 6,5 g/kg_{such.vzd.}). Funkce zařízení (přepínání zásuvek) pracovalo v bezchybném chodu.

6. Závěr

Dosažené výsledky referenčního porovnání poukazují na mírné rozdíly naměřených parametrů mezi čidly 1 až 3 a čidly referenčními. Tyto rozdíly mohly být způsobeny nejen konstrukčním uspořádáním čidel a jejich jednotlivými komponenty, ale také vzájemným umístěním čidel ověřovaných a ověřovacích vůči sobě v reálném prostoru kaple, kde jsou jednotlivé parametry vnitřního mikroklimatu ovlivněny prouděním vzduchu a mění se v rámci každého dm³. Rozhodujícím parametrem pro plnění účelu zařízení jsou naměřené hodnoty měrných vlhkostí.

Ve standardním prostředí sakrálních staveb s relativní vlhkostí 30-80 % rel. a teplotami mezi 10-30 °C se předpokládá chyba měření zařízením JP001 nepřekračující 0,2 g/kg_{such.vzd.}. Vzhledem k účelu a funkčnímu využití testovaného zařízení a praktických požadavků na vnitřní mikroklima sakrálních staveb lze tuto odchylku plně akceptovat. Testované zařízení je funkční a použitelné ve standardním provozu sakrálních a jiných staveb.

V případě nestandardních podmínek (s nízkými hodnotami měrné vlhkosti) je žádoucí softwarová kalibrace zařízení po vyhodnocení předběžného referenčního měření.

V Praze, 31. 12. 2018

Zpracoval: Ing. Lukáš Balík, PhD.