

Monitorování koncentrace kyslíku s využitím Internetu věcí během pandemie covidu-19

Jan Velička¹, Martin Pieš¹, Ján Hrubovčák², Petr Jelínek², Tomáš Mimra¹, Radovan Hájovský¹

¹Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

²Chirurgická klinika, Fakultní nemocnice Ostrava

Během pandemie covidu-19 bylo evidováno až dvojnásobné množství vzniku požárů a explozí souvisejících s výskytem nebezpečné koncentrace kyslíku v nemocnicích ve srovnání s nepandemickými časy. To bylo pravděpodobně dáno nedostatečnou připraveností nemocnic na prudký nárůst používání ventilátorů během kyslíkových terapií u těžce nemocných pacientů s covidem-19. Pandemie tak ukázala, že je potřeba považovat oddělení pracující s medicínským kyslíkem za potenciálně nebezpečná a zavést systémová opatření, která dokážou tato rizika ohrožující lidské životy eliminovat. Možným řešením, jak zabránit vzniku požáru souvisejícího s výskytem nebezpečné koncentrace kyslíku, je použití námi navrženého smart měřicího systému, který dokáže zvýšenou koncentraci kyslíku přesně a včas detekovat. Bezdrátový senzor je založen na technologii Internet of Things a splňuje požadavky na dlouhodobé monitorování v rámci nemocničního prostředí. Koncentrace kyslíku je měřena v pravidelných intervalech a data jsou bezdrátově přenášena do databázového úložiště. V případě překročení nastavené hodnoty koncentrace kyslíku dochází k upozornění nemocničního personálu formou SMS zprávy a e-mailu.

Klíčová slova: covid-19, měřicí systém, IoT, měření koncentrace kyslíku, JIP, detekce plynu, IQRF.

Monitoring oxygen concentration using the internet of things during the COVID-19 pandemic

During the COVID-19 pandemic, up to twice as many fires and explosions related to the occurrence of dangerous oxygen concentrations in hospitals were recorded compared to non-pandemic times. This was probably due to the lack of preparedness of hospitals for the sharp increase in the use of ventilators during oxygen therapy in seriously ill patients with COVID-19. The pandemic thus showed that it is necessary to consider departments working with medical oxygen as potentially dangerous and to introduce systemic measures that can eliminate these risks threatening human lives. A possible solution to prevent fires related to the occurrence of dangerous oxygen concentrations is the use of a smart measuring system designed by us, which can accurately and promptly detect increased oxygen concentrations. The wireless device is based on Internet of Things technology and meets the requirements for long-term monitoring within the hospital environment. The oxygen concentration is measured at regular intervals and the data is wirelessly transmitted to a database storage. If the set oxygen concentration value is exceeded, hospital staff is notified via SMS and email.

Key words: COVID-19, Measurement system, IoT, Oxygen Concentration Measurement, ICU, Gas Detection, IQRF.

Úvod

Onemocnění covid-19 způsobené koronavirem SARS-CoV-2 se poprvé objevilo v prosinci 2019 ve Wuhan city v Číně a velmi rychle se šířilo

celým světem. Již v březnu 2020 prohlásila Světová zdravotnická organizace šíření této vysoce infekční respirační nemoci za pandemii (1). Kvůli své vysoké nakažlivosti a snadné přenosnosti pomocí kapének

doc. Ing. Radovan Hájovský, Ph.D.

Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství, Fakulta elektrotechniky a informatiky,

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

radovan.hajovsky@vsb.cz

Cit. zkr: Vnitř Lék. 2025;71(5):312-319

Článek přijat redakcí: 25. 4. 2025

Článek přijat po recenzích: 21. 8. 2025

a aerosolových částic se toto virové onemocnění stalo celosvětovým problémem. Ačkoliv velká část nemocných prodělala nemoc s mírným či bezpříznakovým průběhem, existovalo u některých pacientů riziko vzniku těžkého průběhu a následné hospitalizace (2). Mezi závažné příznaky patřila zejména bolest na hrudi, zvýšená dušnost nebo dýchací obtíže, které mohly vést až k hypoxii (3). Hypoxické respirační selhání bylo u těžce nemocných pacientů s covidem-19 časté a bylo také hlavním důvodem hospitalizace s oxygenoterapií či umístění na JIP (jednotka intenzivní péče) (2). Při nedostatečné účinnosti konvenční oxygenoterapie během akutního hypoxického respiračního selhání bylo dále doporučeno přistoupit k vysokoprútokové nosní oxygenaci, neinvazivní přetlakové ventilaci nebo k intubaci (4).

Všechny tyto techniky pro podporu dýchání jsou obecně vysoce účinné léčebné přístupy, jejichž užití vede ve většině případů k záchraně života pacienta. Při jejich aplikaci se obvykle používají vysoké koncentrace kyslíku (od 24,0 % do 80,0 %) (5), a je proto potřeba dodržovat přísná bezpečnostní opatření. V případě nedodržení protokolů stanovených pro práci s medicínským kyslíkem může dojít v nemocničním prostředí k požáru (6). I velmi malé zvýšení hladiny kyslíku ve vzduchu z 21,0 % nad 23,0 % je označováno za nebezpečně vysoké a může mít za následek vznik požáru (7). Navíc koncentrace kyslíku vyšší než 21,0 % vede k rychlejšímu šíření ohně, snižuje minimální zápalnou teplotu, požár bývá intenzivnější, hůř se hasí a hořet mohou i ohnivzdorné materiály (8).

Ke vzniku nehod v nemocničním prostředí spojených s přítomností kyslíkem obohacené atmosféry docházelo i v nepandemických časech (9–11), avšak během pandemie covidu-19 bylo pozorováno dramatické zvýšení počtu (až dvakrát více incidentů než v předchozích letech) požárů a výbuchů, a to zejména na JIP a covid-19 jednotkách (7, 12). Tyto incidenty se zdály být přímým důsledkem nedostatečné připravenosti nemocnic na prudký nárůst používání ventilátorů během kyslíkových terapií u těžce nemocných pacientů s covidem-19. Ve studii (13) se ukázalo, že podíl vydechovaného kyslíku při použití kyslíkové masky dosahoval průměrné hodnoty 46,0 % a při použití kombinace chirurgické roušky a kyslíkové masky dokonce 49,9 %. Během experimentů (8, 14) bylo provedeno měření kyslíku na odděleních hospitalizovaných pacientů s covidem-19, při kterém se ukázalo, že v některých kompartmentech překračovala koncentrace kyslíku bezpečnou úroveň a dosahovala až 25,2 %. Koncentrovaná přítomnost kyslíkových ventilátorů v uzavřeném prostoru s nízkou cirkulací vzduchu spolu s používáním netěsnících ventilů či hadic vedla k vytvoření prostředí s nebezpečně vysokou úrovní kyslíku. Čistý kyslík reagoval s běžnými materiály jako tuk, mazivo nebo organickými sloučeninami, což vedlo ke vzniku požáru či dokonce exploze, když se kyslík uvolňoval pod vysokým tlakem (7).

Z těchto důvodů je potřeba považovat oddělení, která pracují s medicínským kyslíkem, za potenciálně nebezpečná prostředí a zvýšit povědomí o riziku, které představuje zvýšená koncentrace kyslíku ve vzduchu. Dále je nutné zavést systémová opatření pro minimalizaci vzniku nehod, které mohou vést ke ztrátám na životech či materiálním škodám (7, 14). Mezi tato základní opatření patří zajištění optimálního rozdělení pacientů s oxygenoterapií na jednotlivých pokojích, dostatečné větrání místnosti, zamezení používání rozpouštědel, pravidelná údržba a kontrola systémů dodávajících kyslík a všech elektrických

a elektromechanických zařízení z hlediska opotřebení, průchodnosti a tepelného zatížení (7). Tato opatření jsou však velmi ovlivněna lidským faktorem a při jejich dodržování může docházet k chybám či úplnému selhání. Možným řešením, jak při nedodržení těchto opatření včas detekovat zvýšenou koncentraci kyslíku ve vzduchu a zabránit výše zmíněným nehodám, je použití smart senzoru kontinuálně měřícího tuto hodnotu v reálném čase.

Na začátku pandemie covidu-19 nebyla dle našich informací a na základě provedené rešerše k dispozici komerčně dostupná senzorická síť pro měření koncentrace kyslíku v uzavřených prostorech s přenosem naměřených hodnot do databáze a vizualizací těchto dat pomocí webové aplikace. Proto v tomto článku prezentujeme nový bezdrátový senzor spolu s komplexním měřicím systémem, který měří koncentraci kyslíku online a při překročení bezpečné hodnoty vyše upozornění zdravotnickému personálu. Výhodou senzoru je využitelnost také v jiných odvětvích, kde je vyžadováno kontinuální měření koncentrace kyslíku a sledování naměřených hodnot z dispečerského stanoviště.

Návrh a realizace měřicího systému

V této kapitole je detailně popsáno jak hardwarové, tak softwarové řešení navrženého bezdrátového senzoru pro kontinuální měření koncentrace kyslíku a teploty v nemocnicích. Dále je zde popsána experimentální procedura, která byla provedena za účelem ověření funkčnosti zařízení a popis nasazení senzorů na JIP jednotkách ve Fakultní nemocnici Ostrava.

Měřicí systém

Námi uvedené zařízení je primárně určeno pro měření koncentrace kyslíku v uzavřených prostorech, kde se předpokládá změna koncentrace kyslíku v ovzduší (jedná se zejména o oblast zdravotnictví nebo průmyslu). Sestava se skládá ze dvou hlavních částí, bezdrátového senzoru (uzlu sítě IQMESH) a IQRF komunikační brány (Obr. 1), které spolu komunikují pomocí IoT technologie IQRF® využívající topologii sítě mesh (IQMESH). Data z jednotlivých bezdrátových senzorů jsou skrz tuto síť zasílána na koordinátora sítě. Koordinátor sítě je v tomto

Obr. 1 Ukázka sestavy bezdrátového senzoru a komunikační brány pro kontinuální měření koncentrace kyslíku a teploty v uzavřených prostorech



případě součástí brány vytvořené z jednodeskového počítače Nano Pi NEO 2 Plus, který je prostřednictvím wifi nebo ethernet zabezpečeně připojen do sítě internet. Koordinátor je vytvořen z IQRF modulu, který je k jednodeskovému počítači připojen pomocí SPI (Serial Peripheral Interface) sběrnice. Tyto speciální vlastnosti koordinátora IQMESH v rámci bezdrátové sítě jsou vytvořeny pomocí k tomu určeného firmware od výrobce.

K měření koncentrace kyslíku, teploty a dalších provozních dat senzoru dochází každých pět minut (nastavení tohoto parametru lze dále měnit). Mezi těmito diskrétními časovými okamžiky jsou senzorické moduly ve sleep režimu. Software IQRF GW Daemon zajišťuje komunikaci mezi senzorickou sítí a MQTT (Message Queue Telemetry Transport). Data jsou prostřednictvím MQTT zasílána přímo na univerzitní server a ukládána do SQL (Structured Query Language) databáze a následně zpracovávána do čitelné podoby programem v jazyce Python. Pro vizualizaci je využíván systém Grafana, který používá SQL databázi jako datový zdroj. Přístup k vizualizaci je přes přihlášení přístupovými údaji. Strukturu monitorovacího systému s jednotlivými komponentami je možné vidět na Obr. 2. V případě překročení nastavené

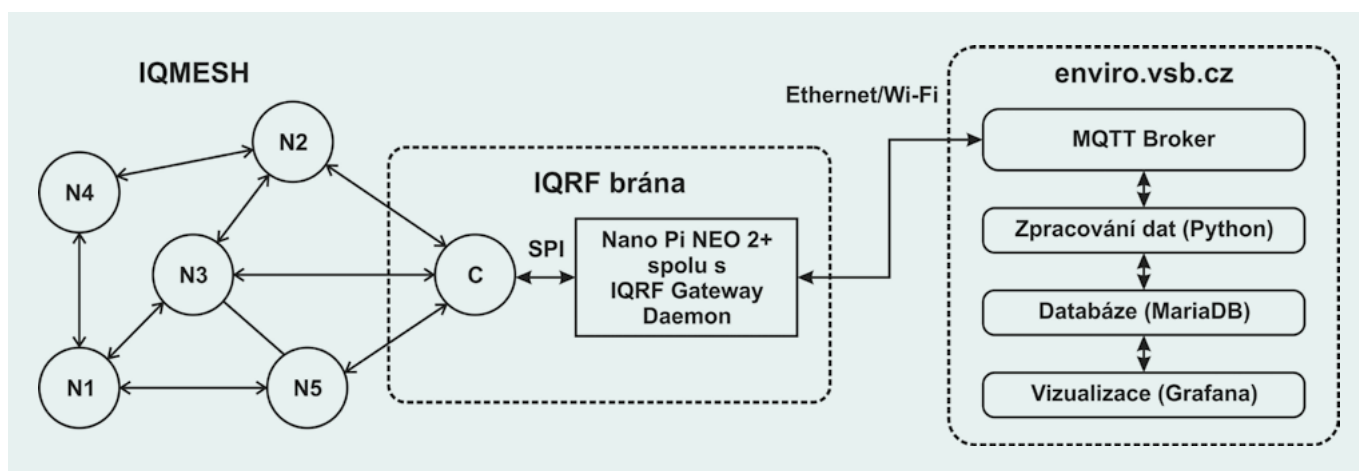
hodnoty koncentrace kyslíku dochází k upozornění uživatele formou SMS (Short Message Service) a e-mailu.

HW část

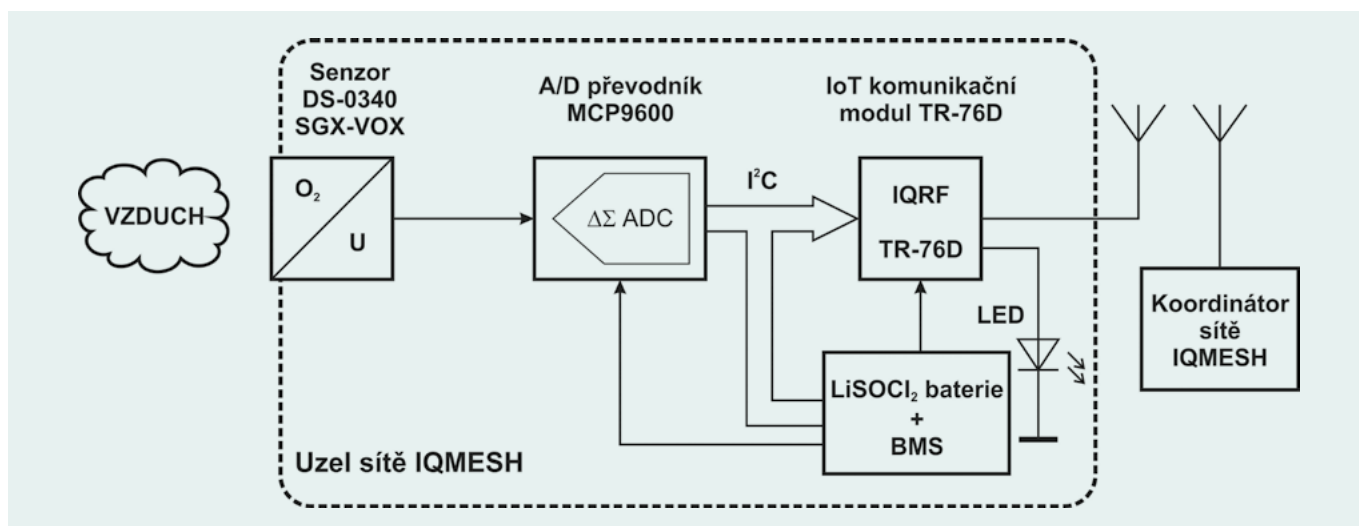
Senzorický modul, který je uzlem sítě IQMESH (N1 – N5), jehož vnitřní strukturu je možné vidět detailně na obrázku 3, je tvořen elektrochemickým snímačem kyslíku, který je propojen s ADC. Součástí systému je dále bezdrátový komunikační modul, který je propojen s ADC (analog to digital converter), koordinátorem bezdrátové sítě a napájecí baterií. Senzorický modul je koncipován jako kompaktní robustní box, o rozměrech 55 mm × 115 mm × 90 mm, umožňující snadnou povrchovou desinfekci a čištění. Modul je opatřen identifikačním štítkem. Jednotlivé implementované hardware komponenty jsou specifikovány následovně:

Elektrochemický snímač koncentrace kyslíku – Pro měření koncentrace kyslíku je použit elektrochemický senzor kyslíku DS-0340 SGX-VOX (15) s napěťovým výstupem. Rozsah měřené koncentrace kyslíku je 0–100 %. Senzor je určen pro použití ve ventilačních systémech, včetně měření podílu vdechovaného kyslíku při plicní ventilaci. Jeho

Obr. 2. Struktura monitorovacího systému koncentrace kyslíku. Data z jednotlivých senzorů (N1–N5) jsou zasílána na koordinátora sítě (C). Komunikace mezi senzorickou sítí a MQTT je zajištěna pomocí software IQRF GW Daemon. Data jsou následně uložena do SQL databáze a zpracována do čitelné podoby programem v jazyce Python. Vizualizace dat je realizována pomocí systému Grafana



Obr. 3. Blokový diagram hardwaru senzorického modulu pro měření koncentrace kyslíku obsahujícího elektrochemický snímač kyslíku (O_2), ADC, bezdrátový komunikační modul založený na technologii IQRF®, napájecí baterii a koordinátor bezdrátové sítě využívající topologii sítě IQMESH



použití však není určeno pro trvalé užívání v prostředích s koncentrací kyslíku vyšší než 25 % a v prostředích s anesteziologickými plyny. Snímač je připojen k rezistoru 10 k Ω , na kterém je měřeno napětí. Výstupní napětí senzoru je lineárně závislé na koncentraci kyslíku a nabývá velmi nízkých hodnot (9–52 mV) při koncentracích kyslíku v rozsahu 21–100 %. Výpočet koncentrace kyslíku je realizován dle rovnice 1.

$$C_{\text{oxygen}}(\%) = a \cdot \text{ADC} + b + (k(T) - k(T_0))$$

kde:

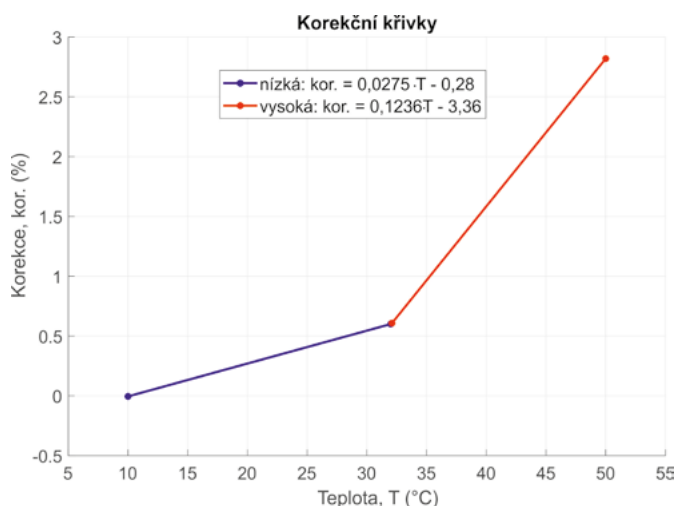
- koncentrace kyslíku (%)
- směrnice přímky vypočtená ze dvou bodů charakteristiky
- offset přímky vypočtený ze dvou bodů charakteristiky
- hodnota napětí z ADC (mV)
- teplotní korekce
- teplota
- teplota při kalibraci

Výstupní hodnota koncentrace kyslíku může klesat s nárůstem teploty, maximálně však o 2 %. Senzor je proto vybaven částečnou vnitřní teplotní kompenzací. Korekční charakteristika senzoru je ukázána na obrázku 4.

Analogově digitální převodník – Pro převod analogového napětí na výstupu senzoru kyslíku je použit obvod MCP9600 (16), což je přesný ADC s rozlišením až 18 bitů a LSB (least significant bit) od 2 μ V. Obvod je vybaven interním teploměrem a předzesilovačem. Rozsah vstupního napětí je -250 až +250 mV. Ačkoliv se jedná o převodník určený primárně pro termočlánky, byl tento obvod vybrán i v tomto případě, jelikož umožňuje efektivně číst i surovou hodnotu napětí na vstupu, jak se ukázalo v naší předchozí studii (17). Před vstupem ADC je použit RLC filtr typu dolní propust z důvodu omezení rušení. Komunikace s tímto obvodem je pomocí I2C (inter-integrated circuit) sběrnice.

Komunikační modul – Komunikační IQR® modul TR-76DA (18) je umístěn na samostatné PCB (printed circuit board) desce, interně označené jako TR-BASE, připojené pomocí konektoru tak, aby byl ve vertikální poloze. Modul je vybaven interní PCB anténou, která je umís-

Obr. 4. Korekční charakteristika senzoru DS-0340 SGX-VOX pro závislost měřené koncentrace O₂ na teplotě



těna mimo nosnou PCB s ohledem na doporučení výrobce. IQR® modul TR-76DA je vybaven mikrokontrolérem PIC 16LF1938 s 16 kB pamětí FLASH, 1 kB pamětí RAM a 256 Bytů pamětí EEPROM. Radiofrekvenční část modulu tvoří obvod SPIRIT1, ve kterém je implementována GFSK modulace. Výstup je vybaven symetrizačním členem BALF-SPI-01D3. Pro rozšíření velikosti pamětí typu EEPROM je osazen externím obvodem 24AA256. Napájecí napětí je možné v rozsahu 3,0–3,4 V.

Koordinátor bezdrátové sítě – Koordinátor bezdrátové sítě zajišťuje sběr dat a jejich předání do nadřazených systémů jak je možné vidět na obrázku 2.

Napájecí baterie – Napájení senzorického modulu je zajištěno prostřednictvím Li-SOCl₂ baterie s kapacitou 19 Ah. Stav napájení je možné monitorovat prostřednictvím napětí baterie a včas tak upozornit na nízký stav baterie. Monitoring napětí je uskutečněn přes odporový dělič, který je připojován jen v době měření.

SW část

Softwarovou část monitorovacího systému je možné rozdělit do dvou základních částí, první z nich je firmware vytvořený pro samotný bezdrátový senzor a druhou částí je serverová aplikace pro příjem, ukládání a zpracování naměřených dat. Výsledkem každého měřicího cyklu jsou data obsahující informaci o koncentraci kyslíku v místnosti, teplotě v místnosti, stavu baterie aj. Tyto informace jsou zakódovány do payloadu a zaslány zabezpečeným kanálem na univerzitní server. Jak již bylo uvedeno, zde probíhá jejich zpracování a vizualizace. Jelikož se jedná o komplexní reálný bezdrátový měřicí systém, nelze úplně eliminovat případné nejistoty a chyby měření. Proto je nutno veškerá data, která vzniknou měřením a jsou přenesena na server, primárně analyzovat na jejich přesnost a správnost. Tato procedura bude detailněji popsána dále.

Firmware senzoru – Firmware bezdrátového senzorického modulu je implementován přímo do mikrokontroléru uvnitř IQR® transceiver (TR) modulu. Je implementována komunikace s integrovanými obvody prostřednictvím sběrnice I2C. První použitý obvod je MCP9600 implementovaný jako A/D převodník pro senzor kyslíku a druhý použitý obvod je MCP3425, který je implementován pro monitorování napětí baterie. Součástí procesu měření je kontrola překročení nastavené hodnoty napětí na výstupu senzoru kyslíku pro zapnutí signalizace pomocí LED diody žluté barvy. Získané hodnoty jsou upraveny do jednotného formátu (dle IQR® standard sensor V15, dostupné na stránkách výrobce) (19).

Serverová aplikace – Sběr a zpracování dat na serveru je možné rozdělit do tří základních etap: **a) příjem dat**, **b) primární kontrola dat** a **c) zpracování a analýza dat**. Každá etapa je samostatným procesem. Zpracování dat na straně serveru je implementováno v jazyce Python.

a) **Přijem dat** – Data jsou přijata prostřednictvím vlastního MQTT klienta v jazyce Python, který přijatá data uloží do tabulky surových dat v databázi. Zde jsou surová data uložena pro pozdější zpracování do čitelné podoby.

b) **Primární kontrola dat** – Nejprve je provedena primární kontrola, zda přišla validní data z konkrétních senzorických modulů. Toto

je možné rozdělit na samostatné oblasti: oblast časová a oblast velikosti dat a metadat.

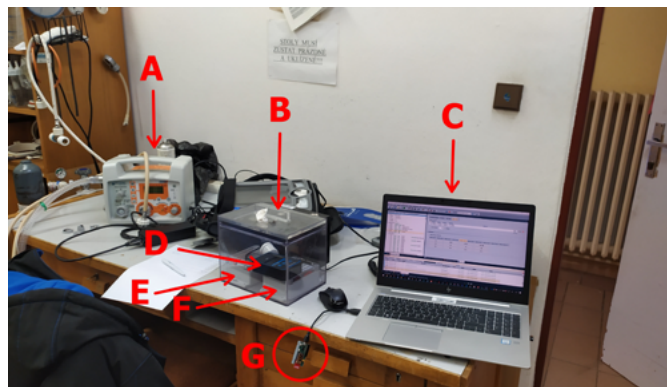
Metoda detekce příjmu dat je založena na kontrole časových značek v tabulkách surových hodnot. Kontrola je spouštěna periodicky a je založena na archivaci poslední známé hodnoty pro konkrétní senzorický modul a jeho poslední časové značky. Na základě porovnání těchto časových značek je provedeno vyhodnocení zda jsou data validní z hlediska časového intervalu přijetí. V případě, že je překročena předpokládaná doba příjmu nových dat, je nejprve uloženo varování a v případě opakovaného překročení je uložena chybová hláška. Jedná se o tři úrovně stavy (OK, Warning, Error). Druhá část kontroly se zaměřuje na množství přijatých Bytů a obsah vybraných Bytů, které obsahují meta informace.

- c) **Zpracování a analýza dat** – Zpracování dat do podoby číselných hodnot je prováděno samostatně a je implementováno včetně teplotní korekce. Pro přepočítání jsou používány vlastní kalibrační hodnoty pro konkrétní senzorický modul, které jsou uloženy v paměti modulu. Raw data jsou zpracována do čitelné podoby pomocí skriptu napsaného v jazyce Python. Při spuštění skriptu je nejprve provedeno načtení konfigurace z JSON (JavaScript Object Notation) souboru pro konfiguraci konkrétní instance. Tato konfigurace obsahuje parametry pro identifikaci dat ze senzorů. Mezi další parametry patří cílová tabulka a počet řádků zpracovaných v jednom spuštění. Na základě těchto údajů je vytvořeno připojení do databáze. Z cílové tabulky je zjištěno nejvyšší Id dat odpovídající tabulce raw dat. Na základě tohoto Id je sestaven dotaz na tabulku raw dat o řádky začínající Id+1 a končící Id+1+počet řádků zpracovaných v jednom spuštění. V případě, že nejsou žádná data ke zpracování, je skript ukončen. Detailnější informace o zpracování dat lze najít v naší předchozí studii (20). Data jsou cyklicky zpracovávána a zapisována pomocí SQL dotazu do tabulky. V případě chyby se pokračuje následujícím řádkem, chyba je zaznamenána do logu.

Experimentální ověření měřicího systému

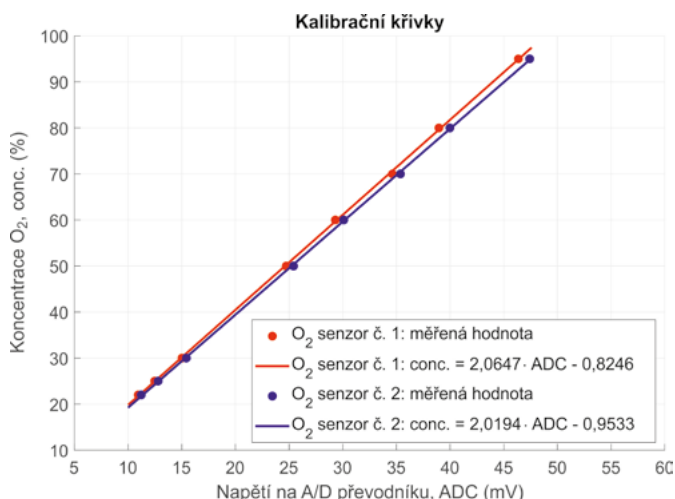
Před nasazením senzorů na JIP odděleních bylo nejprve provedeno experimentální ověření jejich funkčnosti. Experiment byl veden v uzavřené testovací plynové komoře se zajištěným prouděním/

Obr. 5. Fotografie z testování senzorů pomocí vysokých koncentrací kyslíku



A – zdroj kyslíku, B – testovací plynová komora, C – notebook pro zpracování dat, D – referenční měřicí přístroj GREISINGER GOX 100, E – bezdrátový senzor 1, F – bezdrátový senzor 2, G – IQRF koordinátor

Obr. 6. Převodní charakteristika senzoru DS-0340 SGX-VOX



mixováním pomocí malé vrtule, do které byly dva senzorické moduly umístěny společně s referenčním ručním měřidlem (GREISINGER GOX 100), viz Obr. 5.

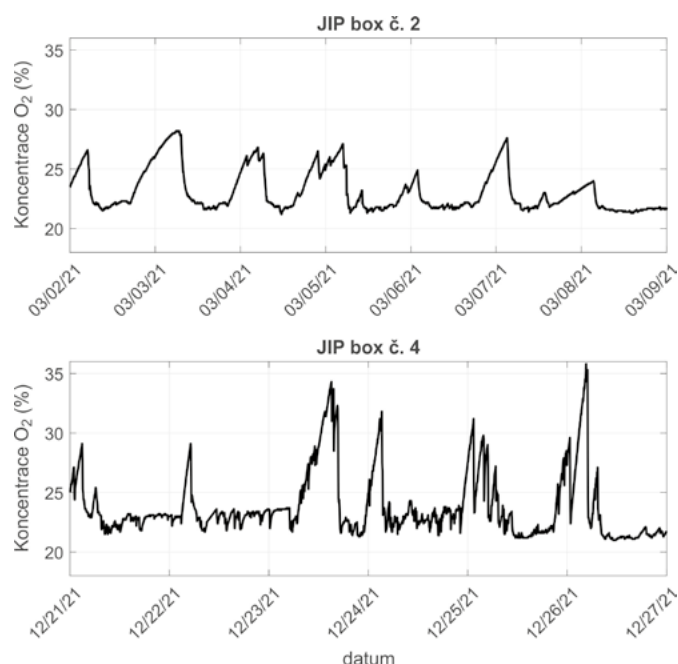
Pro naměřenou koncentraci kyslíku byla vždy zaznamenána hodnota výstupního napětí z obou testovaných senzorů v mV. Rovněž byla zaznamenána teplota během měření. Tento experiment byl proveden stejným medicínským kyslíkem, jako je používán při terapiích. Na základě těchto hodnot bylo možné zpřesnit přepočítání koncentrace kyslíku ze senzorů. Experimentálně naměřenou charakteristiku pro dva senzory je možné vidět na obrázku 6.

Samotná implementace vyvinutého bezdrátového monitorovacího systému byla uskutečněna ve Fakultní nemocnici Ostrava. Bylo

Obr. 7. Fotografie z in situ nasazení senzorů na JIP oddělení



Obr. 8. Týdenní záznam koncentrace kyslíku na JIP odděleních – BOX 2 a BOX 4



nasazeno celkem pět kusů bezdrátových senzorů, čtyři kusy přímo na jednotlivé místnosti JIP oddělení (viz Obr. 7) a jeden kus byl umístěn v pracovně sester jako referenční. Komunikační brána byla rovněž umístěna v pracovně sester. Jednalo se o oddělení kde probíhala léčba pacientů s covidem-19 i s použitím kyslíkové terapie.

Výsledky měření

Tato podkapitola sumarizuje výsledky, kterých bylo dosaženo při testování senzorů v reálných podmínkách během jejich umístění v nemocni-

ci. Po celou dobu testování senzorů byly zaznamenávány jak hodnoty koncentrace kyslíku, tak hodnoty teploty.

Na Obr. 8 je zaznamenán týdenní průběh koncentrace kyslíku na JIP Boxu č. 2 a JIP Boxu č. 4 z období vrcholící pandemie covidu-19 (březen a prosinec 2021), kdy docházelo k vysokému zatížení vysoce specializovaných zdravotnických pracovišť. Jak je z Obr. 8 patrné, docházelo během tohoto období k nárůstu koncentrace kyslíků ve sledovaných prostorách až přes hodnotu 30 %. Na překročení běžné koncentrace kyslíku ve vzduchu byl upozorněn nemocniční personál pomocí SMS a e-mailu, který učinil potřebná opatření pro obnovení bezpečnosti daného oddělení.

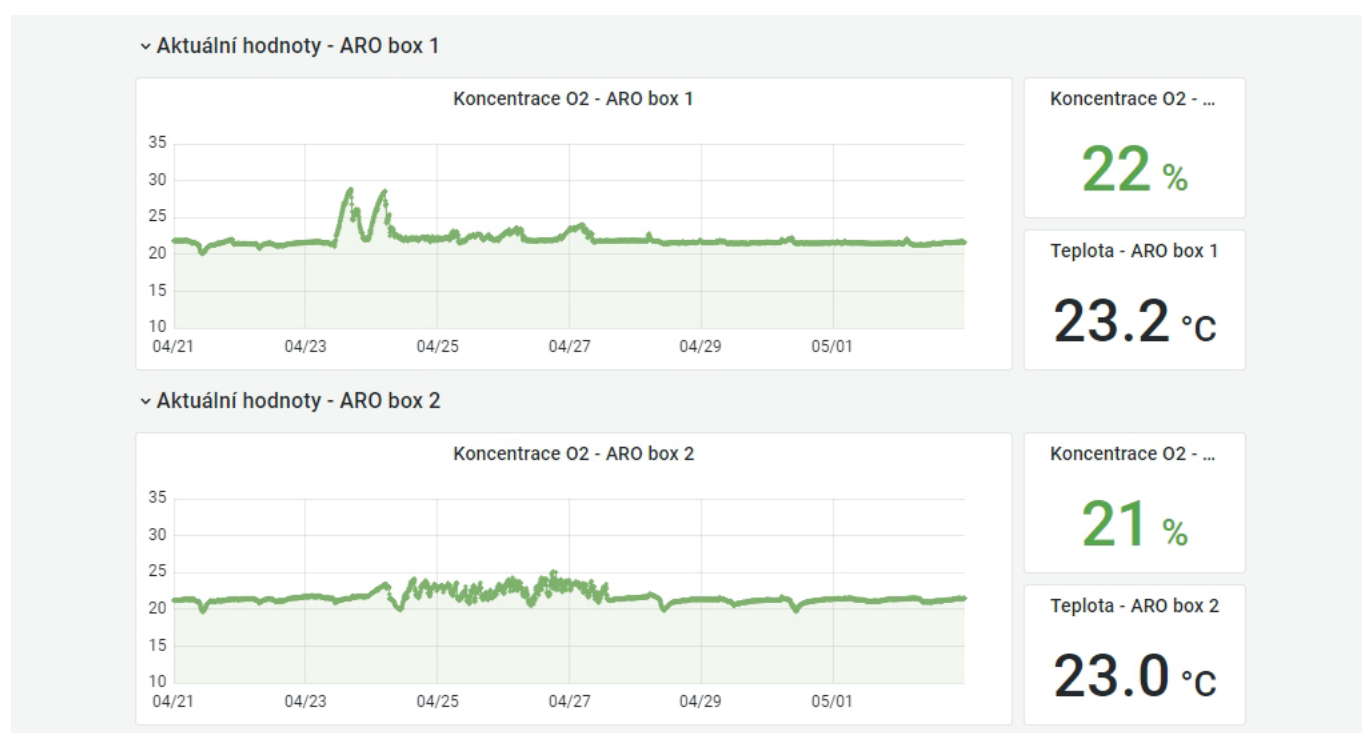
K cyklickým nárůstům koncentrace kyslíku docházelo zejména v nočních hodinách. Toto pravidelné zvyšování koncentrace mohlo být pravděpodobně způsobeno výrazně menším pohybem zdravotnického personálu v prostorách JIP boxů. To vedlo k nižší cirkulaci vzduchu, a tedy k nižšímu mísení kyslíku s okolním vzduchem, mající za následek rostoucí koncentraci kyslíku. Z těchto důvodů je nutno průběžně monitorovat JIP jednotky zejména v nočních hodinách a naměřenou koncentraci pravidelně sledovat.

Vizualizaci obrazovky v systému Grafana, kterou má k dispozici zdravotnický personál je možné vidět na Obr. 9. Vizualizace grafu obsahuje koncentrace kyslíku v daném časovém období a aktuální hodnoty koncentrace kyslíku a teploty uvedené na pravé straně. Zde je také uveden název oddělení, na kterém je senzor umístěn.

Diskuze

Toto pilotní nasazení senzorických modulů v nemocničním prostředí prokázalo funkčnost navrženého monitorovacího systému pro kontinuální měření koncentrace kyslíku na JIP odděleních. Systém úspěšně

Obr. 9. Obrazovka vizualizace ze systému Grafana, kterou mají k dispozici zdravotníci. Popisky jsou uvedeny v češtině, jelikož je systém používán v české nemocnici



detekoval překročení nastavených hodnot koncentrace kyslíku a odeslal upozornění kompetentním pracovníkům. Kromě vysoké spolehlivosti měřicího systému byl kladen důraz také na zvýšenou bezpečnost přenášovaných dat, a pro jejich přenos byla proto použita samostatná wifi síť a přímé propojení VPN (virtual private network) na univerzitní server. Výrobek navíc splňuje základní požadavky harmonizačních právních předpisů Evropské unie a směrnic Evropského parlamentu a rady 2014/30/EU a je chráněn užitným vzorem CZ 35107 U1.

Během testování senzorického systému se však ukázalo, že aby zařízení pracovalo správně, je při jeho používání potřeba dodržet určitá opatření. Dodržení následujících doporučení vede k eliminaci vlivů, které by mohly negativně ovlivnit přesnost měření a zajištění vysoké spolehlivosti navrženého systému. Je proto vhodné následovat tato doporučení:

- Senzorický modul je vhodné instalovat ve svislé poloze senzorem dolů, na zeď nebo obdobnou plochu ve výšce cca 120 cm nad podlahou (v některých případech však může být vhodné nižší umístění, protože kyslík je těžší než vzduch).
- Senzorický modul nesmí být v přímém proudění vzduchu, například v bezprostřední blízkosti dveří nebo oken.
- Senzorický modul nesmí být v bezprostřední blízkosti zdroje kyslíku.
- Senzorický modul nesmí být zakryt závěsem či jinou textilií.
- Senzorický modul nesmí být vystaven přímým tepelným účinkům, jako je například výstup chlazení přístrojů (počítače, monitory, notebooky, klimatizace), topení nebo přímý sluneční svit.

Pokud by nebyla tato doporučení dodržena, mohlo by dojít ke snížení přesnosti navrženého zařízení, a tedy ke snížení jeho spolehlivosti. Ke snížení efektivity senzorického systému může dále dojít při jeho nevhodném čištění. K čištění pouzdra se doporučuje použít pouze měkký, mírně vodou navlhčený hadřík. Pokud je to nutné, je možné použít dezinfekční přípravek, ten se však nesmí dostat přímo do senzoru, jelikož by mohlo dojít ke změně stavu plastových částí. Nedoporučuje se používat žádné prostředky na drhnutí nebo chemická rozpouštědla (aceton, ředidla barev a laků), neboť by tyto prostředky mohly poškodit pouzdro produktu. Žádnou další speciální údržbu produkt nevyžaduje. Avšak vzhledem k elektrochemickému principu fungování senzoru je nutné počítat se snížením životnosti senzoru při zvýšené expozici kyslíku, jak je uvedeno v datovém listu senzoru (15). Z tohoto důvodu je nutné senzor vyměnit nejpozději po dvou letech provozu, aby byla

zajištěna spolehlivost systému. V průběhu používání monitorovacího systému byly u některých senzorů dále zjištěny problémy s výdrží baterie, a to i přesto, že na základě měření spotřeby byla stanovena životnost baterie až na dobu devět let. Z důvodu zajištění kontinuity provozu je proto doporučeno vyměnit baterie po dvou letech provozu nebo dle potřeby technikem přímo v nemocnici.

Díky vysoké přesnosti, jednoduché obsluze a nenáročné údržbě lze tento monitorovací systém považovat za velmi efektivní nástroj vhodný pro dlouhodobé monitorování. Kontinuální monitorování koncentrace kyslíku probíhá nadále i v současné době, a umístění zařízení bude dále realizováno na JIP odděleních dalších nemocnic. Předmětem dalšího výzkumu, jenž povede k vylepšení monitorovacího systému, bude dále vývoj komponenty pro autodiagnostiku měřicí elektroniky, doplnění měření teploty vzduchu vstupujícího do senzoru pro zlepšení teplotní kompenzace měření a také komponenta pro diagnostiku stavu baterie s přesným výpočtem její zbývající kapacity.

Komunikační dosah jednotlivých komponent závisí na jejich umístění a podmínkách prostředí. V typickém nemocničním prostředí se dosah mezi senzorem a koordinátorem pohybuje okolo cca 500 m při přímé viditelnosti a cca 20 m v případě několika překážek (zdivo, dveře). Minimální vzdálenost mezi senzory a koordinátorem by měla být alespoň 0,5 m, aby se předešlo interferencím, přičemž systém využívá MESH topologii pro překlenutí větších vzdáleností. Tyto hodnoty vycházejí z technické dokumentace modulů IQR® a z našich provozních zkušeností.

Závěr

Tato studie se zabývala problematikou včasné a přesné detekce zvýšené koncentrace kyslíku na JIP odděleních. Navržený bezdrátový senzorický systém založený na IoT technologii se v rámci pilotní studie ukázal jako vysoce efektivní a vhodný pro dlouhodobé kontinuální monitorování v nemocničním prostředí. Hodnoty koncentrace kyslíku byly měřeny v pravidelných intervalech a při zaznamenání zvýšené koncentrace kyslíku došlo k upozornění nemocničního personálu, který mohl učinit potřebná opatření a zajistit bezpečnost daného oddělení. Za limitaci studie lze považovat testování pouze pěti senzorů. Po ověření funkčnosti většího množství senzorů v dalších nemocnicích bude možné, aby se zařízení díky své spolehlivosti, jednoduché obsluze a nízkým finančním nákladům stalo významným bezpečnostním prvkem a běžnou součástí moderního zdravotnictví.

PROHLÁŠENÍ AUTORŮ: Prohlášení o původnosti: Publikace byla zpracována s využitím uvedené literatury a nebyla publikována ani zaslána k recenznímu řízení do jiného média. **Střet zájmů:** Žádný. **Financování:** Tento článek byl podpořen projektem SP2025/019, „Vývoj algoritmů a systémů pro řídicí, monitorovací a bezpečnostní aplikace XI“, Studentská grantová soutěž, VŠB-TU Ostrava. **Registrace v databázích:** N/A. **Projednání etickou komisí:** Nebylo požadováno.

LITERATURA

1. Pires SM, et al. Burden of disease of covid19: Strengthening the collaboration for national studies. *Front Public Health*. 2022; [Internet]. *Frontiers Media*; 2022 [cited 20250819]. Available from: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.907012>.
2. OspinaTascón GA, et al. Effect of highflow oxygen therapy vs conventional oxygen therapy on invasive mechanical ventilation and clinical recovery in patients with severe covid19. *JAMA*. 2021;326:21612171.
3. Simonson TS, et al. Silent hypoxaemia in covid19 patients. *J Physiol*. 2021;599:10571065.
4. Alhazzani W, et al. Surviving sepsis campaign: Guidelines on the management of critically ill adults with coronavirus disease 2019 (covid19). *Intensive Care Med*. 2020;46:854887.
5. Whittle JS, Pavlov I, Sacchetti AD, et al. Respiratory support for adult patients with covid19. *J Am Coll Emerg Physicians Open*. 2020;1:95101.
6. Kelly FE, et al. Fire safety and emergency evacuation guidelines for intensive care units and operating theatres. *Anaesthesia*. 2021;76:13771391.
7. Wood MH, Hailwood M, Koutelos K. Reducing the risk of oxygenrelated fires and explosions in hospitals treating covid19 patients. *Process Saf Environ Prot*. 2021;153:278288.
8. Dowbysz A, et al. Analysis of the flammability and the mechanical and electrostatic discharge properties of selected personal protective equipment used in oxygene-

- nriched atmosphere. *Int J Environ Res Public Health*. 2022; [Internet]. MDPI; 2022 [cited 20250819]. Available from: <https://doi.org/10.3390/ijerph191811453>.
9. Yardley I, Donaldson L. Surgical fires, a clear and present danger. *Surgeon*. 2010;8:8792.
 10. Chowdhury K. Fires in Indian hospitals: Root cause analysis and recommendations for their prevention. *J Clin Anesth*. 2014;26:414424.
 11. Cooper J, Griffiths B, Ehrenwerth J. Safe use of highflow nasal oxygen (hfno) with special reference to difficult airway management and fire risk. *Anesth Patient Saf Found*. **2018;33.
 12. Liu D, Xu Z, Wang Y, et al. Identifying fire safety in hospitals: Evidence from Changsha, China. *Alex Eng J*. 2023;64:297308.
 13. Chang MG, et al. Reduced effective oxygen delivery and ventilation with a surgical facemask placed under compared to over an oxygen mask: A comparative study. *Anesthesiol Res Pract*. 2022;2022:15.
 14. Wróblewski W, et al. Fire safety of healthcare units in conditions of oxygen therapy in covid19. *Sustainability*. 2022. [Internet]. MDPI; 2022 [cited 20250819]. Available from: <https://doi.org/10.3390/su14074315>
 15. SGX Sensortech. DS0340 SGXVOX Datasheet [Internet]. SGXSensortech; 2020 [cited 20250819]. Available from: <https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2020/04/DS0340SGXVOXdatasheet1.pdf>.
 16. Microchip Technology. MCP960X/LOX/RL0X Datasheet [Internet]. Microchip; 2019 [cited 20250819]. Available from: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/Device-Doc/MCP960XLOXRL0XDataSheet20005426F.pdf>.
 17. Hajovsky R, Pies M, Velicka J. Design and implementation of an iot sensor for high temperatures. In: Kluszczyński K, ed. 2021 Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE). IEEE; 2021:16. [Internet] [cited 20250819]. Available from: <https://doi.org/10.1109/WZEE54157.2021.9577014>.
 18. IQRF Tech s.r.o. TR76D RF Transceiver [Internet]. IQRF Tech; 2022 [cited 20250819]. Available from: <https://www.iqrf.org/productdetail/tr76d>.
 19. IQRF Alliance. IQRF Interoperability IQRF Standard Manuals [Internet]. [cited 20250819]. Available from: <https://www.iqrfalliance.org/iqrfinteroperability/>.
 20. Hajovsky R, et al. Design of an iotbased monitoring system as a part of prevention of thermal events in mining and landfill waste disposal sites: A pilot case study. *IEEE Trans Instrum Meas*. 2023;72:114.