prof. Ing. Radovan Nosek, PhD.
prof. Ing. Michal Holubčík, PhD.
Ing. Miriam Nicolanská, PhD.
Ing. Patrik Nemec, PhD.

Aplikácie SMART technológií v technike prostredia

Poďakovanie

Tieto učebné texty e-learningového formátu vznikli vďaka podpore projektu **028ŽU-4/2023** s názvom „*Implementácia SMART riešení v regulácii energetických strojov a zariadení do pedagogického procesu*“. Autori týmto ďakujú Kultúrnej a edukačnej grantovej agentúre Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky.

PREDSLOV

Vážení čitatelia,

Tieto e-learningové vzdelávacie texty s názvom *Aplikácie SMART technológií v technike prostredia* vznikli ako podporný študijný materiál zameraný na prepojenie tradičných princípov techniky prostredia s modernými inteligentnými technológiami. Ich cieľom je poskytnúť systematický a zrozumiteľný pohľad na možnosti využitia SMART riešení v oblasti vykurovania, vetrania, kvality ovzdušia, energetických sústav a súvisiacich technických zariadení.

Úvodné kapitoly vytvárajú teoretický rámec techniky prostredia, pričom sa venujú environmentálnym súvislostiam a aktuálnym európskym stratégiám v oblasti udržateľnosti. Následne je pozornosť zameraná na vývoj a princípy SMART technológií, ich základnú architektúru, výhody implementácie a legislatívne požiadavky spojené s ich uplatňovaním v technických systémoch.

Významná časť publikácie sa venuje nízkonákladovým snímačom a meracím princípom využívaným pri monitorovaní fyzikálnych a environmentálnych veličín. Spracované sú fyzikálne princípy merania, druhy signálov, ako aj praktické možnosti nasadenia snímačov kvality ovzdušia, teploty, vlhkosti a tlaku v reálnych aplikáciách. Na túto problematiku nadväzuje kapitola o komunikačnej infraštruktúre, ktorá poskytuje prehľad drôtových a bezdrôtových rozhraní, IoT platforiem a spôsobov zberu, prenosu a vizualizácie údajov.

Záverečné kapitoly sú orientované na praktické aplikácie SMART riešení v energetických systémoch budov a malých zdrojov tepla. Pozornosť je venovaná inteligentnému monitorovaniu, regulácii prevádzkových parametrov. Publikácia tak prepája teoretické poznatky s praktickými príkladmi využiteľnými v pedagogickom procese aj v technickej praxi.

Texty sú určené najmä študentom technických odborov, ale aj odborníkom z praxe, ktorí sa venujú návrhu, prevádzke alebo modernizácii energetických a environmentálnych systémov. Ich ambíciou je podporiť porozumenie inteligentným technológiám ako prirodzenej súčasti moderných technických riešení v oblasti techniky prostredia.

OBSAH

Predslov **3**

Obsah **4**

Zoznam skratiek **7**

Úvod **9**

1 SMART technológie v technike prostredia **12**

1.1 Stručný prehľad histórie vývoja digitalizácie v technike prostredia 12

1.2 Základy SMART technológie 14

1.2.1 Definícia inteligencie a „SMART“ prvkov v technike prostredia 14

1.2.2 Základná štruktúra inteligentného systému v technike prostredia a výhody 16

1.2.3 Výhody implementácie SMART technológie 17

1.2.4 SMART city index – Stav implementácie inteligentných systémov v krajinách 19

1.2.5 Normy a legislatíva inteligentných systémov v energetike 19

2 Snímače pre SMART technológie **21**

2.1 Základné druhy signálov (analógový a digitálny) 21

2.2 Fyzikálny princíp merania snímačov 22

2.2.1 Infračervený princíp (NDIR – „*Non-Dispersive Infrared*“) 22

2.2.2 Laserový/Optický princíp (LDL – „*Laser Diode-based Detection*“) 23

2.2.3 Odporové snímače („*resistive-based gas sensors*“) 24

2.2.4 Piezoelektrické snímače 25

2.3 Nízkonákladové snímače na monitorovanie kvality ovzdušia 26

2.3.1 Snímače koncentrácie tuhých znečisťujúcich látok 26

2.3.2 Snímače koncentrácie plynných znečisťujúcich látok 30

2.3.3 Snímače teploty, vlhkosti a tlaku ovzdušia 33

3 Komunikačná Technika pre SMART technológie **39**

3.1 Zber a prenos údajov v SMART aplikáciách 39

3.1.1 I^2C („*Inter-Integrated Circuit*“) 39

3.1.2 SPI („*Serial Peripheral Interface*“) 40

3.1.3 UART („Universal Asynchronous Receiver-Transmitter“) 41

3.1.4 MODBUS (RS232 / RS485) 42
3.2 IoT platformy 43
3.2.1 MQTT 44
3.2.2 Zobrazovacie widgety 45
3.2.3 Ovládacie widgety 47
3.2.1 Prehľad IoT Platforiem 48
3.3 Komunikačné systémy pre inteligentnú domácnosť 52
3.3.1 Systémy inteligentnej domácnosti 52
3.3.2 Centralizované huby 53
3.3.3 Mini-server 54
4 SMART technológie vo vykurovacích sústavách 55
4.1 SMART hlavice vykurovacích telies 55
4.2 SMART rozdeľovače vykurovacej sústavy 57
4.3 SMART rozdeľovače podlahového vykurovania 59
4.4 SMART konvektory 61
4.5 SMART ohrievače vody 61
4.6 SMART regulácia sústav CZT 62
5 SMART technológie vo vetracích sústavách 64
5.1 Decentralizované vetranie 65
5.1.1 SMART ventilátory 65
5.1.2 SMART zariadenia pre vetranie oknami 66
5.1.3 SMART zariadenia úpravy vzduchu 68
6 Aplikácie SMART technológií v malých zdrojoch tepla 75
6.1 Tradičné regulačné metódy 75
6.2 Regulácia malých zdrojov tepla Fuzzy logikou 76
6.3 Neurónové siete v regulácie malých zdrojoch tepla 80
7 Ďalšie aplikácie SMART technológií 85
7.1 SMART monitorovacie zariadenia kvality ovzdušia 85
7.1.1 Monitorovanie kvality ovzdušia 85
7.1.2 Inteligentné zariadenia monitorovania kvality ovzdušia 87
7.1.3 Mobilné inteligentné zariadenie monitorovania kvality ovzdušia 94

7.1.4 Stacionárne inteligentné zariadenia monitorovania kvality ovzdušia 96
7.2 SMART technológie v poľnohospodárstve 100
7.3 SMART technológie v elektrických sieťach.....102
7.3.1 Inteligentné meracie systémy (IMS).....104
7.3.2 Inteligentné zásuvky.....104
7.3.3 Inteligentné riešenia osvetlenia 106
Použitá literatúra.....108

ZOZNAM SKRATIEK

Označenie	Jednotka	Význam
a	[m^{-1}]	merná usadzovacia plocha odlučovača
AI	[-]	umelá inteligencia
CF_4	[-]	perfluórmetán
CO	[ppm]	oxid uhoľnatý
CO_2	[ppm]	oxid uhličitý
DT	[K]	teplota deformácie, spekania alebo tavenia
ΔT	[K]	rozdiel teplôt
EMS	[-]	energetický manažmentový systém
EN	[-]	európska norma
ESP32	[-]	mikropočítač pre IoT aplikácie
F	[$C \cdot mol^{-1}$]	Faradayova konštanta
FT	[K]	teplota tečenia
GWP	[-]	globálny potenciál otepľovania
GWP_{100}	[-]	globálny potenciál otepľovania pre 100 rokov
HCl	[-]	kyselina chlorovodíková
HFC	[-]	fluórované uhľovodíky
HFC-134a	[-]	tetrafluóretán
HRV	[-]	rekuperačné vetranie (Heat Recovery Ventilation)
HVAC	[-]	vykurovanie, vetranie a klimatizácia
IoT	[-]	Internet vecí
ISO	[-]	Medzinárodná organizácia pre normalizáciu
k	[-]	zisk regulačného člena
kWh	[kWh]	spotrebovaná elektrická energia
LT	[-]	nízka hodnota (fuzzy množina)
MT	[-]	stredná hodnota (fuzzy množina)
HT	[-]	vysoká hodnota (fuzzy množina)
LS	[-]	nízka pôdna vlhkosť
DS	[-]	optimálna pôdna vlhkosť
HS	[-]	vysoká pôdna vlhkosť
MEMS	[-]	mikroelektromechanický systém
NDIR	[-]	nedisperzná infračervená metóda

NO_x	[ppm]	oxidy dusíka
O_2	[%]	objemová koncentrácia kyslíka
P	[W]	tepelný alebo elektrický výkon
PID	[-]	proporcionálno-integračno-derivačná regulácia
PM	[$\mu g \cdot m^{-3}$]	tuhé častice
$PM_{2.5}$	[$\mu g \cdot m^{-3}$]	tuhé častice s priemerom do 2,5 μm
Q	[J]	teplo
$\dot{Q}$	[W]	tepelný tok
RH	[%]	relatívna vlhkosť vzduchu
RF	[-]	bezdrôtová rádiová komunikácia
RS-485	[-]	sériové komunikačné rozhranie
RTU	[-]	vzdialená terminálová jednotka
S	[%]	pôdna vlhkosť
SCADA	[-]	dohľadový riadiaci systém
SF_6	[-]	hexafluorid síry
SMART	[-]	inteligentné technické riešenia
STO	[-]	bezpečnostná funkcia Safe Torque Off
T	[°C]	teplota
TLS	[-]	zabezpečený komunikačný protokol
TVOC	[ppm]	celkové prchavé organické látky
U	[V]	elektrické napätie
VAV	[-]	variabilný objem vzduchu
VOC	[ppm]	prchavé organické zlúčeniny
WiFi	[-]	bezdrôtová komunikačná technológia

ÚVOD

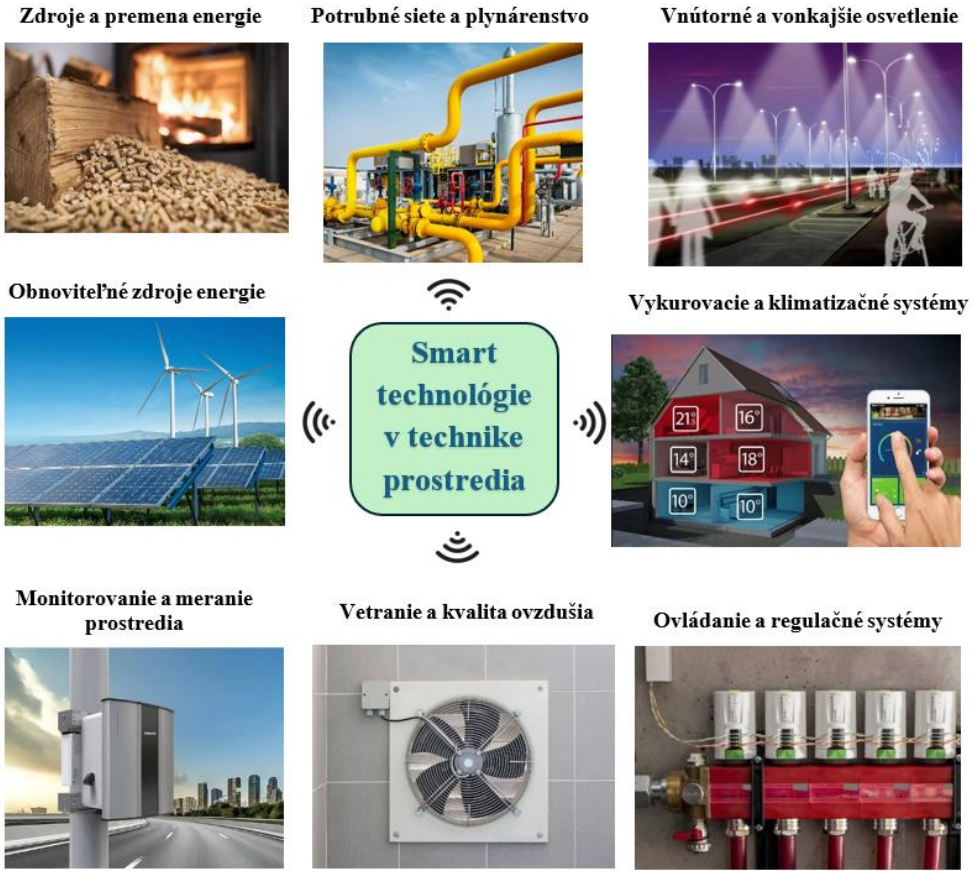
Táto kapitola vytvára základný rámec pre pochopenie techniky prostredia ako interdisciplinárneho odboru, ktorý spája technické, environmentálne a energetické oblastí. Zameriava sa na význam technických systémov pri zabezpečovaní kvality vnútorného prostredia, energetickej efektívnosti a ochrany životného prostredia. Pozornosť sa venuje aj širším súvislostiam, ako sú klimatické zmeny, udržateľný rozvoj a rastúce nároky na efektívne hospodárenie so zdrojmi energie. Kapitola vytvára teoretický základ potrebný na pochopenie aplikácie inteligentných technológií v ďalších častiach skrípt.

Technika prostredia je odbor, ktorý zohráva úlohu v zabezpečovaní zdravého, komfortného a udržateľného životného prostredia. Spája poznatky z rôznych technických disciplín s cieľom vytvoriť systémové riešenia pre budovy, mestá a priemyselné prevádzky. Zahŕňa široké spektrum oblastí – od zásobovania energiou a vody, cez vykurovanie, chladenie, vetranie, až po čistenie ovzdušia, odpadové hospodárstvo a obnoviteľné zdroje energie. Tieto technológie umožňujú efektívne využívať prírodné zdroje, znižovať dopad na životné prostredie a zároveň zvyšovať kvalitu života obyvateľov. Venuje sa aj širším súvislostiam napr. ako klimatické zmeny, udržateľný rozvoj a rastúce nároky na efektívne hospodárenie so zdrojmi energie, ktoré vychádzajú zo strategických zámerov EÚ.

Prijatím viacerých environmentálnych stratégií a cieľov, sa členské štáty EU zaväzujú zabezpečiť udržateľné využívanie prírodných zdrojov, ochranu životného prostredia a prispôsobenie sa klimatickým zmenám s dôrazom na vodu, pôdu a biodiverzitu. Medzi najvýznamnejšie prijaté dohody patria: Európska zelená dohoda je komplexná stratégia EÚ na dosiahnutie klimatickej neutrality do roku 2050. Tento cieľ je právne záväzný a predstavuje zásadný krok k dosiahnutiu klimatickej neutrality do roku 2050. Cieľ na rok 2050: Konečným cieľom je, aby sa EÚ stala prvým klimaticky neutrálnym kontinentom do roku 2050 [1]. Emisné ciele Fitfor55 majú znížiť emisie skleníkových plynov do roku 2030 o 55 % v porovnaní s úrovňou z roku 1990 a dosiahnuť uhlíkovú neutralitu do roku 2050 . Tieto ciele sú zakotvené v Európskom klimatickom zákone a tvoria základ Európskej zelenej dohody. Cieľ na rok 2030: EÚ si kladie za cieľ znížiť emisie skleníkových plynov do roku 2030 aspoň o 55 % v porovnaní s rokom 1990.

Odbory tepelná energetika a technika prostredia sú neoddeliteľnou súčasťou modernej spoločnosti a ich význam bude v budúcnosti ešte výraznejší v kontexte klimatických zmien a energetickej transformácie. Súčasťou ich nepretržitého vývoja sú SMART technológie, ktoré umožňujú dopĺňať tradičné riešenia o presnejší zber údajov, rýchlejšiu reakciu procesov a vytvárať efektívnejšiu prevádzku. Mikropočítače, inteligentné snímače, regulátory či cloudové platformy dokážu

monitorovať a analyzovať stav prostredia v reálnom čase a tým zlepšovať fungovanie technických zariadení a sústav bez toho, aby menili ich základné princípy. Takýto prístup postupného zavádzania automatizácie otvára priestor pre jednoduchšie diagnostikovanie chýb, optimalizáciu energií, lepšie riadenie, zvyšovanie kvality prevádzky a komfortu prostredia. Na obrázku 1.1. a v tabuľke 1.1 je uvedený prehľad oblastí ktorým sa katedra venuje.



***Obrázok 0.1**: Prehľad implementácie SMART technológie v technike prostredia*

Tabuľka 0.1 : Prehľad odvetví techniky prostredia a príklad implementácie SMART technológie

#	Odvetvie	Predmet na KET UNIZA	Príklad implementácie SMART technológie
1	Energetické systémy	Technika prostredia a environmentalistika (*Bc., 1. ročník*)	IoT meranie spotreby energie v reálnom čase, vzdialené vyhodnocovanie údajov z prevádzky
2	Obnoviteľné zdroje energie	Obnoviteľné zdroje energie (*Bc., 2. ročník*)	AI riadenie výkonu solárnych panelov, predikcia výroby podľa počasia
3	Zdroje a premena energie	Zdroje a premena energie (*Bc., 2. ročník*)	Automatická regulácia distribúcie energie, digitálne dvojča energetického systému
4	Monitorovanie a meranie prostredia	Monitorovanie životného prostredia (*Bc., 3. ročník*)	Bezdrôtové senzory kvality ovzdušia, cloudové ukladanie a analýza dát
5	Technika ochrany ovzdušia	Technika ochrany ovzdušia (*Bc., 3. ročník*)	Ventilácia riadená na základe CO_2, predikcia emisií pomocou strojového učenia
6	Energetické využívanie odpadov	Energetické využívanie odpadov (*Bc., 3. ročník*)	Monitorovanie teploty a vlhkosti spalín, optimalizácia horenia na základe senzorov
7	Ovládanie a regulačné systémy	Regulácia tepelných zariadení (*Ing., 1. ročník*)	Adaptívne riadenie výkonu podľa požiadaviek, regulácia pomocou fuzzy logiky
8	Potrubné siete a plynárenstvo	Projektovanie plynárenských sústav (*Ing., 1. ročník*)	Detekcia únikov plynu pomocou senzorov, automatické uzavretie vetiev siete
9	Vetracie a klimatizačné sústavy	Vetranie a klimatizácia (*Ing., 1. ročník*)	Inteligentné riadenie prúdenia a filtrácie vzduchu, diaľkové ovládanie cez aplikáciu
10	Vykurovacie sústavy budov	Vykurovanie (*Ing., 1. ročník*)	SMART termostaty s WiFi a učením, prediktívne kúrenie podľa správania používateľa
11	Osvetlenie	Umelé osvetlenie (*Ing., 2. ročník*)	Automatické stmievanie podľa denného svetla, osvetlenie riadené podľa pohybu osôb

1 SMART TECHNOLÓGIE V TECHNIKE PROSTREDIA

SMART technológie v technike prostredia sa stávajú bežnou súčasťou moderných budov a energetických systémov. Vychádzajú z prepojenia digitálnych prvkov, automatizácie a inteligentného riadenia s cieľom zlepšiť efektivitu, komfort aj udržateľnosť. V tejto kapitole sa oboznámime so základnými pojmami, vývojom, komponentmi a významom inteligentných riešení v kontexte technických zariadení budov a globálnych environmentálnych a legislatívnych požiadaviek. SMART systémy reagujú na meniace sa podmienky v reálnom čase a umožňujú optimalizovať prevádzku zariadení. Základom sú prepojené snímače, dátové platformy a riadiace jednotky. Cieľom je nielen znižovanie spotreby energie, ale aj zlepšovanie kvality vnútorného prostredia a zodpovedný prístup k zdrojom.

1.1 Stručný prehľad histórie vývoja digitalizácie v technike prostredia

Vývoj SMART technológií v technike prostredia sa opiera o dlhú históriu automatizácie a riadiacich systémov. Od prvých mechanických termostatov až po dnešné cloudové platformy a internet vecí (IoT), každý technologický krok priniesol nové možnosti pre efektívne riadenie budov. Táto podkapitola stručne mapuje najvýznamnejšie míľniky, ktoré ovplyvnili vznik a rozvoj digitálnych riešení v oblasti energetiky, vykurovania, vetrania a budov ako celku [2] [3] [4].

- **1925 – Zavedenie PID regulácie do kotlov a vykurovacích sústav -** Proporcionálno-integračno-derivačná (PID) regulácia, predstavená Nicolasom Minorskym, sa v roku 1925 začala využívať aj vo vykurovacích systémoch. Umožňovala presnejšie riadenie teploty kotlov a radiátorov tým, že reagovala na odchýlku, jej rýchlosť aj časové oneskorenie.
- **1932 – Prvé elektrické riadiace relé pre vykurovanie v budovách -** V tridsiatych rokoch sa začali v USA objavovať elektromechanické termostaty s reléovým výstupom, ktoré vedeli ovládať plynové kotly a ventilátory. Tieto zariadenia boli schopné spínať okruhy podľa teplotného signálu a nahradili skoré kvapalinové a pneumatické mechanizmy.
- **1958 – Zavedenie elektrických časovačov pre kotly a osvetlenie -** V roku 1958 sa začali vo väčšej miere používať mechanické a neskôr elektronické časovače, ktoré umožnili plánovať prevádzku kotlov, ventilátorov a osvetlenia. Tieto systémy umožnili napríklad nočné zníženie

teploty v školách alebo vypnutie osvetlenia počas pracovných prestávok. Časová automatizácia bola prvým krokom k efektívnemu energetickému manažmentu.

- **1979 – Nástup digitálneho riadenia („*Direct Digital Control*“ - *DDC*)** vo vetraní a klimatizácii priniesol v HVAC systémoch prelom: mikroprocesory začali nahrádzať mechanické a pneumatické prvky. Vetracie jednotky, chladiace systémy aj okenné ventilácie sa začali riadiť pomocou digitálnych signálov zo senzorov CO_2, teploty a vlhkosti. Táto technológia umožnila časové programovanie vetrania a úsporu energie počas neobsadených hodín.
- **1991 – Zavedenie KNX pre osvetlenie, vykurovanie a tienenie** - Protokol KNX (pôvodne EIB – „*European Installation Bus*“) umožnil decentralizované riadenie budov, kde každé zariadenie – napr. termostmoat, svetlo alebo motor žalúzie – má vlastnú inteligenciu. Systém umožňuje prepojenie kúrenia s prítomnosťou osôb, automatické stmievanie osvetlenia alebo zatiahnutie žalúzií pri nadmernom slnečnom žiarení. Všetko beží po jednej zbernici bez centrálnej jednotky.
- **1999 – Diaľkový dohľad nad klimatizáciou a ventiláciou cez web** - Zavedenie IP protokolu do techniky prostredia umožnilo vzdialený monitoring cez web. Už v roku 1999 bolo možné monitorovať teplotu a vlhkosť v HVAC systémoch cez LAN siete. Vznikli prvé systémy pre správu budov s diaľkovou správou klimatizačných jednotiek a ventilátorov.
- **2007 – Prvé inteligentné termostaty pre domáce vykurovanie** - Spoločnosť ECOBEE uviedla prvý Wi-Fi termostat s možnosťou diaľkového ovládania a učenia správania. Systém riadil vykurovanie podľa prítomnosti osôb, vonkajšej teploty a časového plánu. V praxi umožnil automatické zníženie teploty v čase neprítomnosti a zvýšenie komfortu pri návrate domov.
- **2012 – Z-Wave pre osvetlenie, vykurovanie a senzory okien** - Z-Wave je bezdrôtová sieť využívaná pre riadenie domácich technológií – najmä osvetlenia, kúrenia, dverí a okien. Systém umožňuje napr. automatické zhasnutie svetla pri otvorení okna alebo zníženie teploty, keď sa miestnosť vyprázdni.
- **2016 – LoRaWAN („*Long Range Wide Area Network*“) –** sieť s dlhým dosahom a veľkým pokrytím LoRaWAN sa začala masívne používať v oblasti monitorovania kvality vzduchu a spotreby tepla. Vetracie systémy získali možnosť snímať CO_2, VOC a teplotu bez potreby napájania zo siete. Rovnako sa začala LoRa využívať v systémoch riadenia solárnych panelov na strechách.

- **2020 – AI pre prediktívne riadenie tepelných čerpadiel a TÚV** - Moderné BMS systémy integrovali neurónové siete na predikciu spotreby tepla a optimalizáciu prevádzky tepelných čerpadiel. Systém vie predvídať ranný dopyt po teplej vode a pripraviť zásobník s minimálnou stratou energie. Výpočty sa často vykonávajú v cloude a využívajú spätnú väzbu z minulých dní.
- **2022–2025 – Federované učenie pre vetranie a detekciu anomálií** - V novších riešeniach sa začína používať federované učenie („*Federated Learning*“), kde senzory (napr. vetracie jednotky) sa učia lokálne, no zdieľajú modely s inými zariadeniami. Takéto systémy umožňujú zlepšiť efektivitu vetrania bez zberu citlivých údajov. Navyše umožňujú detegovať poruchy motorov, ventilátorov alebo filtrov včas bez potreby človeka.

1.2 Základy SMART technológie

1.2.1 Definícia inteligencie a „SMART“ prvkov v technike prostredia

V kontexte techniky prostredia pojem „inteligencia“ označuje schopnosť systému reagovať na zmeny okolitých podmienok autonómne, efektívne a adaptívne. Ide o súhru technických, softvérových a komunikačných komponentov, ktoré spoločne zabezpečujú zhromažďovanie údajov, ich spracovanie a vykonávanie optimalizovaných rozhodnutí v reálnom čase. SMART prvky sú teda viac než len automatizačné jednotky – zahŕňajú schopnosť učiť sa z predchádzajúcich cyklov, zohľadňovať správanie používateľov a reagovať na dynamické zmeny v energetických, klimatických alebo prevádzkových podmienkach [5].

V oblasti budov a energetických systémov SMART technológie prepájajú snímače, dátové platformy, akčné členy a algoritmy rozhodovania. Uplatňujú sa v oblastiach vykurovania, vetrania, klimatizácie, prípravy teplej vody či riadenia osvetlenia. Vďaka inteligentným funkciám umožňujú znižovať prevádzkové náklady, zvyšovať komfort a zároveň prispievať k dosahovaniu ekologických cieľov. Dôležitou súčasťou je schopnosť systémov komunikovať navzájom, s používateľom a so širšími energetickými sieťami, čo vytvára predpoklady pre budúce koncepty energetickej flexibility a decentralizácie [6].

1. **Zber dát:** Systémy nepretržite zhromažďujú údaje zo senzorov umiestnených v rôznych častiach budovy alebo zariadenia. Tieto dáta môžu zahŕňať teplotu, vlhkosť, CO_2, obsadenosť či vonkajšie klimatické podmienky. (*napr. snímač CO_2 vo vetracom systéme deteguje zvýšenú koncentráciu a aktivuje intenzívnejšie vetranie*)

2. **Spracovanie informácie:** Získané údaje sú analyzované v reálnom čase pomocou zabudovaných algoritmov alebo cloudových platforiem. Na základe analýzy sa prijímajú rozhodnutia alebo sa generujú odporúčania pre optimalizáciu prevádzky. (*napr. systém vyhodnotí, že teplota miestnosti je dlhodobo nižšia ako nastavený komfort a upraví výstupný výkon kotla*)
3. **Adaptívnosť:** SMART systémy sa dokážu prispôsobiť aktuálnym podmienkam, ako je zmena počasia, rozdielne správanie obyvateľov alebo zmeny tarifných cien energie. Ich riadiace logiky sa postupne optimalizujú na základe historických údajov. (*napr. systém sa naučí, že miestnosť je vždy neobsadená medzi 12:00 a 13:00 a automaticky zníži kúrenie v tomto čase*)
4. **Autonómne rozhodovanie:** Na základe definovaných cieľov (napr. komfort, úspora energie) systém samostatne vykonáva akcie bez zásahu používateľa. Takéto rozhodnutia môžu byť okamžité alebo plánované v čase. (*napr. systém sám otvorí tieniace prvky, keď je v zime slnečný deň, aby využil pasívne solárne zisky*)
5. **Prepojenosť:** Jednotlivé komponenty systému sú navzájom prepojené a komunikujú medzi sebou aj s vonkajšími službami, ako sú energetické siete alebo predpovede počasia. To umožňuje koordinovanú a dynamickú reakciu celého systému. (*napr. kotol spolupracuje so solárnym kolektorom a prioritizuje bezemisný zdroj pri ohreve vody*)
6. **Modularita a škálovateľnosť**: Systémy sú navrhnuté tak, aby sa dali ľahko rozšíriť o nové prvky alebo prispôsobiť meniacim sa požiadavkám. To umožňuje postupnú digitalizáciu bez nutnosti rozsiahlej rekonštrukcie. (*napr. ku základnému systému HVAC možno neskôr doplniť senzory kvality vzduchu a optimalizačný modul*)
7. **Energetická efektívnosť:** SMART systémy optimalizujú spotrebu energie tak, aby sa minimalizovali straty a zabezpečil komfort s čo najnižšími nákladmi. Pracujú v súlade s prednastavenými energetickými cieľmi alebo normami. (*napr. systém vypne ohrev v miestnostiach, kde sú otvorené okná, aby zabránil plytvaniu teplom*)
8. **Podpora obnoviteľných zdrojov:** Riadenie sa prispôsobuje dostupnosti obnoviteľnej energie – systém dáva prednosť vlastnému solárnemu zisku alebo akumulačnému systému pred nákupom energie z distribučnej siete. (*napr. tepelné čerpadlo sa aktivuje počas denného prebytku fotovoltiky a ohreje zásobník TÚV*)

Obrázok 1.1 *: Základná schéma inteligentnej budovy v technike prostredia [7]*

1.2.2 Základná štruktúra inteligentného systému v technike prostredia a výhody

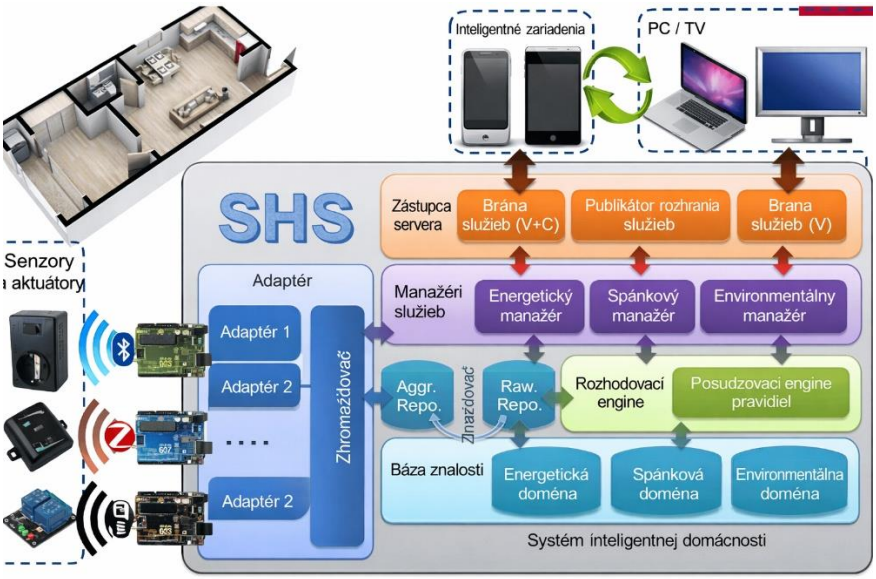
Inteligentné systémy v technike prostredia využívajú prepojenie snímačov, dátových platforiem a riadiacich prvkov na optimalizáciu vnútorných aj vonkajších podmienok. Pozostávajú z hlavných častí, ako sú snímače, cloudové úložiská, dátové servery, akčné členy, riadiaca platforma, samotné technické zariadenia a prostredie. Zber, prenos a spracovanie údajov umožňujú efektívne riadenie celého systému. Správne prepojenie všetkých zariadení je kľúčové pre zabezpečenie spoľahlivosti, funkčnosti a adaptability systému v reálnych podmienkach [8].

A. **Snímače** – Základným prvkom inteligentného systému sú senzorické jednotky monitorujúce kvalitu ovzdušia (koncentrácie CO, CO_2, PM, VOC), teplotu, relatívnu vlhkosť, atmosférický tlak, spotrebu elektrickej energie, zemného plynu a vody (prietokové snímače), ako aj intenzitu slnečného žiarenia, prítomnosť a polohu osôb a stav inteligentných zásuviek.
B. **IoT platforma / Užívateľské rozhranie** – Ide o softvérové prostredie umožňujúce vizualizáciu a monitoring nameraných údajov v reálnom čase. Zároveň slúži na riadenie jednotlivých prvkov systému, ako sú vykurovacie sústavy, ventilačné jednotky, tepelné čerpadlá a iné technológie budovy.
C. **Zbernice / Centrálne komunikačné jednotky (huby)** – Namerané údaje z jednotlivých snímačov nie sú odosielané priamo na dátový server alebo do

cloudu z dôvodu minimalizácie energetickej a výpočtovej záťaže snímačov. Miesto toho sú sústredené do centrálnej jednotky (napr. v objekte alebo na streche budovy), ktorá zabezpečuje zber a následný prenos dát.

D. **Dátový server (cloudový alebo fyzický)** – Pre dlhodobé ukladanie a spracovanie údajov slúži dátový server. Môže ísť o fyzické úložisko (napr. lokálny disk) alebo o cloudové riešenie dostupné ako externá služba, zabezpečujúce vysokú dostupnosť a flexibilitu.

E. **Užívateľské zariadenia** – Koncové zariadenia, prostredníctvom ktorých má používateľ prístup k IoT platforme. Môže ísť o smartfón, tablet, počítač alebo iné internetové zariadenie, vrátane inteligentných televízorov.



Obrázok 1.2 *: Základné rozdelenie hlavných častí inteligentného systému v domácnosti [8]*

1.2.3 Výhody implementácie SMART technológie

SMART systémy prinášajú viacero environmentálnych a ekonomických výhod, najmä v oblastiach efektivity, automatizácie a prispôsobiteľnosti. Vďaka inteligentnému sledovaniu spotreby a regulácii prevádzky dokážu znížiť energetickú náročnosť, využiť obnoviteľné zdroje a optimalizovať údržbu. Tabuľka 2.1 uvádza hlavné výhody implementácie SMART technológie v rôznych odvetviach techniky prostredia [9].

Tabuľka 1.1 *: Prehľad výhod aplikovania SMART riešení v technike prostredia*

Výhoda	Popis	Príklad
Zníženie spotreby energie	Presná regulácia podľa aktuálnej potreby znižuje energetické straty. Analýza údajov zo senzorov.	Riadenie HVAC podľa obsadenosti znižuje spotrebu až o 20 %.
Nižšie prevádzkové náklady	Optimalizovaný režim znižuje výdavky na energiu, údržbu a personál. Upozorňuje na neefektívnu prevádzku.	Systém upozorní na netesnosť ventilácie a zabráni stratám tepla.
Rýchla návratnosť investícií	SMART riešenia sa vďaka úsporám často vrátia do 3–5 rokov. Pomáhajú aj dotácie.	Systém riadenia osvetlenia sa vrátil za 2,8 roka.
Zníženie emisií CO_2	Efektívna prevádzka a využitie OZE znižujú uhlíkovú stopu. Prispieva to k plneniu legislatívnych cieľov.	AI-riadený kotol znížil emisie CO_2 o 18 %.
Flexibilita energetickej sieti	Systémy reagujú na zmenu taríf alebo požiadavky siete. Umožňujú aj predaj prebytkov.	Tepelné čerpadlo zníži výkon počas špičky a používateľ získa zľavu.
Prediktívna údržba	Sledovanie parametrov umožňuje zásahy ešte pred poruchou. Predlžuje sa tým životnosť zariadení.	Algoritmus predpovedal poruchu ventilátora týždeň vopred.
Zlepšenie komfortu	SMART systémy udržiavajú optimálne podmienky podľa preferencií. Zvyšujú pohodu a produktivitu.	Systém znižuje CO_2 ventiláciou pri prekročení 1000 ppm.
Podpora udržateľnosti	Riadenie znižuje odpad, šetrí zdroje a predlžuje životnosť. Umožňuje ekologickú aj ekonomickú rovnováhu.	Softvérová aktualizácia nahradí potrebu výmeny hardvéru.
Bezpečnosť a monitorovanie	Nepretržité sledovanie umožňuje rýchlu reakciu na incidenty. Dá sa spätne analyzovať prevádzka.	Alarm pri zvýšenej teplote v rozvodni zabráni preťaženiu.

1.2.4 SMART city index – Stav implementácie inteligentných systémov v krajinách

SMART City Index je medzinárodný rebríček, ktorý hodnotí, ako efektívne mestá využívajú technológie na zlepšenie života svojich obyvateľov. Vychádza z údajov zhromaždených výskumnými inštitútmi, ako je IMD a Singapore University of Technology and Design. Hodnotenie prebieha podľa týchto 5 hlavných oblastí:

1. **Digitálna infraštruktúra** – dostupnosť internetu, senzorových sietí, dátových platforiem.
2. **Mobilita a doprava** – inteligentné dopravné systémy, verejná doprava, elektromobilita.
3. **Energetická a environmentálna efektívnosť** – SMART siete, OZE, nakladanie s odpadmi.
4. **Vzdelanie a zdravie** – online služby, digitálna zdravotná starostlivosť.
5. **Občianska participácia a správa** – e-government, transparentnosť, zapojenie verejnosti.

V rebríčku **IMD SMART City Index 2025** bolo hodnotených **141 miest** z celého sveta. Prvé miesto obsadil **Zürich** vďaka rozvinutej digitálnej infraštruktúre, SMART doprave a ekologickým riešeniam. Druhé miesto patrí **Oslo**, ktoré vyniká udržateľnou mobilitou a využívaním obnoviteľných zdrojov. **Praha** sa umiestnila na výbornom **12. mieste** vďaka digitalizácii služieb a modernej verejnej doprave. **Bratislava** v rebríčku hodnotená nebola (pod x141), no postupne zavádza SMART riešenia v oblasti mobility, odpadového hospodárstva a digitalizácie. Hodnotenie vychádza z prieskumov medzi obyvateľmi a technologickej úrovne miest .SMART City index hodnotí mestá podľa ich úrovne digitalizácie, udržateľnosti, dátového riadenia a kvality života [10].

1.2.5 Normy a legislatíva inteligentných systémov v energetike

Inteligentné systémy v energetike vyžadujú jasne definované normy a legislatívu, ktoré zabezpečujú ich spoľahlivosť, interoperabilitu, bezpečnosť a efektívnu prevádzku. Táto podkapitola sa venuje najvýznamnejším technickým normám a regulačným rámcom v danej oblasti [11] [12].

- **ASHRAE 135 –** *(platná od 1995)***:** Definuje komunikačný protokol pre systémy riadenia budov (BMS). Umožňuje interoperabilitu medzi zariadeniami rôznych výrobcov. Príklad: prostredníctvom BACnetu možno ovládať osvetlenie, HVAC aj bezpečnostné systémy v jednej platforme.

- **IEC 62056** *(platná od 2002)***:** Zameriava sa na dátovú výmenu v systémoch diaľkového odpočtu („SMART metering“). Podporuje obojsmernú komunikáciu medzi inteligentnými meračmi a energetickým operátorom. Príklad: definícia štruktúry dát pre fakturáciu na báze 15-minútových intervalov spotreby.

- **IEC 61850** *(platná od 2003)*: Zameriava sa na komunikáciu v automatizačných systémoch energetických sietí. Poskytuje jednotné rozhranie pre zber a výmenu údajov medzi zariadeniami v elektrickej infraštruktúre. Príklad: norma definuje čas odozvy pre ochranné zariadenie do 3 ms pre kritické poruchy.

- **ISO/IEC 27001** *(platná od 2005)***:** Zaoberá sa riadením informačnej bezpečnosti, čo je zásadné aj pre SMART systémy v prostredí. Zavádza systém opatrení na ochranu dát, ktoré zahŕňajú hardvérové i softvérové komponenty. Príklad: požiadavka na dvojúrovňové overenie pri prístupe do systému energetického manažmentu.

- **IEC 62351** *(platná od 2007)***:** Norma pre kybernetickú bezpečnosť v energetických komunikačných protokoloch. Chráni integritu, dôvernosť a dostupnosť dát v SMART grid systémoch. Príklad: zabezpečenie komunikácie cez TLS v systéme SCADA medzi RTU a riadiacim centrom.

- **ISO 50001** *(platná od 2011)***:** Týka sa systémov energetického manažmentu a pomáha organizáciám zlepšovať energetickú efektívnosť. Umožňuje vytváranie stratégií a cieľov založených na meraní a auditoch spotreby. Príklad: norma vyžaduje dokumentáciu každoročného zlepšenia v percentách – napr. 2 % úspora energie ročne.

- **EN 15232** *(platná od 2012)***:** Zaoberá sa vplyvom automatizácie a riadenia budov na energetickú účinnosť. Klasifikuje úrovne automatizácie od triedy D (žiadne riadenie) po A (pokročilé riadenie s optimalizáciou). Príklad: trieda A umožňuje úsporu až 30 % energie pri vykurovaní oproti triede C.

- **ISO 52010-1** *(platná od 2017)***:** Norma definuje metódy výpočtu environmentálnych vstupov do budov, ako je slnečné žiarenie, teplota a vietor. Je základom pre simulácie energetickej náročnosti budov. Príklad: výpočet globálneho horizontálneho solárneho žiarenia v kWh/m² za deň podľa geografickej polohy.

2 SNÍMAČE PRE SMART TECHNOLÓGIE

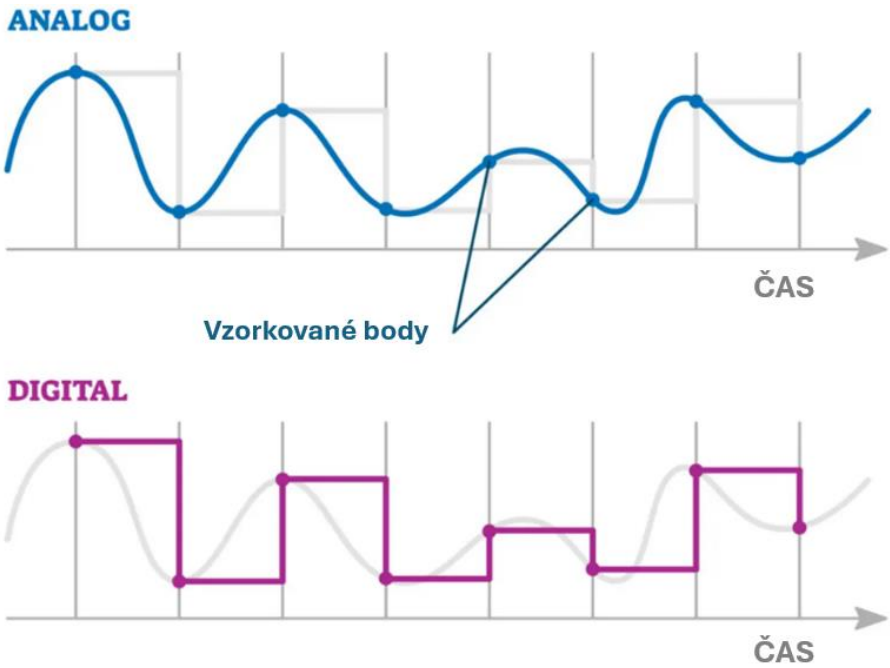
Rozvoj SMART technológií v technike prostredia je úzko spätý s dostupnosťou spoľahlivých a cenovo prijateľných snímačov, ktoré umožňujú kontinuálne sledovanie fyzikálnych a chemických veličín prostredia. Nízkonákladové snímače zohrávajú dôležitú úlohu najmä pri monitorovaní kvality ovzdušia, mikroklimatických podmienok a prevádzkových stavov technických systémov. Vďaka pokroku v oblasti mikroelektroniky, miniaturizácie a komunikačných rozhraní sa tieto zariadenia stali široko využiteľnými nielen vo výskume, ale aj v školských projektoch, pilotných aplikáciách a domácich monitorovacích systémoch. Hoci ich presnosť spravidla nedosahuje úroveň profesionálnych meracích prístrojov, pri vhodnej kalibrácii a správnom použití dokážu poskytovať dostatočne relevantné údaje pre SMART riadiace a hodnotiace aplikácie v technike prostredia.

2.1 Základné druhy signálov (analógový a digitálny)

Snímače sa podľa typu výstupného signálu delia na analógové a digitálne. Každý typ má svoje výhody aj obmedzenia. Rozdiely sa prejavujú v citlivosti, odolnosti voči rušeniu, spôsobe spracovania dát a možnostiach použitia v technike prostredia, kde majú široké uplatnenie. Tabuľka 3.1 uvádza základné porovnanie vlastností analógových a digitálnych snímačov [13].

Tabuľka 2.1 *: Základné porovnanie analógových a digitálnych snímačov [13]*

Parameter	Analógové snímače	Digitálne snímače
Typ výstupu	**Spojitý signál** (napr. napätie 0–5 V)	**Diskrétny signál** (logická hodnota 0/1)
Citlivosť	**Vysoká**	**Nižšia**
Odolnosť voči rušeniu	**Nízka**	**Vysoká**
Spracovanie	Vyžaduje A/D **prevodník**	Dá sa **priamo** čítať
Presnosť výstupu	Závisí od kvality komponentov a kalibrácie	Stabilná a opakovateľná, často so zabudovanou kalibráciou
Cena a jednoduchosť	**Zvyčajne lacnejšie** ale vyžadujú viac obvodov	**Mierne drahšie** ale jednoduchšie na zapojenie



Obrázok 2.1 *: Porovnanie analógového a digitálneho signálu snímačov [13]*

2.2 Fyzikálny princíp merania snímačov

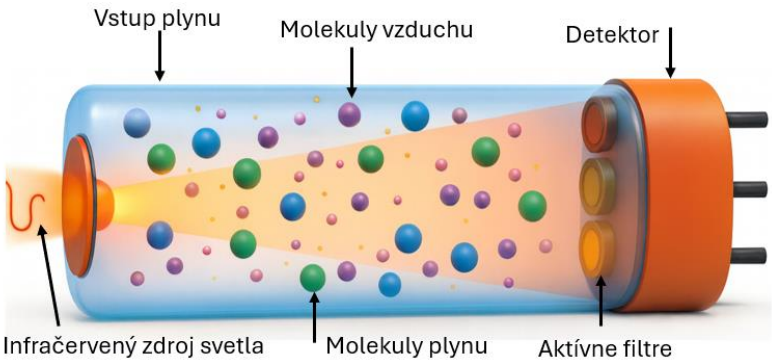
Existuje viacero spôsobov merania fyzikálnych veličín, ktoré využívajú rozličné princípy snímania. Každý typ snímača pracuje na inom fyzikálnom základe v závislosti od požadovaného druhu merania. Bežne sa využívajú infračervené, laserové, elektrochemické, piezoelektrické či optické metódy detekcie. Tieto princípy umožňujú prevod fyzikálnych javov, ako sú tlak, koncentrácia plynu, teplota či pohyb, na elektrický signál. Správna voľba snímača zohľadňuje aj presnosť, spoľahlivosť a podmienky prostredia, v ktorom bude zariadenie pracovať.

2.2.1 Infračervený princíp (NDIR – „*Non-Dispersive Infrared*“)

Infračervené snímače fungujú na princípe selektívnej absorpcie infračerveného žiarenia molekulami plynu. Každý plyn absorbuje infračervené žiarenie na špecifických vlnových dĺžkach. Snímač vyžaruje infračervené svetlo cez meraný plyn a deteguje, koľko žiarenia bolo absorbované. Z rozdielu intenzít žiarenia pred a po prechode plynom sa vypočíta koncentrácia cieľovej látky. Tento

princíp je často využívaný na meranie oxidu uhličitého (CO_2), oxidu uhoľnatého (CO) či metánu (CH_4).

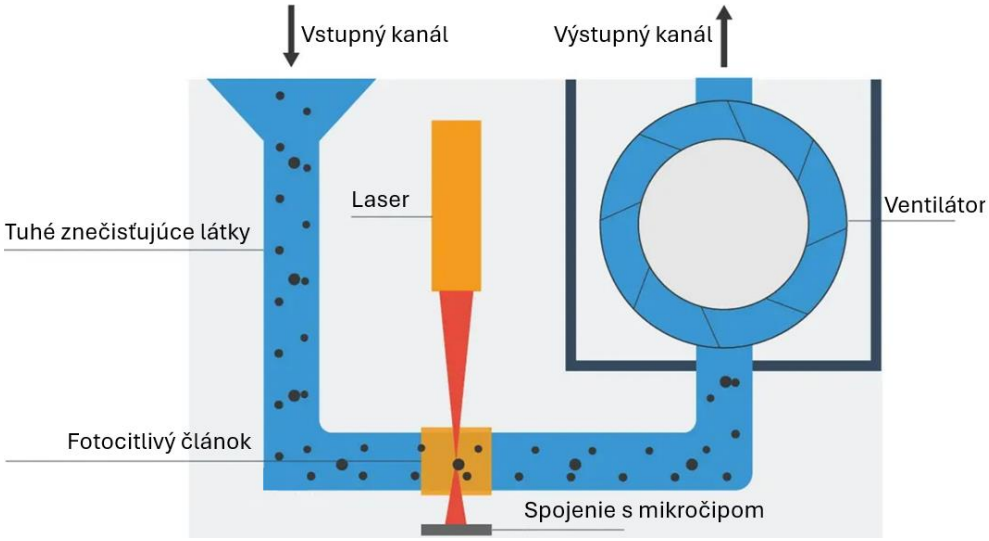
Na obrázku je znázornený princíp infračerveného snímača pracujúceho na báze NDIR (nedisperzné infračervené meranie). Plyny vstupujú do meracej komory, kde ich ožaruje infračervené svetlo zo zdroja. Molekuly plynu absorbujú špecifické vlnové dĺžky. Svetlo následne prechádza cez aktívne a referenčné filtre a dopadá na detektor. Rozdiel v intenzite žiarenia umožňuje určiť koncentráciu konkrétneho plynu na základe jeho absorpčného spektra. Táto technológia je spoľahlivá, selektívna a často využívaná na meranie CO_2 a CO [14].



Obrázok 2.2 *: Základná štruktúra infračervených snímačov plynov [14]*

2.2.2 Laserový/Optický princíp (LDL – „*Laser Diode-based Detection*“)

Laserové snímače využívajú vysoko koherentné svetlo z laserovej diódy na detekciu plynov alebo pevných častíc. Pri meraní tuhých znečisťujúcich látok (TZL) laserové snímače detegujú rozptyl svetla na časticiach podľa princípu Mieovej teórie. Výsledná intenzita rozptýleného svetla koreluje s koncentráciou častíc v meranom objeme. Lorenz-Mieova teória opisuje rozptyl elektromagnetického žiarenia (napr. laserového svetla) na **guľovitých časticiach**, ktorých veľkosť je porovnateľná s vlnovou dĺžkou žiarenia. Je to presné riešenie Maxwellových rovníc pre sférické častice v homogénnom prostredí. Fotocitlivý snímač deteguje zmeny charakteristiky žiarenia, z ktorého sa určujú koncentrácie PM_1, $PM_{2,5}$ a PM_{10} [15].



Obrázok 2.3 *: Základný princíp laserového/optického merania koncentrácie TZL [16]*

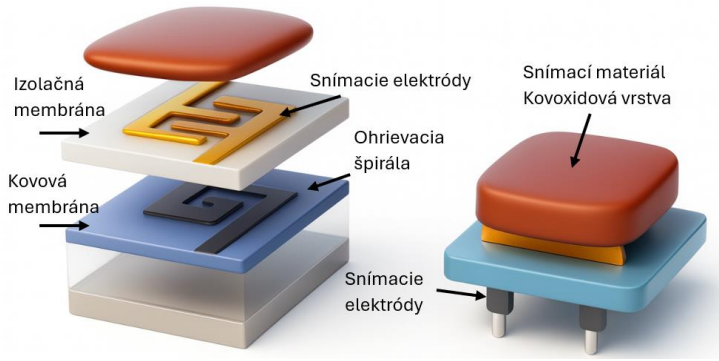
Čo sa deje vnútri snímača?

1) **Laserová dióda vyžaruje svetelný lúč do meracej komory**: Tuhé častice sa pohybujú vo vnútri snímača spolu so vzduchom a prichádzajú do kontaktu so svetlom.
2) **Keď svetlo narazí na častice, dochádza k rozptylu žiarenia:** Rozptýlené svetlo sa šíri rôznymi smermi v závislosti od veľkosti, tvaru a indexu lomu častíc.
3) **Fotodióda/fotocitlivý snímač zachytáva rozptýlené svetlo:** Premieňa intenzitu svetla na elektrický signál.
4) **Zabudovaný mikročip prepočíta signál hmotnostné koncentrácie PM_1, $PM_{2,5}$ a PM_{10}** : Predpokladá štandardná hustota a guľovitý tvar častíc.

2.2.3 Odporové snímače („*resistive-based gas sensors*“)

Odporové snímače plynov fungujú na princípe zmeny elektrického odporu citlivej polovodičovej vrstvy pri kontakte s cieľovým plynom. Najčastejšie sa využíva oxid cínatý (SnO_2), ktorého vodivosť sa mení vplyvom chemických reakcií na povrchu materiálu. Pri prítomnosti plynu, ako je oxid uhoľnatý (CO), dochádza k redox reakcii, ktorá uvoľňuje elektróny a znižuje odpor vrstvy. Táto zmena sa vyhodnocuje ako signál, z ktorého sa určuje koncentrácia plynu v ovzduší. Snímače, ktoré pracujú týmto princípom sú bežne najlacnejšie, a však majú značné nevýhody [17]:

1) **Oxidácia a degradácia aktívneho materiálu** : Opakované (napr. $CO + O^- \rightarrow CO_2$) môžu postupne meniť štruktúru oxidu cínu (SnO_2) a znižovať jeho citlivosť.
2) **Kontaminácia povrchu** : Prach, mastnota, aerosóly alebo vlhkosť môžu zaniesť povrch snímacej vrstvy a znížiť jej schopnosť adsorbovať plyny.
3) **Potreba ohrevu:** Väčšina snímačov musia mať aktívne ohrievanie (vysoká spotreba prúdu).



Obrázok 2.4 : *Základné časti odporového plynného snímača [18]*

2.2.4 Piezoelektrické snímače

Piezoelektrické snímače využívajú vlastnosť niektorých materiálov (napr. kryštálov alebo keramík), ktoré pri mechanickej deformácii generujú elektrické napätie. Tento jav je známy ako piezoelektrický efekt. V energetike sa tieto snímače používajú najmä na detekciu vibrácií, rázových javov a dynamických zmien tlaku. V prípade napríklad turbín alebo parných generátorov slúžia na diagnostiku mechanického namáhania. Zmena napätia, vyvolaná deformáciou citlivej vrstvy, sa zaznamenáva a vyhodnocuje v riadiacom systéme. Výsledky sa používajú na monitorovanie technického stavu a prediktívnu údržbu zariadení [19]

<u>Aplikácie v technike prostredia</u>

- **Monitoring vibrácií v turbínach a generátoroch** : IoT uzly s piezosnímačmi detegujú abnormality a predchádzajú poruchám pomocou vzdialeného spracovania dát.
- **Monitorovanie stavu akumulátorov a výkonovej elektroniky** : Detekcia expanzie, vibrácií alebo tlakov v batériových moduloch cez senzorové IoT moduly.

- **SMART Grid komponenty a transformátory :** Integrácia piezosnímačov do inteligentných transformátorov na sledovanie mechanických zmien, s diaľkovým prenosom dát

2.3 Nízkonákladové snímače na monitorovanie kvality ovzdušia

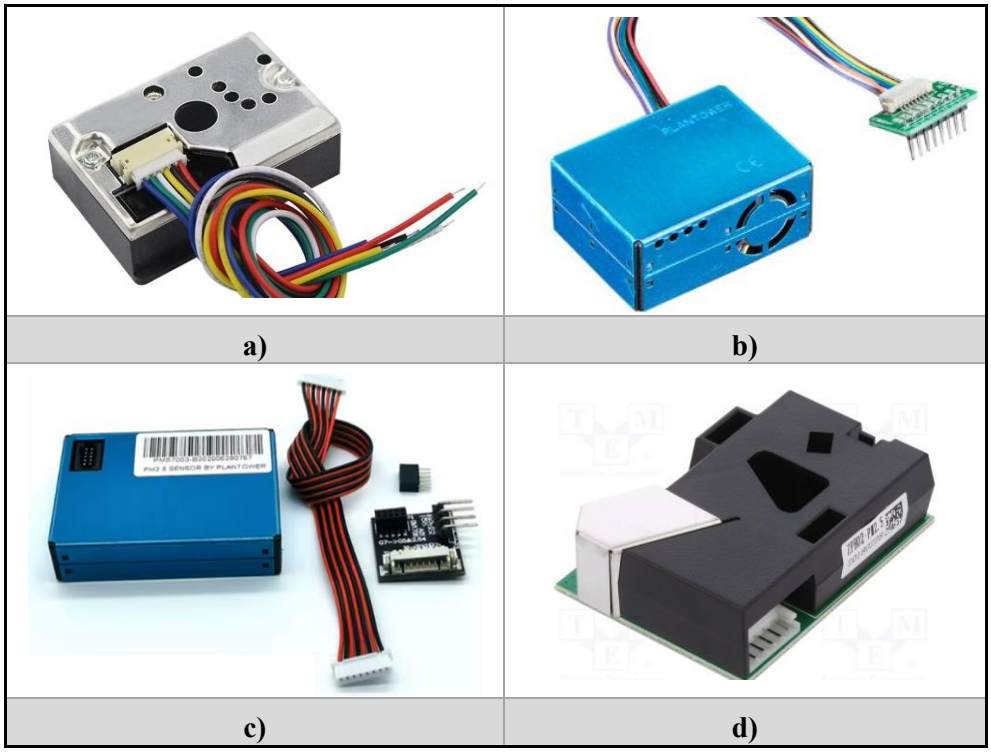
Rozvoj elektroniky a dostupných technologických riešení umožnil vznik cenovo prijateľných snímačov určených na sledovanie stavu prostredia, ktoré nachádzajú uplatnenie vo výskumných aktivitách, školských projektoch aj v domácich monitorovacích systémoch. Hoci tieto zariadenia spravidla nedosahujú presnosť profesionálnych meracích prístrojov, pri vhodnej kalibrácii a správnom použití dokážu poskytovať spoľahlivé údaje. Monitorovanie kvality ovzdušia slúži na vyhodnocovanie stavu atmosférického prostredia z hľadiska jeho fyzikálnych vlastností, ako sú teplota, vlhkosť a tlak vzduchu, ako aj z hľadiska chemického zloženia, najmä koncentrácie škodlivých látok. Tieto látky sa všeobecne rozdeľujú na plynné znečisťujúce látky a tuhé znečisťujúce látky (TZL). Vďaka nízkej cene, jednoduchej implementácii a možnosti pripojenia k počítaču alebo internetu sa výrazne zvyšuje potenciál ich nasadenia najmä v mestskom prostredí, kde vo väčšine prípadov poskytujú dostatočný merací rozsah a citlivosť. Táto kapitola sa zameriava na prehľad základných typov nízkonákladových snímačov, ich technické vlastnosti, výhody, obmedzenia a možnosti využitia v oblasti monitorovania životného prostredia.

2.3.1 Snímače koncentrácie tuhých znečisťujúcich látok

Na tabuľke 3.2 sú uvedené technické charakteristiky, priemerné ceny a základné rozmerové parametre jednoduchších a cenovo dostupnejších typov snímačov na meranie koncentrácie tuhých znečisťujúcich látok. Ide najmä o kompaktné optické snímače pracujúce na princípe rozptylu svetla, ktoré sú vhodné na orientačné a prevádzkové monitorovanie. Tieto zariadenia sú vo všeobecnosti citlivejšie na spôsob zapojenia, stabilitu napájania a kvalitu signálu, pričom si vyžadujú dôslednú inicializačnú aj periodickú kalibráciu. Vplyv okolitej teploty, vlhkosti spalín a zloženia aerosólu môže výrazne ovplyvniť presnosť merania, čo kladie zvýšené nároky na ich správnu integráciu do meracieho systému. Prepojenie s ďalšími snímačmi, napríklad teploty alebo kyslíka, môže byť limitované rozdielnymi komunikačnými rozhraniami a časovou synchronizáciou dát.

Tabuľka 2.2 : Prehľad jednoduhších PM snímačov na trhu [20],[21],[22],[23]

PM Snímač	GP2Y1014AU0F	ZPH02	PM5003	PM7003
Spoločnosť	Sharp (Japonsko)	Winsen (Čína)	Plantower (Čína)	
Cena	~10 €	~12 €	~20 €	~25 €
Rozhranie	Analog	UART / PWM	PWM	UART
Merací rozsah	$PM_{2.5}$ 0–500 μg/m³	$PM_{2.5}$ 0–500μg/m³	PM_1- PM_{10} 1000μg/m³	
Meracia presnosť	±30%	±15%	±10%	±10%
Teplota (°C)	-10 až +65	0 až +50	-10 až+60	-10 až +60
Priemerná spotreba	~20 mW	~90 mW	~100 mW	~100 mW



Obrázok 2.5 *: PM snímače do 30 € : a) Sencor GP2 b) Plantower PM5003 + Adaptér c) Plantower PM7003 + Adaptér d) Winsen ZPH02*

Do tejto kategórie patria snímače s integrovaným I²C rozhraním, automatickou kalibráciou a bezpečnostnými prvkami, ktoré zabezpečujú spoľahlivé meranie bez rušenia iných zariadení. Výhodou je kvalitná softvérová podpora – knižnice, ukážkové kódy a dokumentácia. Veľmi odporúčané sú snímače od DFROBOT, ktoré majú výborne spracovanú wiki stránku. Oplatí sa investovať do drahšieho PM senzora – ponúka vyššiu presnosť, stabilitu merania a často obsahuje samočistiace mechanizmy, čím zabezpečuje dlhodobú spoľahlivosť v náročných podmienkach.

Tabuľka 2.3 *: Prehľad PM snímačov od 30 € na trhu [24],[25],[26],[27]*

PM Snímač	***SEN55-SDN-T***	**SPS30**	**Gravity PM2.5**	**OPC-R2**	**OPC-N3**
Spoločnosť	Sensirion (Švajčiarsko)		DFRobot (Čína)	Alphasense (UK)	
Cena	~30 €	~35 €	~40 €	~200 €	~350 €
Rozmery (mm)	75×35×25	41x41x12	72x40x14	72x21x20	75x63x60
Hmotnosť (g)	36	59	55	30	105
Rozhranie	UART / I²C	UART / I²C	UART / I²C	SPI	SPI
Merací rozsah	PM_1- PM_{10} 0 – 1000 μg/m³			$PM_{0,3}$ – PM_{10} 0 - 2000	$PM_{0,3}$ – PM_{40} 0 - 2000
Meracia presnosť	±10%	±10%	±10%	6-8%	4-5%
Prevádzková teplota (°C)	-10 až +50	-10 až +60	-10 až +60	-10až +40	-10až +50
Spotreba energie	~315 mW	~275 mW	~100 mW	~270 mW	~360 mW

Výhoda najdrahšieho riešenie od spoločnosti AlphaSense je, že so snímačov je pripravený dostupný špecializovaný softvér, ktorým sa dá daný snímač prepojiť a ovládať.

Obrázok 2.6 *: PM snímače od 40 do 350 € : a) Sensirion SEN55 b) SPS30 c) DFRobot Gravity PM Sensor d) AlphaSense OPC-N3 e) OPC-R2*

2.3.2 Snímače koncentrácie plynných znečisťujúcich látok

Snímače určené na meranie koncentrácií plynných znečisťujúcich látok zohrávajú kľúčovú úlohu pri monitorovaní kvality ovzdušia, ako aj pri hodnotení účinnosti spaľovacieho procesu a emisií z malých zdrojov tepla. Využívajú rôzne princípy merania v závislosti od konkrétneho plynu a požadovanej presnosti. Elektrochemické senzory sa bežne používajú na detekciu oxidu uhoľnatého (CO), oxidu dusičitého (NO_2) a oxidu siričitého (SO_2), pričom reagujú chemickou reakciou na cieľovú látku, čo vedie k merateľnej zmene elektrického signálu.

Snímače CO

a) b) c) d)

Obrázok 2.7 *: Snímače CO a) Winsen ZE15 b) Gravity MEMS CO c) SparkFun MQ-7 d) Gravity : Elektrochemický senzor CO kalibrovaný vo výrobe*

Tabuľka 2.4 *: Prehľad základnej charakteristiky snímačov CO [28], [29], [30], [31], [32]*

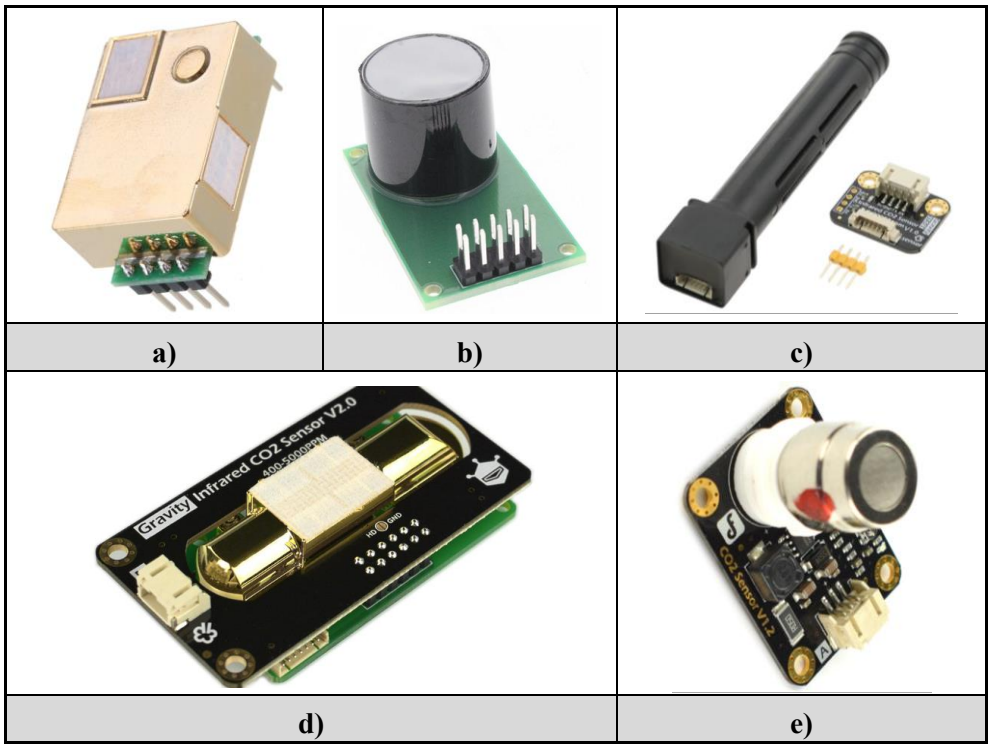
Snímač	Priemerná cena	Rozsah detekcie	Presnosť / rozlíšenie	Spojenie (interface)
MQ-7	~2-3 €	20 – 2000 ppm	Nízka presnosť, nastaviteľná citlivosť	Analog
Fermion: MEMS CO snímač	~4 €	5 – 5000 ppm	Nízka presnosť, orientačné meranie	Analog
Winsen ZE15-CO	~10 €	0 – 500 ppm	Rozlíšenie 0,1 ppm	Analog, UART
DFRobot SEN0466	~60 €	0 – 1000 ppm	Vysoká presnosť, teplotná kompenzácia	Analog, I^2C, UART
Alphasense COA1+	~100 - 150 €	0 – 5000 ppm	Veľmi vysoká presnosť, priemyselné štandardy	ISB

Snímače CO2

CO_2 snímače slúžia na meranie koncentrácie oxidu uhličitého vo vzduchu. Využívajú sa v inteligentnej ventilácii, zdravotníctve, klimatizácii, poľnohospodárstve a výskume. Dôležité sú aj pri regulácii spaľovacieho procesu na optimalizáciu účinnosti a zníženie emisií.

Tabuľka 2.5 *: Prehľad základných charakteristík snímačov CO2 [33], [34], [35], [36], [37]*

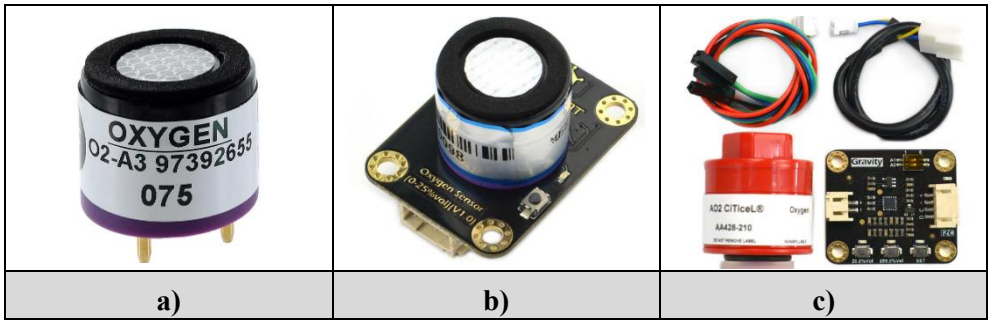
Snímač	Cena	Rozsah detekcie	Presnosť / rozlíšenie	Spojenie (interface)
Winsen:MH-Z19B	~40 €	0–2000 ppm	±50 ppm + 3 %	UART / PWM
Gravity: Elektrochemický	~60 €	0 - 10 000 ppm	±40 ppm + 5 %	Analog
Gravity: PWM Infračervený CO_2	~75 €	400–5000 ppm	±50 ppm + 5 %	PWM
Gravity: UART CO_2	~ 90 €	0–50 000 ppm	±50 ppm + 5 %	UART
SprintIR 100 % CO_2 senzor	~300 €	0–1 000 000 ppm (0–100 %)	±300 ppm ± 5%	UART



Obrázok 2.8 *: Prehľad CO2 snímačov a) Winsen MH-Z19B b) SprintIR 100% c) DFRobot UART d) PWM e) Elektrochemický*

Snímače O_2

Kyslíkové snímače slúžia na meranie koncentrácie kyslíka v plynných zmesiach a zohrávajú dôležitú úlohu v technike prostredia. Ich presnosť a spoľahlivosť sú kľúčové pre riadenie procesov závislých od dostupnosti kyslíka. Používajú sa pri optimalizácii spaľovania na zabezpečenie správneho pomeru vzduch–palivo, pri monitorovaní kvality ovzdušia v interiéroch či na kontrolu aeróbnych podmienok pri biologickom čistení odpadových vôd



Obrázok 2.9*: Prehľad kyslíkových snímačov [38], [39], [40]*

Tabuľka 2.6 *: Prehľad charakteristík kyslíkových snímačov*

Názov senzora	Cena	Rozsah merania	Presnosť	Zapojenie
DFRobot Gravity – senzor O2 (I2C)	≈ 50 €	0–100 % O_2	±2 % F.S.	I^2C
Gravity elektrochemický snímač	≈ 100 €	0–100 % O_2	±0.1 % (v rozsahu)	I^2C
Alphasense O2-A2 Oxygen Sensor	≈ 70 €	0–25 % O_2	±1 % F.S.	Analóg (ISB potrebný)

2.3.3 Snímače teploty, vlhkosti a tlaku ovzdušia

Teplota, relatívna vlhkosť a atmosférický tlak patria medzi základné environmentálne veličiny, ktoré ovplyvňujú správanie spalín a tým aj celý spaľovací proces. Ich meranie je dôležité nielen pri sledovaní podmienok v spaľovacej komore, ale aj pri analýze disperzie emisií vo vonkajšom prostredí. Na tento účel sa používajú snímače založené na digitálnych mikročipoch, ktoré poskytujú presné a stabilné údaje pri nízkej energetickej náročnosti. Senzory ako BME280, BMP388 či SHT31 umožňujú súčasné meranie viacerých parametrov a sú vhodné pre dlhodobý monitoring.

- **Barometrický tlak:**

Meria absolútny tlak vzduchu voči vákuu. Snímače využívajú piezorezistívne membrány porovnávajúce okolité prostredie s uzavretou referenčnou komorou. *Aplikácia:* monitorovanie výšky, meteorológia, kalibrácia ventilácie podľa nadmorskej výšky.

- **Diferenciálny tlak:**

Meria rozdiel tlakov medzi dvoma miestami (napr. pred a za filtrom). Snímače majú dva tlakové porty a merajú rozdiel pomocou tlakovo citlivého čipu. *Aplikácia:* sledovanie zanesenia filtrov, riadenie prietoku vzduchu, meranie prúdenia v potrubiach.

Snímače tlaku

Meranie tlaku zohráva významnú úlohu v technike prostredia, kde umožňuje efektívnu reguláciu prúdenia vzduchu, plynov a kvapalín. Presné sledovanie tlaku prispieva k energetickej účinnosti, bezpečnosti a komfortu. Uplatňuje sa vo

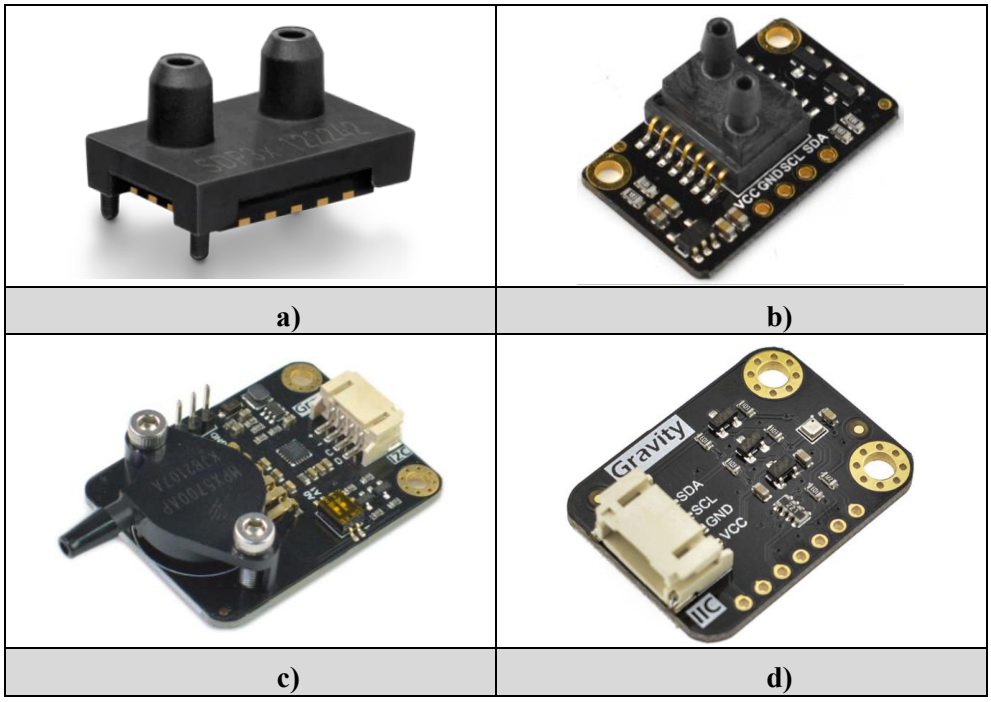
vetracích, klimatizačných aj spaľovacích zariadeniach. Aplikácie merania tlaku v technike prostredia:

1) **Riadenie diferenčného tlaku vo vzduchotechnike a klimatizácii**
   V systémoch sa meranie diferenčného tlaku využíva na zabezpečenie optimálneho prúdenia vzduchu medzi rôznymi sekciami potrubia alebo medzi miestnosťami. Regulácia tlakového rozdielu pomáha predchádzať spätnému prúdeniu vzduchu a zvyšuje energetickú efektívnosť systému. Tým sa zabezpečuje nielen komfort používateľov, ale aj správna funkcia zariadení.

2) **Kontrola filtrácie vzduchu (zanesenie filtrov)**
   Meranie diferenčného tlaku pred a za filtrom umožňuje detegovať zvýšený odpor spôsobený znečistením filtra. Ak tlakový rozdiel prekročí stanovenú hodnotu, signalizuje potrebu výmeny filtra alebo údržby systému. Tento proces pomáha predĺžiť životnosť zariadení a zabezpečuje kvalitu vzduchu v interiéri.

3) **Monitorovanie spaľovacích podmienok v kotloch**
   Meraním tlaku v spaľovacej komore a komíne možno získať dôležité informácie o priebehu horenia a o stave odťahových ciest spalín. Tlakové hodnoty sú indikátorom správneho ťahu a môžu signalizovať poruchy alebo nebezpečné stavy, ako je upchatie komína. Takéto monitorovanie je kľúčové pre bezpečnosť prevádzky a účinnosť spaľovania.

4) **Meranie tlaku plynov v distribučných a regulačných staniciach**
   V distribučných sústavách plynu sa tlak meria na rôznych úsekoch potrubia, aby sa zabezpečila rovnomerná a bezpečná dodávka paliva. V regulačných staniciach slúži meranie na kontrolu a úpravu tlaku tak, aby bol vhodný pre konkrétnych odberateľov. Presné meranie tlaku je nevyhnutné pre prevenciu únikov, poškodení a výbuchov.



a) b) c) d)

Obrázok 2.10 *: Prehľad tlakových snímačov a) Sensirion SDP816-125Pa b) DFRobot LWLP5000 (Techfun) c) DFRobot LWLP5000 (oficiálny) d) DPS310 barometrický senzor [41], [42], [43], [44]*

Tabuľka 2.7 *: Základné charakteristiky tlakových snímačov [41], [42], [43], [44]*

Názov senzora	Cena	Typ tlaku	Rozsah tlaku	Presnosť	Pracovná teplota	Zapojenie
Gravity: BMP388	≈ 8 €	Absolútny	30 - 125 kPa	±8 Pa	-40°C~80°C	I^2C
Sensirion: SDP810	≈ 25 €	Diferenciálny	±1500 Pa	3%	-40°C~85°C	Analog/I^2C
Fermion: LWLP5000	≈ 45 €	Diferenciálny	±500 Pa	<1,5%	-40°C~85°C	I^2C
Gravity: MPX5700AP	≈ 50 €	Absolútny	15-700kPa	<2,5%	0～85°C	I^2C

Snímače vysokých teplôt (od 150C) (termočlánky a nedotykové zariadenia)

Termočlánky patria medzi najrozšírenejšie snímače teploty v technike prostredia. Využívajú termoelektrický jav, pri ktorom sa na spoji dvoch rôznych kovov generuje napätie úmerné rozdielu teplôt. Vynikajú vysokou teplotnou odolnosťou, jednoduchosťou a rýchlou odozvou. Príklady aplikácie sú:

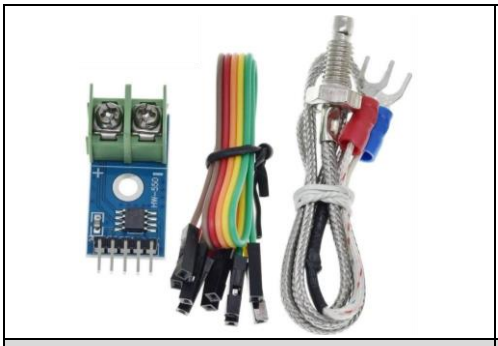
1) **Riadenie teploty spaľovania v kotloch pomocou AI algoritmov**
   Termočlánky merajú teplotu spaľovacieho procesu v reálnom čase a odosielajú dáta do systému umelej inteligencie, ktorý reguluje prívod paliva a vzduchu. Tým sa dosahuje stabilné horenie s minimálnou produkciou emisií.

2) **Monitoring tepelného komfortu v SMART budovách a automatická regulácia vykurovania**
   Pomocou termočlánkov je možné neustále sledovať aktuálnu teplotu v jednotlivých zónach budovy. Na základe týchto údajov systém automaticky upravuje vykurovanie alebo chladenie pre maximálny komfort a úsporu energie.

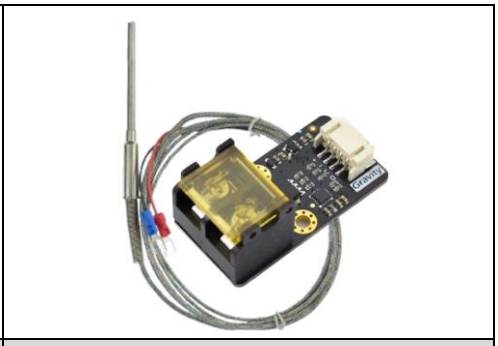
3) **Ochrana tepelných zariadení pred prehriatím pomocou prediktívnej údržby**
   Termočlánky sledujú teploty kritických komponentov a systém včas identifikuje riziko prehriatia. Prediktívny algoritmus následne odporučí zásah ešte pred vznikom poruchy.

4) **Optimalizácia výkonu solárnych kolektorov v kombinácii s IoT sieťami**
   Meraním teploty v rôznych bodoch kolektorového systému možno vyhodnotiť jeho účinnosť a výkon. IoT platforma umožňuje vzdialené riadenie a adaptívnu reguláciu podľa aktuálnych podmienok.

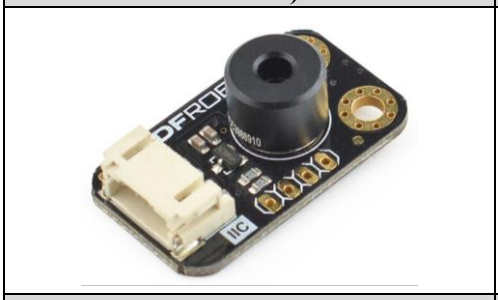
5) **Diagnostika výmenníkov tepla a detekcia zanesenia v reálnom čase**
   Porovnávanie vstupnej a výstupnej teploty pomocou termočlánkov umožňuje rýchlu identifikáciu poklesu prestupu tepla. Zmeny v teplotnom profile signalizujú nánosy alebo neefektívnu výmenu tepla.



a)



b)



c)

d)

Obrázok 2.11 *: Prehľad snímačov teploty (termočlánky a bezkontaktné IR kamery) [45], [46], [47], [48]*

Tabuľka 2.8 *: Prehľad technických vlastností snímačov teploty [45], [46], [47], [48]*

Názov senzora	Cena	Typ merania	Rozsah teploty	Presnosť	Zapojenie
MAX6675	6 eur	Termočlánok	-200 do 1300C	± 1.5 °C	SPI
Gravity K-Type	22 eur	Termočlánok	-270°C do 1372°C	±2°C	I^2C
Gravity: MLX90614-DCC	15 eur	IR Kamera (FOV: 35°)	-70.01℃ to +380℃	±0.5˚C	I^2C
Gravity: MLX90614-DCI	50 eur	IR Kamera (FOV: 5°)	-70.01℃ to +380℃	±0.2˚C	I^2C

Snímače prietoku vody

Snímače prietoku vody sú zariadenia slúžiace na meranie množstva kvapaliny pretekajúcej potrubím. Využívajú sa v automatizovaných systémoch, kde zabezpečujú kontrolu spotreby, reguláciu toku a ochranu pred únikom. Ich využitie je kľúčové v inteligentných technických riešeniach. Aplikácie sú:

1) **Domáca automatizácia** – riadenie spotreby vody a havarijné uzávery Snímače prietoku monitorujú spotrebu vody v reálnom čase a pomáhajú optimalizovať jej využitie v domácnosti. V prípade zistenia neobvyklého alebo nadmerného prietoku môžu automaticky uzavrieť prívod a predísť škodám.
2) **Závlahové systémy** – presné dávkovanie vody podľa potreby rastlín Na základe meraného prietoku je možné presne určiť množstvo vody dodanej jednotlivým zónam záhrady. Tým sa zabezpečuje efektívne zavlažovanie podľa typu pôdy, rastlín a aktuálnych klimatických podmienok.
3) **Energetické okruhy** – kontrola prietoku vo vykurovaní a chladení Snímače prietoku sú súčasťou riadiacich systémov, ktoré zabezpečujú rovnomernú distribúciu tepla alebo chladu v celom objekte. Pomáhajú optimalizovať výkon čerpadiel a zabraňujú tepelným stratám alebo prehrievaniu.
4) **Priemyselné procesy** – sledovanie a regulácia kvapalín v reálnom čase V priemyselných aplikáciách sa využívajú na presné riadenie technologických procesov, kde je dôležitý stabilný a merateľný prietok kvapaliny. Ich integrácia do PLC alebo SCADA systémov umožňuje rýchlu reakciu na zmeny a zabezpečenie kvality výroby.

a)	b)	c)

Obrázok 2.12 *: Prehľad nízkonákladových prietokomerov [49], [50], [51]*

3 KOMUNIKAČNÁ TECHNIKA PRE SMART TECHNOLÓGIE

Aby mala SMART technológia skutočný prínos, musí vedieť efektívne komunikovať — nielen medzi zariadeniami, ale aj s používateľom. Práve preto zohrávajú komunikačné protokoly a platformy internetu vecí (IoT) zásadnú úlohu. Zabezpečujú prenos, spracovanie a sprístupnenie informácií, vďaka čomu môže byť systém nielen funkčný, ale aj inteligentne reagujúci a užívateľsky hodnotný.

3.1 Zber a prenos údajov v SMART aplikáciách

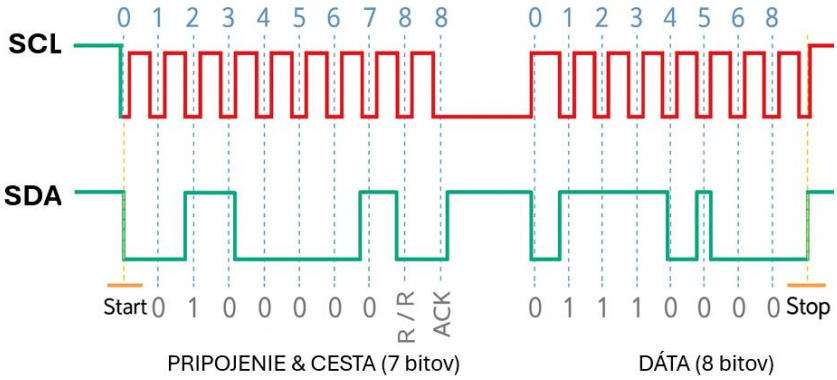
Digitálne komunikačné rozhrania slúžia na prepojenie rôznych zariadení a systémov v rámci inteligentných technických riešení. Umožňujú spoľahlivý prenos údajov medzi senzormi, riadiacimi jednotkami, aktuátormi či monitorovacími prvkami. Efektívna výmena informácií je nevyhnutná pre automatizáciu procesov, optimalizáciu prevádzky a zabezpečenie adaptívneho riadenia v rôznych oblastiach – od priemyslu až po techniku prostredia. [52], [53].

3.1.1 I^2C („*Inter-Integrated Circuit*“)

I^2C (po angl. „Inter-Integrated Circuit“) znamená vnútorná integrovaná zbernica. Ide o zapojenie prostredníctvom iba dvoch káblov čo je veľká výhoda pre jednoduchosť zapojenia:

1) **SDA** („*Serial Data Line*“) – Linka na prenos dát medzi zariadeniami na I^2C zbernici, funguje obojsmerne

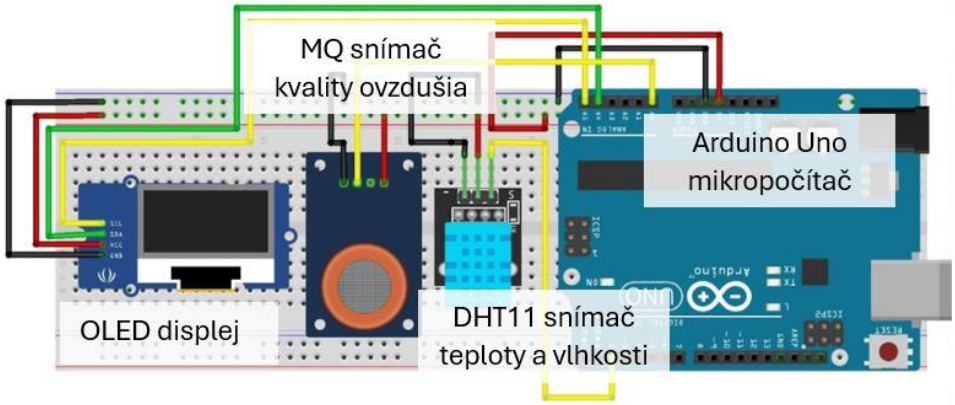
2) **SCL** („*Serial Clock Line*“) - Linka, ktorou master zariadenie generuje hodinový signál na synchronizáciu komunikácie.



Obrázok 3.1 *: Príklad prenos údajov/dát zo snímača cez I^2C komunikáciu*

Každé zariadenie pripojené na I²C zbernicu má **svoju jedinečnú 7-bitovú adresu.** Pri 7-bitovom adresovaní je možné teoreticky pripojiť až 127 zariadení ale v praxi býva na jednej zbernici bežne pripojených 2 až 10 zariadení. Príkladmi I²C adries snímačov je [54]:

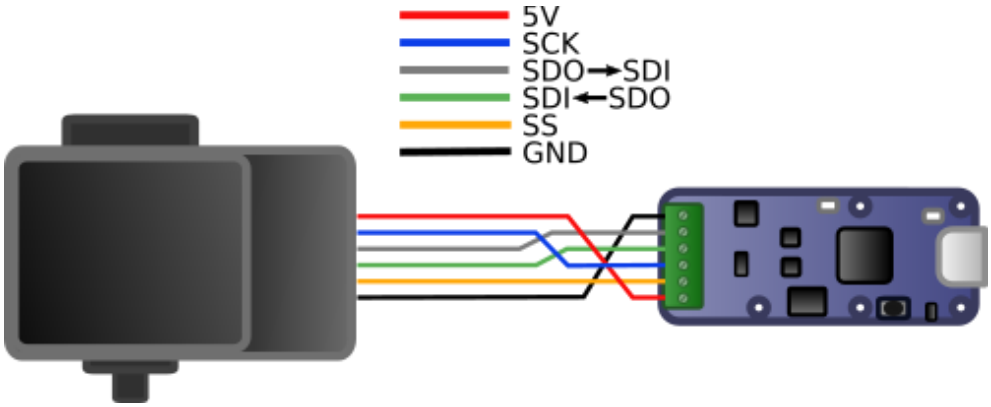
- TC74 – teplotný senzor, I²C adresa: „**0x48**“
- BMP280 – tlakový a teplotný senzor, I²C adresa: „**0x76**“ alebo „**0x77**“
- SSD1306 – OLED displej, I²C adresa: „**0x3C**“



Obrázok 3.2 *: Príklad zapojenia snímačov DHT11, MQ-135 a OLED displeja prostredníctvom analog a I²C pripojenia do Arduino Uno*

3.1.2 SPI („*Serial Peripheral Interface*“)

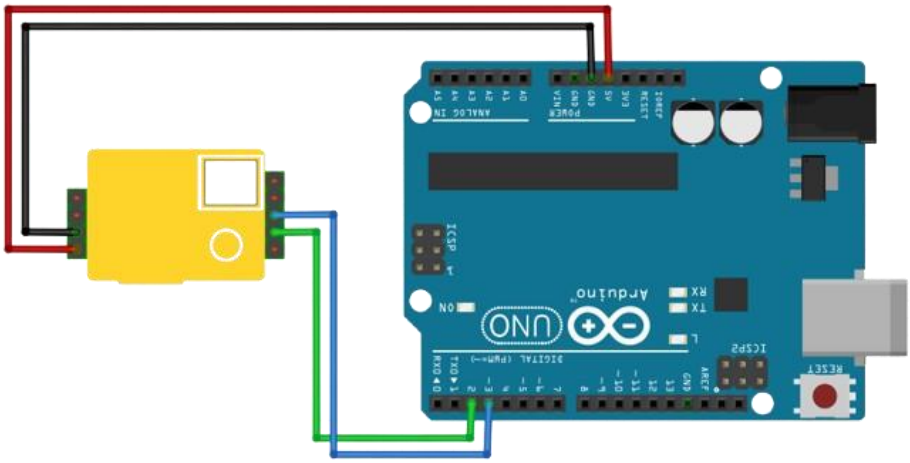
SPI (po angl. „*Serial Peripheral Interface*“) alebo sériové periférne rozhranie je rýchla štvorlinková komunikačná zbernica určená na prepojenie mikrokontrolérov s zariadeniami. Využíva vodiče **MOSI** („*Master Out Slave In*“ – hlavný von, podriadený dnu), **MISO** („*Master In Slave Out*“ – hlavný dnu, podriadený von), **SCK** („*Serial Clock*“ – sériové hodiny) a **SS** („*Slave Select*“ – výber podriadeného). Umožňuje plne duplexný prenos dát a sa využíva pri pripojení digitálnych teplotných senzorov, snímačov kvality ovzdušia, riadení dotykových displejov. Vďaka vysokej rýchlosti a spoľahlivosti je vhodná pre aplikácie s časovo kritickým spracovaním dát.



Obrázok 3.3 *: Príklad zapojenia snímač TZL (AlphaSense) pomocou SPI*

3.1.3 UART („Universal Asynchronous Receiver-Transmitter“)

UART (po angl. „*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*“) alebo „*univerzálny asynchrónny prijímač-vysielač*“ je veľmi populárne sériové komunikačné rozhranie, ktoré využíva dve linky – prímač (**RX**) a vysielač (**TX**). Je obľúbené pre svoju jednoduchú implementáciu a nízke hardvérové nároky. Príkladmi sú WiFi Moduly, niektoré snímače kvality ovzdušia a pod. Najväčšiou nevýhodou, že je možné zapojiť iba jedno zariadenie do portov (napr. na obrázku 3.4 port číslom „2“ a „3“ sú vyhradené iba pre snímač CO_2.



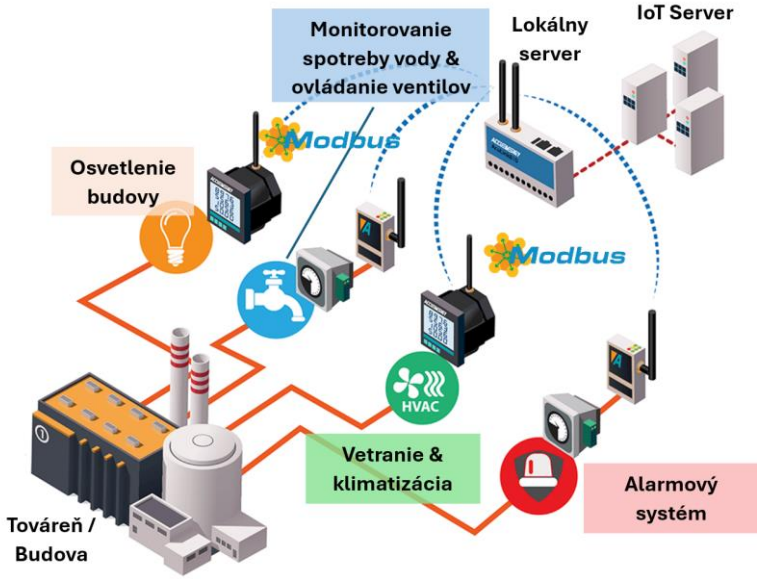
Obrázok 3.4 *: Schéma zapojenia CO_2 snímača MH-Z19 pomocou UART*

3.1.4 MODBUS (RS232 / RS485)

Modbus je jednoduchý a rozšírený komunikačný protokol vyvinutý firmou Modicon v roku 1979. Funguje na modeli master-slave (alebo client-server) a využíva sériovú (RS-232/RS-485). Používa sa hlavne v priemyselných automatizačných systémoch pre čítanie/zápis údajov z/do zariadení [55].

Modbus sa využíva v rôznych aplikáciách, kde je potrebná spoľahlivá a rýchla komunikácia v reálnom čase. Je obľúbený najmä v oblasti techniky prostredia a energetického manažmentu.

1. **Automatizácia budov** : V oblasti techniky prostredia sa Modbus využíva na prepojenie systémov vykurovania, vetrania a klimatizácie (HVAC), osvetlenia, zabezpečenia a energetického manažmentu. Protokol umožňuje vzájomnú komunikáciu medzi rôznymi zariadeniami a efektívne riadenie budov.
2. **Energetické riadiace systémy** : Modbus sa uplatňuje v systémoch sledovania a riadenia spotreby energie, najmä v inteligentných sieťach (SMART grid). Pomocou Modbus RTU alebo Modbus TCP je možné získavať údaje z elektromerov, analyzovať tok energie a riadiť distribučné zariadenia.
3. **Vodné hospodárstvo a čistiarne odpadových vôd** : Modbus umožňuje komunikáciu medzi senzormi, čerpadlami, ventilmi a riadiacimi jednotkami v úpravniach vody a čistiarňach. Vďaka tomu je možné efektívne monitorovať a riadiť procesy úpravy vody a odstraňovania znečistenia.



Obrázok 3.5 *: Schéma prepojenia inteligentných zariadení MODBUS [56]*

Sériové rozhrania RS232 a RS485 patria medzi základné komunikačné protokoly využívané v automatizačnej technike pre prepojenie riadiacich systémov s periférnymi zariadeniami. RS232 je bod-bod rozhranie s typickou prenosovou vzdialenosťou do 15 metrov, pričom pracuje s napäťovými úrovňami ±3 V až ±15 V (logická 1: −3 V až −15 V, logická 0: +3 V až +15 V). Oproti tomu RS485 umožňuje komunikáciu až do 1200 metrov, podporuje až 32 zariadení na jednej zbernici a využíva diferenciálny prenos signálu. Napäťová úroveň medzi vodičmi A a B musí byť minimálne ±200 mV pre detekciu logického stavu, pričom typické úrovne sú ±1,5 V až ±5 V. Príklady zariadení v technike prostredia sú:

1) **Frekvenčné meniče** – napr. na riadenie otáčok ventilátorov alebo čerpadiel v HVAC systémoch (napr. Siemens, Schneider, Delta).
2) **Regulačné ventily s pohonom** – elektricky ovládané ventily pre distribúciu tepla alebo chladu, ktoré majú komunikáciu cez RS485 (napr. Belimo MP-Bus, Modbus RTU).
3) **PLC (Programovateľné logické automaty)** – napr. Siemens S7-200, ktoré majú RS485 pre priemyselnú komunikáciu so senzormi a aktívnymi prvkami.
4) **CO_2, VOC a iné environmentálne senzory** – napr. senzory pre kvalitu vnútorného vzduchu, ktoré komunikujú cez RS485 (Modbus RTU).
5) **Klimatizačné jednotky** – niektoré modely umožňujú riadenie cez RS485 protokol (napr. Mitsubishi, Daikin, LG).
6) **Kondenzačné kotly a tepelné čerpadlá** – s priemyselným rozhraním RS485 na vzdialené riadenie a monitoring (napr. Buderus, Viessmann so systémom EMS alebo Modbus).
7) **Zariadenia merajúce prietok, tlak alebo teplotu** – ako napr. prietokomery, tlakové snímače, teplomery s výstupom RS485.
8) **Elektrostatické odlučovače a filtre TZL** – pokročilejšie verzie umožňujú komunikáciu cez RS485 pre diagnostiku, nastavenie napätia, prúdu alebo čistenia.

3.2 IoT platformy

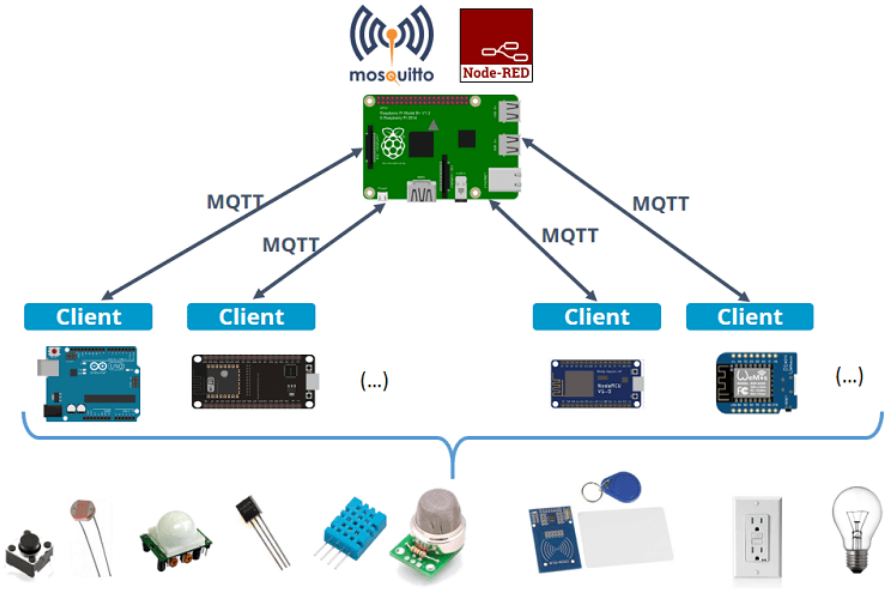
IoT platforma je základ každého SMART riešenia. IoT Platforma je to čo spája užívateľov a všetky snímače, zariadenia a iné prvky SMART riešenia. Umožňujú zbierať, spracovávať, zobrazovať a analyzovať údaje na jednom mieste v reálnom čase, ktoré sa dá sprístupniť na každom počítači, tablete, mobile, dokonca už aj na SMART hodinkách SMART hodinky. Informácie/Dáta môžu byť zobrazené v rôznych formách podľa vhodnosti.

3.2.1 MQTT

Na začiatku je však potrebné, aby snímač/monitorovacie zariadenie bolo schopné preposlať informácie na IoT Platformu. Tu sa často aplikuje MQTT – Protokol na prenos telemetrických údajov na diaľku (z anglického „*Message Queuing Telemetry Transport*“). Bežne sa uplatňuje v systémoch internetu vecí (IoT), najmä tam, kde je potrebné rýchlo a spoľahlivo prenášať údaje zo senzorov do nadriadeného systému aj pri obmedzenej konektivite. Príkladmi služieb sú „*mosquitto*“ alebo „*Node-RED*“ [57].

Príklad zberu údajov z teplotného snímača:

1. Teplotný snímač zmeria hodnotu napr. 22 °C.
2. Táto hodnota sa odošle (publikuje) cez MQTT na server (broker).
3. Iné zariadenie (napr. počítač) túto správu prijme (odoberie) a zobrazí ju.



Obrázok 3.6 *: MQTT komunikácia medzi snímačmi v domácej automatizácie*

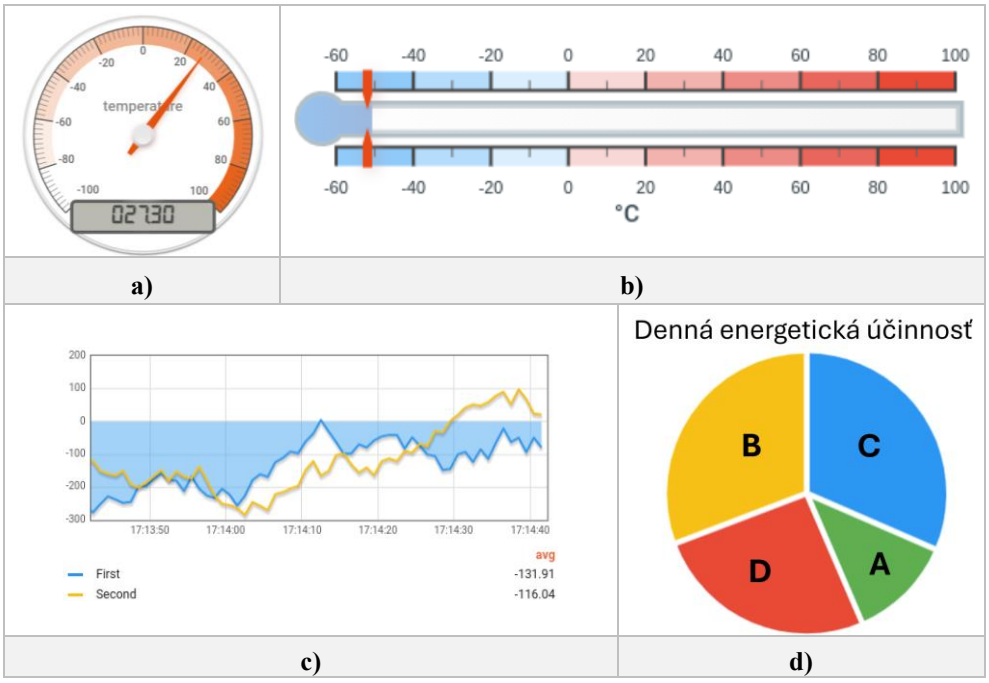
Zozbierané údaje sa často prijímajú vo formáte riadkov alebo v takzvaných „surových dátach“. Aby boli pre používateľa zrozumiteľné a ľahko interpretovateľné, využívajú sa na ich zobrazenie vizuálne prvky nazývané **widgety**. Tieto prvky sú bežnou súčasťou väčšiny platforiem pre internet vecí (IoT) a umožňujú prehľadné zobrazovanie údajov, ich rýchlu analýzu a jednoduchú orientáciu pri rozhodovaní.

Widgety možno rozdeliť do dvoch hlavných skupín: **zobrazovacie widgety**, ktoré slúžia na vizualizáciu údajov (napr. grafy, merače, indikátory), a **ovládacie widgety**, ktoré umožňujú používateľovi interagovať so systémom (napr. tlačidlá, prepínače, posuvníky).

Obrázok 3.7 *: Základne druhy informačných blokov "widgets" na IoT platformu*

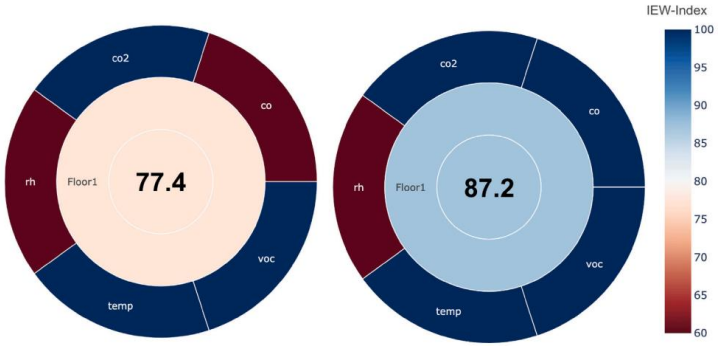
3.2.2 Zobrazovacie widgety

Zobrazovacie widgety sú výstupné prvky grafického používateľského rozhrania, ktoré slúžia výhradne na vizualizáciu údajov zo SMART systémov. Na rozdiel od ovládacích prvkov neumožňujú používateľovi priame zasahovanie do systému ani jeho riadenie – poskytujú len prehľadné zobrazenie aktuálneho stavu alebo historických dát. Medzi najčastejšie formy zobrazovacích widgetov patria grafy, merače, indikátory alebo farebné signalizačné prvky (obrázok 3.8)

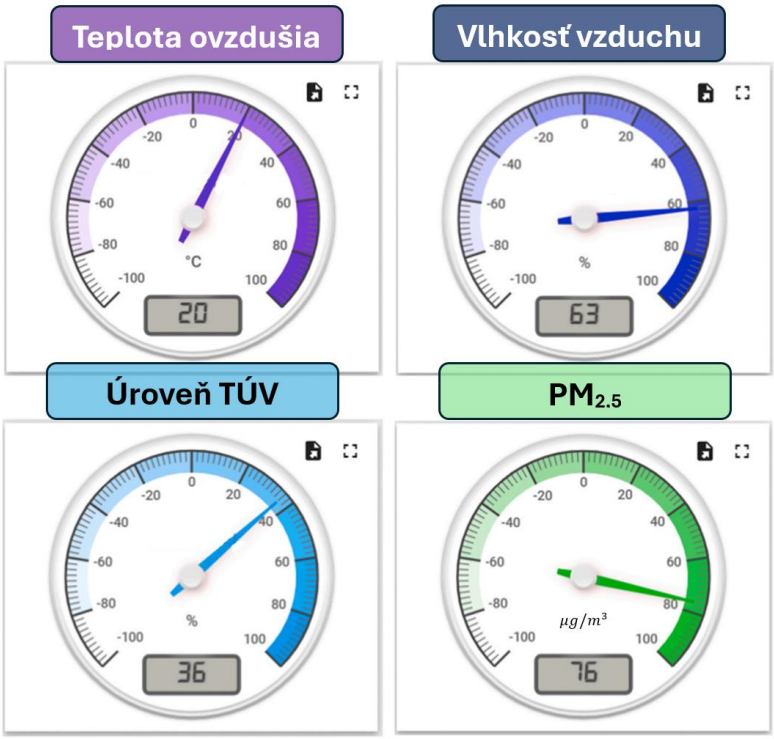


Obrázok 3.8 *: Základne druhy informačných widgetov a) ručičkový ukazovateľ b) teplomer c) čiarový graf (s priemerom) d) koláčový diagram [58]*

Widgety môžu obsahovať aj doplnkové vizuálne a zvukové upozornenia, ktoré zvyšujú informačnú hodnotu zobrazených údajov. Medzi vizuálne prvky patrí napríklad zmena farby grafu alebo indikátora pri prekročení nastavených limitných hodnôt, čo používateľa okamžite upozorní na odchýlku. Zvukové signály, ako sú pípnutia alebo alarmy, môžu signalizovať poruchy, nebezpečné stavy alebo potrebu zásahu. Tieto rozšírenia zlepšujú prehľadnosť systému a umožňujú používateľovi rýchlo a efektívne reagovať na zmeny v prevádzke.



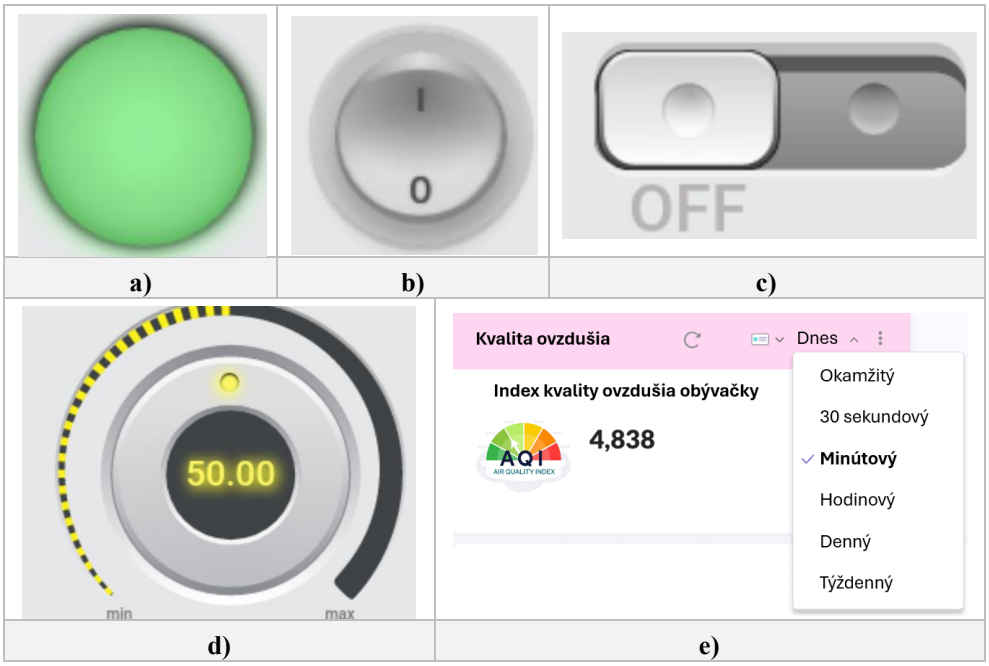
Obrázok 3.9 *: Informačný widget na zobrazovanie IEW indexu*



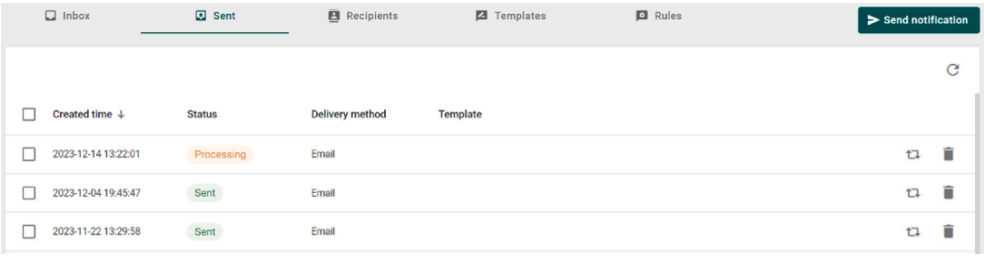
Obrázok 3.10 *: Dynamické informačné bloky/panely senzorových dát v rozhraní ThingsBoard.*

3.2.3 Ovládacie widgety

Na rozdiel od zobrazovacích widgetov, ovládacie prvky umožňujú používateľovi aktívne zasahovať do fungovania systému. Ide o tlačidlá, posuvníky, výberové polia alebo prepínače, pomocou ktorých možno meniť nastavenia alebo spúšťať konkrétne akcie. Príklady zahŕňajú zapnutie ventilátora, nastavenie požadovanej teploty či prepnutie režimu z automatického na manuálny. Aby tieto zásahy fungovali správne, musí byť vopred presne definované, ako má systém na daný vstup reagovať, a táto logika musí byť podporená v softvéri danej IoT platformy.



Obrázok 3.11 *: Ovládateľné prvky/widgety IoT platformy a) príkaz podľa farby b) tlačidlo ON/OFF c) posúvač ON/OFF d) termostat e) výber časového intervalu [58]*



Obrázok 3.12 *: Automatická emailová notifikácia stavu*

3.2.1 Prehľad IoT Platforiem

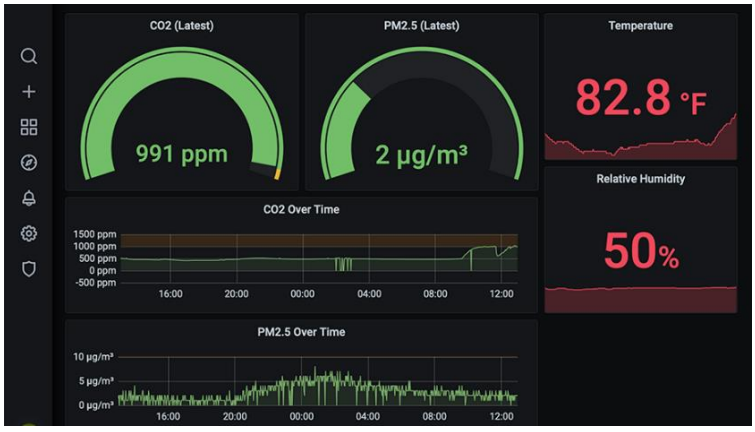
ThingSpeak od MathWorks je cloudová platforma určená na zber a vizualizáciu údajov z IoT zariadení. Medzi jej hlavné výhody patrí jednoduchosť použitia a priama integrácia s MATLABom na analýzu dát. Výrazným obmedzením je však maximálny počet len 8 kanálov na jeden zdroj a úplná absencia ovládacích prvkov či interakcie so systémom.

Mathworks: ThingSpeak

Obrázok 3.13 *: Príklad platformy ThingSpeak na tablete*

Grafana

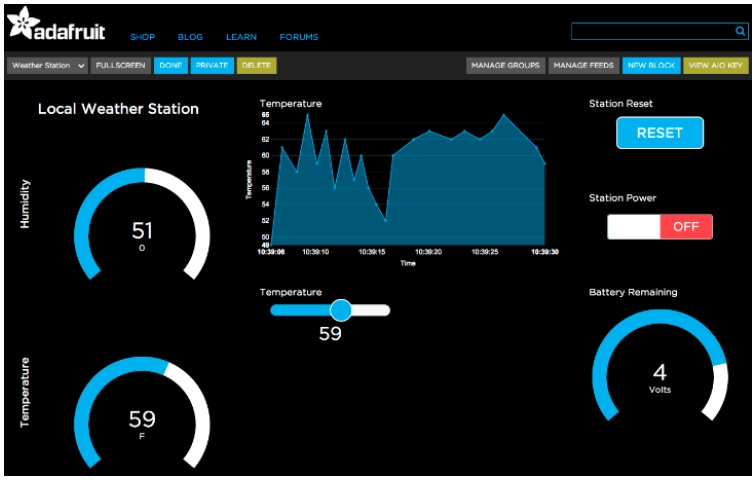
Grafana je rovnako nástroj na vizualizáciu dát (bez spoplatnenia), ktorý umožňuje vytvárať interaktívne a prispôsobiteľné „dashboardy“. Podporuje širokú škálu dátových zdrojov (napr. InfluxDB, MQTT, Prometheus).



Obrázok 3.14 *: Príklad IoT platformy na Grafana : Domáci monitorovací systém kvality ovzdušia (PM/CO_2)*

Adafruit IO

Adafruit IO je cloudová platforma určená na jednoduché pripojenie mikrokontrolérov a IoT zariadení, ako sú Arduino, ESP32, Raspberry Pi, či BBC micro:bit. Je navrhnutá s dôrazom na používateľskú prívetivosť a umožňuje rýchle vytváranie dashboardov, vizualizáciu údajov a jednoduché ovládanie zariadení cez internet. Platforma podporuje protokoly MQTT a HTTP a ponúka knižnice priamo pre Arduino IDE aj MakeCode. Je ideálna pre začiatočníkov a výučbu, no nevýhodou sú obmedzenia v bezplatnej verzii – napríklad počet feedov, frekvencia aktualizácií a ukladanie histórie údajov

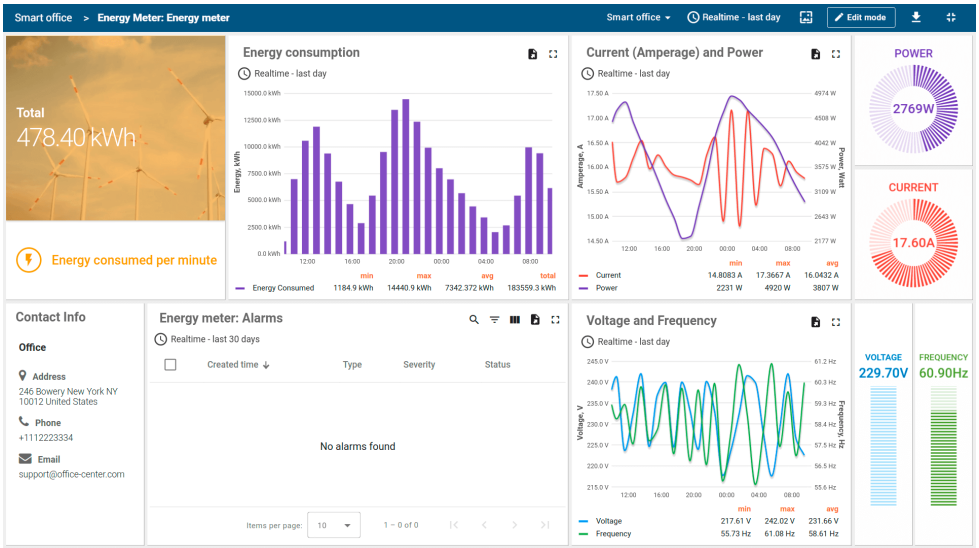


Obrázok 3.15 *: Príklad IoT platformy na monitorovania počasia na Adafruit IO*

ThingsBoard

ThingsBoard je výkonná open-source IoT platforma určená na zber, spracovanie, vizualizáciu a riadenie údajov zo zariadení v reálnom čase. Podporuje štandardné protokoly ako MQTT, HTTP či CoAP a umožňuje tvorbu interaktívnych ovládacích panelov s rôznymi typmi widgetov vrátane tlačidiel, grafov, indikátorov či prepínačov. Systém tiež ponúka pokročilé možnosti automatizácie pomocou pravidiel, alarmov a spätnej väzby pre riadenie zariadení.

Hlavnou výhodou ThingsBoardu je jeho flexibilita, obojsmerná komunikácia a možnosť plnej správy používateľov, rolí a dátovej štruktúry. Platforma však vyžaduje zložitejšiu inštaláciu a technické znalosti pri konfigurácii servera, databázy a IoT brokerov, čo môže byť nevýhodou pre menej skúsených používateľov v porovnaní s jednoduchšími riešeniami ako ThingSpeak.



***Obrázok 3.16**: Príklad inteligentného merača elektrickej spotreby na ThingsBoard*

Zobrazený dashboard je vizualizačné a monitorovacie rozhranie inteligentného systému založeného na IoT platforme, ktoré v reálnom čase zhromažďuje, spracúva a prezentuje údaje z viacerých snímačov prostredia. Umožňuje súčasné sledovanie teploty, relatívnej vlhkosti vzduchu, vlhkosti pôdy a hladiny vody prostredníctvom tabuliek časových radov a stĺpcových grafov. Pre SMART systém je takéto riešenie užitočné najmä vďaka prehľadnej interpretácii dát, rýchlej identifikácii extrémnych alebo nežiaducich stavov a podpore rozhodovania. Vizualizácia historických aj aktuálnych hodnôt tvorí základ pre automatizované riadenie, optimalizáciu prevádzky a implementáciu pokročilých regulačných algoritmov.

Z hľadiska praktickej aplikácie má takto koncipovaný dashboard význam aj pre vyhodnocovanie dlhodobých trendov a správania systému v čase. Zobrazenie štatistických ukazovateľov, ako sú minimálne, maximálne, priemerné a posledné namerané hodnoty, umožňuje rýchlu diagnostiku stability prostredia a odhalenie odchýlok od požadovaných prevádzkových podmienok. Centralizované rozhranie zároveň znižuje nároky na manuálny dohľad nad systémom a vytvára predpoklad pre jeho rozšírenie o automatické alarmy, prediktívne funkcie alebo prepojenie s nadriadenými riadiacimi systémami. Takýto prístup zvyšuje spoľahlivosť SMART riešení, podporuje efektívne hospodárenie so zdrojmi a prispieva k vyššej energetickej aj prevádzkovej efektívnosti celého systému.

Obrázok 3.17 *: IoT platforma "ThingsBoard" zavlažovacieho systému [59]*

3.3 Komunikačné systémy pre inteligentnú domácnosť

Inteligentná domácnosť spája automatizáciu, zber dát a digitálne riadenie technických systémov budovy s cieľom zvýšiť komfort, bezpečnosť a energetickú efektívnosť. Prepojením vykurovacích, vetracích, osvetľovacích a elektrických sústav vzniká integrované riešenie schopné reagovať na správanie užívateľov aj aktuálne prevádzkové podmienky.

3.3.1 Systémy inteligentnej domácnosti

Systémy inteligentnej domácnosti založené na modulárnej automatizácii sa zameriavajú na prepojenie širokého spektra snímačov, ovládacích prvkov a centrálnych komunikačných jednotiek. Umožňujú riadenie osvetlenia, teploty, vlhkosti, zabezpečenia a energetickej spotreby v domácnosti. Vysoká miera kompatibility s rôznymi softvérovými platformami zabezpečuje flexibilné začlenenie do existujúcich inteligentných ekosystémov. Možnosť vytvárania automatizácií a scenárov prispieva k zvýšeniu komfortu používateľa, bezpečnosti objektu a energetickej účinnosti prevádzky, pričom dôležitým aspektom je aj jednoduchá inštalácia a dostupnosť riešenia. Na ilustračnom obrázku je znázornený ekosystém inteligentnej domácnosti pozostávajúci z centrálnej riadiacej jednotky, ktorá komunikuje s rôznymi typmi snímačov, napríklad pohybu, otvorenia, teploty, vibrácií či úniku vody, a zároveň ovláda výstupné prvky, ako sú inteligentné svetelné zdroje alebo spínacie moduly.

Obrázok 3.18 *: AQUARA inteligentná domácnosť pre kúpeľňu*

Inteligentná domácnosť môže byť realizovaná ako prehľadne prepojený systém snímačov a ovládacích prvkov, ktoré umožňujú automatizované riadenie rôznych procesov v interiéri. Na ilustračnom obrázku je znázornená centrálna riadiaca jednotka obklopená komponentmi, ako sú snímač pohybu, snímač teploty a vlhkosti, termostat, detektor dymu, snímač úniku vody či inteligentný spínací prvok. Tieto zariadenia medzi sebou bezdrôtovo komunikujú a umožňujú monitorovanie vnútorného prostredia, vytváranie automatických reakcií na zmeny podmienok a vzdialené ovládanie domácnosti. Takéto riešenie je kompatibilné s modernými softvérovými aplikáciami a prispieva k zvýšeniu komfortu používateľa, bezpečnosti objektu a energetickej úspornosti v bežnom bývaní.

Obrázok 3.19 *: Tesla inteligentná domácnosť riadenie vykurovania, vetrania*

3.3.2 Centralizované huby

Niektoré inteligentné domáce zariadenia ponúkajú okrem hlasového ovládania aj funkcie súvisiace s kvalitou vnútorného prostredia. Vybrané riešenia obsahujú snímače na detekciu pohybu a umožňujú bezkontaktné sledovanie kvality spánku pomocou radarových technológií. Tieto systémy dokážu monitorovať parametre ako dýchanie, kašeľ alebo poruchy spánku bez potreby nositeľných zariadení. Iné inteligentné prvky disponujú zabudovanými teplotnými snímačmi, ktoré umožňujú automatizovať vykurovanie alebo ventiláciu, napríklad spustením ventilátora pri prekročení nastavenej teploty. Takéto zariadenia možno integrovať do inteligentnej domácnosti na účely monitorovania a automatizácie mikroklimatických podmienok v interiéri. [60] [61].

a) **b)**

Obrázok 3.20 *: Centralizované inteligentné huby a) Google Nest Hub (2nd gen) b) EÚ Amazon Echodot (5th. gen)*

3.3.3 Mini-server

Centrálna riadiaca jednotka inteligentných domov a budov slúži ako hlavný prvok automatizačného systému. Zabezpečuje integráciu a koordináciu rôznych technológií, ako sú vykurovanie, osvetlenie, tienenie, zabezpečenie, vetranie, energetické hospodárstvo a ďalšie podporné systémy. Jej úlohou je zber a spracovanie údajov zo snímačov, realizácia riadiacej logiky a odosielanie príkazov výstupným prvkom. Vďaka kombinácii digitálnych a analógových vstupov a výstupov, sieťovej komunikácie a podpore rozširujúcich modulov umožňuje flexibilné a škálovateľné riešenie pre rôzne typy objektov [62]. Aplikácie v energetike sú:

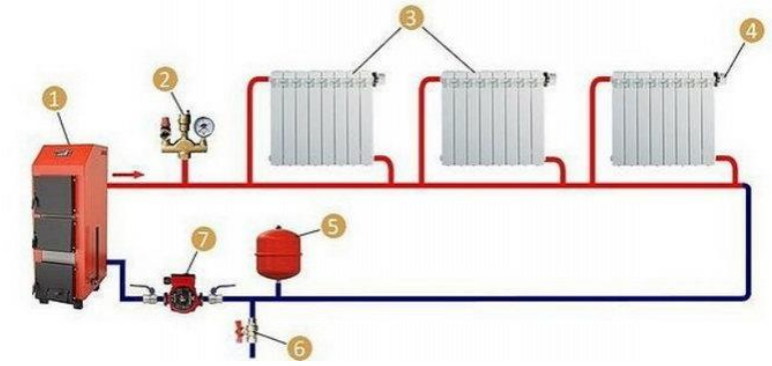
- **Riadenie vykurovania a prípravy teplej vody** – Loxone Miniserver optimalizuje chod kotla, tepelného čerpadla alebo akumulačnej nádrže na základe teplotných snímačov a časových režimov. Tým sa znižuje spotreba energie a zvyšuje sa celková energetická účinnosť systému.
- **Optimalizácia spotreby elektrickej energie v budove** – Riadiaca jednotka sleduje okamžitú spotrebu a prispôsobuje prevádzku energeticky náročných zariadení podľa dostupnej energie. Umožňuje tak znížiť špičkové zaťaženie a efektívnejšie využívať elektrickú energiu.
- **Integrácia fotovoltického systému** – Loxone Miniserver spracováva údaje o výrobe elektriny z fotovoltických panelov a riadi spotrebiče tak, aby sa maximalizovalo využitie vlastnej výroby. Prebytočná energia môže byť smerovaná do akumulácie alebo využitá na ohrev vody.

4 SMART TECHNOLÓGIE VO VYKUROVACÍCH SÚSTAVÁCH

Inteligentné technológie nachádzajú čoraz širšie uplatnenie aj v oblasti vykurovania, kde otvárajú nové možnosti pre efektívnejšie riadenie spotreby paliva, optimalizáciu prevádzky a výrazné zníženie emisií. V čase rastúcich nárokov na energetickú hospodárnosť a ochranu životného prostredia je integrácia SMART riešení do vykurovacích systémov logickým krokom smerom k udržateľnosti. Využívanie senzorov, dátovej analýzy a umelej inteligencie umožňuje reagovať na zmeny v reálnom čase a prispôsobiť chod zariadení aktuálnym podmienkam. Táto kapitola sa venuje konkrétnym možnostiam aplikácie moderných SMART technológií v bežných vykurovacích sústavách rodinných domov ale aj centrálneho zásobovania tepla.

4.1 SMART hlavice vykurovacích telies

Na obrázku 4.1 je zobrazená schéma jednorúrovej vykurovacej sústavy. Voda vo vykurovacej sústave sa ohrieva v zdroji tepla (1), odkiaľ je hnaná obehovým čerpadlom (7) cez regulačné armatúry (2) do vykurovacích telies (3, 4), ktoré odovzdávajú teplo do obytných priestorov. Zvýšený tlak v sústave reguluje expanzná nádoba (5). Prebytok vody sa vypúšťa cez spätný ventil (6) do odtoku. Tento spôsob vykurovania je jednoduchý, úsporný na materiál, vhodný len pre menšie objekty, kde nie je potrebné oddelené vetvenie vykurovania.



Obrázok 4.1 *: Schéma jednorúrovej vykurovacej sústavy [63]*

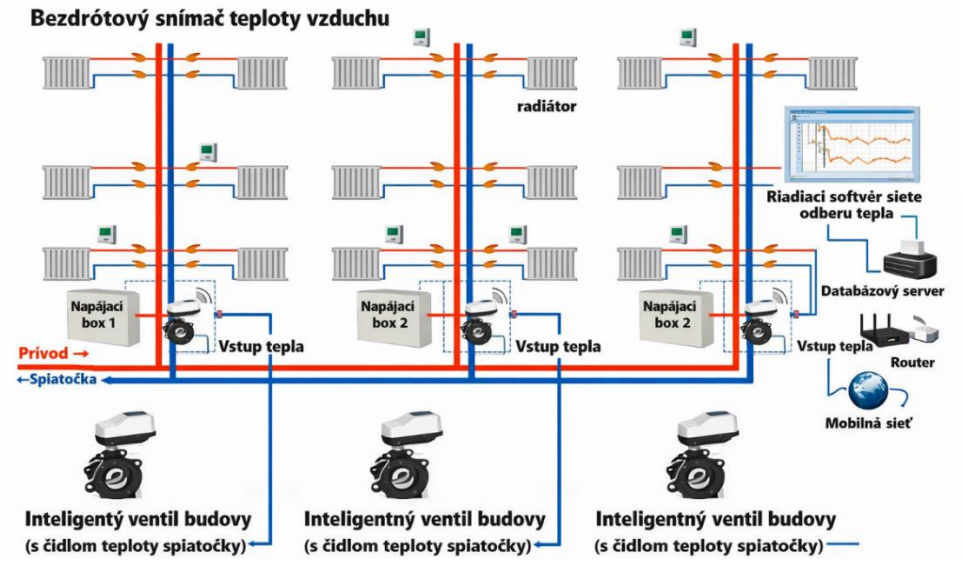
Bežné vykurovacie teleso je možné jednoducho zmeniť na inteligentné montážou WiFi-ovládaného elektromotorického pohonu na uzatvárací ventil. Je to bezdrôtové zariadenie navrhnuté na riadenie ventilov podlahového vykurovania a doskových vykurovacích telies teplovodných vykurovacích sústav. Na to aby

mohlo fungovať musí obsahovať komunikačné rozhrania, napríklad technológiu Loxone. Takéto zariadenia pri ovládaní ventilov dokážu vyvinúť uzatváraciu silu až 100 N. [64].

a) **b)**

Obrázok 4.2 *: Automatizovaný elektromotor na bezdrôtové ovládanie ventilov radiátora [64]*

Aplikáciou inteligentných ventilov s dynamickým riadením podľa spätnej teploty na vyváženie distribúcie tepla, kedy sa cieľová teplota určuje na základe tepelných charakteristík budov je možné pomocou modelu s lineárnou korekciou znížiť nerovnováhu teplôt miestností s rovnakým účelom v administratívnych budovách a tak dosiahnuť úsporu energie až 3,73 % [65].



Obrázok 4.3 *: Schéma zapojenia inteligentných ventilov vo vykurovacej sústave*

Regulačné ventily s inteligentnými hlavicami vykurovacích telies je možné ovládať prostredníctvom webových a mobilných aplikácií. Jednou z nich je webová aplikácia SQUID, ktorej užívatelia môžu využívať funkciu zadania preferovaných

teplôt pri rôznych cenách. Algoritmus v tejto aplikácii pomocou Bayesovej regresie nastavuje cieľovú teplotu podľa citlivosti na cenu. Aplikácia zobrazuje teploty, tarify a návrhy AI [66].

Obrázok 4.4 *: Užívateľské rozhranie webovej aplikácie SQUID [66]*

Možnosti zobrazenia aplikácie:

A. **Týždenný rozvrh vykurovania:** Používateľ si pri prvom nastavení aplikácie vytvára individuálny rozvrh vykurovacích profilov.

B. **Bočný panel s informáciami:** Bočný panel aplikácie neustále zobrazuje aktuálnu teplotu z ventilu a cieľovú teplotu určenú AI.

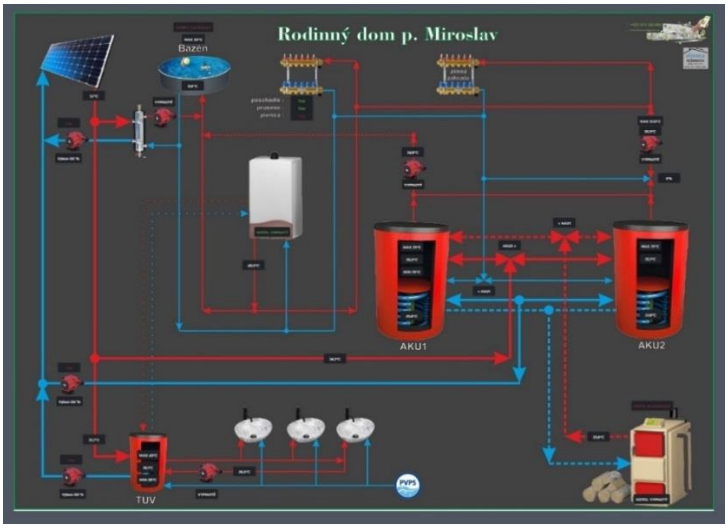
C. **Vizualizácia správania AI:** Pri kliknutí na ľubovoľný vykurovací profil sa zobrazí vizualizácia zmien cieľovej teploty v závislosti od ceny.

Notifikácie rozhodnutí AI: Používateľ má prístup k prehľadu vlastných teplotných vstupov a rozhodnutí AI pre každú polhodinu.

4.2 SMART rozdeľovače vykurovacej sústavy

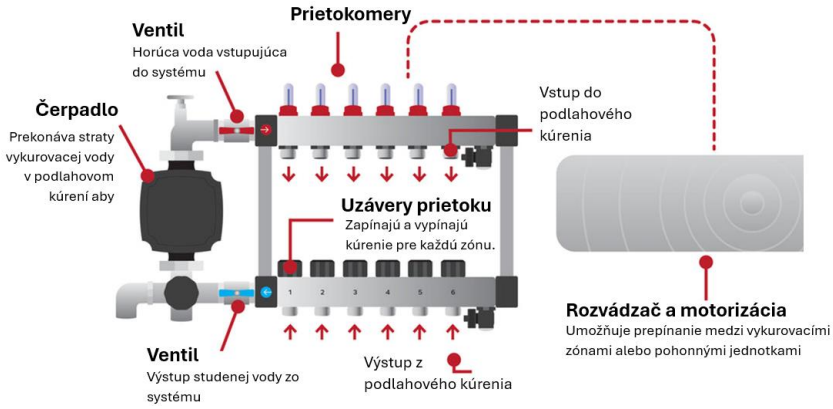
Na obrázku 4.5. je zobrazená schéma dvojrúrovej vykurovacej sústavy rodinného domu s hlavnými zdrojmi tepla elektrokotlom a solárnymi kolektormi ktoré ohrievajú vodu v akumulačných nádržiach AKU1 a AKU2 a záložným zdrojom tepla kotlom na drevnú biomasu. Teplo je distribuované do TUV, podlahového vykurovania, vykurovacích telies a bazéna. Cirkuláciu teplej vody zabezpečujú viaceré obehové čerpadlá. Bežná vykurovacia sústava doplnená o inteligentné riadenie optimalizuje tok energie medzi zdrojmi, zásobníkmi

a vykurovacími telesami. Takéto riešenie zvyšuje účinnosť a komfort vykurovania a znižuje spotrebu a náklady na energie. [67].



Obrázok 4.5 : *Vykurovacia sústava [67]*

Na obrázku 4.6 je zobrazená inteligentné riadenie vetvových prietokových ventilov rozdeľovača.



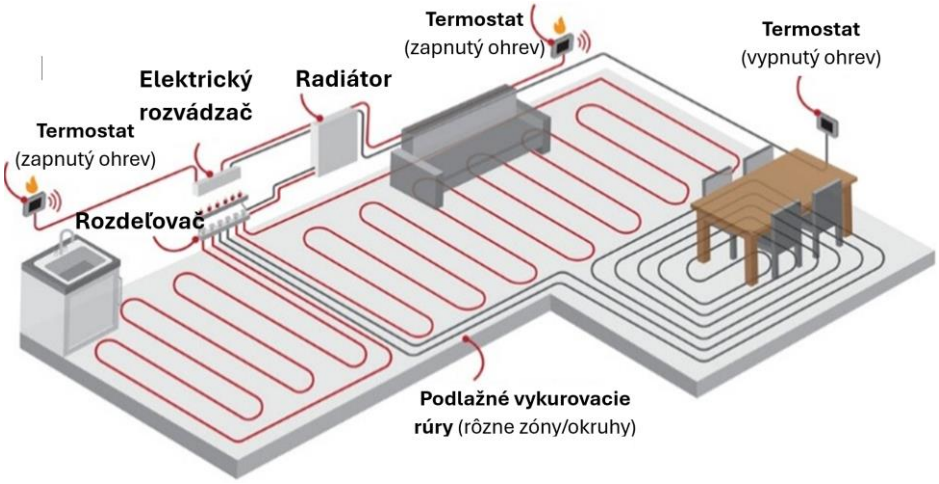
Obrázok 4.6 *: SMART rozdeľovač [68]*

Teplá voda prúdi zo zdroja tepla cez guľový ventil a čerpadlo do hornej časti rozdeľovača. Odtiaľ ide cez výstupné rúrky do podlahových slučiek. Spodná časť prijíma vratnú vodu z okruhov späť do systému. Elektrické ovládanie zabezpečuje riadiace centrum.

4.3 SMART rozdeľovače podlahového vykurovania

Podlahové vykurovanie je moderný spôsob distribúcie tepla, ktorý zabezpečuje rovnomerné a komfortné vykurovanie miestnosti zdola. Teplo sa šíri sálaním cez podlahu, čo vytvára príjemné prostredie bez prúdenia vzduchu. Tento spôsob vykurovania je energeticky efektívny a esteticky nenápadný. Na obrázku 4.7 je zobrazená schéma podlahového vykurovania. Podlahové vykurovanie tvorí [68]:

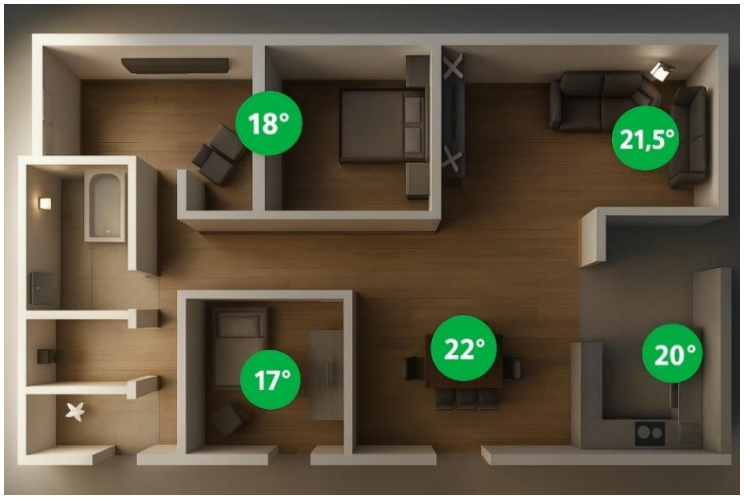
A. **Zdroj tepla :** Zariadenie, ktoré zabezpečuje ohrev vody v systéme – najčastejšie ide o kotol, tepelné čerpadlo alebo centrálny zdroj tepla.
B. **Rozdeľovač :** Slúži na rozdelenie vykurovacej sústavy na viacero okruhov, umožňuje ich reguláciu a prípadne aj uzavretie.
C. **Vykurovacie rúrky :** Slúžia na prenos tepla do miestnosti – pri vodnom systéme ide o plastové rúrky, pri elektrickom o odporové vodiče alebo rohože.
D. **Tepelná izolácia :** Ukladá sa pod rúrky alebo káble, zabraňuje stratám tepla do podlahovej konštrukcie a zvyšuje účinnosť celého systému.
E. **Termostat :** Je ovládacie zariadenie, ktoré reguluje teplotu v miestnosti na základe aktuálnej potreby, môže byť manuálny, digitálny alebo SMART.
F. **Obehové čerpadlo :** Zabezpečuje cirkuláciu teplej vody v uzavretom okruhu podlahového vykurovania (platí pre vodné systémy).



***Obrázok 4.7** : Schéma podlahového vykurovania so zónovou reguláciu teploty [68]*

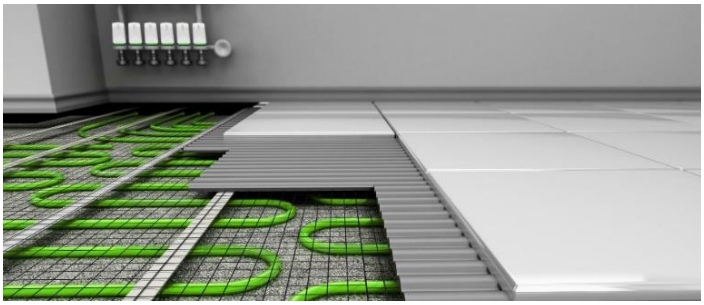
Keďže každá miestnosť v dome má odlišný účel, mali by mať individuálne nastavené rôzne teplotné a vlhkostné podmienky. Podľa účelu priestoru by mala byť teplota optimalizovaná osobitne pre každú zónu. Pre spánkové zóny sa ako ideálna považuje teplota približne **18 °C**, zatiaľ čo v kúpeľni je žiaduca vyššia teplota okolo

23 °C a v obývacej miestnosti približne **21,5 °C**. Tieto hodnoty sa môžu počas dňa dynamicky prispôsobiť dennému režimu podľa pobytu osôb v jednotlivých priestoroch, pričom samotné riadenie je zabezpečované automatizovaným systémom termostatmi umiestnenými v priestore každej zóny bez potreby manuálneho zásahu.



Obrázok 4.8 *: Teplotné zóny v obytnom prisetore*

Na obrázku 4.9 sú systémové dosky podlahového vykurovania s rúrkami umiestnenými pod dlažbou a riadiacim rozdeľovačom umiestneným na stene. Takéto SMART riešenie podlahového vykurovania využíva miniserver, zónové ventily a senzory na inteligentné, zónové riadenie teploty. Systém sa prispôsobuje denným zvykom, šetrí energiu a umožňuje ovládanie cez aplikáciu alebo plne automaticky.



Obrázok 4.9 : *Podlahové vykurovanie s Wi-Fi rozdeľovačom [69]*

Na obrázku 4.10 sú zobrazené elektrotermické pohony namontované na rozdeľovači podlahového vykurovania. Každý pohon zodpovedá jednej vykurovacej vetve (zvyčajne jednej miestnosti alebo zóne). Tieto pohony pomocou elektrického impulzu otvárajú alebo zatvárajú prietok vody, čím zabezpečujú požadovanú teplotu.

Obrázok 4.10 *: WiFi inteligentný systém na ovládanie rozvádzača podlahového vykurovania*

4.4 SMART konvektory

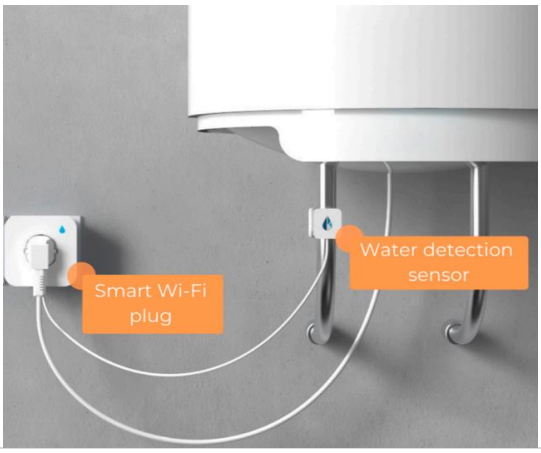
Obytné priestory je možné vykurovať aj elektrickými konvektorovými ohrievačmi. Medzi elektrické inteligentné ohrievače sa radí konvektor, ktorý kombinuje infračervený a konvekčný ohrev. Pokryje tepelné straty miestnosti podľa veľkosti s menovitým výkonom od 400 do 1200W. Vyznačujú sa tenkým dizajnom. Majú Wi-Fi ovládanie cez mobilnú aplikáciu s termostatom, časovačom a senzorom pádu.

Obrázok 4.11 *: Inteligentný konvektor*

4.5 SMART ohrievače vody

Inteligentné zariadenie na ohrev vody v domácnostiach na ostrove São Miguel (Portugalsko), preukázalo za 6 mesiacov schopnosť znížiť spotrebu energie na ohrev vody v priemere o 1,33 kWh denne na jedného používateľa, čo zodpovedá 26,43 % úspore energie a zároveň 35,5 % úspore nákladov. V prepočte na finančný prínos to predstavuje priemernú ročnú úsporu 97,63 € na spotrebiteľa, čo prevyšuje obstarávaciu cenu zariadenia vo výške 85 €. V širšom meradle skupina 2127 týchto zariadení dosiahla zníženie dennej spotreby elektriny o 2832 kWh, čo predstavuje

0,21 % z celkovej produkcie elektrickej energie ostrova a súčasne umožnilo zníženie termálnej výroby elektriny o 0,37 %. Tieto úspory sa prejavili aj v environmentálnej rovine – **zariadenia každoročne znižujú emisie oxidu uhličitého o 693,31 ton** [70].



a)

b)

Obrázok 4.12 : *SMART regulácia elektrického ohrievača [70]*

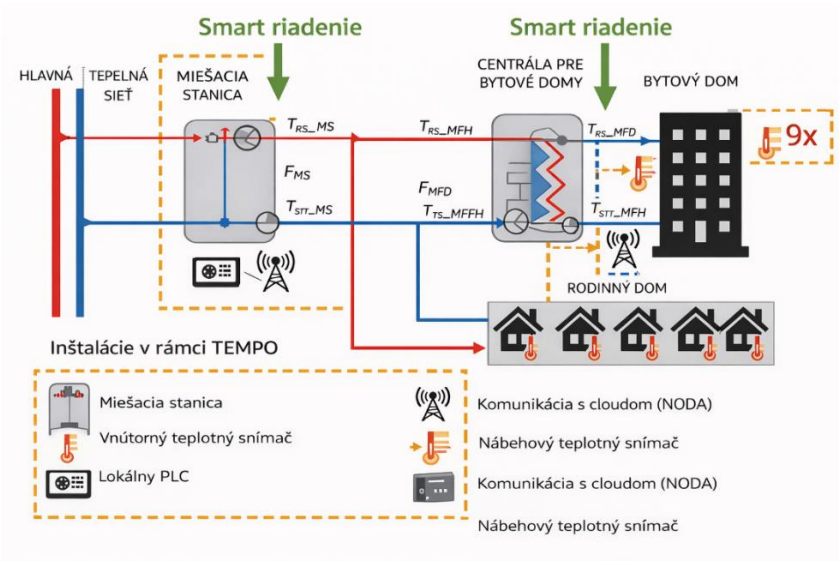
Tabuľka 4.1 *: Redukcia tepla aplikovaním SMART regulácie elektrických kotlov*

Domácnosť	**Tradičná regulácia** (kWh)	**SMART regulácia** (kWh)	**Redukcia spotreby** (%)
1	10.9	8.79	12.88
2	2.52	2.22	11.90
3	5.3	3.51	30.22
4	4.61	3.37	27.84
5	2.90	2.14	26.21
6	7.78	4.82	38.05

4.6 SMART regulácia sústav CZT

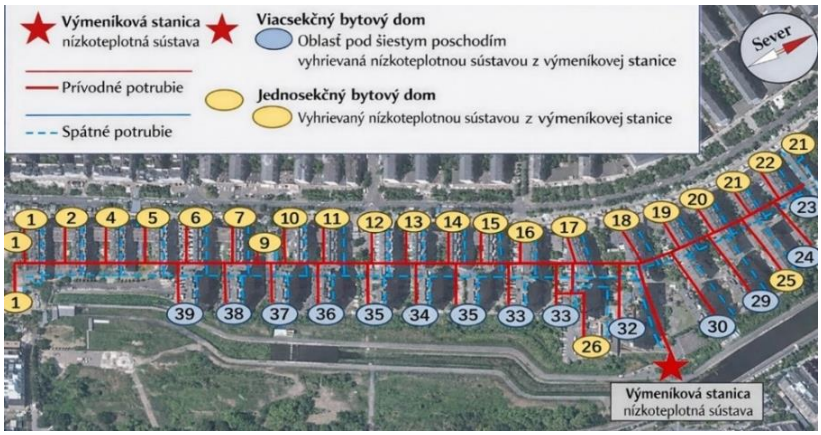
Na obrázku 4.13 je zobrazená aplikácia inteligentného regulačného systému v sieti CZT v meste Brescia s použitím cloudovej platformy na zber dát v reálnom čase a prenos riadiacich signálov. Touto aplikáciou sa podarilo znížiť denné priemerné teploty vratnej vody váženej podľa prietoku o takmer 1 K, pričom okamžité zníženie bolo až 15 K. Regulovaním teploty prívodu sa podarilo znížiť

denné špičky dodávky tepla v priemere o 262 kWh (34 %) znížením tepelnej záťaže [71].



Obrázok 4.13 *:Schéma inteligentného regulačného systému rozvodu CZT [71]*

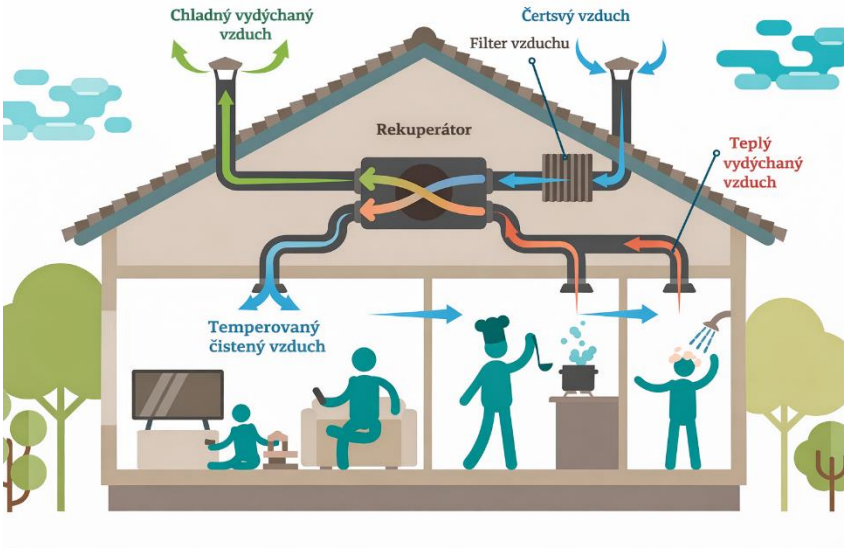
Podobnou aplikáciou inteligentného regulačného systému siete CZT ulice domových bytoviek v meste Leibnitz, ktorá využívala optimalizačný systém riadenia podľa predikcie dopytu na strane výroby a riadenie odberu na strane spotreby sa podarilo znížiť emisie CO_2 o 35 % a náklady na palivo o 7 % [72].



Obrázok 4.14 *: Schéma zapojenia CZT ulice domových bytoviek [72]*

5 SMART TECHNOLÓGIE VO VETRACÍCH SÚSTAVÁCH

Moderné vetracie systémy významne prispievajú k zabezpečeniu kvalitného vnútorného prostredia, a ich účinnosť sa dá výrazne zvýšiť pomocou inteligentných technológií. SMART riešenia umožňujú automatizované riadenie výmeny vzduchu na základe aktuálnych podmienok, ako sú koncentrácia CO_2, teplota, vlhkosť alebo pohyb osôb. Vďaka vzájomnému prepojeniu senzorov, riadiacej logiky a dátovej analýzy možno optimalizovať prevádzku systémov s ohľadom na komfort aj spotrebu energie. Táto kapitola sa venuje možnostiam implementácie inteligentného vetrania v obytných aj verejných budovách s dôrazom na praktickú realizovateľnosť a efektívnosť.



Obrázok 5.1 *: Schéma SMART ventilačnej sústava s tepelným výmenníkom [73]*

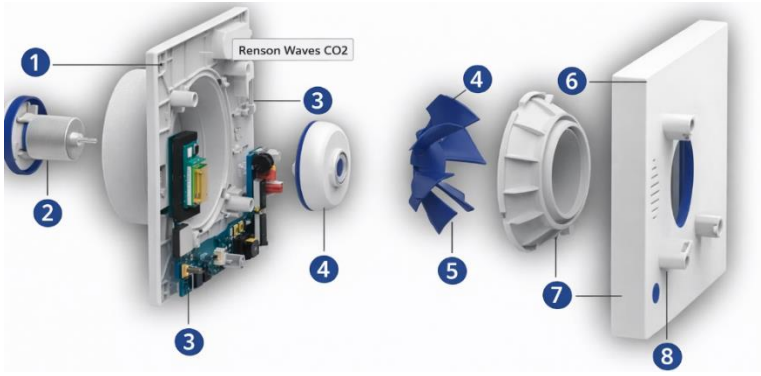
- Spôsoby zabezpečenia výmeny vzduchu v budovách možno rozdeliť do dvoch základných kategórií:
- **Prirodzená ventilácia** – prebieha na základe prirodzenej konvekcie vzduchu spôsobenej rozdielmi v teplote a tlaku. Typickými príkladmi sú vetranie prostredníctvom okien, vetracích šácht, mriežok alebo difúznych otvorov v obvodových konštrukciách.
- **Mechanická (nútená) ventilácia** – využíva aktívne zariadenia na pohyb vzduchu, najčastejšie ventilátory. Patrí sem napríklad odsávanie pomocou digestora v kuchyni alebo riadená rekuperačná jednotka v nízkoenergetických stavbách.

5.1 Decentralizované vetranie

Decentralizované vetracie systémy predstavujú flexibilné riešenie zabezpečenia výmeny vzduchu v jednotlivých miestnostiach bez potreby rozsiahlych rozvodov a centrálnej vzduchotechnickej jednotky. Ich výhodou je jednoduchá inštalácia, nižšie investičné náklady a možnosť samostatnej regulácie podľa aktuálnych prevádzkových podmienok v konkrétnom priestore. V kombinácii s inteligentnými riadiacimi prvkami umožňujú tieto systémy reagovať na zmeny mikroklimatických veličín v reálnom čase, čím prispievajú k zlepšeniu kvality vnútorného prostredia a energetickej efektívnosti prevádzky budov. Jednou z najčastejších aplikácií decentralizovaného vetrania je regulované odsávanie vzduchu v hygienických a vlhkostne zaťažených priestoroch.

5.1.1 SMART ventilátory

Ako príklad jednoduchej a prakticky realizovateľnej aplikácie inteligentného riadenia decentralizovaného vetrania možno uviesť reguláciu výkonu ventilátora v kúpeľni, ktorá je primárne zameraná na odvádzanie nadmernej vlhkosti a znehodnoteného vzduchu. Takýto spôsob riadenia umožňuje automatickú úpravu otáčok ventilátora na základe aktuálnej hodnoty relatívnej vlhkosti v miestnosti, čím sa zabezpečuje efektívne odvetranie len v nevyhnutnom rozsahu. V prípade požiadavky na kompaktné riešenie je možné celý systém integrovať do jedného autonómneho zariadenia. Koncepcia „všetko v jednom“ zahŕňa snímač vlhkosti, riadiacu elektroniku aj výkonový člen priamo v tele ventilátora, bez potreby použitia externých snímačov, samostatnej riadiacej jednotky alebo pripojenia k nadradenému serveru.

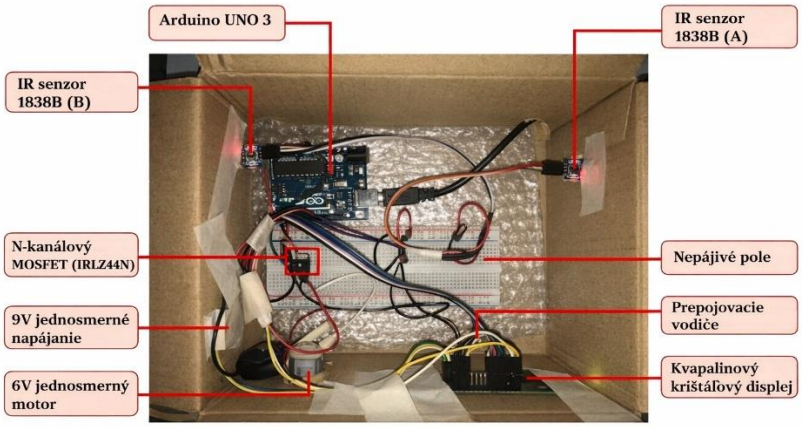


Obrázok 5.2 *: Rozložený pohľad na ventilátor: 1 motor, 2 montážny prvok, 3 riadiaca elektronika so snímačom vlhkosti, 4 kryt motora, 5 obežné koleso, 6 vzduchový adaptér, 7 montážny rám, 8 čelný panel. [74]*

Ventilačný systém môže disponovať iba základnou úrovňou automatizácie. Príkladom je ventilátor, ktorý je prepojený so snímačom relatívnej vlhkosti a vykonáva jednoduchý príkaz typu: *„aktivuj sa pri prekročení 70 % relatívnej vlhkosti v kúpeľni“*. Takýto systém však nedisponuje dostatočnou inteligenciou na komplexnejšie rozhodovanie, ako napríklad:

- Ako dynamicky regulovať otáčky ventilátora v závislosti od aktuálnych podmienok?
- Aký bude dopad ventilácie na teplotu vzduchu v miestnosti?
- Ako zabezpečiť efektívne odvetranie bez nadmerného ochladzovania priestoru alebo zbytočného odsávania vzduchu?

Výhoda je jednoduchosť aplikácie a SMART riešenie pre jednotlivé miestnosti. Ďalším variantom SMART ventilátora je ventilátor s riedením otáčok motora prostredníctvom mikropočítača Arduino, ktorý reguluje rýchlosť motora podľa počtu osôb v miestnosti zistených infračerveným senzorom. Takéto riešenie môže znížiť spotrebu energie vetrania priestorov v priemere o 45,13 % oproti systému bez senzora [75].



Obrázok 5.3 *: Vnútorný dizajn inteligentného ventilátora [75]*

5.1.2 SMART zariadenia pre vetranie oknami

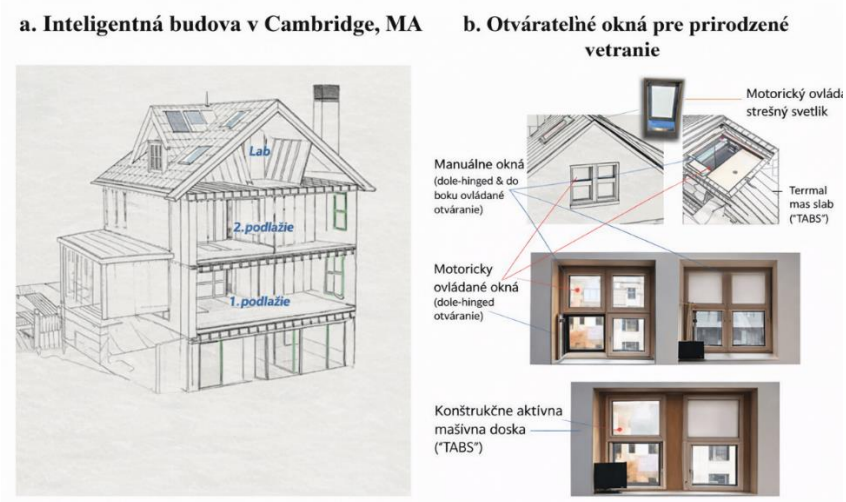
Jedným z riešení implementácie inteligentného pasívneho systému vetrania je využitie motorizovaného ovládania okien. Výhodou motorizovaných okien je ich presná a opakovateľná regulácia miery otvorenia, ako aj možnosť ovládania okien umiestnených vo väčších výškach alebo ťažko prístupných miestach. Prevádzkové

údaje, ako je uhol otvorenia okna alebo poloha pohonného piesta, sa prenášajú do centrálnej riadiacej jednotky, ktorá na základe vyhodnotenia kvality vnútorného ovzdušia optimalizuje dobu a intenzitu vetrania v súlade s požiadavkami užívateľa a prevádzkovými podmienkami objektu.

Kyvné strešné okno s integrovaným elektrickým ovládaním je vybavené riadiacou jednotkou, pohonom a napájacím modulom, ktoré umožňujú diaľkové ovládanie prostredníctvom mobilného rozhrania alebo hlasového rozhrania. Napájanie systému je realizované zo štandardnej elektrickej siete s napätím 230 V / 50 Hz, pričom príkon pohonu sa pohybuje v rozsahu približne 20–30 W počas aktívneho chodu. Okno je určené pre montáž do striech so sklonom v rozsahu približne 15° až 90°. Súčasťou systému je dažďový snímač s reakčným časom rádovo jednotiek sekúnd, ktorý pri detekcii zrážok automaticky uzatvára krídlo okna. Maximálny uhol otvorenia krídla dosahuje približne 30–40°, čo umožňuje efektívne prirodzené vetranie. Integrovaná ventilačná klapka zabezpečuje regulovaný prívod vzduchu aj pri zatvorenom okne s prietokom v rádoch desiatok $m^3 \cdot h^{-1}$.[76].

a)	b)

Obrázok 5.4 *: Motorizované WiFi inteligentné strešné okná a) rám b) motorizovaný mechanizmus [76].*



Obrázok 5.5 *: Inteligentná budova a ovládateľné okná*

Riadený systém prirodzeného vetrania je typom integrovaného návrhu s inteligentným riadením v architektúre. V tejto štúdii bola voľba spodne výklopných motoricky ovládaných okien a ich umiestnenie pre jednostranné vetranie v architektonickom návrhu určená na základe udržateľného architektonického prístupu, vychádzajúceho z predchádzajúcich projektových skúseností.

5.1.3 SMART zariadenia úpravy vzduchu

Inteligentné zariadenia na úpravu vzduchu zohrávajú významnú úlohu pri zlepšovaní kvality vnútorného prostredia, najmä v obytných a administratívnych budovách, kde dochádza k dlhodobému pobytu osôb. Moderné riešenia umožňujú nielen účinnú filtráciu znečisťujúcich látok, ale aj kontinuálne monitorovanie kvality vzduchu a automatickú reguláciu prevádzky na základe aktuálnych podmienok. Tieto zariadenia prispievajú k zníženiu koncentrácie tuhých častíc, alergénov a pachových látok, čím zlepšujú hygienické aj komfortné parametre vnútorného prostredia. Inteligentná čistička vzduchu vhodná pre miestnosti do 60 m². Využíva snímač $PM_{2.5}$ a PM_{10}, ktorý nepretržite monitoruje kvalitu vzduchu. Zariadenie má prietok vzduchu až 500 m³/h a filtruje až 99,97 % častíc vrátane prachu, peľu, dymu a zápachov pomocou trojvrstvového HEPA filtra. Životnosť filtra je približne 6 až 12 mesiacov, v závislosti od intenzity používania. Čistička podporuje WiFi pripojenie a je ovládateľná cez aplikáciu Mi Home, Google Assistant alebo Alexa. Používateľ môže cez WiFi aplikáciu Mi Home presne nastavovať intenzitu ventilátora v niekoľkých úrovniach – od tichého nočného režimu cez stredný výkon až po manuálne zvolenú rýchlosť v rozsahu 1–100 %. V automatickom režime sa

rýchlosť ventilátora prispôsobuje úrovni znečistenia vzduchu na základe koncentrácie $PM_{2.5}/PM_{10}$ [77].

a) **b)**

Obrázok 5.6 *: Xiaomi Mi Air Purifier 4 Pro a) Zariadenie b) 360° HEPA filter s tromi filtračnými vrstvami [77]*

Inteligentný zvlhčovač vzduchu s UV-C sterilizáciou eliminuje až 99,9 % baktérií vo vode pred uvoľnením pary. Disponuje prietokom pary až 350 ml/h a nádržou s objemom 4,5 litra, čo umožňuje nepretržitú prevádzku až 32 hodín bez doplňovania. Zariadenie sa pripája cez WiFi a je plne ovládateľné v aplikácii Mi Home, kde možno nastaviť intenzitu pary, časovač alebo automatizáciu [78].

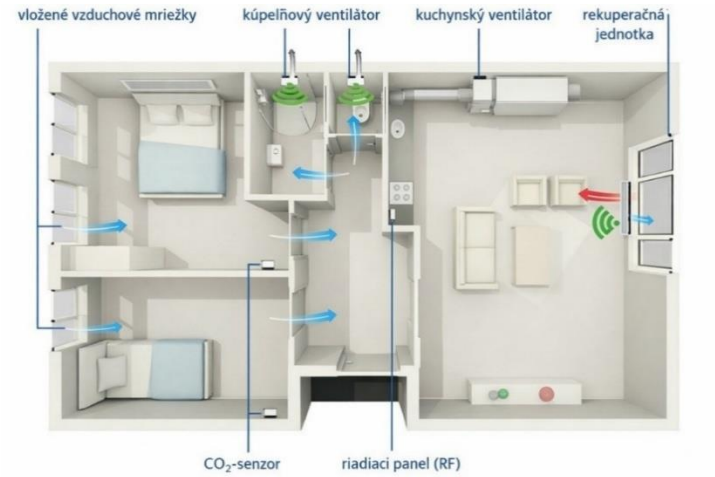
a) **b)**

Obrázok 5.7 *: Xiaomi SMART Antibacterial Humidifier 2 a) Zvlhčovač s 4,5 l nádržou a parným výstupom b) UV-C sterilizačná jednotka pre dezinfekciu vody [78]*

Centralizované vetranie

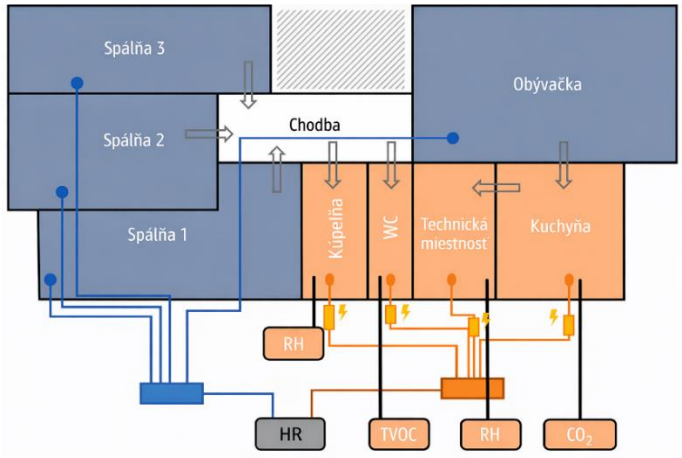
SMART centralizované vetranie je založené na princípe mechanického vetrania s rekuperáciou tepla, pri ktorom je výmena vzduchu v celom objekte zabezpečovaná prostredníctvom jednej centrálnej jednotky. Tento spôsob vetrania kombinuje riadený prívod čerstvého vzduchu do obytných miestností a súčasný odvod znehodnoteného vzduchu z hygienických a technologicky zaťažených priestorov. Privádzanie čerstvého vzduchu je realizované centrálnym prívodným vetraním, pričom vzduch je distribuovaný do obytných miestností, ako sú spálne a obývacie priestory, prostredníctvom nasávacích mriežok. Odvádzanie znehodnoteného vzduchu zabezpečuje centrálne odsávacie vetranie, realizované ventilátormi umiestnenými v kúpeľni (B-Fan), na toalete (T-Fan) a v kuchyni (K-Fan). Tento spôsob rozdelenia prívodu a odvodu umožňuje efektívne smerovanie prúdenia vzduchu v rámci objektu.

Ventilačný systém je prepojený s rekuperačnou jednotkou HRV (Heat Recovery Ventilation), ktorá umožňuje spätné získavanie tepla z odvádzaného vzduchu a jeho prenos na privádzaný čerstvý vzduch. Týmto spôsobom dochádza k zníženiu tepelných strát spojených s vetraním a k zvýšeniu energetickej efektívnosti prevádzky objektu. Riadenie systému je realizované pomocou SMART snímača koncentrácie CO_2, ktorý priebežne vyhodnocuje kvalitu vnútorného vzduchu. Na základe nameraných hodnôt je upravovaný výkon vetracej jednotky prostredníctvom bezdrôtového ovládacieho panela (RF). Takýto spôsob riadenia umožňuje automatické prispôsobovanie intenzity vetrania aktuálnym podmienkam v interiéri, čím sa zabezpečuje komfortné vnútorné prostredie pri súčasnom znížení energetickej náročnosti systému [79].



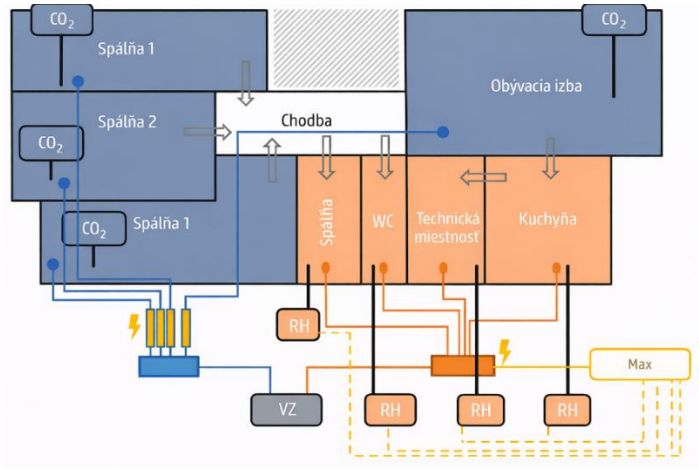
Obrázok 5.8 *: Príklad SMART ventilačnej sústavy domácnosti a základne časti [79]*

Prvý inteligentný systém používa RH senzory v kúpeľni a technickej miestnosti (práčovni), CO_2 senzor v kuchyni a TVOC senzor na detekciu prítomnosti na toalete. Ventilácia sa prispôsobuje iba v miestnostiach s odvodnými výustkami. V miestnostiach sú použité VAV ventily pre individuálne riadenie prietoku.



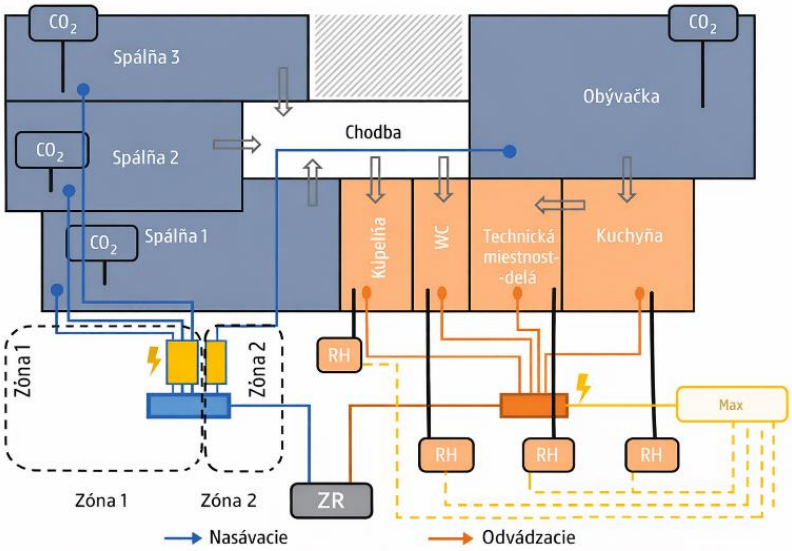
Obrázok 5.9 *: Inteligentný ventilačný systém D1 [80]*

Druhý systém má RH senzory vo všetkých odvetrávaných miestnostiach a CO_2 senzory vo všetkých miestnostiach s prívodom vzduchu. Prívodné prúdy sú regulované VAV ventilmi po miestnostiach. Odvodné prúdy sa riadia podľa najhoršej nameranej RH. Systém je vždy vyvážený.



Obrázok 5.10 : *Inteligentný ventilačný systém D2 [80]*

Tretí systém je podobný systému D2, ale prívod vzduchu sa nereguluje individuálne, ale po dvoch zónach – denná zóna (obývačka) a nočná zóna (spálne). Na základe CO_2 senzorov systém uprednostní ventiláciu jednej zóny, druhá dostáva len 10 % menovitého prietoku.



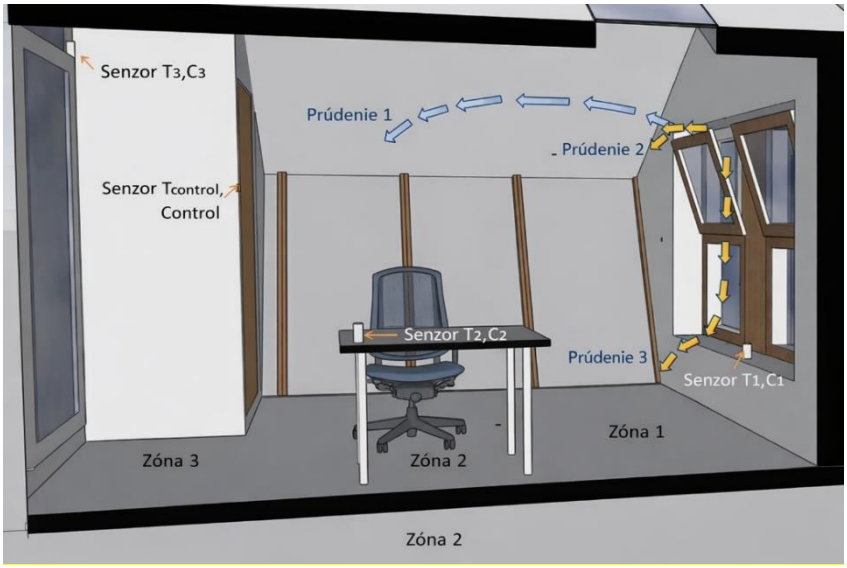
Obrázok 5.11 *: Inteligentný ventilačný systém D3 [80]*

Regulácia systému D3 funguje na základe vlhkosti (RH) a koncentrácie CO_2. Vlhkosť v kúpeľni, WC a kuchyni riadi odvod vzduchu. Prívod sa reguluje podľa CO_2 v dennej a nočnej zóne – ventiluje sa prioritne zóna s vyšším CO_2, druhá dostáva len 10 % prietoku.

Tabuľka 5.1 *: Regulačné pravidlá rýchlosti vetrania podľa CO2 a RHi miestností*

Miesto	Riadiaci parameter	Rýchlosť vetrania
Kúpeľňa, technická miestnosť, WC, kuchyňa	RHi meraná v každom priestore: MAX(RHi) < 50 %	10%
	50 % < MAX(RHi) < 90 %	Lineárna
	90 % < MAX(RHi)	100%
	MAX(CO_2,i) < Δ350 ppm	10%
	Δ350 ppm < MAX(CO_2,i) < Δ550 ppm	Lineárna
	Δ550 ppm < MAX(CO_2,i)	100%
Obývacia izba	CO_2, obývacia izba < Δ350 ppm	10%
	Δ350 ppm < CO_2, obývacia izba < Δ550 ppm	Lineárna
	Δ550 ppm < CO_2, obývacia izba	100%
	Celkový prívodný prietok vzduchu = Celkový odvodný prietok vzduchu	–

Cieľom prediktívneho riadenia vetrania v zimnom období je, aby sa koncentrácia CO_2 udržiavala pod hranicou 1 000 ppm bez výrazného zníženia vnútornej teploty. Použitý prístup zahŕňa zber údajov zo snímačov a učenie modelu určeného na riadenie motoricky ovládaných okien v reálnom čase s päťminútovým krokom. Dosiahnuté výsledky potvrdili účinnú reguláciu koncentrácie CO_2, pričom pokles teploty neprekročil 1 °C a priemerná denná spotreba energie zostala na rovnakej úrovni (3,73 kWh), bez štatisticky významného nárastu. Systém tak preukázal efektivitu inteligentného vetrania v reálnych prevádzkových podmienkach [80].



Obrázok 5.12 *: Regulácia kvality ovzdušia miestnosti pomocou troj-zónovej regulácie prostredníctvom troch snímačov teploty a snímač CO2*

6 APLIKÁCIE SMART TECHNOLÓGIÍ V MALÝCH ZDROJOCH TEPLA

Rozvoj moderných technológií a digitalizácie prináša nové možnosti aj do oblasti malých zdrojov tepla. Tradičné kotly a spaľovacie zariadenia sú postupne dopĺňané inteligentnými prvkami, ktoré umožňujú presnejšie riadenie spaľovacieho procesu, optimalizáciu prevádzky a zníženie emisií. Využívanie senzorov, dátovej analytiky a algoritmov umelej inteligencie vedie k vyššej účinnosti a bezpečnosti prevádzky. SMART riešenia tak poskytujú malým zdrojom tepla nielen technologický posun, ale aj možnosť prispieť k environmentálnej udržateľnosti a k lepšej integrácii do moderných energetických systémov.

6.1 Tradičné regulačné metódy

Riadenie malých zdrojov tepla bolo dlhodobo založené na jednoduchých regulačných prístupoch, ktoré sa snažia zabezpečiť stabilnú prevádzku pri čo najnižších nákladoch na technológiu. Najzákladnejšou metódou je tzv. **štart–stop regulácia**, pri ktorej sa prítok vzduchu alebo podávanie paliva cyklicky zapína a vypína podľa aktuálnej potreby. Ide o veľmi lacný a jednoduchý spôsob, avšak vedie k výrazným tepelným stratám, kolísaniu výkonu a častej mechanickej záťaži zariadenia.

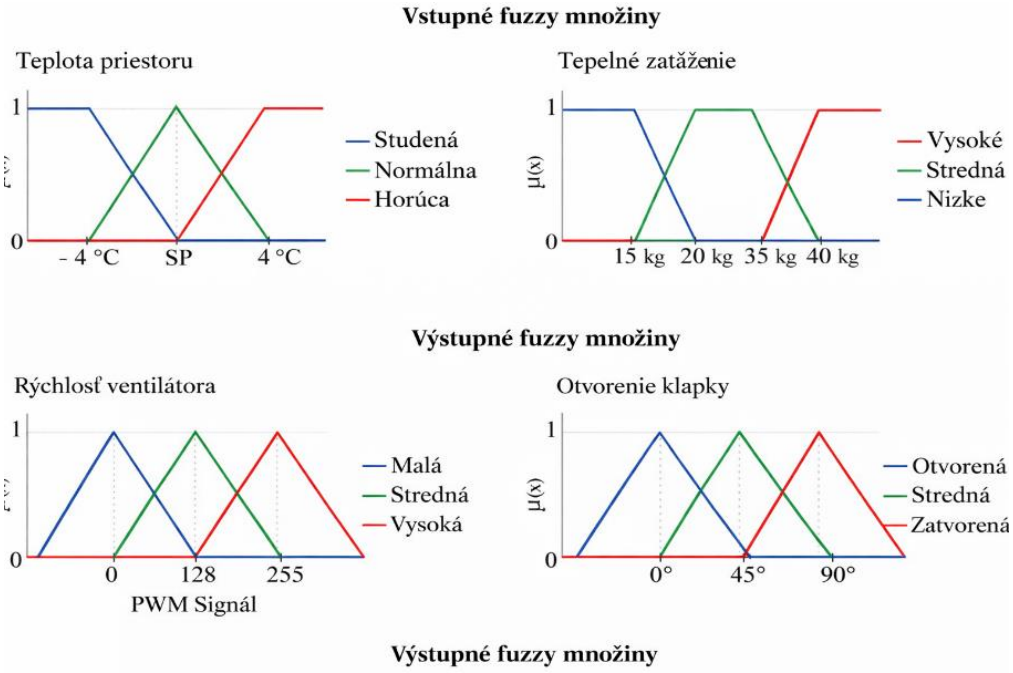
Ďalším tradičným prístupom je **PID regulácia**, prípadne jej zjednodušené varianty PD alebo PI. V kotloch sa najčastejšie využíva PID algoritmus na riadenie otáčok ventilátora alebo rýchlosti podávača. Hoci umožňuje jemnejšie riadenie oproti štart–stop systému, reaguje len na odchýlku regulovanej veličiny (napr. teploty) bez zohľadnenia komplexných podmienok spaľovania. Nevýhodou je pomalá reakcia na náhle zmeny paliva alebo záťaže a nemožnosť adaptívneho správania.

Treťou často využívanou metódou je **termostatická regulácia**, kde sa riadenie vykonáva na základe nastaveného teplotného limitu. Po prekročení hranice sa obmedzí prívod paliva alebo vzduchu a po poklese sa opäť obnoví. Tento spôsob je jednoduchý, avšak trpí veľkou hysteréziou a neschopnosťou udržiavať stabilné parametre spaľovania.

Nevýhodou všetkých tradičných metód je absencia spätnej väzby od komplexných veličín, akými sú emisie, kvalita spaľovania alebo zloženie paliva, čo vedie k nižšej účinnosti a vyššiemu environmentálnemu zaťaženiu.

6.2 Regulácia malých zdrojov tepla Fuzzy logikou

Fuzzy logika je metóda riadenia, ktorá umožňuje pracovať s nepresnými alebo neurčitými vstupmi. Na rozdiel od klasickej logiky, kde veličiny nadobúdajú iba hodnoty 0 alebo 1, vo fuzzy logike sa používa **stupnica pravdepodobnosti** v intervale ⟨0;1⟩. Vďaka tomu dokáže lepšie napodobňovať ľudské rozhodovanie a reagovať na meniace sa podmienky spaľovania. Práve schopnosť prispôsobovať sa neurčitým vstupom a kombinovať viaceré parametre (teplota, koncentrácia CO, ťah komína) robí z fuzzy regulácie **inteligentný prístup** k riadeniu malých zdrojov tepla.



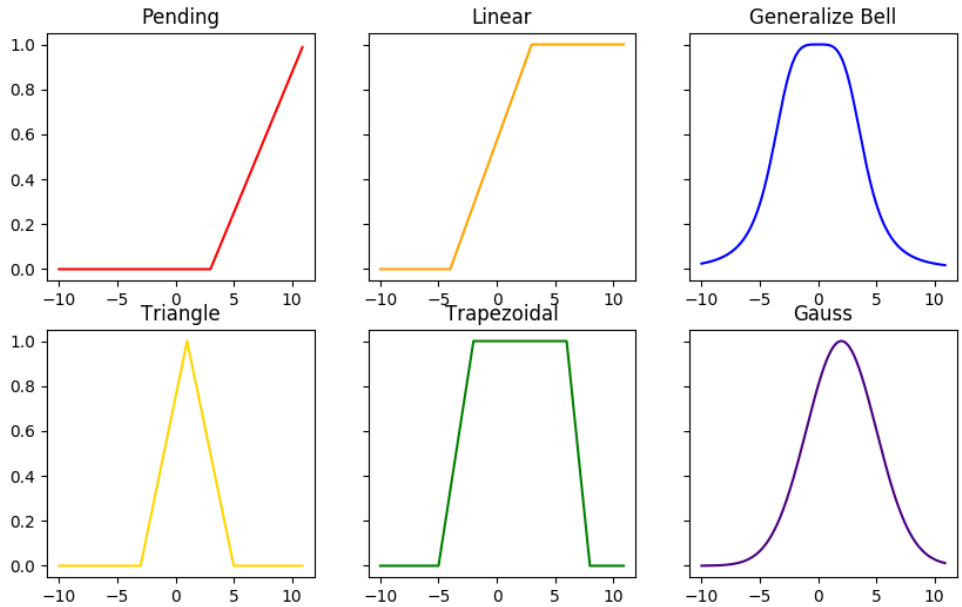
Obrázok 6.1 *: Prehľad vstupných a výstupných skupín regulácie malého zdroja tepla [81]*

Vo fuzzy regulácii zohráva **funkcia členstva** zásadnú úlohu, pretože určuje, do akej miery určitý vstup patrí do danej množiny (napr. „nízka teplota“, „stredná koncentrácia CO“ alebo „vysoký ťah“). Na rozdiel od klasického prístupu, kde sa vstup zaradí jednoznačne, vo fuzzy logike môže mať prvok súčasne **čiastočnú príslušnosť k viacerým množinám**. Fuzzy logika je schopná brať do úvahy charakteristiky ako napríklad uvedené v tabuľke č. 7.1.

Tabuľka 6.1 *: Prehľad charakteristík spaľovacieho procesu vstupujúce do funkcie členstva Fuzzy logiky*

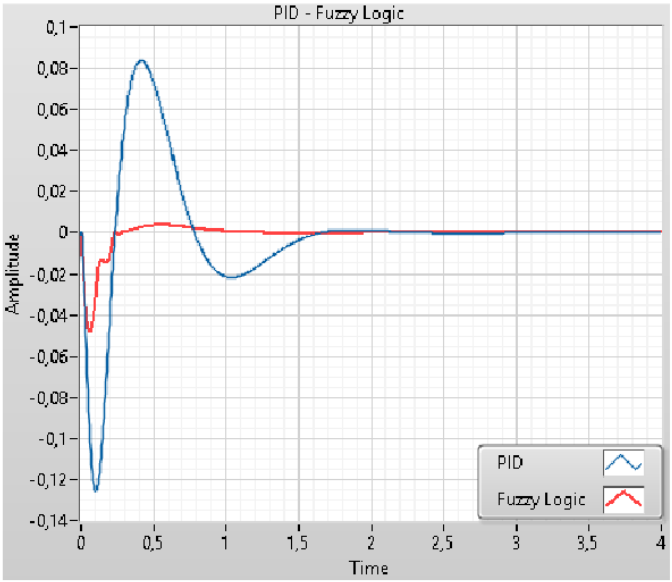
Charakteristika	Popis hraničných hodnôt	Typ funkcie členstva	Odporúčaná váha
Teplota spalín	nízka, optimálna, vysoká	trojuholníková	stredná/vysoká
Koncentrácia CO	malá, stredná, nadlimitná	lichobežníková	vysoká
Obsah kyslíka (λ)	nedostatočný, vyvážený, nadbytočný	Gaussova	vysoká
Ťah komína	slabý, stabilný, príliš silný	trojuholníková	stredná
Rýchlosť ventilátora	pomalá, primeraná, príliš vysoká	lichobežníková	stredná
Podávanie paliva	nízke, rovnomerné, nadmerné	trojuholníková	stredná/vysoká
Vlhkosť paliva	suché, mierne vlhké, mokré	Gaussova	stredná
Stabilita plameňa	nestabilný, stabilný, intenzívny	lichobežníková	vysoká

Obrázok č. 7.2 zobrazuje šesť základných typov funkcií členstva používaných vo fuzzy logike: lineárne, trojuholníkové, lichobežníkové, Gaussove a generalizovaný zvonovitý tvar. Každá z nich určuje, ako sa hodnota vstupného parametra priraďuje k fuzzy množine s mierou príslušnosti od 0 do 1. Výber konkrétneho tvaru závisí od charakteru veličiny – napríklad teplota sa často modeluje trojuholníkovou funkciou, zatiaľ čo emisie či vlhkosť paliva lepšie vystihujú plynulejšie tvary, ako je Gaussova alebo zvonovitá funkcia [82].



Obrázok 6.2 *: Prehľad základných druhov funkcií členstva (základ fuzzy logiky)*

Obrázok porovnáva odozvu systému riadeného PID regulátorom (modrá) a fuzzy logikou (červená). PID vykazuje veľké prekmitnutie a postupné ustálenie, zatiaľ čo fuzzy regulátor rýchlejšie stabilizuje výstup s menšími odchýlkami a prakticky bez oscilácií, čo dokazuje jeho vyššiu robustnosť [83].



Obrázok 6.3 *: Porovnanie regulácie PID a Fuzzy logiky v mechanickom systéme [83]*

Vstupné veličiny x = [$T_{spalín}$, CO, λ, $\Delta P_{ťah}$,etc.] sa najskôr transformujú do fuzzy priestoru pomocou funkcií členstva $\mu_i^{\ell} \in [0,1]$. Takto získame mieru príslušnosti k rôznym stavom (napr. „teplota vysoká“, „CO nadlimitné“). Príkladom pravidla môže byť, že :

R1 :IF CO vysoké AND λ je nízke, potom Δu_{vzduch} = zvýšiť

R2**:** IF CO je **stredné** AND λ je **nadbytočné** THEN Δu_{vzduch}= **znížiť**.

R3**:** IF $T_{spalín}$ **nízka** AND λ **nedostatočné** THEN Δu_{vzduch} **zvýšiť**, $\Delta u_{podávač}$= **mierne znížiť**.

R4**:** IF TZL je **vysoké** AND ťah je **slabý** THEN Δu_{vzduch}=**zvýšiť**, $\Delta u_{podávač}$= **znížiť**.

R5 (START – zvýšiť výkon) :
IF e_P je **veľký kladný** (napr. eP>εon=+10%) AND plameň **stabilný** AND CO **malé/stredné**
THEN **podávač = ZAPNÚŤ**, $\Delta u_{podávač}$=+10 až 20%, Δu_{vzduch}=+5 až +10% (kvôli stechiometrii).

R6 (STOP – znížiť spotrebu paliva /prebytok výkonu) :
IF e_P je **veľký záporný** (napr. eP<εoff=−5%) OR CO **nadlimitné** AND λ **nízke** OR (Tspalín je **vysoká** e_P **malý záporný**)) THEN **podávač = VYPNÚŤ** na t_{stop}=5–10 s

V Mamdaniho prístupe sa výstupné fuzzy množiny („znížiť“, „držať“, „zvýšiť“) orežú podľa vypočítaných váh (dôležitosť) w_j a následne sa agregujú a defuzzifikujú, napr. centroidom. V Sugeno prístupe sa používajú výstupné hodnoty (singletons) z_j, napríklad -10, 0, +10 % PWM pre ventilátor, pričom výsledok je vážený priemer:

$$\Delta u = \frac{\left(\Sigma\, w_j \cdot z_j\right)}{\Sigma\, w_j}$$

Príklad z praxe regulácie kotla na drevné pelety:

V tomto príklade je vstup CO klasifikovaný ako „vysoké“ s príslušnosťou 0,8 a súčasne λ ako „nízke“ s príslušnosťou 0,6. Fuzzy logika tieto hodnoty kombinuje pomocou t-normy (súčin): w1=0.8×0.6=0.48 w 1 =0.8×0.6=0.48. Táto výsledná váha určuje silu pravidla „zvýšiť prívod vzduchu o +10 %“. ak $\mu_{COvysoké}$ = 0.8 a $\mu_{\lambda nízke}$ = 0.6, potom w_1 = 0.48 pre pravidlo „zvýšiť vzduch o +10 %“. Výsledok zmeny rýchlosti ventilátora je:

$$\Delta u_{vzduch} \approx (0.48 \cdot 10 + 0.21 \cdot (-5)) / 0.69 \approx +5.7\,\%$$

Aplikácia fuzzy logiky v riadení malých zdrojov tepla umožňuje efektívne spracovanie viacerých neurčitých vstupných veličín a zabezpečuje vyššiu mieru adaptability spaľovacieho procesu. V práci [84] boli do regulačného algoritmu zahrnuté teplota spalín, koncentrácia CO a prebytočný vzduch, pričom regulačný zásah spočíval v plynulej úprave otáčok ventilátorov a dávkovania paliva. Takto navrhnuté riadenie viedlo k stabilnejšiemu priebehu spaľovania a k zníženiu koncentrácií CO v porovnaní s klasickým PI regulátorom. V práci [85] bolo realizované porovnanie on/off, PID a fuzzy regulácie vo vykurovacom systéme budovy, kde vstupné veličiny tvorila teplota vnútorného prostredia a zmeny požadovaného tepelného výkonu. Výstupom bolo riadenie zdroja tepla, pričom fuzzy regulácia dosiahla zníženie spotreby energie v rozsahu 30–70 % pri súčasnom zachovaní tepelného komfortu. Uvedené výsledky potvrdzujú vhodnosť fuzzy regulácie na riadenie systémov s premenlivými prevádzkovými podmienkami a viacerými vstupnými veličinami.

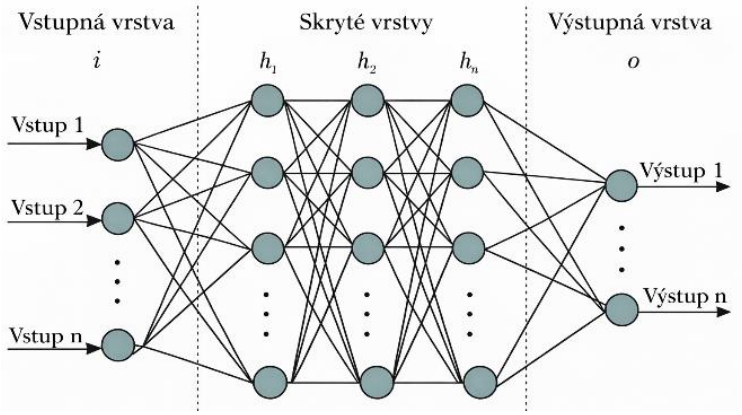
Fuzzy logika nachádza významné uplatnenie aj v úlohách nadradeného riadenia spaľovacích systémov. V práci [86] bol fuzzy regulačný algoritmus využitý na dynamické nastavovanie referenčných hodnôt pre klasické PID regulátory kotla, pričom vstupné veličiny tvorili tlak a teplota pary. Regulačné zásahy sa realizovali prostredníctvom úpravy prietoku paliva a spaľovacieho vzduchu, čo viedlo k zníženiu prekmitov a k rýchlejšiemu ustáleniu systému v porovnaní s čisto PID reguláciou. Pri spaľovaní biomasy [87] fuzzy-PID regulácia umožnila presnejšie udržiavanie teploty horúceho vzduchu v procese sušenia, kde vstupmi boli teplota a vlhkosť a výstupmi rýchlosť ventilátora a dávkovanie paliva. Optimalizácia vlhkosti paliva z približne 23 % na 18 % [88] sa následne prejavila zvýšením účinnosti až na 81 % a znížením emisií o 178 g/kWh. Uvedené prístupy potvrdzujú, že fuzzy logika je efektívnym nástrojom nielen na stabilizáciu spaľovacieho procesu, ale aj na zvyšovanie energetickej efektívnosti a redukciu emisií.

6.3 Neurónové siete v regulácie malých zdrojoch tepla

V posledných rokoch sa regulácia malých zdrojov tepla posúva od klasických lineárnych prístupov k pokročilým metódam umelej inteligencie. Medzi najperspektívnejšie prístupy patria práve neurónové siete, ktoré dokážu spracovávať komplexné, nelineárne vzťahy medzi parametrami spaľovania a dynamikou kotla. To z nich robí vhodný nástroj pre inteligentnú optimalizáciu spaľovacieho procesu, kde cieľom je nielen stabilná prevádzka, ale aj zvýšenie účinnosti a redukcia emisií.

Neurónové siete poskytujú robustný rámec pre inteligentné riadenie spaľovania, umožňujú predikciu výkonu kotla a produkcie emisií v reálnom čase. Využívajú schopnosť učiť sa zložitým, nelineárnym vzťahom medzi množstvom paliva, prívodom vzduchu a výstupnými parametrami, čím prekonávajú obmedzenia konvenčných regulačných metód. Ich adaptabilita je kľúčová pre dosiahnutie stabilnej prevádzky, vyššej účinnosti a významného zníženia emisií. Základom sú prepojené uzly – neuróny, ktoré spracúvajú informácie a učia sa z dát. Hlavné prvky architektúry neurónovej siete sú:

1. **Vstupná vrstva** – prijíma dáta a odovzdáva ich do skrytých vrstiev.
2. **Skryté vrstvy** – extrahujú vzory; ich počet a veľkosť ovplyvňujú presnosť.
3. **Výstupná vrstva** – poskytuje finálne predikcie alebo klasifikácie.
4. **Váhy a bias** – určujú význam signálov a upravujú aktiváciu neurónov.
5. **Aktivačné funkcie** (napr. sigmoid, ReLU, tanh) – zachytávajú nelineárne vzťahy.



Obrázok 6.4 : *Základná štruktúra a časti neurónovej siete*

Ako zobrazené na obrázku 6.8, čím hlbšia je neurónová sieť, tým zložitejšie a jemnejšie vzory dokáže neurónová sieť rozpoznať. Pri analýze spaľovacieho procesu to znamená, že ...

prvé vrstvy môžu identifikovať základné parametre ako:

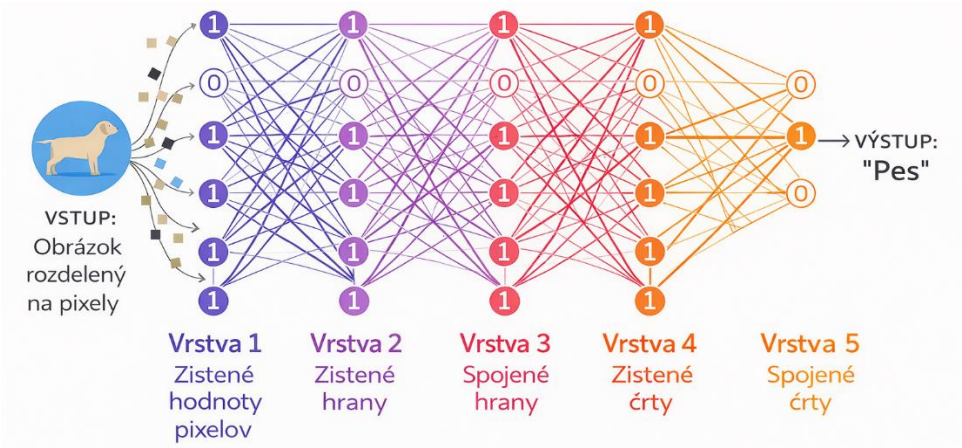
a) teplota
b) koncentrácia kyslíka
c) tepelný výkon.

stredné vrstvy sa učia spájať tieto hodnoty do významnejších vzťahov – napríklad rozpoznať:

a) nestabilné horenie
b) náhly nárast TZL

c) riziko nedokonalého spaľovania

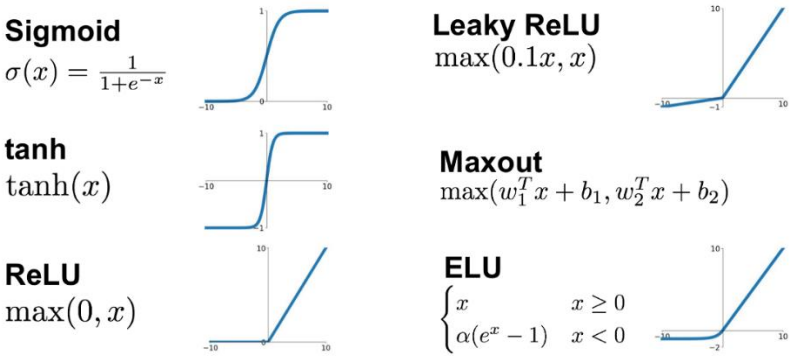
najhlbšie vrstvy potom umožňujú modelu predpovedať budúce stavy kotla a optimalizovať nastavenia podávania paliva či ventilácie ešte skôr, než nastane problém.



Obrázok 6.5 *: Príklad rozdelenia funkcionality skrytých vrstiev neurónovej siete* [89]

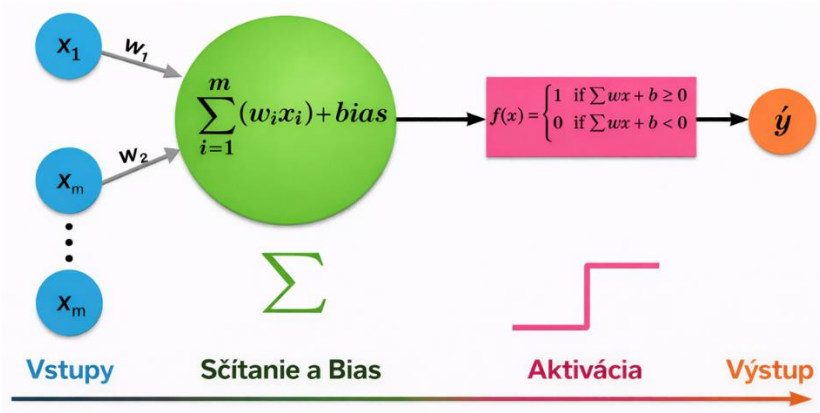
Aktivačné funkcie sú neoddeliteľnou súčasťou neurónových sietí. Ich úlohou je zaviesť **nelinearitu** do výpočtového modelu, čo umožňuje sieti riešiť aj zložité úlohy ako klasifikácia emisií, predikcia výkonu či rozpoznávanie obrazov. V praxi aktivačná funkcia rozhoduje o tom, **či bude konkrétny neurón „aktívny“**, teda či bude reagovať na vstup a ovplyvní výstup modelu. Bez nich by bola sieť len obyčajnou lineárnou regresiou – veľmi obmedzenou. Základné druhy aktivačných funkcií sú uvedené na obrázku 6.10.

Sigmoid a **tanh** sú historicky dôležité, ale pri hlbších sieťach môžu spomaľovať učenie. **ReLU** je dnes najpoužívanejšia pre svoju jednoduchosť a efektivitu. **Leaky ReLU** rieši jej slabinu – „mŕtve“ neuróny. **Maxout** ponúka flexibilitu kombináciou viacerých funkcií, zatiaľ čo **ELU** zabezpečuje hladší gradient aj pri záporných hodnotách, čím urýchľuje konvergenciu učenia.



Obrázok 6.6 *: Základné druhy aktivačných funkcií*

Váhy (w) a biasy (b) sú základnými parametrami neurónovej siete, ktoré sa počas tréningu upravujú tak, aby model dokázal čo najpresnejšie predikovať výstup. Dá sa skonštatovať, že sú to konštanty ktorými sa spájajú všetky susedné uzly ako zobrazené na obrázku 7.11. Každé spojenie medzi neurónmi má pridelenú váhu, ktorá určuje **význam daného vstupu**. Váha slúži na určenie **dôležitosti konkrétneho uzla**. Bias slúži ako **posun aktivačnej funkcie**, vďaka čomu sieť dokáže lepšie aproximovať nelineárne javy.



Obrázok 6.7 *: Základná schéma výpočtu výstupu podľa nastavených váh*

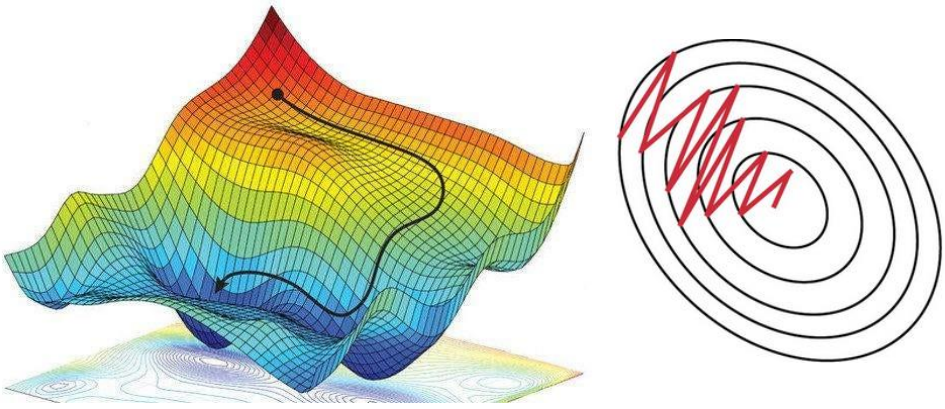
Cieľová funkcia (po angl. „*objective function*“) je matematický výraz, ktorý vyjadruje, čo sa má optimalizovať počas procesu učenia alebo riadenia. Inak povedané je potrebné kvantitatívne zodpovedať otázku ako kvalitne prebieha spaľovací proces. V neurónových sieťach alebo regulačných systémoch je to veličina, ktorú chceme minimalizovať alebo maximalizovať.

V kontexte **spaľovacieho procesu** môže byť cieľová funkcia kombináciou viacerých kritérií, napríklad:

1) udržiavať stabilný **tepelný výkon**,
2) minimalizovať **produkciu emisií (CO, NO_x, TZL)**,
3) znižovať **spotrebu paliva**.

Tieto ciele sú však vo svojej podstate často protikladné – napríklad zvýšenie výkonu môže viesť k vyššej tvorbe emisií alebo väčšej spotrebe paliva. Ich vzájomné vzťahy sú komplikované a nelineárne, čo si vyžaduje pokročilé metódy optimalizácie a inteligentné regulačné prístupy.

Tréning neurónovej siete prebieha tak, že sa váhy a biasy postupne prispôsobujú tréningovým dátam s cieľom minimalizovať chybu medzi predikovaným a skutočným výstupom. Tento proces začína algoritmom backpropagácie, ktorý vypočíta gradient chyby voči jednotlivým parametrom. Na základe týchto gradientov nastupujú optimalizačné algoritmy – tzv. riešiče. Najjednoduchší je stochastic gradient descent (SGD), ktorý parametre upravuje priamo podľa vypočítaného gradientu. Pokročilejšie riešiče, ako Adam, RMSProp či Adagrad, dokážu dynamicky meniť rýchlosť učenia alebo ukladať informácie o predchádzajúcich krokoch. V praxi to znamená, že sieť sa učí rýchlejšie, stabilnejšie a vyhýba sa lokálnym minimám, čo vedie k presnejším predikciám a lepšej generalizácii modelu.



a) b)

Obrázok 6.8 *: Vizualizácia optimalizácie cieľovej funkcie spaľovacieho procesu a) v 3D b) v 2D (gradientové mapové kruhy)*

7 ĎALŠIE APLIKÁCIE SMART TECHNOLÓGIÍ

Rastúce nároky na efektívne využívanie energie, znižovanie environmentálnej záťaže a optimalizáciu prevádzkových procesov vedú k čoraz širšiemu uplatňovaniu inteligentných technológií aj v ďalších oblastiach. Digitálne nástroje, dátová analýza a automatizované riadiace systémy sa postupne presadzujú v hospodárskych odvetviach s vysokou spotrebou energie, úzko prepojených s výrobou, distribúciou a spotrebou energie. Táto kapitola sa zameriava na inteligentné aplikácie moderných technológií v poľnohospodárstve a v oblasti vodného hospodárstva, kde majú tieto riešenia výrazný potenciál na zvyšovanie efektívnosti, úsporu energie a zlepšenie udržateľnosti. Uvedené príklady zároveň vytvárajú širší kontext pre pochopenie princípov inteligentného riadenia, ktoré sú analogicky uplatniteľné aj v oblasti malých zdrojov tepla.

7.1 SMART monitorovacie zariadenia kvality ovzdušia

Zariadenia na monitorovanie kvality ovzdušia vo vonkajších priestoroch sa v zásade delia na stacionárne a mobilné systémy podľa spôsobu ich nasadenia. Stacionárne monitorovacie zariadenia sú umiestnené na pevných stanovištiach a umožňujú dlhodobé, kontinuálne a spoľahlivé sledovanie vývoja koncentrácií znečisťujúcich látok, čo je vhodné pre hodnotenie trendov a súlad s legislatívnymi požiadavkami. Ich nevýhodou je obmedzené priestorové rozlíšenie. Mobilné monitorovacie systémy, umiestnené na vozidlách alebo prenosných platformách, umožňujú detailné mapovanie priestorovej variability znečistenia, avšak ich merania sú citlivejšie na prevádzkové podmienky a vyžadujú dôkladnú kalibráciu.

7.1.1 Monitorovanie kvality ovzdušia

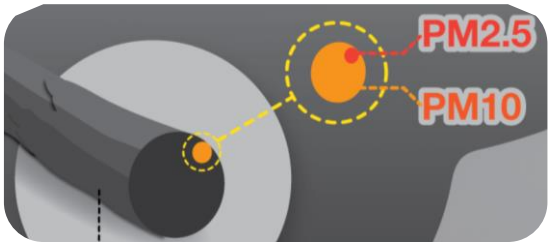
Základne druhy emisií : Emisie delíme na tuhé, kvapalné a plynné. Tuhé znečisťujúce látky (TZL) zahŕňajú prach, popolček a sadze. Kvapalné emisie zahŕňajú aerosóly vznikajúce pri spaľovaní alebo priemyselných procesoch. Plynné emisie sú najčastejšie:

- **CO_2** – oxid uhličitý
- **CO** – oxid uhoľnatý
- **NO_x** – oxidy dusíka (NO, NO_2 a ďalšie)
- **SO_2** – oxid siričitý
- **CH_4** – metán
- **VOC** – prchavé organické zlúčeniny

Znečisťujúce látky v ovzduší sa klasifikujú najmä podľa ich **aerodynamického priemeru**. Koncentrácie tuhých častíc sa monitorujú v širokom rozsahu veľkostí – od častíc s priemerom menším ako 0,3 µm až po frakcie s veľkosťou do 100 µm. Pre účely hodnotenia kvality ovzdušia v oblasti techniky prostredia sa najčastejšie používajú nasledovné kategórie:

- **PM_1** – hmotnostná koncentrácia častíc s priemerom do 1 µm [µg/m³]
- **$PM_{2.5}$** – častice s priemerom do 2,5 µm [µg/m³]
- **PM_{10}** – častice s priemerom do 10 µm [µg/m³]

V niektorých prípadoch sa samostatne sleduje aj tzv. **hrubá frakcia tuhých častíc**, označovaná ako **$PM_{2,5-10}$**, ktorá predstavuje rozdiel medzi PM_{10} a $PM_{2.5}$, teda častice väčšie ako 2,5 µm, no menšie ako 10 µm.

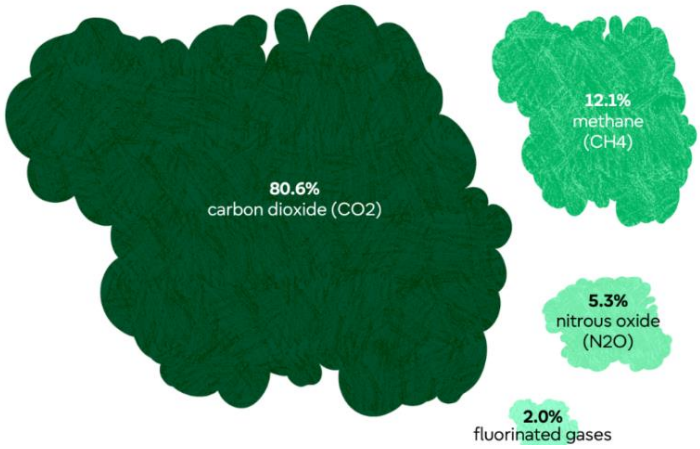


Obrázok 7.1 : *Veľkostné porovnanie TZL vzhľadom na ľudský vlas*

Podľa šiestej hodnotiacej správy IPCC z roku 2023 sú emisie skleníkových plynov z ľudskej činnosti zodpovedné za približne 1,1 °C globálneho otepľovania od začiatku 20. storočia. Ide najmä o spaľovanie uhlia, ropy a plynu, odlesňovanie a poľnohospodárstvo. V roku 2022 pochádzalo 27,4 % emisií EÚ z energetiky, 23,8 % z dopravy, 20,3 % z priemyslu, 11,9 % z rezidenčných a komerčných aktivít a 10,8 % z poľnohospodárstva [90].

Obrázok 7.2 *: Prehľad rozloženia produkcie eCO2 podľa sektorov pre 2022 [90]*

Ako ukazuje infografika, oxid uhličitý (CO_2) je skleníkový plyn, ktorý sa uvoľňuje v najväčšom množstve. Metán je počas 20-ročného obdobia viac než 80-krát účinnejší pri zadržiavaní tepla ako oxid uhličitý [91].



Obrázok 7.3 *: Prehľad produkcie skleníkových plynov (eCO2) v EÚ [91]*

Celkové množstvo emisií sú často prepočítané na tzv. „ekvivalentné CO_2“ v závislosti od intenzity skleníkového efektu látky. Z pohľadu celkových krajín v EÚ Nemecko viedlo s 662 Mt, nasledované Francúzskom (396 Mt), Talianskom (354 Mt) a Poľskom (336 Mt). Česko sa umiestnilo na 9. mieste so 105 Mt, zatiaľ čo Slovensko je na 20. mieste s hodnotou 36 Mt. Tieto hodnoty poukazujú na rozdiely nielen medzi veľkými a malými štátmi, ale aj na efektivitu a štruktúru ich ekonomík.

Množstvo vyprodukovaných emisií sa však náročné porovnať vzhľadom na rozdiel ekonomiky a veľkosti krajín. Z tohto dôvodu sa produkcia emisií monitoruje vzhľadom na počet obyvateľov alebo Hrubý Domáci Produkt (HDD). V roku 2023 dosiahli najvyššie emisie skleníkových plynov na obyvateľa krajiny ako Luxembursko (približne 11,2 tony CO_2 ekvivalentu na osobu), Estónsko (8,9 t), Česko (8,5 t) a Nemecko (7,1 t). **Slovensko s hodnotou približne 6,4 tony na obyvateľa** sa zaradilo mierne nad priemer Európskej únie. Ten v rámci krajín EÚ-27 predstavoval približne 5,6 tony CO_2 ekvivalentu na osobu [92].

7.1.2 Inteligentné zariadenia monitorovania kvality ovzdušia

Inteligentný monitor kvality vnútorného ovzdušia je určený na kontinuálne bezdrôtové sledovanie viacerých environmentálnych parametrov v interiéri. Zariadenie umožňuje súčasné monitorovanie až siedmich veličín, konkrétne koncentrácie radónu, oxidu uhličitého (CO_2), tuhých častíc PM2.5, prchavých organických zlúčenín (VOC), relatívnej vlhkosti vzduchu, teploty a atmosférického tlaku. Meranie koncentrácie CO_2 prebieha v rozsahu približne 400–5 000 ppm s

presnosťou ±50 ppm alebo ±3 % z nameranej hodnoty. Koncentrácia PM2.5 je monitorovaná v rozsahu 0–200 µg·m⁻³ s maximálnou chybou ±(5 µg·m⁻³ + 15 %). Snímač VOC pracuje v rozsahu približne 0–10 ppm a slúži na indikáciu znečistenia ovzdušia chemickými látkami. Teplotný snímač dosahuje presnosť ±0,1 °C, snímač relatívnej vlhkosti ±1 % RH a snímač atmosférického tlaku približne ±0,15 hPa. Zariadenie komunikuje bezdrôtovo prostredníctvom rozhraní Wi-Fi a Bluetooth, čo umožňuje vzdialený prenos dát do používateľského rozhrania a dlhodobé vyhodnocovanie nameraných hodnôt. Napájanie je realizované buď prostredníctvom batériového zdroja (napríklad šesť batérií typu AA) s výdržou až približne dva roky pri bežnej prevádzke, alebo prostredníctvom externého napájania cez rozhranie USB-C. Informácie o kvalite ovzdušia sú zobrazované na energeticky úspornom displeji s elektronickým atramentom a doplnené vizuálnym LED indikátorom, ktorý umožňuje rýchlu orientáciu v stave vnútorného prostredia.

Obrázok 7.4 *: Airthings View Plus - kompletné sledovanie kvality ovzdušia [93]*

Tabuľka 7.1 *: Prehľad presnosti a rozsahu snímača kvality ovzdušia "Airthings View Plus"*

Parameter	Rozsah merania	Presnosť merania
CO_2	400 – 5000 ppm	±50 ppm alebo ±3 %
$PM_{2.5}$	0 – 200 µg/m³	±5 µg/m³ alebo ±15 %
Radón	0 – 500 Bq/m³	±10 Bq/m³ pri 100 Bq/m³
VOC	0 – 10 ppm	Relatívna hodnota
Teplota	−10 °C až +60 °C	±0,1 °C
Vlhkosť	0 – 85 % RH	±1 % RH
Tlak vzduchu	500 – 1100 hPa	±0,15 hPa

Inteligentný detektor dymu je určený na včasnú detekciu požiaru v obytných a administratívnych priestoroch a je vybavený bezdrôtovým komunikačným rozhraním umožňujúcim okamžité odoslanie výstrahy do vzdialeného používateľského rozhrania. V prípade detekcie nebezpečnej situácie zariadenie aktivuje akustickú signalizáciu so zvukovým tlakom približne 85 dB, doplnenú o vizuálnu indikáciu prostredníctvom LED diódy. Napájanie je riešené pomocou batérie s menovitým napätím 3 V, čo umožňuje autonómnu prevádzku bez nutnosti pevného pripojenia k elektrickej sieti. Zariadenie podporuje integráciu do systémov inteligentnej domácnosti a umožňuje vytváranie automatizovaných scenárov, napríklad aktiváciu ďalších bezpečnostných alebo signalizačných prvkov pri detekcii dymu. Využiteľné je v domácnostiach, kanceláriách aj menších prevádzkach.

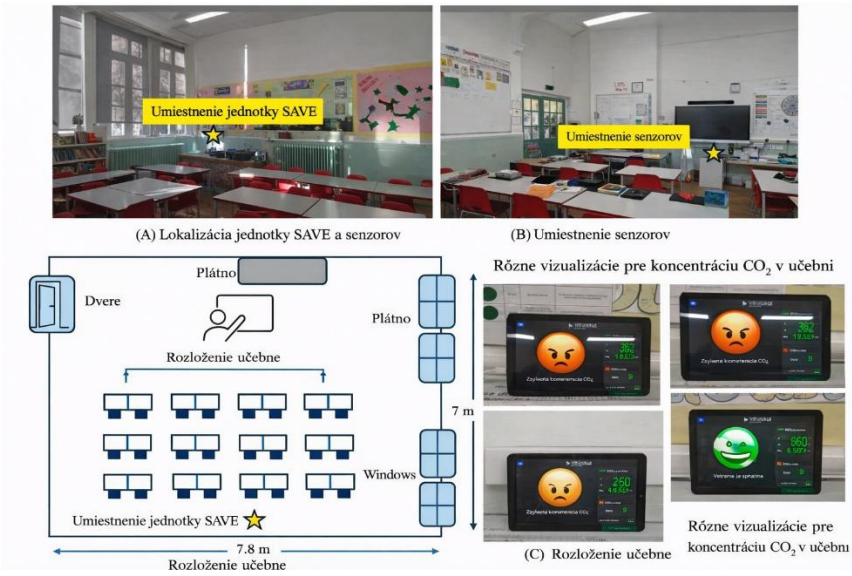
a) **b)**

Obrázok 7.5 *: Tesla inteligentný snímač dymu a) montáž na stenu b) položený na stole [94]*

Vplyv IoT systému SAVE na kvalitu vzduchu a spôsob vetrania v triedach bol hodnotený pri zobrazení úrovne CO_2 prostredníctvom vizuálnych (ikonických indikátorov) a zvukových signálov. Použitie vizuálneho alarmu viedlo k zníženiu koncentrácie CO_2 o 19,5 %, zatiaľ čo kombinácia vizuálneho a akustického upozornenia dosiahla pokles o 19 % [81]. Zostava jednotky SAVE bola pripojená na internet prostredníctvom vyhradenej brány a komunikačného protokolu LoRaWAN (výrobca ELSYS), čo umožnilo nepretržité monitorovanie koncentrácie CO_2 v triede pomocou infračervenej snímačovej technológie s presnosťou ±50 ppm v rozsahu 0–2 000 ppm a ±3 % v rozsahu 2 000–10 000 ppm, ako aj súčasné meranie teploty a

relatívnej vlhkosti. Presnosť merania teploty v rozsahu –10 až 60 °C a relatívnej vlhkosti v rozsahu 5–95 % dosahovala ±0,5 °C a ±3 % [95].

Senzory CO_2 od ELSYS používajú samokalibračný algoritmus Automatic Baseline Correction (ABC), ktorý dynamicky prispôsobuje hladinu CO_2 pozadiu. Navyše sa použili monitory CO_2 QTRAK (model 7575; TSI Inc., Shoreview, MN, USA) na porovnávacie merania CO_2, teploty a vlhkosti, poskytujúce údaje v rozsahu 0–5000 ppm s presnosťou ±3 % alebo ±50 ppm CO_2. Presnosť teploty (−10 až 60 °C) a vlhkosti (5–95 %) bola ±0,5 °C a ±3 %. Aerosólový spektrometer GRIMM EDM 107 (GRIMM Technologies Inc.) sa používal na meranie častíc v rozsahu priemeru 0,25–32 µm. Na meranie nanočastíc (10–700 nm) sa v rámci terénneho merania použila jednotka Testo Discmini (Pacitto et al., 2018), ktorá určuje počet a stredný priemer častíc na základe elektrického náboja aerosólov. Zároveň meria pľúcami uloženú povrchovú plochu (LDSA) s časovým rozlíšením 1 sekunda. Koncentrácie CO_2 namerané jednotkou SAVE silno korelovali s hodnotami z QTraku (korelačný koeficient 0,98).

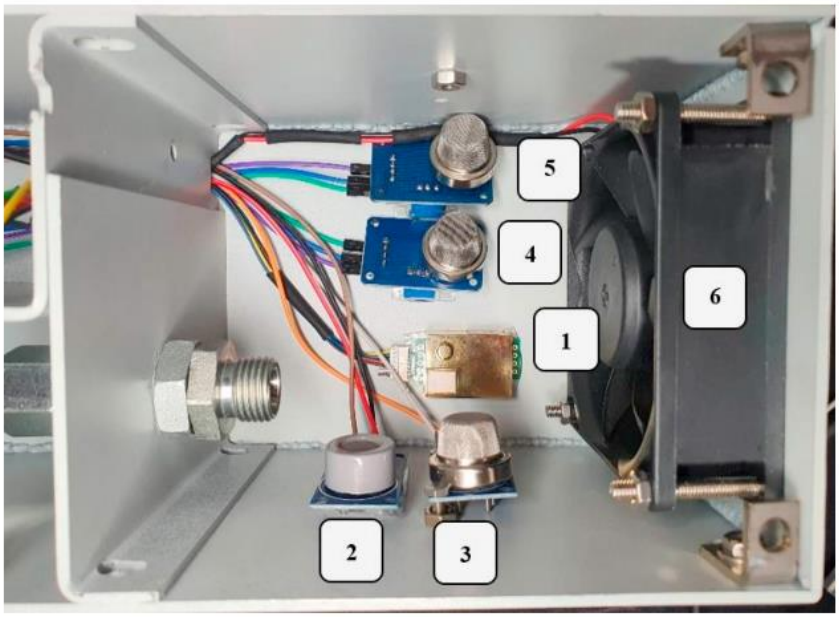


Obrázok 7.6 *: Umiestnenie senzorov v triede (A), pôdorys triedy (B) a zobrazenie vizuálneho displeja jednotky SAVE v závislosti od rôznych koncentrácií CO_2 v triede (C). [95]*

Tabuľka 7.2 *: Pravidlá alarmov SAVE systému a pokyny na vetranie vzhľadom na CO_2 prahy [95]*

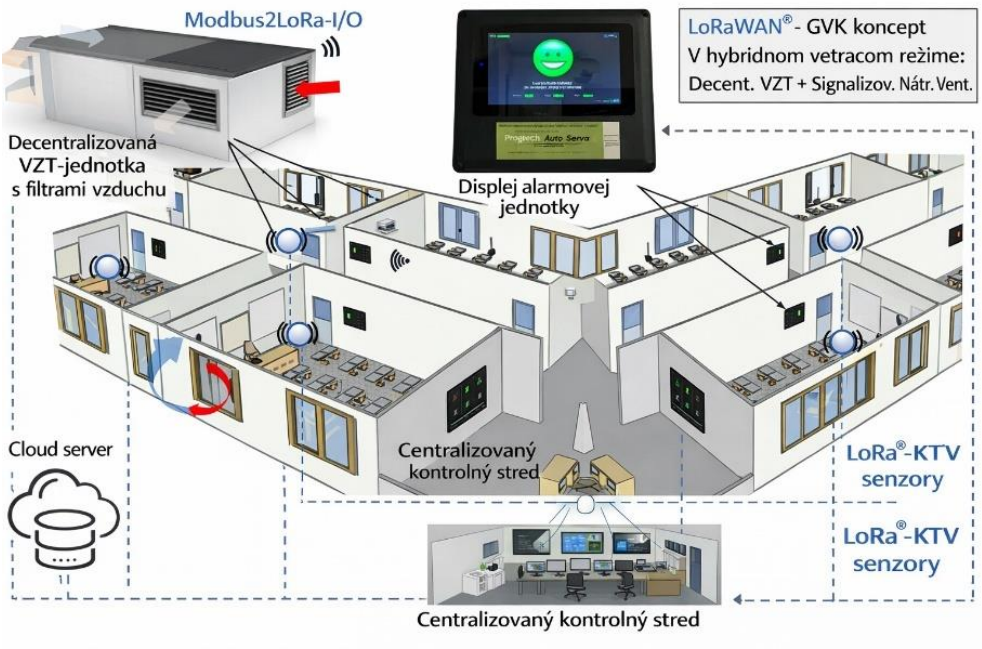
Prah CO_2	Schéma alarmu S1	Schéma alarmu S2	Pokyn na vetranie
Do 1000 ppm	Žiadny vizuálny ani akustický alarm. Tvár ostáva usmiata	Žiadny vizuálny ani akustický alarm. Tvár ostáva usmiata	Nie je potrebné otvárať/zatvárať okná
1000–1500 ppm	Tvár zmení farbu na jantárovú bez akustického signálu	Tvár zmení farbu na jantárovú s 2 s akustickým signálom	Otvoriť okná
Nad 1500 ppm	Tvár zmení farbu na červenú bez akustického signálu	Tvár zmení farbu na červenú s 5 s akustickým signálom	Otvoriť všetky dvere a okná

Bezdrôtový monitorovací systém bol testovaný v podzemných garážach obchodného centra v meste Žilina (Slovensko) počas experimentálnych meraní v roku 2022. Objekt pozostával z dvoch podlaží a merania prebiehali v rôznych polohách pri vstupe aj v hĺbke garáží, pričom každé meranie trvalo 5 minút pri stabilnej teplote 15 °C. Použitý bol jeden autonómny IoT uzol s piatimi snímačmi: MH-Z19 na CO_2 (0–2000 ppm), MQ-7 na CO (20–2000 ppm), MQ-131 na O_3 (10–1000 ppm), MQ-135 na VOC (10–300 ppm) a MQ-138 na organické plyny. Maximálne namerané hodnoty dosiahli 1767,41 ppm CO_2, 9,91 ppm CO, 65,52 ppm $PM_{2,5}$ a 142,23 ppm PM_{10}. Údaje boli prenášané do cloudovej IoT platformy Adafruit. Princíp inteligentného „SMART irrigation system“ bol analogicky využitý na dopytovo riadené vetranie a čo umožňuje znížiť dobu chodu ventilátorov [96]



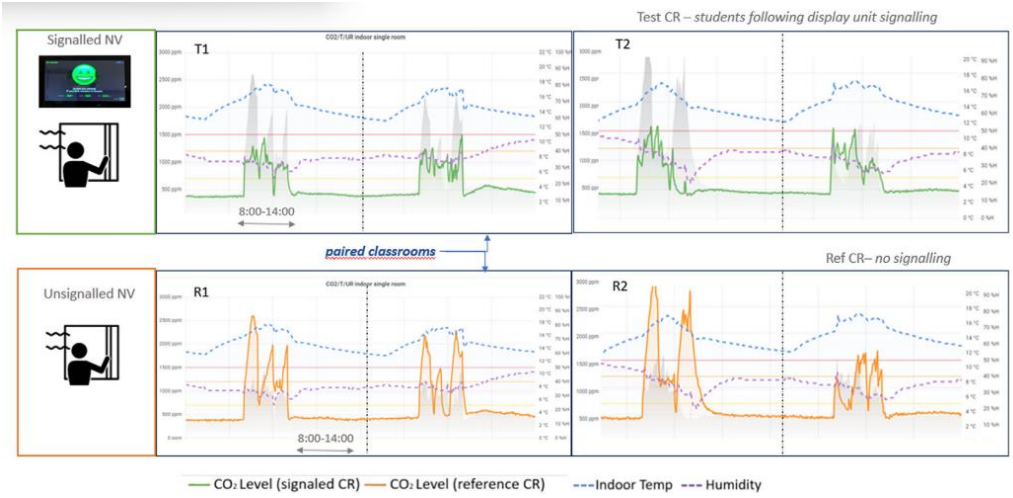
Obrázok 7.7 *: Monitorovací systém vetrania v garážach [96]*

Koncept SMART Healthy Schools (SHS), v preklade Inteligentné a zdravé školy, označuje integrovaný prístup k vytváraniu zdravého, bezpečného a energeticky efektívneho vnútorného prostredia v školských budovách prostredníctvom inteligentných technológií. Tento prístup je založený na využívaní digitálnych platforiem, údajov zo snímačov a automatizovaného riadenia s cieľom systematicky zlepšovať kvalitu vnútorného ovzdušia, tepelnú pohodu a celkový komfort užívateľov. V danom prípade je koncept SHS realizovaný prostredníctvom IoT platformy AulaSicura určenej na riadenie kvality vnútorného ovzdušia v školských objektoch. Navrhnutý systém vetrania pracuje s bezdrôtovými snímačmi koncentrácie CO_2, teploty a relatívnej vlhkosti, ktoré komunikujú prostredníctvom siete LoRaWAN. Na základe kontinuálneho monitorovania parametrov vnútorného prostredia systém podporuje riadené vetranie učební s cieľom udržiavať hygienicky vyhovujúce podmienky počas vyučovania. V pilotnej prevádzke na základnej škole v Taliansku bolo dosiahnuté zníženie priemernej koncentrácie CO_2 v triedach o 25 % (927 ppm v porovnaní s 1 283 ppm v referenčných miestnostiach). Hybridný režim prevádzky kombinuje manuálne vetranie aktivované vizuálnymi a akustickými upozorneniami s mechanickou ventiláciou. Platforma zároveň umožňuje škálovateľné riadenie veľkého počtu tried a vytvára priestor pre uplatnenie prediktívnych stratégií riadenia kvality vnútorného ovzdušia aj na úrovni celých školských areálov.

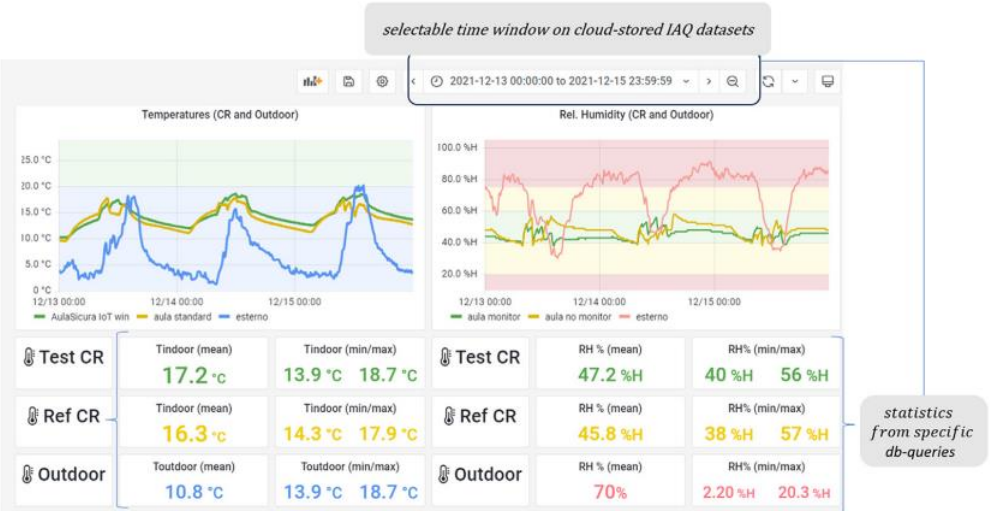


Obrázok 7.8 *: Schéma inteligentnej školy so systémom riadenia kvality vzduchu*

Obrázky dokumentujú experimentálne overenie regulácie kvality vnútorného ovzdušia v dvoch učebniach pri reálnych prevádzkových podmienkach. Grafické výstupy poukazujú na rozdiely medzi riadeným a neriadeným režimom vetrania, pričom hodnotenými veličinami sú koncentrácia CO_2, vnútorná teplota a relatívna vlhkosť vzduchu. Z výsledkov je zrejmé, že aplikácia regulačného algoritmu na základe údajov zo snímačov vedie k stabilnejšiemu priebehu koncentrácie CO_2 a k obmedzeniu jej extrémnych nárastov počas obsadenosti miestnosti. Súčasne je možné pozorovať priaznivý vplyv regulácie na tepelnú a vlhkostnú mikroklímu, ktorá sa dlhodobo udržiava v rozsahu odporúčanom pre pobyt osôb. Tieto zistenia potvrdzujú vhodnosť využitia inteligentných riadiacich prístupov pri zvyšovaní kvality vnútorného prostredia v školských budovách.



Obrázok 7.9 *: Výsledky regulácie kvality ovzdušia v učebni 1*

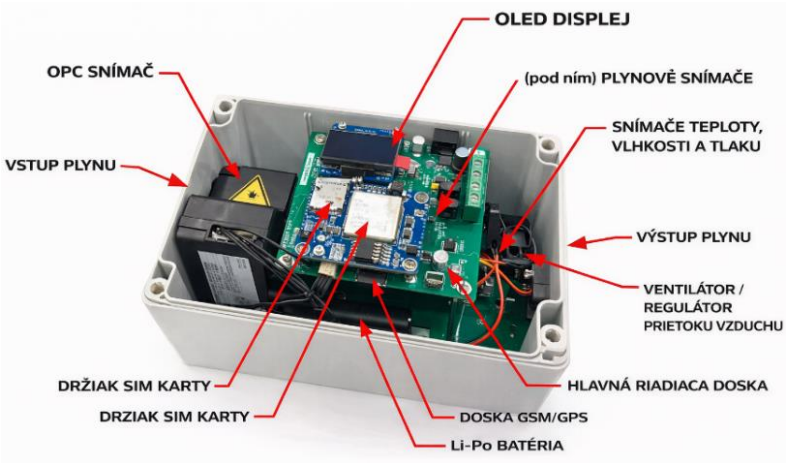


Obrázok 7.10 *: Výsledky regulácie kvality ovzdušia v učebni 2*

7.1.3 Mobilné inteligentné zariadenie monitorovania kvality ovzdušia

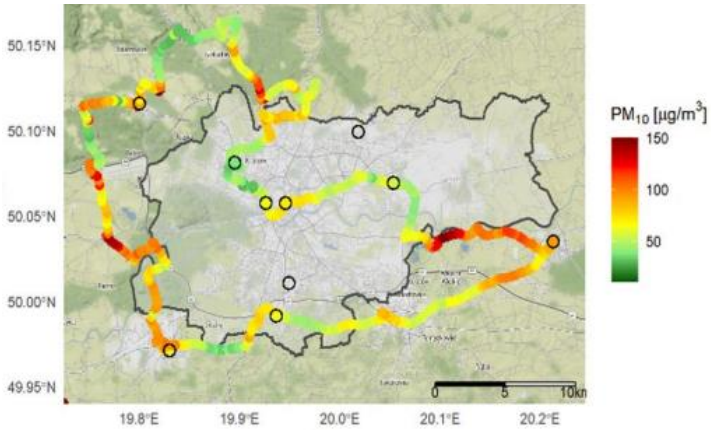
V štúdii bol navrhnutý a prakticky overený mobilný systém monitorovania kvality vonkajšieho ovzdušia, ktorý bol integrovaný na bicykel a testovaný v mestskom prostredí mesta Badajoz v Španielsku. Systém bol vybavený dvoma elektrochemickými snímačmi na meranie oxidu dusičitého a prízemného ozónu a optickým snímačom tuhých častíc OPC-N3, ktorý meral koncentrácie $PM_{2,5}$ a PM_{10}

na princípe rozptylu laserového žiarenia. Údaje boli zaznamenávané so vzorkovacím intervalom 3 s, celková hmotnosť zariadenia bola približne 1,1 kg a energetická autonómia dosahovala až 8 hodín. Po aplikovaní kalibrácie založenej na neurónovej sieti bola dosiahnutá výrazná zhoda s referenčnými meraniami, pričom koeficient determinácie R^2 presiahol hodnotu 0,83 pre všetky sledované znečisťujúce látky a hodnota RMSE pre $PM_{2,5}$ klesla na 2,59 µg/m³, čo potvrdzuje schopnosť systému spoľahlivo zachytiť priestorovú a časovú variabilitu znečistenia [97].



Obrázok 7.11 *: Mobilné SMART zariadenie : Monitorovanie kvality von. ovzdušia*

Na rozdiel od predchádzajúceho systému integrovaného na bicykel bol tento mobilný monitorovací systém pevne inštalovaný na osobnom vozidle, čo umožnilo pokrytie väčších vzdialeností a rozsiahlejších území počas jednej meracej kampane. Systém bol nasadený v rurálnych oblastiach v okolí Krakova (Poľsko), ktoré nie sú súčasťou národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia. Jadrom zariadenia bol optický aerosólový analyzátor DustTrak II 8530 na meranie PM_{10}, doplnený o GPS modul a záznam dát. Merania prebiehali počas šiestich zimných kampaní medzi decembrom 2021 a marcom 2022, s frekvenciou 3 Hz a rýchlosťou vozidla do 40 km/h. Po kalibrácii voči referenčným staniciam sa dosiahla korelácia R = 0,52–0,96, pričom boli identifikované lokálne hotspoty s koncentráciami až 250 µg/m³, čo potvrdzuje charakter systému ako inteligentného nástroja dopĺňajúceho stacionárne monitorovanie [98].



Obrázok 7.12 *: Monitorovania koncentrácie PM_{10} 19 januára 2022 Krakow*

7.1.4 Stacionárne inteligentné zariadenia monitorovania kvality ovzdušia

Jedným z príkladov väčšieho inteligentného monitorovacieho systému je projekt AirQo, ktorý bol implementovaný vo viacerých mestách v Ugande (napr. Kampala, Jinja, Fort Portal) ako rozsiahla stacionárna aj mobilná sieť snímačov kvality ovzdušia založená na nízkonákladovej technológie. AirQo používa autonómne zariadenia merajúce PM (0–500 µg/m³) spolu s doplnkovými parametrami ako teplota, vlhkosť a tlak, pričom sú navrhnuté pre náročné mestské podmienky s flexibilným napájaním (solárne, sieťové) a 2G/GSM komunikáciou. Sieť dnes obsahuje viac ako 120 statických a mobilných uzlov, ktoré poskytujú údaje v priemerných intervaloch okolo 90 s a posielajú ich do cloudovej platformy na AI-kalibráciu, analýzu a vizualizáciu.

Obrázok 7.13 *: Monitorovací systém v Ugande PM častíc*

Rozsiahle monitorovanie kvality vonkajšieho ovzdušia bolo realizované v meste Oradea (Rumunsko) prostredníctvom stacionárnej IoT siete, pozostávajúcej z viacerých pevných meracích uzlov umiestnených v dopravne zaťažených zónach.

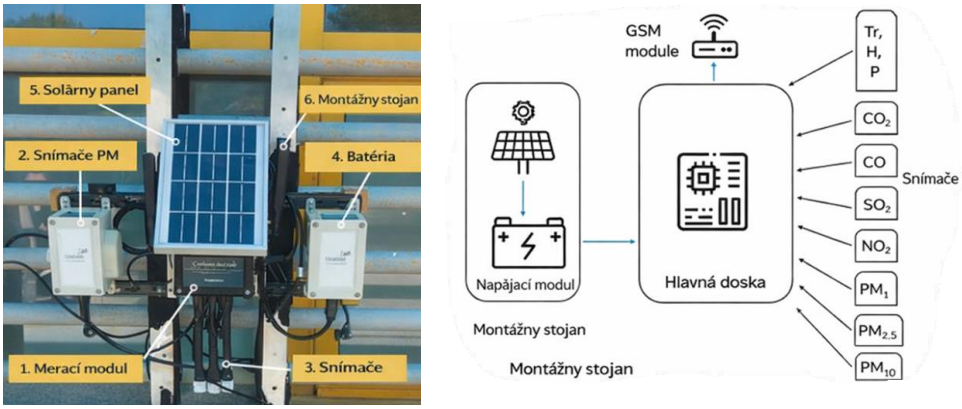
Každý uzol bol vybavený optickým snímačom tuhých častíc SDS011, schopným merať $PM_{2,5}$ a PM_{10} v rozsahu 0–999 µg/m³ s rozlíšením 0,3 µg/m³, ďalej snímačom teploty a vlhkosti DHT22 (presnosť ±0,5 °C a ±2 % RH) a tlakovým snímačom BMP280. Zariadenia boli napájané zo sieťového zdroja 230 V a komunikovali prostredníctvom Wi-Fi. Inteligentný charakter systému spočíval v automatickej kalibrácii dát pomocou neurónových sietí implementovaných v prostredí TensorFlow, kde sa po spracovaní dosiahlo $R^2 = 0{,}91$ pre $PM_{2,5}$ a zníženie RMSE pod 4,5 µg/m³. Platforma umožňovala vizualizáciu dát v reálnom čase a identifikáciu epizód s koncentráciami PM_{10} presahujúcimi 150 µg/m³, čím sa systém etabloval ako plnohodnotné inteligentné riešenie pre mestské monitorovanie ovzdušia [99].

a) **b)**

Obrázok 7.14 *: Inteligentný systém na monitorovanie kvality ovzdušia s kamerovým systémom na automatické rozpoznávanie áut*

Monitorovanie kvality vonkajšieho ovzdušia bolo realizované v meste Ruse (Bulharsko), konkrétne v areáli Univerzity Ruse „Angel Kanchev“ pri frekventovanom bulvári Rodina. Nasadený bol stacionárny autonómny monitorovací prototyp, pevne inštalovaný vo výške 2 m nad terénom, napájaný solárnym panelom v kombinácii s akumulátorom, čo umožnilo nepretržitú prevádzku 24/7 počas 12 mesiacov (03/2024 – 03/2025). Zariadenie využívalo IoT platformu Libelium a meralo koncentrácie CO, CO_2, NO_2, SO_2, PM_1, $PM_{2,5}$ a PM_{10} spolu s teplotou, vlhkosťou a tlakom, s periódou 15 minút. Dáta boli prenášané cez GSM do cloudového úložiska, kde prebiehala automatizovaná analýza. Namerané priemerné hodnoty dosiahli $PM_{2,5}$ = 10,48 µg/m³, PM_{10} = 34,44 µg/m³, pričom epizodické

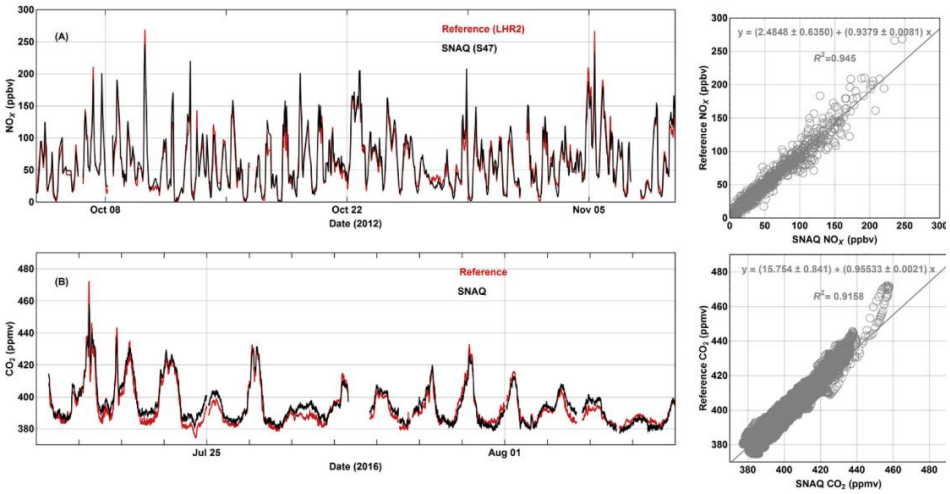
maximá PM_{10} presiahli 10 000 µg/m³. Inteligentný charakter systému spočíval v prepojení autonómneho napájania, kontinuálneho zberu dát, cloudovej infraštruktúry a pokročilých analytických metód (k-means klastrovanie, neparametrická štatistika), ktoré umožnili identifikáciu typických znečisťujúcich scenárov a podporu dátovo riadeného manažmentu kvality ovzdušia [100].



a) **b)**

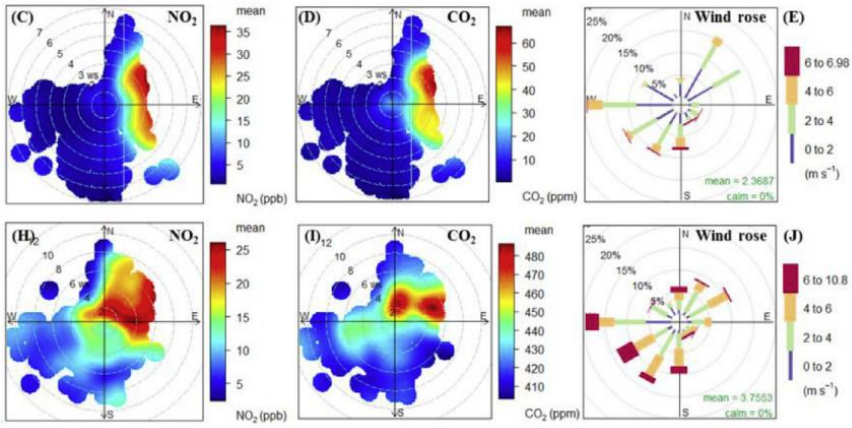
Obrázok 7.15 *: Univerzitné zariadenia na monitorovanie kvalitu ovzdušia a) fyzikálny prototyp b) schéma snímačov*

Monitorovanie kvality vonkajšieho ovzdušia prebiehalo v areáli letiska London Heathrow (Spojené kráľovstvo) pomocou hustej siete nízkonákladových stacionárnych zariadení SNAQ s odhadovanou jednotkovou cenou približne 300 €. Nasadených bolo až 40 uzlov inštalovaných vo výške ~3 m, vybavených elektrochemickými snímačmi Alphasense (NO, NO_2, CO), NDIR snímačom SenseAir K33 (CO_2) a optickým snímačom častíc. Porovnanie s referenčnou stanicou preukázalo vysokú presnosť merania, pričom pre NO_x bola dosiahnutá korelácia $R^2 \approx 0{,}95$ a pre CO_2 $R^2 \approx 0{,}92$, so smernicami regresie blízkymi hodnote 1,0; reprodukovateľnosť medzi uzlami dosiahla $R^2 > 0{,}90$. Priestorová rekonštrukcia koncentrácií NO_2 ukázala, že lokálne letiskové zdroje tvoria 30–36 % ročnej koncentrácie, zatiaľ čo dominantnú časť znečistenia tvorí regionálne pozadie. Výsledky zároveň poukazujú na potrebu, aby inteligentné monitorovacie systémy v reálnom čase integrovali meteorologické údaje [62].



Obrázok 7.16 *: Porovnanie koncentrácie CO2 a NO stanice s referenciou*

Obrázok 8.14 ukazuje vplyv počasia na jednotlivé koncentrácia znečisťujúcich látok. Takéto polárne a smerovo orientované zobrazenie dát má významnú výhodu pri monitorovaní kvality ovzdušia, pretože umožňuje priamo prepájať koncentrácie znečisťujúcich látok so smerom a rýchlosťou vetra. Vďaka tomu je možné identifikovať dominantné zdroje znečistenia a ich priestorovú lokalizáciu bez potreby zložitých numerických modelov. Farebné mapy poskytujú rýchlu vizuálnu interpretáciu úrovní koncentrácií NO_2 a CO_2, zatiaľ čo veterné ružice odhaľujú transport znečistenia v závislosti od meteorologických podmienok. Tento spôsob vizualizácie zvyšuje prehľadnosť, podporuje porovnanie rôznych časových období a výrazne uľahčuje odbornú analýzu procesov šírenia znečisťujúcich látok v ovzduší.



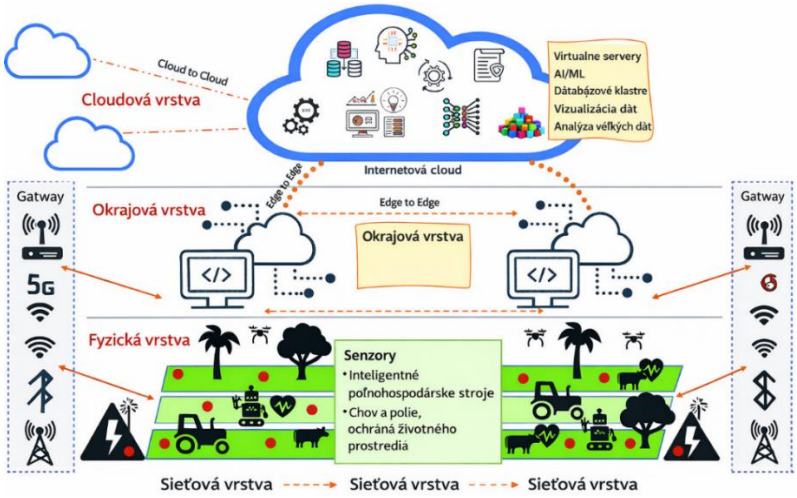
Obrázok 7.17 *: Polárne grafy lokálnych a sieťových koncentrácií znečistenia*

7.2 SMART technológie v poľnohospodárstve

Inteligentná agronómia a ekologické hospodárenie predstavujú moderný prístup k poľnohospodárstvu, ktorý spája digitálne technológie, senzory, dátovú analytiku a environmentálne princípy. Moderné poľnohospodárstvo využíva zariadenia, ako sú meteorologické stanice, zavlažovacie a drenážne systémy s inteligentným riadením, systémy obnoviteľných zdrojov energie (napr. solárne panely), technológie na zber a recykláciu dažďovej vody či monitorovanie kvality pôdy a ovzdušia. Cieľom je optimalizovať pestovanie plodín, šetriť prírodné zdroje a minimalizovať dopad na životné prostredie. Tento prístup zvyšuje efektívnosť, znižuje náklady a podporuje trvalo udržateľné poľnohospodárstvo.

Obrázok 7.18 *: Konceptuálna štruktúra SMART systému v poľnohospodárstve*

Poľnohospodárstvo a súvisiace systémy vytvorili v roku 2022 približne 16,2 miliardy ton CO_2 ekvivalentu (Gt CO_2eq), čo predstavuje približne 29,7 % celkových antropogénnych emisií – od roku 2000 nárast o 10 % [101]. Sektor poľnohospodárstva, lesníctva a zmeny využitia pôdy (AFOLU) tvorí podľa databáz FAO a IPCC približne 13 – 21 % globálnych emisií. V USA poľnohospodárstvo vrátane elektrickej energie v roku 2020 prispelo k 11,2 % celkových emisií krajiny (6,7 % z poľnohospodárskych aktivít, zvyšok nepriamo z elektriny) [102].

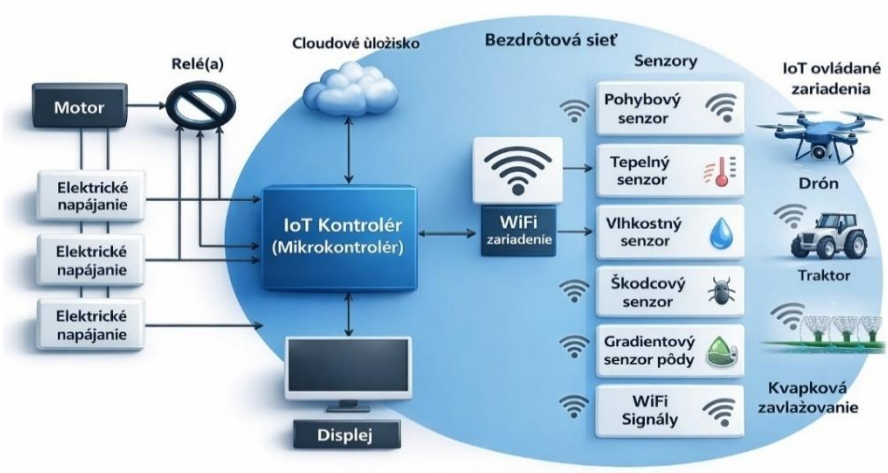


Obrázok 7.19 *: Základne časti (fyzikálne, digitálne, telekomunikačné) inteligentného poľnohospodárskeho systému [103]*

Emisie z priameho využitia energie (palivá, elektrina) v poľnohospodárstve dosiahli v roku 2019 približne 1,029 miliardy ton CO_2 ekv. ročne, pričom 523 Mt CO_2eq sú priamo z poľnohospodárskej energetiky (motorové palivá), a zvyšok z elektriny. Zavlažovanie predstavuje významnú energetickú položku: ročne spotrebuje asi 1 896 PJ a vyprodukuje 216 miliónov ton CO_2, čo sú približne 15 % z celkových emisií a energetickej spotreby v sektore zavlažovania [104].

V modernom poľnohospodárstve zohrávajú inteligentné senzory kľúčovú úlohu pri efektívnom riadení výroby. Umožňujú sledovanie vlhkosti pôdy, výživových látok, klimatických podmienok či zdravia plodín a zvierat v reálnom čase. Tieto zariadenia pomáhajú farmárom optimalizovať zavlažovanie, znižovať spotrebu hnojív a predchádzať výskytu škodcov. Vďaka využitiu dátovej analytiky je možné lepšie plánovať výsadbu aj zber. Inteligentné senzory podporujú trvalo udržateľné hospodárenie, šetria vodu, energiu a zároveň zvyšujú výnosy. Ich implementácia otvára dvere k presnejšiemu, efektívnejšiemu a ekologickejšiemu poľnohospodárstvu [105].

- **Senzory vlhkosti pôdy** merajú obsah vody v pôde a pomáhajú optimalizovať zavlažovanie.
- **pH senzory** zisťujú kyslosť alebo zásaditosť pôdy pre vhodné podmienky rastu.
- **Svetelné senzory (PAR)** merajú intenzitu fotosynteticky aktívneho žiarenia.
- **Senzory CO_2** monitorujú koncentráciu oxidu uhličitého v skleníkoch na podporu fotosyntézy.



Obrázok 7.20 : *Základná schéma inteligentnej siete v poľnohospodárstve [106]*

Obrázok znázorňuje inteligentný poľný systém, ktorý pomocou senzorov vlhkosti a tlaku umožňuje optimalizovať zavlažovanie podľa aktuálnych podmienok pôdy. Mobilné ovládanie zvyšuje presnosť a šetrí vodu. Rozdiely tlaku v systéme pomáhajú odhaliť straty či nerovnomerné rozdelenie vody, čo zvyšuje efektivitu a umožňuje personalizované zavlažovanie.

7.3 SMART technológie v elektrických sieťach

SMART grid, alebo inteligentná elektrická sieť, je moderný systém distribúcie a riadenia elektrickej energie, ktorý využíva digitálne technológie, senzory, automatizáciu a obojsmernú komunikáciu medzi výrobcami a spotrebiteľmi. Umožňuje flexibilné a efektívne riadenie výroby, prenosu a spotreby energie v reálnom čase. Medzi hlavné výhody patrí vyššia spoľahlivosť dodávok, zníženie strát v sieti, možnosť integrácie obnoviteľných zdrojov energie, rýchlejšie odhalenie porúch a nižšie prevádzkové náklady. SMART grid zároveň podporuje udržateľnosť a znižovanie emisií skleníkových plynov.

Vedecké štúdie uvádzajú, že implementácia inteligentných elektrických sietí umožňuje zníženie celkových distribučných strát o približne 6,5 %, pričom spoľahlivosť dodávky elektrickej energie sa zvyšuje až o 20 %. Reakčný čas siete na poruchové stavy sa skracuje z rádovo minút na hodnoty pod 300 ms, čo výrazne zlepšuje stabilitu prevádzky. Integrácia decentralizovaných obnoviteľných zdrojov môže dosahovať podiel až 45 % z celkového inštalovaného výkonu bez negatívneho vplyvu na kvalitu napätia. Zároveň sa uvádza pokles emisií CO_2 v elektroenergetike o 12 % a zníženie prevádzkových nákladov distribučných sústav približne o 15 % v porovnaní s konvenčnými sieťami.

Výhody sú napríklad:

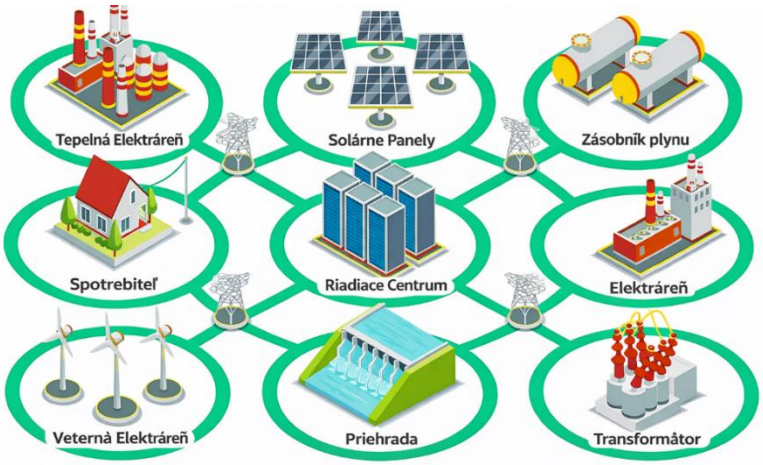
Úspora energie a väčšia kontrola nad spotrebou: Inteligentné siete prinášajú používateľom možnosť efektívnejšie riadiť spotrebu energie a tým dosiahnuť výrazné úspory. Vďaka pokročilým meracím technológiám (AMI) a systémom riadenia dopytu (DR) získavajú spotrebitelia prehľad o svojej aktuálnej spotrebe a nákladoch, čo im umožňuje prispôsobiť svoje správanie s cieľom znížiť výdavky na energiu [52].

Presné sledovanie spotreby: Vysoké časové rozlíšenie, ktoré umožňujú moderné automatizované meracie systémy, zaznamenáva údaje v sekundových intervaloch. Takto detailné meranie umožňuje presnejšie vyúčtovanie a zároveň poskytuje podnety na optimalizáciu spotreby.

Flexibilita v riadení zaťaženia: Vďaka technológiám odozvy na dopyt môžu spotrebitelia aktívne alebo automaticky upravovať svoju spotrebu podľa aktuálnej situácie – napríklad v závislosti od cien elektriny alebo dostupnosti obnoviteľných zdrojov. Tým získavajú väčšiu kontrolu nad svojimi energetickými nákladmi.

Možnosti zníženia výdavkov: Pri využívaní taríf závislých od času odberu (TOU) a inteligentných domácich zariadení môžu domácnosti dosiahnuť úsporu na úrovni 10 až 15 % z celkových účtov za energiu. Tieto úspory vyplývajú z optimalizácie spotreby v časoch, keď sú ceny najnižšie.

Inteligentné ovládanie prostredníctvom IoT: Zariadenia prepojené cez internet vecí, ako napríklad inteligentné vykurovacie systémy, dokážu automaticky prispôsobiť svoju činnosť aktuálnym vonkajším podmienkam. Týmto spôsobom sa zvyšuje ich účinnosť a znižujú sa náklady spojené s prevádzkou domácnosti.

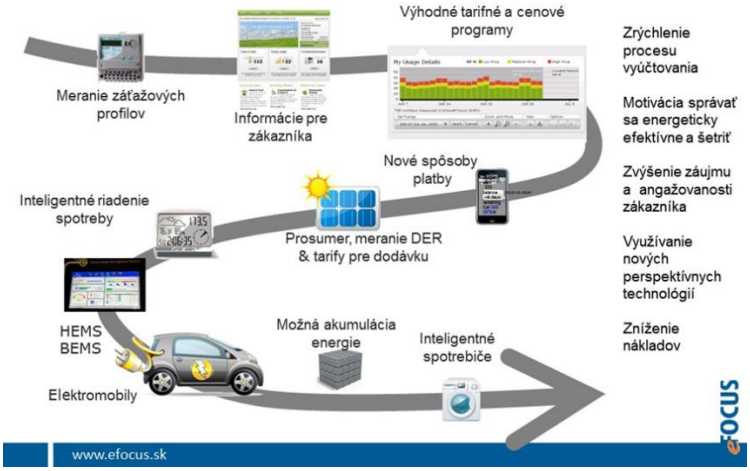


Obrázok 7.21 *: SMART elektrická sieť mesta [52]*

7.3.1 Inteligentné meracie systémy (IMS)

V rámci modernizácie distribučných elektrických sústav sa čoraz viac uplatňuje koncept inteligentných meracích systémov (IMS), ktoré umožňujú presné, automatizované a diaľkovo dostupné meranie spotreby elektrickej energie. Zavádzanie týchto systémov na Slovensku je v súlade s požiadavkami Ćópskej únie na zvýšenie efektívnosti, transparentnosti a flexibility trhu Unergiami [51]. Inteligentné elektromery ponúkajú funkcie ako automatizovaný prenos údajov, diaľkové odpočty, identifikácia výpadkov v reálnom čase a detailná analýza odberového profilu. Tieto vlastnosti umožňujú optimalizáciu spotreby energie a môžu viesť k úsporám na úrovni 3 – 5 % ročne.

Medzi ďalšie prínosy patrí znižovanie prevádzkových nákladov distribučných spoločností, zvýšenie spoľahlivosti dodávky elektriny a možnosť tarifnej diferenciácie podľa času alebo zaťaženia siete. Ku koncu októbra 2015 bolo na Slovensku nainštalovaných približne 20 000 inteligentných meračov na odberných miestach s ročnou spotrebou nad 15 MWh. Cieľom bolo dosiahnuť pokrytie aspoň 80 % zákazníkov I. kategórie do konca roka 2015.



Obrázok 7.22 *: Flowchart aplikovania inteligentných meračov spotreby elektrickej energie [108]*

7.3.2 Inteligentné zásuvky

Inteligentné zásuvky slúžia na vzdialené ovládanie elektrických spotrebičov a zároveň umožňujú monitorovanie ich elektrickej spotreby. Sú navrhnuté pre prevádzku v jednofázovej sieti s menovitým napätím 230 V a maximálnym prúdom do 16 A, čo zodpovedá maximálnemu zaťaženiu približne 3,7 kW. Vybrané modely podporujú bezdrôtovú komunikáciu prostredníctvom Wi-Fi alebo

nízkoenergetických sieťových protokolov určených pre inteligentné domácnosti. Zásuvky umožňujú sledovanie okamžitej aj kumulatívnej spotreby elektrickej energie v reálnom čase, pričom presnosť merania dosahuje rádovo desatiny kWh. Vďaka kompaktným rozmerom, typicky okolo 50 × 70 × 75 mm, nezaberajú výrazný priestor a sú vhodné aj do hustejšie osadených zásuvkových polí [109] [110]. Funkčne podporujú časové plánovanie, automatizované scenáre a integráciu do systémov inteligentného riadenia budov. Na obrázku je znázornený príklad inteligentných zásuviek spolu s mobilným používateľským rozhraním, ktoré umožňuje prehľadné zobrazenie spotreby a konfiguráciu prevádzkových režimov.

a) **b)**

Obrázok 7.23 *: Inteligentné WiFi zásuvky a) Immax NEO LITE + mobilná aplikácia b) Xiaomi Mi SMART Plug 2 [109] [110]*

Viacfázové inteligentné merače spotreby elektrickej energie sú určené na online monitorovanie trojfázových elektrických sústav v obytných aj komerčných objektoch. Zariadenie sa inštaluje do elektrického rozvádzača a využíva externé prúdové transformátory na bezkontaktné snímanie prúdu v jednotlivých fázach bez nutnosti prerušenia hlavného vedenia. Umožňuje meranie napätia v rozsahu 3 × 230/400 V, prúdu do približne 63 A na fázu a celkového výkonu až do 18 kW. Namerané údaje o napätí, prúde, okamžitom výkone a spotrebe elektrickej energie sú v reálnom čase prenášané prostredníctvom bezdrôtovej siete do používateľského rozhrania, kde je možné dlhodobé sledovanie a vyhodnocovanie energetickej bilancie objektu. Takéto riešenie je vhodné na detailné energetické monitorovanie a optimalizáciu spotreby v domácnostiach aj menších prevádzkach.

a) **b)**

Obrázok 7.24 *: Immax NEO SMART trojfázový WiFi merač spotreby*

7.3.3 Inteligentné riešenia osvetlenia

Inteligentné riešenia osvetlenia predstavujú moderný prístup k správe svetelných systémov, ktorý kombinuje úsporu energie, komfort a automatizáciu. Využívajú senzory, bezdrôtové siete a algoritmy riadenia na prispôsobenie osvetlenia aktuálnym podmienkam a potrebám používateľov. Tieto technológie zohrávajú kľúčovú úlohu v budovách s vysokou energetickou efektívnosťou a prispievajú k znižovaniu environmentálnej záťaže aj nákladov na prevádzku.

Koncept SMART osvetlenia vznikol v rámci rozvoja Internetu vecí (IoT). Prvé inteligentné zariadenia sa objavili už v 90. rokoch, ale až masový nástup bezdrôtových technológií, ako sú WiFi a Bluetooth, umožnil rozvoj inteligentných riešení v oblasti osvetlenia. Dôležitým medzníkom bolo zavedenie otvorených štandardov, ako je Zigbee alebo Z-Wave, ktoré umožnili integráciu produktov rôznych výrobcov. Najnovším posunom je štandard MATTER, ktorý zjednocuje komunikáciu medzi SMART zariadeniami naprieč značkami a platformami. To zákazníkom dáva istotu, že ich osvetlenie bude kompatibilné s riešeniami od Apple, Google, Amazonu alebo Tuya .

Nasadenie inteligentného systému prebehlo v Thajsku (Bangkok) v prostredí verejného vonkajšieho osvetlenia, kde boli testované dva LED svetelné stožiare s výškou 3 m a rozstupom 7 m. Každý uzol obsahoval 55 W LED svietidlo, snímač osvetlenosti, PIR snímač pohybu, snímač prachových častíc PM2,5, IP kameru a riadiacu jednotku Wemos D1 R2. Merania prebiehali v roku 2023 počas nočných intervalov 18:00–06:00. Automatický režim udržiaval osvetlenosť 40 lx pri priemernom príkonu 30 W, čo viedlo k úspore energie približne 40 % oproti manuálnemu režimu (50–60 W). IoT platforma Blynk umožnila vzdialený dohľad a riadenie, pričom architektúra je priamo aplikovateľná aj na SMART zavlažovací (irrigation) systém, kde rovnaký princíp snímačov, dátovej konektivity a

adaptívneho riadenia umožňuje optimalizáciu spotreby vody a prevádzkových nákladov [111]. Implementácia distribuovaného inteligentného systému prebehla v roku 2019 počas jedného mesiaca v podzemnej stanici metra v Nankingu (Čína) a v administratívnej budove v Ningbo. V stanici bolo nasadených 276 LED svietidiel, každé vybavené bezdrôtovým modulom so snímačom PIR, mikrovlnným Dopplerovým snímačom a snímačom osvetlenosti, komunikujúcim cez ZigBee mesh sieť. Dosiahnutá priemerná úspora energie bola 45 %, pri nízkej obsadenosti až 71,5 %, s redukciou príkonu zo 16 W na 10 % úrovne stmievania. V kancelárii s plochou 1 399 m² a 201 svietidlami bola zaznamenaná úspora 36 %. [112].

POUŽITÁ LITERATÚRA

[1] European Commission, "European Green Deal," 2024. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/european-green-deal_en

[2] B. B. Technologies, "History of building automation," 2025. [Online]. Available: https://www.boschbuildingsolutions.com/xc/en/news-and-stories/history-of-building-automation/

[3] ArchDaily, "The history of building automation started in 1883 when Warren Johnson invented the thermostat," *ArchDaily*, 2020, [Online]. Available: https://www.archdaily.com/964683/a-brief-history-of-automation-in-architecture

[4] Automation.com, "Origins of Building Automation from Cornelius Drebbel's Thermostat," 2018. [Online]. Available: https://blog.connectwithodin.com/the-past-present-and-future-of-building-automation-systems

[5] N. Balta-Ozkan, B. Boteler, and O. Amerighi, "Smart homes and their users: a systematic analysis and key challenges," *Energy Policy*, vol. 66, pp. 70–85, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.01.045.

[6] N. Asim *et al.*, "Sustainability of Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) Systems in Buildings—An Overview," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 2, p. 1016, 2022, doi: 10.3390/ijerph19021016.

[7] Organisation for Economic Co-operation and D. (OECD), *Smart City Data Governance: Challenges and the Way Forward*. in OECD Urban Studies. Paris: OECD Publishing, 2023. doi: 10.1787/e57ce301-en.

[8] J. Xiao and R. Boutaba, "The Design and Implementation of an Energy-Smart Home in Korea," *Journal of Computing Science and Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 204–210, Sep. 2013, doi: 10.5626/JCSE.2013.7.3.204.

[9] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, *A review on buildings energy consumption information*, vol. 40, no. 3. Elsevier, 2008. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.

[10] IMD Smart City Observatory, "IMD Smart City Index Rankings," 2025. [Online]. Available: https://www.imd.org/smart-city-observatory/home/rankings/

[11] International Organization for Standardization, "Energy management systems – Requirements with guidance for use," 2011. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/69426.html

[12] International Electrotechnical Commission, "Communication networks and systems for power utility automation," 2003. [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/publication/6028

[13] Crossroad Energy, "Understanding the Difference Between Analog and Digital Signals," 2024. [Online]. Available: https://crossroadenergy.com/understanding-the-difference-between-analog-and-digital-signals/

[14] J. G. Liang *et al.*, "Multiplex-gas detection based on non-dispersive infrared technique: A review," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 356, p. 114318, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.SNA.2023.114318.

[15] C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.

[16] D. Nedelkovski, "DIY Air Quality Monitor - PM2.5, CO2, VOC, Ozone, Temp & Hum - Arduino Meter," 2021. [Online]. Available: https://howtomechatronics.com/projects/diy-air-quality-monitor-pm2-5-co2-voc-ozone-temp-hum-arduino-meter/

[17] Henan Hanwei Electronics Co. Ltd, "MQ-7 Semiconductor Sensor for Carbon Monoxide," 2021, *Zhengzhou, China*. [Online]. Available: https://www.hwsensor.com

[18] B. Ertu, "The Fabrication of Porous Barium Titanate Ceramics via Pore-Forming Agents (PFAs) for Thermistor and Sensor Applications," in *Powder Metallurgy*, InTech, 2012. doi: 10.5772/33930.

[19] K. Uchino, *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*. Boston, MA: Springer Science & Business Media, 2010.

[20] Sharp Corporation, "Sharp GP2Y1014AU0F Dust Sensor Datasheet," 2016.

[21] Winsen Electronics Technology Co. Ltd., "Winsen ZPH02 Dust Sensor."

[22] Plantower, "Plantower PMS5003 Particulate Matter Sensor."

[23] Plantower, "Plantower PMS7003 Particulate Matter Sensor."

[24] Sensirion AG, "Sensirion SEN55-SDN-T Environmental Sensor."

[25] Sensirion AG, "Sensirion SPS30 Particulate Matter Sensor."

[26] DFRobot, "Gravity: PM2.5 Air Quality Sensor SEN0460," 2024.

[27] Alphasense Ltd., "Alphasense Optical Particle Counters (OPC)."

[28] Alphasense Ltd., "Carbon Monoxide Sensors (CO)," 2024.

[29] DFRobot, "Environmental Quality Sensor (CO2, TVOC, eCO2, eTVOC, Temp & Humidity)," 2024.

[30] Hanwei Electronics Co. Ltd., "MQ-7 Carbon Monoxide Gas Sensor Datasheet," 2017.

[31] Winsen Electronics, "ZE15-CO Electrochemical Carbon Monoxide Gas Sensor," 2024.

[32] DFRobot, "Gravity: Analog Electrical Conductivity Sensor / Meter V2," 2024.

[33] DFRobot, “Gravity: Analog Infrared CO2 Sensor For Arduino (0~5000 ppm),” 2024.

[34] Techfun s.r.o., “Senzor CO2 MH-Z19,” 2024.

[35] DFRobot, “Gravity: UART Infrared CO2 Sensor (MH-Z19B) For Arduino (0~5000 ppm),” 2024.

[36] DFRobot, “Gravity: I2C & UART CO2 Sensor (SCD41),” 2024.

[37] CO2Meter Inc., “SprintIR®-100% CO2 Sensor,” 2024.

[38] CO2Meter Inc., “Alphasense O2-A2 Oxygen Sensor,” 2025.

[39] DFRobot, “Gravity: Electrochemical Oxygen Sensor (0-25%Vol),” 2025.

[40] Techfun s.r.o., “DFRobot Gravity – senzor O2 kyslíka 0–100% (I2C),” 2025.

[41] S. AG, “SDP816-125Pa: Differential Pressure Sensor,” 2025. [Online]. Available: https://sensirion.com/products/catalog/SDP816-125Pa

[42] Techfun s.r.o., “DFRobot Fermion LWLP5000 - diferenčný senzor tlaku ±500Pa,” 2025. [Online]. Available: https://techfun.sk/produkt/dfrobot-fermion-lwlp5000-diferencny-senzor-tlaku-%c2%b1500pa/

[43] DFRobot, “Fermion: LWLP5000 Low Differential Pressure Sensor (±500Pa),” 2025. [Online]. Available: https://www.dfrobot.com/product-2490.html

[44] DFRobot, “Gravity: I2C BME680 Environmental Sensor (Temperature, Humidity, Pressure and Gas),” 2025. [Online]. Available: https://www.dfrobot.com/product-1792.html

[45] DFRobot, “Gravity: I2C High Temperature Sensor (K-Type, 800°C),” 2025. [Online]. Available: https://www.dfrobot.com/product-2841.html

[46] DFRobot, “Gravity: MLX90614-DCI Non-contact IR Temperature Sensor,” 2025. [Online]. Available: https://www.dfrobot.com/product-1745.html

[47] Techfun s.r.o., “MAX6675 + Gravity K-Type Thermocouple Module,” 2025. [Online]. Available: https://techfun.sk/produkt/max6675-driver-termoclanok-k/

[48] DFRobot, “Gravity: MLX90614-DCC Non-contact IR Temperature Sensor,” 2025. [Online]. Available: https://www.dfrobot.com/product-1495.html

[49] DFRobot, “Gravity: Water Flow Sensor (G1/2),” 2025.

[50] Techfun.sk, “Senzor prietoku tekutiny G1/2,” 2025.

[51] Techfun.sk, “Kovový senzor prietoku tekutiny,” 2025.

[52] P. Kortiš, “Úvod do sveta Internetu Vecí - Prednáška 5 : Senzorický subsystém,” 2023.

[53] P. Kortiš, “Úvod do sveta Internetu Vecí – Prednáška 7: Komunikačný subsystém,” 2023.

[54] I. S. S. Team, "I2C Bus on the Arduino-based PLC for industrial automation," Feb. 2020.

[55] Omnitron Systems, "What is Modbus? A Complete Guide to Modbus Protocol and its Applications," 2025. [Online]. Available: https://www.omnitron-systems.com/blog/what-is-modbus-a-complete-guide-to-modbus-protocol-and-its-applications

[56] Accuenergy, "Wireless Modbus: How it Works & Choosing the Right Communication Method," 2025. [Online]. Available: https://www.accuenergy.com/support/reference-directory/wireless-modbus/

[57] R. S. Alvarez, "What is MQTT and How It Works," 2023. [Online]. Available: https://randomnerdtutorials.com/what-is-mqtt-and-how-it-works/

[58] Zoho Corporation, "Understanding Widgets – Types of Widgets," 2025. [Online]. Available: https://help.zoho.com/portal/en/kb/iot/dashboards/widgets/understanding-widgets/articles/understanding-widgets#Types_of_Widgets

[59] A. Morchid, R. Jebabra, H. M. Khalid, R. El Alami, H. Qjidaa, and M. Ouazzani Jamil, "IoT-based smart irrigation management system to enhance agricultural water security using embedded systems, telemetry data, and cloud computing," *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102829, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.RINENG.2024.102829.

[60] Amazon.com Inc., "Amazon Echo Dot (5th Generation)," 2022. [Online]. Available: https://www.amazon.com/dp/B09B8V1LZ3

[61] Google LLC, "Google Nest Hub (2nd gen)," 2021. [Online]. Available: https://store.google.com/product/nest_hub_2nd_gen_specs

[62] Loxone Electronics GmbH, "Miniserver," 2024. [Online]. Available: https://shop.loxone.com/sksk/product/100335-miniserver

[63] BuilderPro, "Jednorúrkový vykurovací systém: schéma a princíp činnosti," 2025. [Online]. Available: https://builderpro.techinfus.com/sk/otoplenie/odnotrubnoe.html

[64] Loxone Electronics GmbH, "Ventilový pohon Air," 2024. [Online]. Available: https://shop.loxone.com/sksk/product/100603-valve-actuator-air

[65] C. Sun *et al.*, "An intelligent control and regulation strategy aiming at building level heating balance in district heating system," *Energy*, vol. 278, p. 127941, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.127941.

[66] A. Vasalou *et al.*, "In pursuit of thermal comfort: An exploration of smart heating in everyday life," *Int. J. Hum. Comput. Stud.*, vol. 186, p. 103245, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.IJHCS.2024.103245.

[67] Loxone Electronics GmbH, "Schéma systému – Loxone," 2024. [Online]. Available: https://www.loxone.com/sksk/produkty/softver/schema-systemu/

[68] The Underfloor Heating Store, "How Does Underfloor Heating Work?," 2025. [Online]. Available: https://www.theunderfloorheatingstore.com/blogs/latest/how-does-underfloor-heating-work

[69] Loxone Electronics GmbH, "Ako ušetriť 600 000 € vo veľkej budove vďaka inteligentnému riadeniu," 2024. [Online]. Available: https://www.loxone.com/sksk/blog/ako-usetrit-600-tisic-eur-vo-velke-budove/

[70] M. Gough, K. Rakhsia, T. Bandeira, H. Amaro, R. Castro, and J. P. S. Catalão, "Design and implementation of a data-driven intelligent water heating system for an island community: A case study," *Energy Convers. Manag.*, vol. 285, p. 117007, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2023.117007.

[71] T. Van Oevelen, T. Neven, A. Brès, R. R. Schmidt, and D. Vanhoudt, "Testing and evaluation of a smart controller for reducing peak loads and return temperatures in district heating networks," *Smart Energy*, vol. 10, p. 100105, May 2023, doi: 10.1016/J.SEGY.2023.100105.

[72] V. Kaisermayer *et al.*, "Smart control of interconnected district heating networks on the example of '100% Renewable District Heating Leibnitz,'" *Smart Energy*, vol. 6, p. 100069, May 2022, doi: 10.1016/J.SEGY.2022.100069.

[73] Evolution Mechanical, "Understanding Ventilation System Design," 2024. [Online]. Available: https://evolutionmechanical.net/blog/ventilation-system-design/

[74] SmartSystems s.r.o., "Waves smart inteligentný ventilátor," 2025. [Online]. Available: https://www.smartsystems.sk/riadene-vetranie/waves-smart-inteligentny-ventilator/

[75] C. C. Kang, J. D. Tan, M. Ariannejad, M. A. S. Bhuiyana, Z. N. Ng, and S. C. H. Yong, "Smart sensor controller for HVAC system," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 60–63, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.EGYR.2023.09.113.

[76] FAKRO Sp. z o.o., "Kyvné elektrické strešné okno s WiFi ovládaním," 2025.

[77] Xiaomi Corporation, "Xiaomi Smart Air Purifier 4 Pro (EU Version)," 2022. [Online]. Available: https://www.mi.com/global/product/mi-air-purifier-4-pro/

[78] Xiaomi Corporation, "Xiaomi Smart Humidifier 2," 2025. [Online]. Available: https://www.mi.com/global/product/xiaomi-smart-humidifier-2/

[79] ClimaRad BV, "ClimaRad Smart+," 2024. [Online]. Available: https://www.climarad.nl/en/solutions/climarad-smart-plus/

[80] W. Zhang, W. Wu, L. Norford, N. Li, and A. Malkawi, "Model predictive control of short-term winter natural ventilation in a smart building using machine learning algorithms," *Journal of Building Engineering*, vol. 73, p.

106602, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.JOBE.2023.106602.

[81] D. A. Rodríguez-Valderrama, J. M. Belman-Flores, D. Hernández-Fusilier, D. M. Pardo-Cely, M. A. Gómez-Martínez, and S. Méndez-Díaz, "Implementation of fuzzy control in a domestic refrigerator considering the influence of the thermal load," *International Journal of Refrigeration*, vol. 149, pp. 23–34, May 2023, doi: 10.1016/J.IJREFRIG.2022.12.018.

[82] M. S. Martín, "Membership-functions," 2023. [Online]. Available: https://github.com/VManuelSM/Membership-functions

[83] I. Al-Bahadly, M. Ahmed, and others, "Comparison between proportional-integral-derivative controller and fuzzy logic approaches on controlling quarter car suspension system," *ResearchGate*, 2020, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/342496741_Comparison_between_proportional_integral_derivative_controller_and_fuzzy_logic_approaches_on_controlling_quarter_car_suspension_system

[84] L. Böhler, J. Krail, G. Görtler, and M. Kozek, "Fuzzy model predictive control for small-scale biomass combustion furnaces," *Appl. Energy*, vol. 276, p. 115339, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115339.

[85] G. Ulpiani, M. Borgognoni, A. Romagnoli, and C. Di Perna, "Comparing the performance of on/off, PID and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building," *Energy Build.*, vol. 116, pp. 1–17, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.12.027.

[86] E. Arriaga-de-Valle and G. Dieck-Assad, "Modeling and Simulation of a Fuzzy Supervisory Controller for an Industrial Boiler," *Simulation*, vol. 82, no. 12, pp. 841–850, Dec. 2006, doi: 10.1177/0037549707076910.

[87] T. Sheng, H. Luo, and M. Wu, "Design and Simulation of a Multi-Channel Biomass Hot Air Furnace with an Intelligent Temperature Control System," *Agriculture*, vol. 14, no. 3, p. 419, Mar. 2024, doi: 10.3390/agriculture14030419.

[88] Kamunge Moses Muriuki, Peter Okemwa, and Isaac Wanjala Nangendo, "Fuzzy logic optimization of moisture content in boiler wood fuel used in tea factories in Kenya," *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, vol. 14, no. 3, pp. 259–266, Mar. 2025, doi: 10.30574/wjaets.2025.14.3.0124.

[89] S. Jadon, "Introduction to Different Activation Functions for Deep Learning," *Medium*, Mar. 2018.

[90] European Parliament, "Greenhouse gas emissions by country and sector (infographic)," 2023. [Online]. Available: https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180301STO98928/greenhouse-gas-emissions-by-country-and-sector-infographic

[91] European Parliament, "Greenhouse gas emissions by country and sector

(infographic)," 2018. [Online]. Available: https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180301STO98928/greenhouse-gas-emissions-by-country-and-sector-infographic

[92] TheGlobalEconomy.com, "CO2 emissions per capita in the European Union," 2023. [Online]. Available: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/Carbon_dioxide_emissions_per_capita/European-union/

[93] Airthings, "Airthings View Plus – Indoor Air Quality Monitor," 2023. [Online]. Available: https://www.airthings.com/view-plus

[94] TESLA, "SMART Sensor Smoke L – Optical Smoke Detector," 2023. [Online]. Available: https://www.teslasystems.com

[95] A. Zivelonghi and A. Giuseppi, "Smart Healthy Schools: An IoT-enabled concept for multi-room dynamic air quality control," *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 4, pp. 24–31, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.IOTCPS.2023.05.005.

[96] M. Nicolanská, M. Holubcík, J. Jandacka, and P. Durcanský, "Application of smart wireless device monitoring emissions of ventilation quality in underground car garage spaces," *Transportation Research Procedia*, vol. 74, pp. 777–784, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.TRPRO.2023.11.542.

[97] J. Gómez-Suárez, P. Arroyo, R. Alfonso, J. I. Suárez, E. Pinilla-Gil, and J. Lozano, "A Novel Bike-Mounted Sensing Device with Cloud Connectivity for Dynamic Air-Quality Monitoring by Urban Cyclists," *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 1272, Feb. 2022, doi: 10.3390/s22031272.

[98] M. Maslouski, E. Jarosz-Krzemińska, P. Jagoda, and E. Adamiec, "A mobile car monitoring system as a supplementary tool for air quality monitoring in urban and rural environments: the case study from Poland," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 15856, Sep. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-43095-w.

[99] L. Bogdanffy, C. R. Lorinț, and A. Nicola, "Development of a Low-Cost Traffic and Air Quality Monitoring Internet of Things (IoT) System for Sustainable Urban and Environmental Management," *Sustainability*, vol. 17, no. 11, p. 5003, May 2025, doi: 10.3390/su17115003.

[100] M. Kozłowski, A. Asenov, V. Pencheva, S. A. Bęczkowska, A. Czerepicki, and Z. Zysk, "Autonomous System for Air Quality Monitoring on the Campus of the University of Ruse: Implementation and Statistical Analysis," *Sustainability*, vol. 17, no. 14, p. 6260, Jul. 2025, doi: 10.3390/su17146260.

[101] Európsky dvor audítorov, "Opatrenia EÚ v oblasti energetiky a zmeny klímy," 2017.

[102] R. Sands, "Agriculture, including electricity use, accounted for an estimated 11.2 percent of U.S. greenhouse gas emissions in 2020," Jul. 2022.

[103] M. Gupta, M. Abdelsalam, S. Khorsandroo, and S. Mittal, "Multi-Layer Smart

Farming Architecture," Feb. 2020.

[104] Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, "Integrovaný národný energetický a klimatický plán na roky 2021 – 2030," 2019.

[105] Winsen Electronics Technology Co. Ltd., "Best Smart Sensors for Farming," 2023.

[106] R. Prathibha, T. Ashwini, and M. Kavya, "Smart Farming with IoT: A Case Study," *ResearchGate*, 2021.

[107] DADAO Energy, "What is Meant by Smart Grid?," 2023. [Online]. Available: https://dadaoenergy.com/sk/blog/what-is-meant-by-smart-grid/

[108] J. Šupšák, "Inštalujeme inteligentné merače elektriny. A čo ďalej?," 2015. [Online]. Available: https://www.energie-portal.sk/Dokument/instalujeme-inteligentne-merace-elektriny-a-co-dalej-102729.aspx

[109] Xiaomi Corporation, "Xiaomi Smart Plug 2 (Wi-Fi)," 2025. [Online]. Available: https://www.mi.com/global/product/xiaomi-smart-plug-2-wi-fi/

[110] Immax, "Immax NEO LITE Smart vnútorná zásuvka EU WiFi," 2025. [Online]. Available: https://www.immax.sk/immax-neo-lite-smart-vnutorna-zasuvka-eu-wifi-p15141/

[111] P. Chiradeja and S. Yoomak, "Development of public lighting system with smart lighting control systems and internet of thing (IoT) technologies for smart city," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 3355–3372, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.EGYR.2023.10.027.

[112] Y. Cheng, C. Fang, J. Yuan, and L. Zhu, "Design and Application of a Smart Lighting System Based on Distributed Wireless Sensor Networks," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 23, p. 8545, Nov. 2020, doi: 10.3390/app10238545.