



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

VYUŽITÍ BEZDRÁTOVÉHO MĚŘENÍ TEPLoty PRO ŘÍZENÍ ROTAČNÍ PECE

The use of wireless temperature measurement to control the rotary kiln

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ANTON BEDNÁR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. František Vdoleček, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Anton Bednár

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití bezdrátového měření teploty pro řízení rotační pece

v anglickém jazyce:

The use of wireless temperature measurement to control the rotary kiln

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Moderní metody bezdrátového přenosu měřených dat nabízejí své využití u mnoha pohybujících se či rotujících systémů. Jedním z oborů, kde je tato problematika velmi aktuální je měření a řízení teplot rotačních pecí.

Cíle diplomové práce:

Na základě důsledné analýzy stávajícího stavu měření a řízení teplot na rotační peci navrhnete variantu využití moderních bezdrátových přenosů měřených teplot a následné úpravy řídicího systému. Návrh přizpůsobte konkrétním podmínkám rotační kalcinační pece podniku PRECHEZA a.s.

Doporučená osnova práce:

1. Současné řešení
2. Návrh bezdrátového přenosu měření teplot na rotační peci
3. Návrh potřebných úprav stávajícího řídicího systému
4. Případné výsledky prvotních testů systému


Seznam odborné literatury:

- CHUDÝ, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín : 1.vydání
Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
KREIDL, M.; Měření teploty – Senzory a měřicí obvody : 1. vydání Praha : BEN – technická
literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
IEC 62591 WirelessHART System Engineering Guide. Emerson 2010
Firemní literatura


Vedoucí diplomové práce: Ing. František Vdoleček, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 22. 11. 2012


Ing. Jan Rompec, Ph.D.
Ředitel ústavu




prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá možností využití bezdrátových převodníků teploty k měření teploty a k regulaci rotační kalcinační pece ve společnosti PRECHEZA a.s., kde je do současnosti využíván zastaralý systém trolejí.

ABSTRACT

This project tries to find out the possible solution for temperature measurement and control on the rotary calcinations kiln at PRECHEZA company, by using of new wirelessHART temperature transmitters.

KLÍČOVÁ SLOVA

Termoelektrický článek, WirelessHART protokol, bezdrátový převodník teploty

KEY WORDS

Thermocouple, WirelessHART standard, temperature wireless transmitter

Prohlášení o originalitě

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně dle pokynů a rad vedoucího s použitými literárními prameny.

Bibliografická citace diplomové práce

BEDNÁR, A. Využití bezdrátového měření teploty pro řízení rotační pece. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Vdoleček, CSc..

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velice poděkovat společnosti PRECHEZA a.s., která mi umožnila v jejich provozu testovat bezdrátové přístroje, za poskytnutí fotodokumentace a hlavně podkladů z průběhu testování a to především panu Ing. Michalovi Lojdovi a Ing. Dušanovi Jurečkovi.

Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Františkovi Vdolečkovi CSc. za jeho podnětné nápady a připomínky při tvorbě této práce a Dr. Radkovi Strnadovi za velice přínosnou technickou podporu v oboru měření teploty.

V neposlední řadě bych rád poděkoval mému zaměstnavateli, firmě EMERSON Process Management, s.r.o., za poskytnutí přístrojů pro testování a za podporu v celém mém studiu.

OBSAH

Zadání diplomové práce	3
Licenční smlouva	5
Abstrakt	7
Seznam použitých zkratk	15
1. Úvod	17
2. Měření teploty	19
2.1 Úvod do měření teploty	19
2.2 Definice teploty	21
2.3 Teplotní stupnice	21
3. Přístroje pro měření teploty	25
3.1 Sensory teploty	25
3.2 Rozdělení senzorů teploty	25
3.3 Termoelektrické články	25
3.4 Typy termoelektrických článků	27
3.5 Kovové odporové senzory teploty	30
3.6 Průmyslové odporové snímače teploty	32
4. WirelessHART bezdrátové průmyslové přístroje	33
4.1 Základy a principy použití standardu WirelessHART	34
4.2 Převodník série 848T	38
4.3 Převodník série 648	40
4.4 Přijímací brána 1420	42
5. Řídicí systém ControlLogix Allen-Bradley	45
6. Měření a regulace teploty na rotační kalcinační peci	51
6.1 Stávající měření a regulace	51
6.2 Nevýhody stávajícího měření a regulace	52
6.3 Test WirelessHART komunikace	53
6.4 Měření teploty pomocí WirelessHART převodníku a jeho srovnání s trolejí	56
6.5 Návrh nových měřících WirelessHART přístrojů a úprava řídicího systému	61
7. Závěr	65

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

S	absolutní Seebeckův koeficient
σ	konduktivita
e	elementární náboj
τ	relaxační čas elektronů
m	efektivní hmotnost náboje
α	teplotní součinitel
R_0	odpor čidla při 0 °C
R_{100}	odpor čidla při 100 °C
W	poměr odporů R_{100} a R_0
η	účinnost vratného Carnotova cyklu
T	termodynamická teplota
Q_2	teplo odebrané teploměrnou látkou z lázně s teplotou T_2
Q_1	teplo odebrané teploměrnou látkou z lázně s teplotou T_1
U	napětí
R	odpor
I	proud
Rt	změna odporu kovu
t	teplota na Celsiově stupnici
T_a	atmosférická teplota

1 ÚVOD

V mé bakalářské práci byla prokázána životaschopnost bezdrátových WirelessHART přístrojů v těžkém průmyslovém prostředí s mnoha rušivými elementy. Na základě provedených zkoušek byly se společností PRECHEZA a.s. domluveny další testy, které již zahrnovaly testování přístrojů společně s připojenými termoelektrickými články na páte troleji. Na základě těchto testů byl proveden rozbor naměřených hodnot a jeho srovnání se současným měřením pomocí sběracích trolejí. Podle porovnání měřených hodnot byly navrženy a doporučeny konfigurace přístrojů, které bude možné použít pro regulaci teploty na kalcinační peci. Dále se práce zabývá potřebou úpravy řídicího systému tak, aby bylo možné plně integrovat nově navržené řešení do stávající regulace pece. Nejdůležitější částí bylo srovnání měřených teplot na troleji a teplot měřených pomocí bezdrátových převodníků a jejich následná úprava tak, aby tyto hodnoty odpovídaly stávajícím teplotám z troleje, pro kterou je regulace nastavena. Po stanovení převodu hodnot se tyto integrují do stávajícího řídicího algoritmu. Další důležitou částí je fyzická integrace WirelessHART přístrojů do řídicího systému, tedy návrh vhodných komunikačních protokolů mezi bránou a řídicím systémem a volba správných vstupů a výstupů včetně kabeláže.

Úkolem celkového návrhu nového bezdrátového měření bylo zmodernizování stávajícího měření a regulace pece, usnadnění servisu a výměny termoelektrických článků. Díky novým přístrojům bude možné včas rozpoznat, zda je termoelektrický článek zničený nebo nikoliv a tím zefektivnit případný servis, opravy a hlavně zkrátit čas, po který je pec zpomalena na nižší otáčky a to právě z důvodu servisního zásahu.

2 MĚŘENÍ TEPLoty

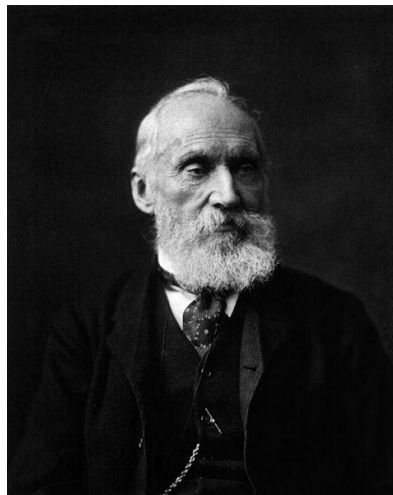
2.1 Úvod do měření teploty

Teplota se objevuje v mnoha fyzikálních zákonech a je jednou z nejdůležitějších termodynamických vlastností, které určují stav hmoty. V podstatě lze uvést, že je mírou kinetické energie pohybu molekul a atomů, kdy molekuly na sebe navzájem narážejí a jejich rychlost pohybu se mění. Existuje jen málo vlastností látek, které by nebyly teplotně závislé.

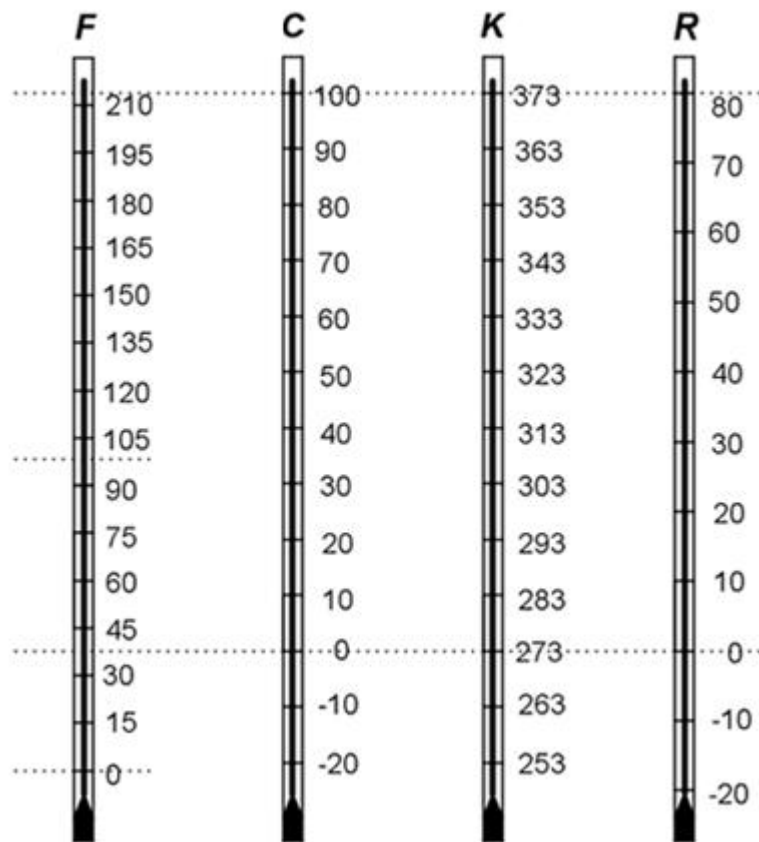
V případě, že na hmotu nepůsobí okolní prostředí je průměrná rychlost molekul konstantní. Tato průměrná rychlost molekul je závislá na teplotě. S tím souvisí i termodynamická teplota tělesa, která je přímo úměrná kinetické energii molekul, respektive je přímo úměrná jejich hmotnosti a kvadrátu pohybu.

Jako nejnižší teplotu označujeme absolutní nulu – 0 K – také označována jako nula termodynamické stupnice. Při této teplotě ustává veškerý pohyb.

První teploměr se objevuje v roce 1592. Zkonstruoval jej italský fyzik, astronom, matematik a filozof Galileo Galilei. Tento teploměr byl založený na principu teplotní roztažnosti vzduchu, ale měl nedostatek a to, že byl závislý na atmosférickém tlaku. První rtuťový teploměr zkonstruoval německý fyzik Daniel Gabriel Fahrenheit. S tímto teploměrem přichází i první teplotní stupnice. Od této doby se teplotní stupnice a teploměry stále vyvíjí. V roce 1730 vzniká Réaumurova teplotní stupnice, kterou navrhl francouzský přírodovědec René-Antoine Ferchault de Réaumur. V roce 1742 zavádí Celsiovu stupnici švédský astronom Anders Celsius a nakonec v roce 1848 definuje britský fyzik a lord William Thompson Kelvin termodynamickou stupnici, označovanou také jako Kelvinova stupnice.



Obr. 1 William Thompson Kelvin [5]



Obr. 2 Různé teplotní stupnice [6]

Měření teploty je velice důležité ve všech oblastech lidské činnosti. Základní měření, se kterým se denně setkáváme, je měření tělesné teploty. I proto bylo jednou z prvních aplikací právě měření tělesné teploty. Teploměr pro tyto účely byl vynalezen v roce 1866.

Základem bezpečnosti a spolehlivosti v energetice, v letecké, železniční a automobilové dopravě a ve veškeré průmyslové produkci elektrospotřebičů a výpočetní techniky je technická diagnostika, přičemž měření teploty patří mezi základní diagnostické veličiny [2]. Dalšími důležitými oblastmi měření teploty jsou farmacie, rafinérská výroba, metalurgie, chemický průmysl a jiné. V metalurgii je teplota jedním z nejdůležitějších parametrů, jelikož se od ní odvíjí chemicko-technologický postup zpracování materiálů a je na ní přímo závislá výsledná kvalita finálního produktu.

Trendem v současném měření teploty je využívání inteligentních (také nazývaných smart) senzorů, které zpravidla zahrnují čidlo a převodník s mikroprocesorem.

2.2 Definice teploty

Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy, tj. stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán nezávisle na čase [2]. Tento stav je charakterizován termodynamickou teplotou, pro kterou platí, že je stejná pro všechny izolované části soustavy. Je potřeba dávat pozor na to, aby nebyla teplota zaměňována za teplo. Teplo je forma energie související s pohybem částic dané soustavy.

Teplota, jako jedna z mála veličin, se nedá měřit přímou metodou, ale pouze pomocí jiných fyzikálních veličin.

2.3 Teplotní stupnice

Termodynamická teplotní stupnice – počátek termodynamické stupnice je dán termodynamickou absolutní nulou. Základní jednotkou je kelvin (K). Tato jednotka byla definována zvolením termodynamické teploty trojného bodu vody.

Trojný bod vody – je rovnovážný stav tří skupenství vody, tedy ledu, vody a syté páry. Tento bod je referenční, jelikož jej můžeme snadno opakovat. Termodynamická teplota trojného bodu je pevně stanovena na hodnotu $T = 273,16$ K, tedy jeden kelvin je 273,16 díl termodynamické teploty trojného bodu vody.

Termodynamická teplotní stupnice je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Účinnost vratných Carnotových cyklů pracujících mezi stejnými lázněmi určitých teplot je závislá jen na těchto teplotách a nezávislá na použité teplotěrové látce [citace].

Pro $T_2 > T_1$ platí:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1)$$

Kde η je účinnost cyklu

T je termodynamická teplota

Q_2 je odebrané teplo teplotěrovou látkou z lázně s teplotou T_2

Q_1 je odebrané teplo teplotěrovou látkou z lázně s teplotou T_1

Celsiova (teplotní) stupnice – je odvozena od Kelvinovy termodynamické stupnice posunutím o teplotu 273,15 K. Tato hodnota je o 0,01 K nižší než termodynamická teplota trojného bodu vody. Jednotka je stupeň Celsia - °C.

Platí:

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \quad (2)$$

Tedy Celsiova teplota t je rovna rozdílu termodynamické teploty T a teploty 273,15 K.

Pro teplotní rozdíl platí:

$$\Delta t = \Delta T \quad (3)$$

Fahrenheitova (teplotní) stupnice – je využívána například ve Spojených Státech Amerických.

Pro převod na Fahrenheitovu teplotu platí:

$$t (^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} T - 459,67 = \frac{9}{5} t (^{\circ}\text{C}) - 32 \quad (4)$$



Obr. 3 Daniel Gabriel Fahrenheit a jeho původní teploměr [7]

Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 – nejpřesnější metrologickou metodou je plynová termometrie. Tato metoda je časově a technicky velmi náročná.

V roce 1927 byla stanovena Mezinárodní praktická teplotní stupnice, která byla postupně generálními konferencemi pro váhy a míry doplňována a upravována. Její poslední znění je z roku 1990 a proto označení ITS-90 (The International Temperature Scale of 1990)

Tab. 1 Definované pevné body podle ITS-90 [8]

Popis	K	°C
Bod tlaku par hélia	3 až 5	-270.15 až -268.15
Rovnovážný stav vodíku v trojném bodě	13.8033	-259.3467
Rovnovážný stav vodíku v bodě tlaku par	= 17	= -256.15
Rovnovážný stav vodíku v bodě tlaku par	= 20.3	= -252.85
Neon v trojném bodě	24.5561	-248.5939
Kyslík v trojném bodě	54.3584	-218.7916
Argon v trojném bodě	83.8058	-189.3442
Rtuť v trojném bodě	234.3156	-38.8344
Voda v trojném bodě	273.16	0.01
Bod tání galia	302.9146	29.7646
Bod tuhnutí india	429.7485	156.5985
Bod tuhnutí cínu	505.078	231.928
Bod tuhnutí zinku	692.677	419.527
Bod tuhnutí hliníku	933.473	660.323
Bod tuhnutí stříbra	1234.93	961.78
Bod tuhnutí zlata	1337.33	1064.18
Bod tuhnutí mědi	1357.77	1084.62

3 PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ TEPLoty

3.1 Senzory teploty

Senzor teploty je funkční celek, který tvoří vstupní blok měřicího řetězce. Senzor je ve styku s měřeným prostředím. Pro senzor teploty se používají také ekvivalentní názvy jako například snímač teploty, který je samostatnou konstrukční součástí teploměrového zařízení, obsahující teplotní čidlo. Teplotní čidlo je část snímače převádějící teplotu na jinou hodnotu fyzikální veličiny. Pro typy senzorů je platná norma ČSN 25 8005 „Názvosloví z oboru měření teploty“, která vstoupila v platnost 1.8. 1989 (například často používaný výraz termočlánek je nesprávné označení termoelektrického článku).

3.2 Rozdělení senzorů teploty

Senzory můžeme rozdělit na základě:

Fyzikálního principu – odporové, termoelektrické, polovodičové, s PN přechodem, dilatační, optické, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické, kapacitní, aerodynamické a další.

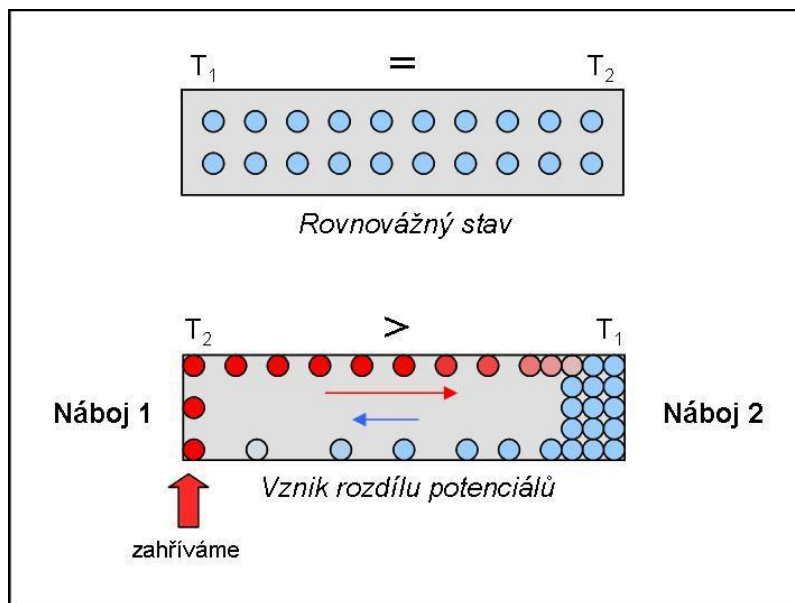
Styku s měřeným médiem – dotykové a bezdotykové

Transformace signálu – aktivní (které se působením teploty chovají jako zdroj elektrické energie – termoelektrické články), pasivní (u kterých je s výjimkou chemických indikátorů teploty potřebné elektrické napájení pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu)

V dalším textu se budeme zabývat pouze termoelektrickými články a odporovými snímači.

3.3 Termoelektrické články

Termoelektrické články jsou založeny na převodu tepelné energie na elektrickou. Tento převod je popsán Seebeckovým jevem. Ten vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositele náboje větší energii (v polovodičích i větší prostorovou hustotu, tj. koncentraci) a proto difundují do chladnějších míst ve větším množství, než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Tímto vzniká jednostranná převaha nábojů kladných nebo záporných. Podle toho jsou pak znaménka absolutních Seebeckových koeficientů S stejná se znaménky nositelů nábojů, kterých je ve vodiči více. Rozložení nositelů souvisí s Fermiho hladinami.



Obr. 4 Znárodnění Seebeckova jevu [9]

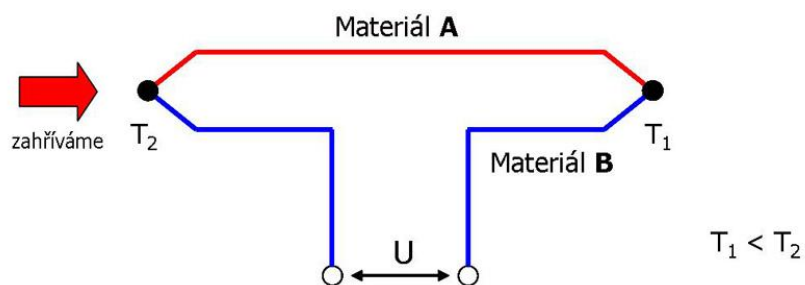
Absolutní Seebeckův koeficient S může být nulový, v případě, že je polovina nositelů proudu kladná a polovina záporná. Mezi konci vodičů existuje napětí ΔE , pokud je mezi nimi teplotní rozdíl ΔT .

$$S(T) = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{dE}{dT} \quad (5)$$

\Rightarrow

$$dE = S(T) dT \quad (6)$$

Pro termoelektrické napětí se používá veličina elektromotorické napětí E (V).

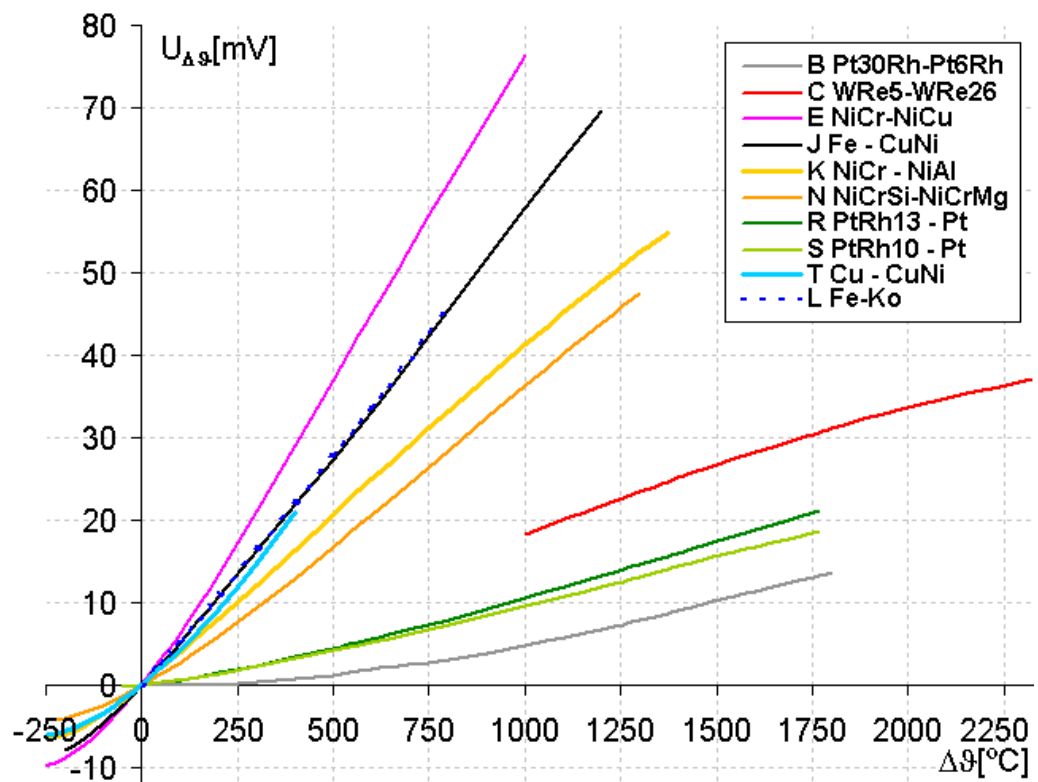


Obr. 5 Schéma Seebeckova obvodu [9]

Termoelektrický článek je vždy složen ze dvou vodičů (polovodičů). Elektrický proud protéká uzavřeným obvodem realizovaným dvěma materiálův odlišnými vodiči, nebo polovodiči tehdy, mají-li spoje A a B rozdílnou teplotu. Rozdělíme-li obvod na kterémkoliv místě obvodu, vznikne na svorkách elektrické napětí.

3.4 Typy termoelektrických článků

Typy termoelektrických článků jsou ve světě normalizovány IEC 584-1. Pro výrobu byly vybrány vždy dva různé materiály a to s ohledem na přijatelnou nelinearitu závislosti termoelektrických napětí na teplotě pro daný teplotní rozsah použití, odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření, dlouhodobou stabilitu a dalšími.



Obr. 6 Charakteristika vybraných termoelektrických článků [10]

Vlastnosti a použitelnost termoelektrických článků:

- Typ K** má složení NiCr-NiAl – je vhodný pro použití v oxidační a inertní atmosféře, je necitlivý pro neutronový tok a nevhodný pro měření ve vakuu.
- Typ T** má složení Cu-CuNi – je nejlepší termoelektrický článek pro nízké teploty a kryogenní aplikace, v redukční, oxidační atmosféře a ve vakuu ho lze použít až do teploty 700 °C.

- TYP J** má složení Fe-CuNi – je vhodný pro oxidační, redukční i inertní atmosféru a vakuum. V redukční atmosféře ho lze použít bez ochranného krytí.
- TYP N** má složení NiCrSi–NiSiMg – má velmi stabilní charakteristiku až do 1300 °C. Je vhodný pro cyklické změny teploty a dále je vhodný pro jadernou energetiku, protože je odolný vůči neutronovému toku.
- TYP E** má složení NiCr-CuNi – má nejvyšší hodnotu termoelektrického koeficientu. Je vhodný pro vakuum a středně oxidační atmosféru, kde se dá využít bez ochranného krytí.
- TYP R** má složení PtRh13-Pt – je vhodný pro měření vysokých teplot až do 1780 °C. Je odolný vůči oxidaci a korozi, ale vždy musí být v ochranném provedení.
- TYP S** má složení PtRh10-Pt – má velice podobné vlastnosti jako termoelektrický článek typu R.
- TYP B** má složení PtRh30-PtRh6 – je použitelný až od teplot 100°C, protože má v rozsahu do 300°C velice malou citlivost. Má podobné vlastnosti jako termoelektrické články typu R a S, ale při teplotách nad 1200 °C je stabilnější.
- TYP G** má složení W-WRh – je vhodný pro extrémně vysoké teploty. Obvykle se nepoužívá pro rozsahy teplot pod 400 °C. Je chemicky stabilní a vhodný pro použití jak v oxidační, tak i v inertní atmosféře, ve vakuu a ve vodíku.
- TYP C** má složení WRh5-WRh26 – má podobné vlastnosti jako termoelektrický článek typu G.

Jednotlivé typy termoelektrických článků se rozlišují i barevně, aby je bylo možné při montáži rozpoznat. Problémem je, že řada zemí má vlastní typizované označování. Viz tabulka 2 a porovnání jednotlivých označení pro různé země.

TAB. 2 Barevná označování termoelektrických článků v různých zemích [11]

International Thermocouple Color Codes - Thermocouple and Extension Grade Wires

N.V. **THERMIBEL** S.A.



THERMO-COUPLE TYPE	ALLOY COMBINATION	U.S. & CANADIAN (ANSI/MC96.1, ANSI/ASTM E230)		PLUG & JACK	International IEC 584-3	International IEC 584-3 Intrinsic Safe	Czech British BS 1843	Netherlands German DIN 43710	Japanese JIS C 1610	French NFC 42-324
		THERMO-COUPLE GRADE	EXTENSION GRADE							
T	Copper			Blue						
	Constantan (Copper-Nickel)									
J	Iron (magnetic)			Black						
	Constantan (Copper-Nickel)									
E	Nickel - Chromium			Purple						
	Constantan (Copper-Nickel)									
K	Nickel - Chromium			Yellow						
	Nickel - Aluminium (magnetic)									
N	Nicrosil (Nickel-Chromium-Silicon)			Orange				No Standard (Use American Color Codes)	No Standard (Use American Color Codes)	No Standard (Use American Color Codes)
	Nisil (Nickel-Silicon-Magnesium)							No Standard (Use American Color Codes)	No Standard (Use American Color Codes)	No Standard (Use American Color Codes)
S	Platinum Rhodium-10%	None Established		Green						
	Platinum	None Established								
R	Platinum Rhodium-13%	None Established		Green						
	Platinum	None Established								
B	Platinum Rhodium-30%	None Established		White (Uncompensated)			No Standard (Use Copper Wire)			No Standard (Use Copper Wire)
	Platinum Rhodium-6%	None Established					No Standard (Use Copper Wire)			No Standard (Use Copper Wire)
C	Tungsten Rhenium-5%	None Established		Red				No Standard (Use American Color Codes)	No Standard (Use American Color Codes)	No Standard (Use American Color Codes)
	Tungsten Rhenium-26%	None Established						No Standard (Use American Color Codes)	No Standard (Use American Color Codes)	No Standard (Use American Color Codes)

3.5 Kovové odporové senzory teploty

Odporové senzory teploty fungují na principu teplotní závislosti kovů na odporu. Kovy je možné si představit jako soubor kladných iontů umístěných v mřížkových bodech krystalové mřížky a takzvaného elektronového plynu tvořeného souborem chaoticky se pohybujících elektronů.

Pro konduktivitu kovu platí:

$$\sigma = ne^2 \frac{\tau}{m} \quad (7)$$

kde

σ – je konduktivita

n – je počet elektronů v jednotkovém objemu

e – je elementární náboj

τ – je relaxační čas elektronů

m – je efektivní hmotnost náboje

Teplotní součinitel α (K^{-1}) je základní materiálovou konstantou. Pro teploty v malém rozsahu teplot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ lze s určitou nejistotou použít lineární vztah:

$$R_t = R_o (1 + \alpha t) \quad (8)$$

Kde R_o je odpor čidla při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Střední hodnota teplotního součinitele odporu α je

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_o}{100 * R_o} \quad (9)$$

Kde R_{100} je odpor čidla při $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

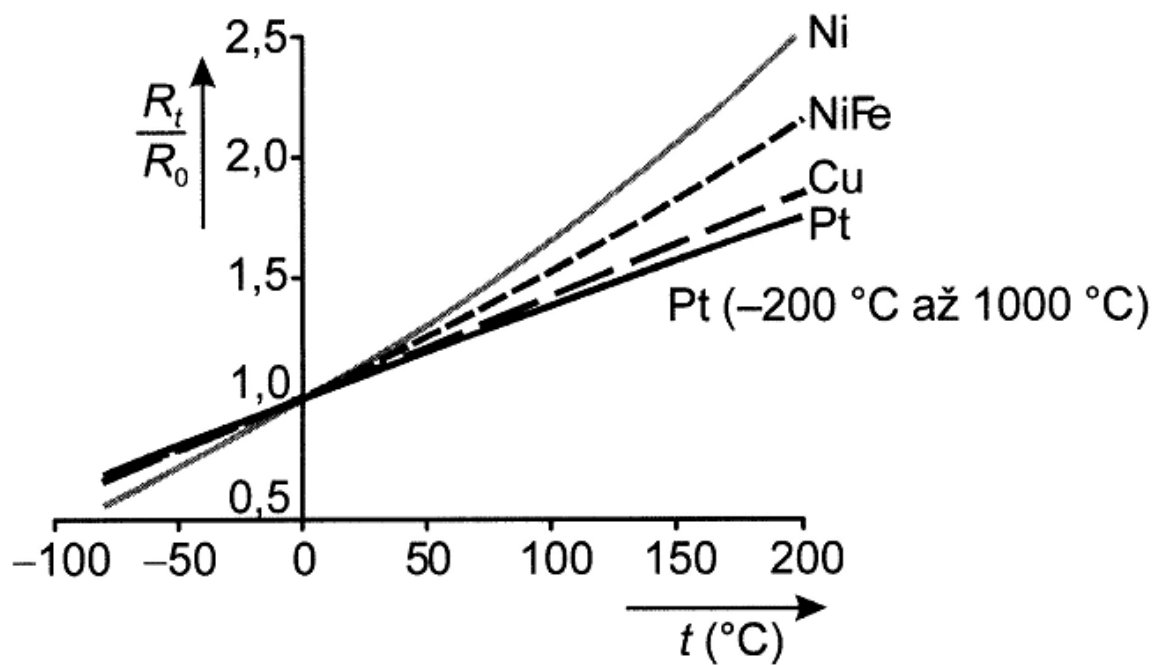
Poměr odporů čidla R_{100} a R_o označujeme W . Pro W platí:

$$W = \frac{R_{100}}{R_o} \quad (10)$$

Pro konstrukci vlastního odporového čidla se používají materiály – platina, nikl, Balco (Ni-Fe), měď, molybden a pro extrémně nízké teploty (kolem $0,5\text{ K}$) slitiny Rh-Fe, Pt-Co a jiné. Pro vyšší teploty nelze využívat lineárních vztahů.

TAB. 3 Materiály používané pro kovové snímače teploty [26]

materiál	$a \cdot 10^2 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	teplotní rozsah	poměr odporů W_{100}
platina	0,385 až 0,391	-20 až 850	1,3850
nikl	0,617 až 0,675	-70 až +150 (+200)	1,6180
Ni-Fe	0,518 až 0,527	-100 až +200	1,462
měď	0,426 až 0,433	-50 až +150	1,4260

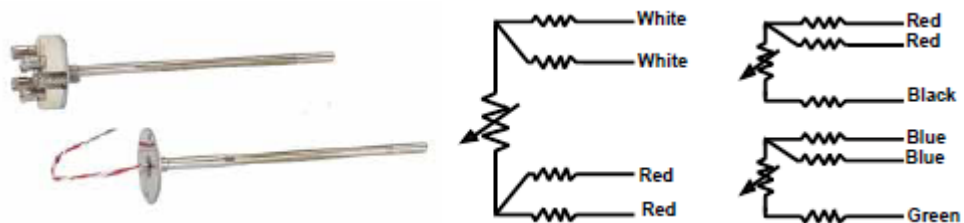


Obr. 7 Teplotní závislost kovových snímačů [12]

3.6 Průmyslové odporové snímače teploty

V praxi se využívají tyto provedení:

- Dvou vodičové
- Tří-vodičové
- Čtyř-vodičové
- S pomocnou smyčkou



Obr. 8 Příklad čidel Pt100 – jednoduché a duální provedení [13]

Samotné čidlo obsahuje dva vodiče, doplňkové vodiče pak slouží ke kompenzaci vlivu odporu samotného vedení.

Čidla můžeme dále dělit na:

- S jímkou (závitovou, přírubovou, navařovací...)
- Bez jímky
- Tyčové

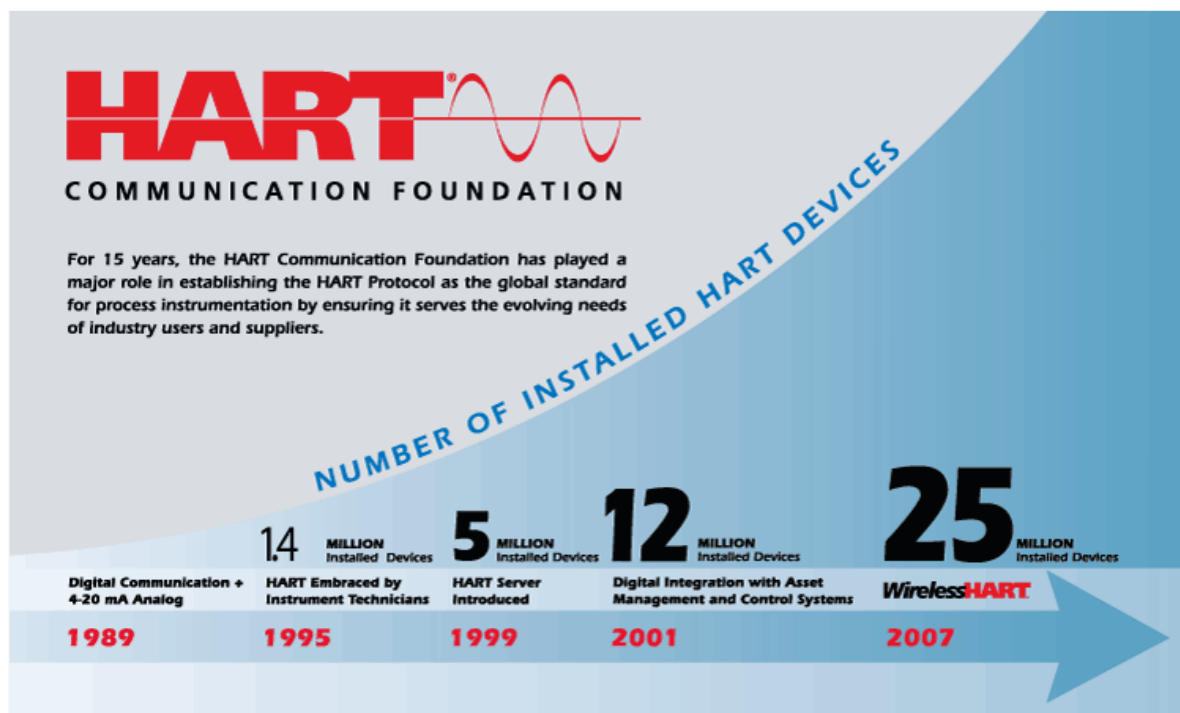


Obr. 9 Termočláanky řady 1075 s metalickou a keramickou ochrannou trubkou [14]

4 WirelessHART BEZDRÁTOVÉ PRŮMYSLOVÉ PŘÍSTROJE

Standard WirelessHART byl schválen komisí IEC (International Electrotechnical Commission) dne 26. března 2010 jako první světový průmyslový komunikační standard pro bezdrátovou komunikaci. Jeho využití je široké a k podpoře tohoto standardu se připojilo mnoho výrobců – například EMERSON, ABB, Endress+Hauser, Siemens, Pepperl+Fuchs a jiní. Jeho obrovskou výhodou je dynamická technologie, která zaručuje komunikaci i v případě, že na sebe přístroje přímo nevidí, tedy pokud jim v komunikační cestě stojí pevná překážka nebo radiová překážka. Síť se dokáže samo-organizovat a najít nejvhodnější komunikační trasy. I přidání nového členu do sítě je velice jednoduché. Ten se pouze správně nastaví pro danou síť a nainstaluje se v komunikačním dosahu některého dalšího členu ze stejné sítě.

Taková to struktura sítě umožňuje šetření nákladů za potřebnou kabeláž a další podpůrnou infrastrukturu, jako jsou například napájecí zdroje v řídicím systému a podobně. Spolehlivost, bezpečnost a i komunikace již byla prověřena několika miliony provozními hodinami. Spolehlivost přenosu dat se pohybuje nad 99% a je odzkoušena provedenými testy v různých aplikacích.



Obr. 10 Označení standardu WirelessHART [15]

Standard WirelessHART je technicky velice podobný zavedenému průmyslovému standardu HART (Highway Addressable Remote Transducer). Přístroje s komunikačním standardem WirelessHART lze tedy s velkou výhodou používat v monitorovacích aplikacích (například hlídání horní hladiny v záchytných jímkách, monitorování tlaku na hlavících vrtů podzemních zásobníků plynu), ale také je využívat k řízení (například měření teploty na rotační peci). Velké využití nacházejí tyto přístroje tam, kde doposud nebylo možné z technických, nebo finančních důvodů instalovat klasické přístroje využívající kabely pro komunikaci a napájení.

4.1 Základy a principy použití standardu WirelessHART

Při práci a navrhování sítě WirelessHART se setkáváme s těmito pojmy:

Gateway – takto se označuje komunikační brána, která přijímá data od ostatních účastníků sítě. V dnešní době je už možné pomocí ní odesílat i příkazy pro ovládací prvky v síti. WirelessHART gateway slouží jako komunikační člen mezi přístroji a hostitelskými aplikacemi. Dále brána obsahuje správu sítě s možností sledování a historizace dat. Je možné pomocí ní vzdáleně konfigurovat parametry přístrojů, a to jak přes specializované softwary (například AMS Software od firmy Emerson Process Management), tak i přes samotné internetové rozhraní brány.



Obr. 11 WirelessHART Gateway 1420 od firmy Emerson Process Management [16]

Hostitelský systém – systém používaný pro řízení technologie (DCS – řídicí systémy, PLC – programovatelné automaty a jiné). [4]

Join key – takto je označován čtyř-bytový přístupový klíč, který je v hexadecimálním tvaru. Může být volen uživatelsky, nebo jej lze vygenerovat náhodně. Úkolem přístupového klíče je zabezpečení komunikace mezi účastníky sítě a přijímací bránou.

Network ID – identifikační číslo sítě. Nabývá celočíselných hodnot od 0 do 36863. Identifikační číslo je dalším prvkem zabezpečení komunikace.

Scan rate – je časový interval, ve kterém se daný přístroj probouzí, provádí požadovanou funkci a odesílá data do přijímací brány. V případě, že se v jedné síti vyskytují přístroje s různými časovými intervaly, tato síť se sama nastaví tak, aby se data vždy dostala k přijímači. To v praxi znamená, že se může probudit pouze komunikační část přístroje, která předá data od jiných zařízení dál. Zbylé části nejsou v tento moment aktivní.

WirelessHART device – jedná se o zařízení, která využívají pro komunikaci protokol WirelessHART, a která jsou zpravidla napájena vlastním napájecím modulem. Jedno zařízení může obsahovat snímač, převodník a vysílací jednotku.

Standard WirelessHART funguje na frekvenci 2,4 – 2,5 GHz, ale v některých zemích, například ve Spojených Státech Amerických, je provozován na frekvenci 900 MHz. Pro používání a provoz WirelessHART přístrojů a zařízení je vyžadována lokální certifikace a povolení od vládní organizace.

Aby síť správně fungovala a koexistovala s jinými sítěmi, využívá WirelessHART tyto techniky:

Segmentování sítě – využití identifikačního čísla sítě pro její zabezpečení.

Izolace spektra – využívá jenom určitá spektra sítě, tudíž se s ostatními účastníky sítě 2,4 GHz nevidí, tedy ani neovlivňuje.

Využití malého výkonu – WirelessHART přístroje používají malé výkony ve srovnání s klasickou Wi-Fi technologií, telefony, RFID a podobně.

Samo-organizování sítě – takzvaná “mesh“ technologie umožňuje v případě blokování komunikační trasy jak pevnou, nebo radiovou překážkou, změnit komunikační trasu na jinou. Tento proces probíhá plně automatizovaně.

Změna kanálů – WirelessHART využívá 15 komunikačních kanálů ze spektra 2,4 GHz.

DSSS kódování – (Direct-Sequence Spread Spectrum) šifrování a filtrování dat.

TSMP – (Time Synchronized Mesh Protocol) časově synchronizovaný síťový protokol, který umožňuje mnohonásobné opakované přenášení dat pro různé síťové cesty a různé frekvence.


Instalace WirelessHART přístrojů:




Správná instalace WirelessHART přístrojů a zařízení je velice důležitá z hlediska fungování sítě jako celku. Samotné instalaci by vždy mělo předcházet testování komunikace v daném místě instalace tak, aby byla zaručena komunikační schopnost přístrojů. Standardní komunikační vzdálenost mezi jednotlivými přístroji, také nazývána jako *efektivní vzdálenost*, je 250 m, nebo v případě použití extendované antény až 800 m. Dosažení rozšířené vzdálenosti 800 m lze dosáhnout pouze v případě dodržení určitých podmínek, které uvádí výrobce (například je potřeba, aby dva přístroje na sebe přímo viděly, což znamená, aby mezi nimi nebyla pevná ani radiová překážka. Dále je zde požadavek, aby byl přístroj umístěn ve výši 3 – 4 m nad zemí).

Vzhledem k tomu, že se bezdrátové přístroje často používají v těžkých průmyslových prostředích a v jejich okolí se nachází mnoho různých překážek, jejich efektivní vzdálenost bývá mnohdy mnohem kratší. Proto je velice důležité přístroje v plánovaném místě instalace otestovat na komunikaci.

Pro lepší zorientování se v typech překážek, byly definovány jejich základní kategorie:

TAB. 4 Definice průmyslových prostředí a efektivní vzdálenosti komunikací

Typ překážky	Efektivní vzdálenost	Popis
Těžké překážky	30 m	Typické průmyslové prostředí s velkým počtem trubek a jiných kovových prvků. Tímto prostorem není možné projet autem [4]
		
[17]		

Typ překážky	Efektivní vzdálenost	Popis
Střední překážky	76 m	Prostředí lehkého průmyslu s malým počtem překážek [4]
 <p data-bbox="874 790 930 824">[18]</p>		
Lehké překážky	152 m	Typické je skladiště ropných produktů. I přes to, že samotné nádrže jsou těžkými překážkami, v tomto prostředí lze velice dobře přenášet radiový signál [4]
 <p data-bbox="874 1283 930 1317">[19]</p>		
Žádné překážky	229 m	Přístroje mají přímou viditelnost na sousední přístroje a jsou instalovány 2m nad úrovní země [4]
 <p data-bbox="874 1865 930 1899">[20]</p>		

Při návrhu sítě je dále potřeba řídit se pokyny výrobce pro správnou montáž a provozování. Další důležitou informací při návrhu je maximální možný počet použitých přístrojů a zařízení v jedné síti. V současnosti je tento počet limitován 100 účastníky v jedné síti. V případech, kdy je na základě bezdrátových přístrojů proces řízen, je doporučeno provést tyto kroky:

1. Zřízení redundantní přijímací brány – v případě výpadku jednoho přijímače jej může okamžitě zastoupit a nahradit druhý přijímač.
2. Připojení přijímací brány do ŘS různými cestami – v případě výpadku jedné komunikační cesty může být tato nahrazena druhou. Například MODBUS a ETHERNET připojení.
3. Záložní napájení přijímací brány – je doporučeno používat záložní zdroj UPS.

4.2 Převodník série 848T

Bezdrátový převodník teploty, který je vybaven čtyřmi nezávislými vstupy. Je možné k němu připojit tyto vstupy:

- 2-, 3-, 4-vodičové odporové snímače teploty
- Termoelektrické články různých typů
- 0 – 1000 mV a 0 – 10 V
- 2-, 3-, 4-vodičové odporové vstupy
- 4 – 20 mA

Převodník je napájen pomocí napájecího modulu, který je jiskrově bezpečný, takže je jeho výměna možná i v zóně s nebezpečím výbuchu. Převodník podporuje konfiguraci High a Low alarmů. Kompletní nastavení lze provádět pomocí standardního ručního HART komunikátoru, nebo vzdáleně pomocí příslušného softwaru.



Obr. 12 Převodník série 848T od firmy Emerson Process Management [21]

TAB. 5 Specifikace přístroje 848T

Vstupy:	- Odporové teploměry
	- Termoelektrické články
	- mV
	- 0 – 10 V
	- 4 – 20 mA
Výstupy:	IEC 62591 WirelessHART, 2,4 GHz DSSS
Limity pro okolní teplotu:	0 – 99 % nekondenzující relativní vlhkost
Přesnost (pro snímač Pt100 při referenčních 20°C)	± 0,30 °C
Izolace:	Izolace mezi všemi kanály senzoru je 10 V DC. Přístroj vydrží až 250 V DC mezi všemi kanály bez poškození.
Alarmy:	Zařízení odesílá hlášení v případě poruchy vstupu
Elektromagnetická kompatibilita (EMC):	Převodník splňuje požadavky směrnice Evropské Unie 2004/108/EC a všechny podstatné požadavky normy EN 61326
Stabilita	± 0,15 % z měřené hodnoty nebo 0,15 °C (platí vždy vyšší hodnota) po dobu dvou let – pro odporové čidlo
	± 0,15 % z měřené hodnoty nebo 0,15 °C (platí vždy vyšší hodnota) po dobu jednoho roku – pro termoelektrický článek
Odolnost vůči vibracím:	Převodník byl testován podle IEC 60770-1 1999 bez efektu na jeho funkčnost
Napájení:	Jiskrově bezpečný napájecí modul
Materiál:	Hlavice – hliník s polyuretanovým nátěrem
	O-kroužky – silikon
	Svorkovnice – PBT
	Anténa – PBT / polykarbonát

Montáž:	Převodník je možné montovat na panel nebo na montážní konzoly s uchycením na 2“ trubku (DN50).
Hmotnost:	2,15 kg
Krytí:	Hlavice HA1 a HA2 – IP66
Schválení:	Schválení typu pro použití v Evropské Unii – CE certifikát
	Schválení pro použití v zóně s nebezpečím výbuchu – ATEX EExia IIC T4 (Ta -40 °C až 70 °C)
	Schválení pro radio-telekomunikaci – R&TTE 1999/5/EC

4.3 Převodník série 648

Bezdrátový převodník teploty s jedním konfigurovatelným vstupem. Oproti převodníku 848T navíc umožňuje použití LCD displeje a speciální kalibraci pro spárování převodníku s čidlem teploty (tzv. sensor matching).



Obr. 13 Převodník série 648 [22]

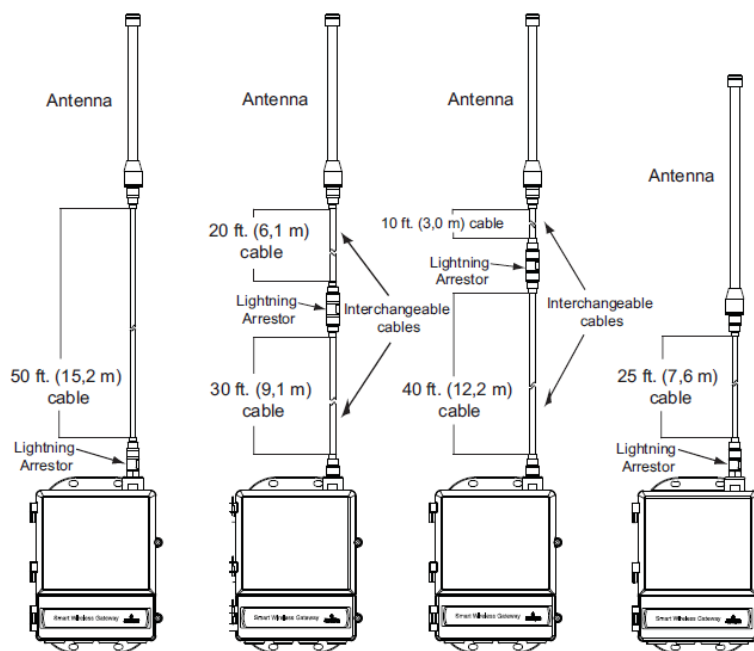
TAB. 6 Specifikace přístroje 648

Vstupy:	- Odporové teploměry
	- Termoelektrické články
	- mV
	- Odporový vstup
Výstupy:	IEC 62591 WirelessHART, 2,4 GHz DSSS
Displej:	Lokální LCD displej zobrazující pět znaků. Zobrazuje měřenou hodnotu v požadovaných jednotkách - °F, °C, °E, K, Ω, mV, % z nastaveného rozsahu
Limity pro okolní teplotu:	Bez LCD displeje: -40 °C až +85 °C S LCD displejem: -20 °C až +80 °C
Limity pro okolní vlhkost:	0 – 99 % nekondenzující relativní vlhkost
Přesnost (pro snímač Pt100 při referenčních 20°C)	± 0,225 °C
Elektromagnetická kompatibilita (EMC):	Převodník splňuje všechny podstatné požadavky normy EN 61326-1:2006 a EN 61326-2:2006
Stabilita	± 0,15 % z měřené hodnoty nebo 0,15 °C (platí vždy vyšší hodnota) po dobu dvou let
Odolnost vůči vibracím:	Převodník byl testován podle IEC 60770-1 1999 bez efektu na jeho funkčnost
Napájení:	Jiskrově bezpečný napájecí modul
Materiál:	Hlavice – hliník s polyuretanovým nátěrem, nebo nerezová ocel 316 SST
	O-kroužky – Buna-N
	Svorkovnice – PBT
	Anténa – PBT / polykarbonát
Montáž:	Převodník je možné instalovat integrálně s čidlem teploty, nebo odděleně na montážní konzoly s uchycením na 2“ trubku (DN50).

Hmotnost:	S hliníkovou hlavicí bez LCD: 1,9 kg
	S hliníkovou hlavicí s LCD: 2 kg
	S nerezovou hlavicí bez LCD: 3,5 kg
	S nerezovou hlavicí s LCD: 3,6 kg
Krytí:	Dvou-komorová hlavice IP66/IP67
Schválení:	Schválení typu pro použití v Evropské Unii – CE certifikát
	Schválení pro použití v zóně s nebezpečím výbuchu – ATEX EExia IIC T4 (Ta -40 °C až 70 °C)
	Schválení pro radio-telekomunikaci – R&TTE 1999/5/EC

4.4 Přijímací brána 1420

Jak už bylo popsáno v kapitole 4.1, přijímací brána slouží ke sběru dat od účastníků WirelessHART sítě a ke komunikaci s hostitelskými systémy. Pro aplikace, ve kterých se WirelessHART přístroje využívají k řízení procesu, byla vyvinuta redundantní brána. To v praxi znamená, že se dvě stejné brány navzájem propojí ethernet kabelem a navzájem se kontrolují, zda pracují správně. V případě výpadku hlavní brány jí okamžitě náhradí brána záložní, aby nedošlo k výpadku a ztrátě přenosu naměřených dat.



Obr. 14 Provedení brány 1420 s oddělenou anténou [23]

TAB. 7 Specifikace přijímací brány 1420

Vstupy:	WirelessHART, 2,4 GHZ
Skenovací frekvence:	1, 2, 4, 8, 16, 32 s nebo 1 – 60 minut
Velikost sítě:	Maximálně 100 přístrojů při skenovací frekvenci >8 s
	Maximálně 50 přístrojů při skenovací frekvenci >4 s
	Maximálně 25 přístrojů při skenovací frekvenci >2 s
	Maximálně 12 přístrojů při skenovací frekvenci >1 s
Výstupy:	Izolovaný RS485 – komunikační linka pro Modbus RTU (maximální délka kabelu 1524 m)
	Ethernet – 10/100base-TX Ethernet, komunikační protokoly EtherNet/IP Modbus TCP, HART-IP, HTTPS (maximální délka kabelu 100 m)
	OPC – podporuje OPC DA v2, v3 server
Napájení:	10,5 – 30 V DC
Vyzařována energie z antény:	Maximálně 10 mW (10 dBm) EIRP
Limity pro okolní teplotu:	Oblast použití -40 °C až +70 °C
Elektromagnetická kompatibilita:	Splňuje EN 61326-1:2006
Možnosti antény:	Integrovaná všesměrová anténa
	Volitelná oddělená všesměrová anténa
Hmotnost:	4,54 kg

<i>Materiál:</i>	Skříňka – hliníková s polyuretanovým nátěrem, krytí NEMÁ 4x
	Těsnění – silikon
	Integrovaná anténa – PBT/PC
	Oddělená anténa – skleněné vlákno
<i>Schválení:</i>	CE, ATEX Ex nA nL IIC T4 (-40 °C < Ta < 60 °C), ATEX Ex tD A 22 IP66 T135 (-40 °C < Ta < 60 °C)

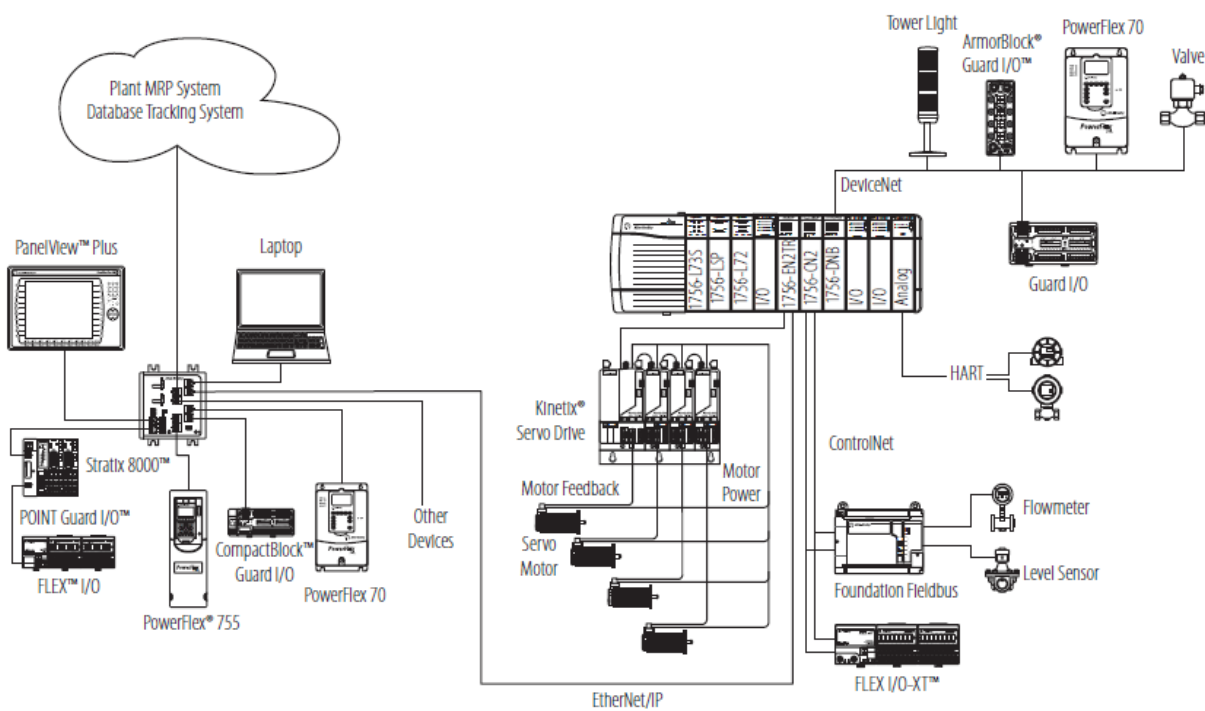
5 ŘÍDICÍ SYSTÉM CONTROLLOGIX ALLEN-BRADLEY

Společnost PRECHEZA a.s. využívá pro řízení procesu kalcinace řídicí systém od firmy Allen-Bradley, ControlLogix série 1756-L61. Jedná se o stavebnicový řídicí systém s možností doplňování vstupů a výstupů. Disponuje řídicí jednotkou a v případě společnosti PRECHEZA a.s. se jedná o typ 1756-L61, která disponuje uživatelskou pamětí o velikosti 2 MB.

TAB. 7 Specifikace řídicího systému ControlLogix 1756-L61

Počet úkolů:	32
- <i>Kontinuálních</i>	100 programů / úkolů
- <i>Periodických</i>	
- <i>Událostí</i>	
Uživatelská paměť:	2 MB
Paměťová karta:	Secure Digital
Vestavěné porty:	1x USB
Možnosti komunikace:	EtherNet/IP
	ControlNet
	DeviceNet
	Data highway plus
	Vzdálené Vstupy/Výstupy
	SynchLink
	USB
Počet možných připojení:	500
Počet síťových připojení:	100 připojení přes ControlNet (CN2/A)
	40 připojení přes ControlNet (CNB)
	256 připojení přes EtherNet/IP, 128 TCP (EN2x)
	128 připojení přes EtherNet/IP, 64 TCP (ENBT)
Možnosti redundance:	Plně podporována
Jednoduché ovládání:	Krokoč, Servo po komunikaci DeviceNet
	Analogové nebo síťové AC řízení

Integrované ovládání:	EtherNET/IP
	SERCOS rozhraní
	Analogové možnosti:
	- Vstup enkodéru
	- Vstup LDT
	- SSI vstup
Programovací jazyky:	Reléové
	Strukturovaný text
	Funkční bloky
	Sekvenční funkční schémata
	Bezpečnostní úkoly atd.



Obr. 15 Architektura s řídicím systémem [24]

TAB. 8 Výběr vstupně / výstupních modulů pro kontrolér 1756-L61

DC Digitálně vstupní moduly:			
Model	Vstupy / Výstupy	Kategorie napájení	Provozní rozsah napájení
1756-IB16	16 vstupů (8 bodů/skupinu)	12/24 V DC sink	10...31.2 V DC
1756-IB16D	16 diagnostických vstupů (4 body/skupinu)	12/24 V DC sink	10...30 V DC
1756-IB16I	16 individuálně izolovaných vstupů	12/24 V DC sink/source	10...30 V DC
1756-IB16IF	16 vysokorychlostních, individuálně izolovaných vstupů	12/24 V DC sink/source	10...30 V DC
DC Digitálně výstupní moduly:			
Model	Vstupy / Výstupy	Kategorie napájení	Provozní rozsah napájení
1756-OB8	8 výstupů	12/24 V DC source	10...30 V DC
1756-OB8EI	8 individuálně izolovaných výstupů s pojistkou	12/24 V DC source	10...30 V DC
1756-OB8I	8 individuálně izolovaných výstupů	12/24 V DC source	10...30 V DC
1756-OB16D	16 diagnostických výstupů (8 bodů/skupinu)	24 V DC source	19.2...30 V DC
Analogové vstupní moduly:			
Model	Vstupy / Výstupy	Rozsah	Rozlišení
1756-IF6CIS	6 individuálně izolovaných vstupů, napájených	0...21 mA	16 bits
			0.34 μ A/bit
1756-IF6I	6 individuálně izolovaných vstupů	\pm 10.5 V	16 bits
		0...10.5 V	10.5V: 343 μ V/bit
		0...5.25 V	0...10.5V: 171 μ V/bit
		0...21 mA	0...5.25V: 86 μ V/bit
			0...21 mA: 0.34 μ A/bit
1756-IF8	8 jednoduše ukončených vstupů	\pm 10.25 V	\pm 10.25V: 320 μ V/cent (15 bits plus sign bipolar)
	4 rozdílové vstupy	0...10.25 V	0...10.25V: 160 μ V/cent (16 bits)

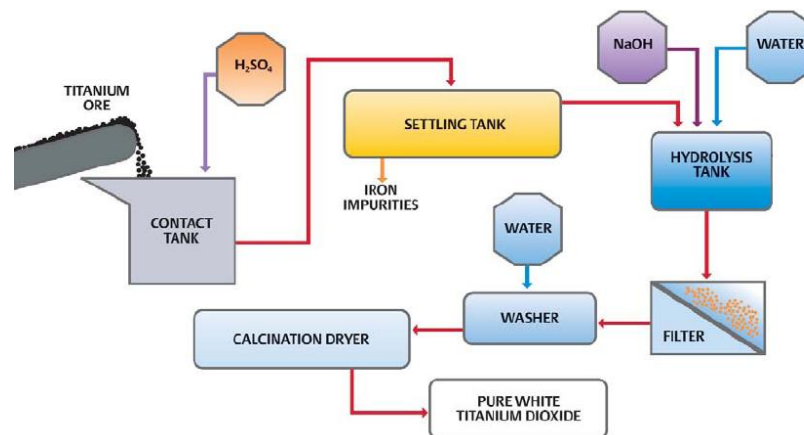
	2 vysokorychlostní rozdílové vstupy	0...5.125 V	0...5.125V: 80 μ V/cnt (16 bits)
		0...20.5 mA	0...20.5 mA: 0.32 μ A/cnt (16 bits)
1756-IF8H	8 různých napěťových, nebo proudových vstupů, HART	\pm 10 V	16...21 bits
		0...5 V	
		1...5 V	
		0...10 V	
		0...20 mA	
		4...20 mA	
Analogové vstupní moduly pro odporová čidla a termoelektrické články:			
Model	Vstupy / Výstupy	Rozsah	Rozlišení
1756-IR6I	6 individuálně izolovaných vstupů RTD	1...487 Ω	16 bits
		2...1000 Ω	1...487 Ω : 7.7 m Ω /bit
		4...2000 Ω	2...1000 Ω : 15 m Ω /bit
		8...4020 Ω	4...2000 Ω : 30 m Ω /bit
			8...4020 Ω : 60 m Ω /bit
1756-IT6I	6 individuálně izolovaných vstupů pro TC	-12...78 mV	16 bits
	1 CJC	-12...30 mV	-12...78 mV: 1.4 μ V/bit
			-12...30 mV: 0.7 μ V/bit
Analogové výstupní moduly:			
Model	Vstupy / Výstupy	Rozsah	Rozlišení
1756-OF4	4 napěťové, nebo proudové výstupy	\pm 10.4 V	Napětí:
		0...21 mA	15 bits across 10.5 V, 320 μ V/bit
			Proud:
			15 bits across 21 mA, 650 nA/bit
1756-OF6CI	6 individuálně izolovaných proudových výstupů	0...21 mA	13 bits across 21 mA (2.7 μ A)



Obr. 16 Řídicí systém ControlLogix od firmy Allen-Bradley [24]

6 MĚŘENÍ A REGULACE TEPLoty NA ROTAČNÍ KALCINAČNÍ PEČI

Měření a regulace teploty, všeobecně na rotačních prvcích je velice náročný technický úkol. S tímto problémem se potýká mnoho cementáren, vápenek a také se s ním setkala i společnost PRECHEZA a.s., která je jediným českým výrobcem titanové běloby. Tato výroba je velice komplikovaný chemicko-fyzikální technologický proces, který obsahuje mnoho kroků – od zpracování rudy (ilmenitu) až po výsledný produkt TiO_2 . Jedním z technologických kroků je i kalcinace, která probíhá přímo v rotační kalcinační peci. Tato pec je regulována na základě měření teploty. Kalcinace je jedním z nejdůležitějších procesů v samotné výrobě titanové běloby a je na ní přímo závislá výsledná kvalita finálního produktu.

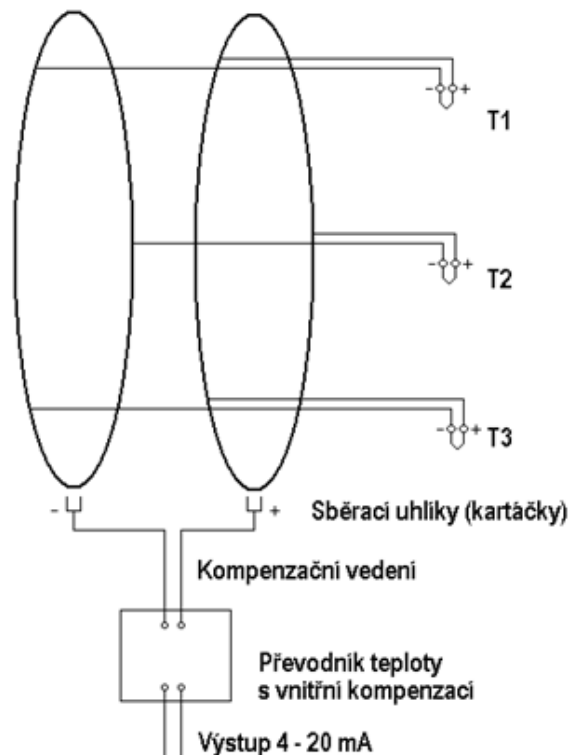


Obr. 17 Jeden ze způsobů výroby TiO_2 [25]

6.1 Stávající měření a regulace

Samotný proces kalcinace probíhá v dlouhých rotujících pecích, které jsou průběžné. Materiál se do nich dávkuje směrem od studeného konce k teplému. Teplý konec znamená, že jsou zde hořáky a zdroj tepla. K přenosu tepla dochází mezi spaliny a vyzdívkou pece a následně mezi vyzdívkou a zpracovávaným materiálem. Měření teploty je prováděno pomocí termoelektrických článků typu K, které jsou v n-ticích instalovány v pravidelných rozestupech po obvodu pece. Používány jsou teploměry od českého výrobce JSP s.r.o. – typ T1512-6 s rozsahem použití od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Každý teploměr je chráněn ochrannou jímkou, která je z materiálu 17255. Termoelektrické články jsou připojeny na společnou sběrací trolej. Měřený signál, tedy mV, je snímán pomocí sběracích uhlíků z troleje a následně je přenášén do převodníku teploty kompenzačním vedením typu K. Převodník teploty typu P5201 od českého výrobce JSP s.r.o. převádí mV na analogový signál 4-20 mA a ten je následně přiveden na vstupy řídicího systému

ControLogix. Hodnota analogového vstupu reprezentuje průměrnou teplotu ze tří měřících bodů na páté troleji, nebo v případě dalšího vstupu reprezentuje průměrnou teplotu z šestibodového měření teploty z první troleje. Řídicí systém tuto hodnotu (hodnoty) zpracuje v řídicím algoritmu, kde každá z trolejí, resp. jejich průměrná teplota má přiřazený koeficient váhy, tedy jak moc zasahuje daná teplota do samotné regulace. Následně jsou ovládány akční členy, kdy celý proces probíhá kontinuálně.



Obr. 18 Ukázka zapojení tří termočlánků na páté troleji

6.2 Nevýhody stávajícího měření a regulace

Nejslabším článkem celé regulační smyčky jsou troleje a sběrací mechanismus. Toto zařízení je už desítky let staré a je velice obtížné jej nahradit nebo vyměnit, protože náhradní díly potřebné pro výměnu nebo opravu se již nevyrábí. Také sběrací mechanismus vyžaduje pravidelnou údržbu a servis a to hlavně kvůli prašnému prostředí, které má za následek znečištění trolejí a sběracího mechanismu, tedy i ovlivnění vlastního měření. Dalším velice podstatným nedostatkem použití trolejí, na kterých jsou připojeny tři, a více termoelektrických článků je, že v případě, kdy dojde k poškození teplotní jímky a následnému zničení měřícího čidla, je celá tato trolej ovlivněna chybným měřením tohoto čidla. Taktéž je velice obtížné poznat, které z čidel bylo zničeno bez nutnosti proměřování či přímo vytažení všech čidel.



Obr. 19 Skutečné provedení trolejí a sběracích mechanismů [4]

6.3 Test WirelessHART komunikace

V mé bakalářské práci jsem společně se společností PRECHEZA a.s. testoval schopnost komunikace WirelessHART přístrojů přímo v hale s kalcinační pecí, kde byl jeden převodník série 648W nainstalován přímo na rotační peci. Výrobní hala, ve které je pec umístěna, je několik set metrů dlouhá. Jsou zde provozovány stovky elektrických pohonů a také řada pohonů s frekvenčními měniči. Dále je zde využíván velký jeřáb na dálkové bezdrátové ovládání. Všechny tyto prvky mohou být rušiči přenášeného WirelessHART signálu.

Samotné testování komunikace probíhalo ve třech krocích.

1. krok – na studeném konci rotační pece byl instalován převodník série 648W s označením TEPLOTA1. Pro ochranu od sálavého tepla byl použit zelený štít s výplní ze skelné vaty. Samotný převodník byl instalován na distanční tyči. Přijímací WirelessHART

brána série 1420 s označením WIHARTGW byla instalována v místnosti s rozvaděči, která je na boční straně haly.

Při testování komunikace v 1. kroku byly naměřeny tyto hodnoty:

Převodník instalován na peci: TEPLOTA1
Gateway: WIHARTGW

Vyhodnocení parametrů za použití jednoho bezdrátového převodníku a Gateway

TEPLOTA1:

- | | |
|--|--------|
| - Stabilita komunikační trasy s WIHARTGW | 71,9 % |
| - RSSI s WIHARTGW | -87 dB |
| - Zmeškaných aktualizací | 1419 |
| - Celkem aktualizací | 63188 |
| - Skenovací frekvence | 8 s |
| - Zmeškané aktualizace v % | 2,24 % |

Převodník v této komunikační konfiguraci neměl žádného souseda, se kterým by mohl komunikovat v případech, kdy byl z pohledu přijímací brány v zákrytu za pecí, tedy vždy půl otáčky pece.

2. krok – k testované sestavě byl doplněn WirelessHART převodník teploty s označením TEPLOTA4. Ten byl umístěn do prostoru, aby pokrýval odvrácenou stranu pece z pohledu přijímací brány tak, aby měl převodník TEPLOTA1 v této části přímou komunikační trasu.

Při testování komunikace ve 2. kroku byly naměřeny tyto hodnoty:

Doplňný převodník má označení: TEPLOTA4

Vyhodnocení parametrů za použití dvou bezdrátových převodníků a Gateway

TEPLOTA1:

- | | |
|--|---------|
| - Stabilita komunikační trasy s TEPLOTA4 | 99,1 % |
| - Stabilita komunikační trasy s WIHARTGW | 66,7 % |
| - RSSI s TEPLOTA4 | -51 dB |
| - RSSI s WIHARTGW | -89 dB |
| - Zmeškaných aktualizací | 244 |
| - Celkem aktualizací | 95464 |
| - Skenovací frekvence | 8 s |
| - Zmeškané aktualizace v % | 0,255 % |

3. krok – do haly byl umístěn WirelessHART převodník tlaku s označením WPT102WIHART, který byl střídavě umístován různě v prostoru haly, aby posílil WirelessHART síť a aby tato síť byla robustnější.

Při testování komunikace ve 3. kroku byly naměřeny tyto hodnoty:

Doplněný převodník má označení: WPT102WIHART

Vyhodnocení parametrů za použití tří bezdrátových převodníků a Gateway

TEPLOTA1:

- Stabilita komunikační trasy s TEPLOTA4	99,1 %
- Stabilita komunikační trasy s WIHARTGW	66,7 %
- Stabilita komunikační trasy s WPT102WIHART	nepřipojen
- RSSI s TEPLOTA4	-56 dB
- RSSI s WIHARTGW	-88 dB
- RSSI s WPT102WIHART	nepřipojen
- Zmeškaných aktualizací	41
- Celkem aktualizací	68377
- Skenovací frekvence	8 s
- Zmeškané aktualizace v %	0,0599 %

TAB. 9 Shrnutí nejdůležitějších výsledků z testování komunikace

Fáze testování	Stabilita komunikační trasy	Počet zmeškaných aktualizací
1. krok	71,90 %	2,240 %
2. krok	99,10 %	0,255 %
3. krok	99,10 %	0,059 %

Z tabulky 9 je patrné, že v prvním kroku testování nebyla komunikační trasa ideální a to hlavně v případech, kdy byl rotující převodník schovaný z pohledu přijímací brány za pecí. Při této komunikaci nebylo doručeno až 2,24% aktualizací, tedy naměřených hodnot. Po přidání dalších přístrojů do sítě, a to už v kroku č. 2, je vidět veliké zlepšení stability komunikační trasy a také snížení počtu zmeškaných aktualizací.

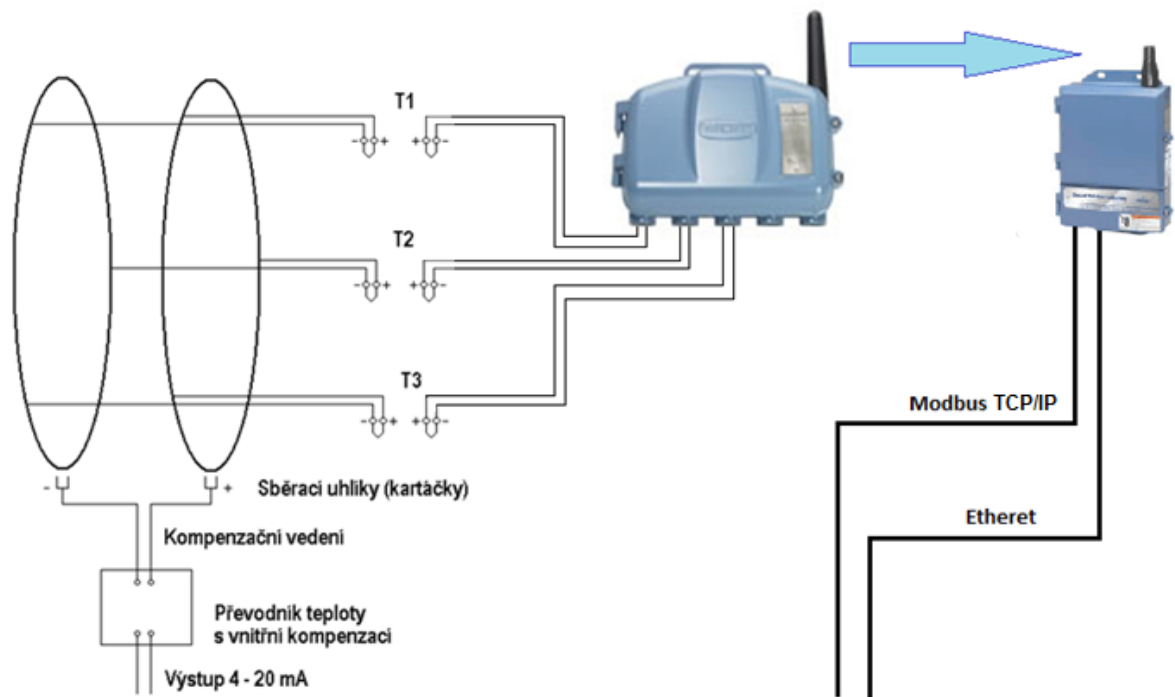
Testováním bylo prokázáno, že tato technologie komunikace může fungovat i v těžkých průmyslových podmínkách. Také z výše uvedeného vyplývá, že pro lepší a robustnější síť je třeba použít alespoň tři účastníků sítě, ale síť jako taková může fungovat i s jedním účastníkem (viz testovací krok č. 1), ovšem za cenu vyšší ztráty přenesených dat a nižší stability komunikační trasy.



Obr. 20 Instalace WirelessHART převodníku 648W s označením TEPLOTA1 na rotační peci [4]

6.4 Měření teploty pomocí WirelessHART převodníku a jeho srovnání s trolejí

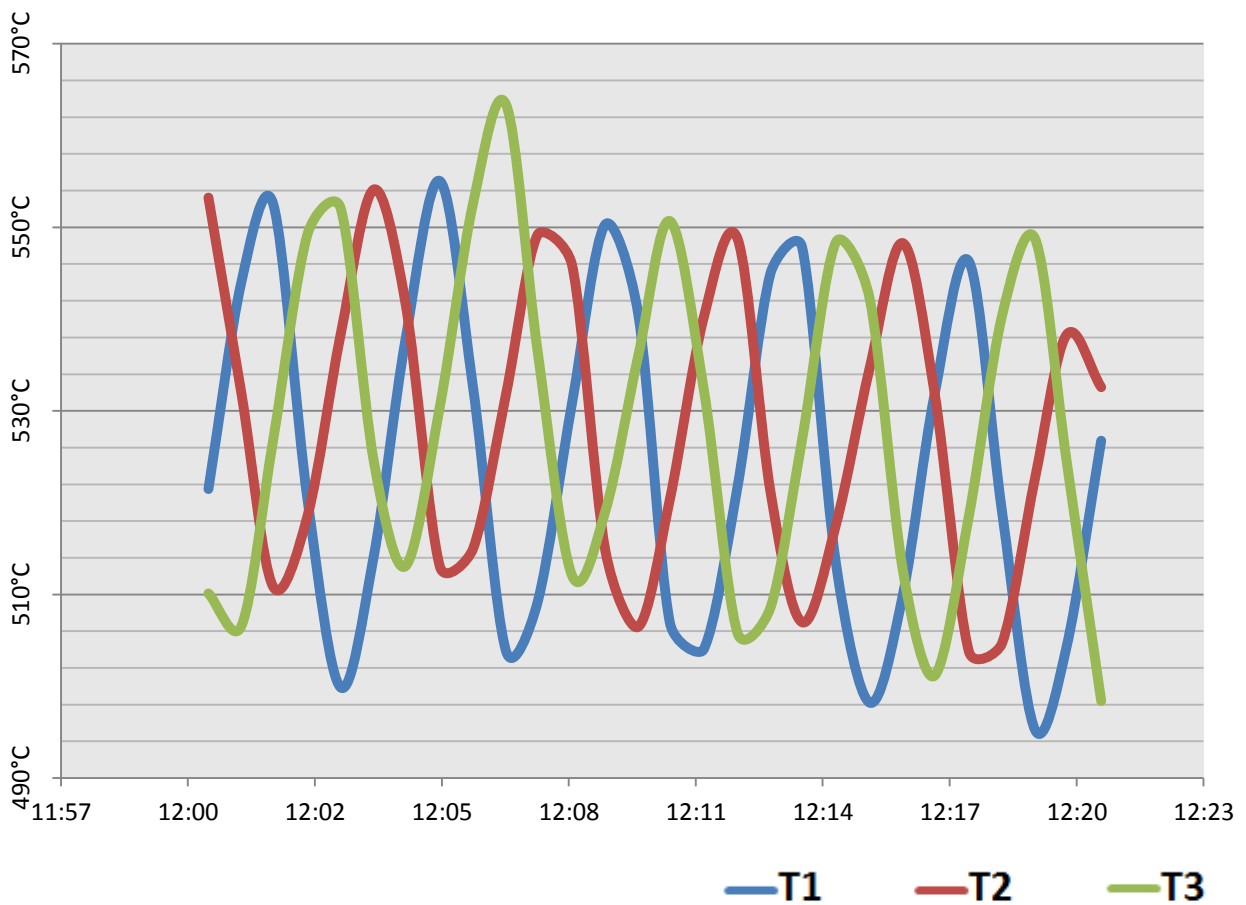
Společnosti Precheza a.s. byl zapůjčen testovací WirelessHART set pro účely srovnání měřených teplot na páté troleji. Na tuto trolej byl instalován bezdrátový převodník série 848, který disponuje čtyřmi vstupy. Klasické termoelektrické články na páté troleji byly vyměněny za dvojité (duální, tedy dva termoelektrické články zalisované v jednom čidlu), kde jeden termoelektrický článek byl připojen klasicky na trolej a druhý byl připojen do WirelessHART převodníku. Příjemčí brána 1420 byla připojena do sběru dat pomocí řídicího systému MLX1400. S tímto systémem brána komunikovala protokolem MODBUS TCP/IP na kanálu CH1. Celkem tento test probíhal dva týdny, kdy bylo nashromážděno více jak 200.000 naměřených údajů.



Obr. 21 Zapojení testovací sady pro srovnání měřených teplot [4]

Podle předpokladu se jednotlivé teploty $T1$, $T2$ a $T3$, respektive jejich naměřené hodnoty pohybovaly po křivkách ve tvaru sinusoid, které byly navzájem fázově posunuty. Toto je způsobeno tím, že pec není zcela naplněna zpracovávaným materiálem, ale ten se valí pouze ve spodní třetině až polovině pece. Z toho vyplývá, že nejteplejším místem v rotační peci je její vrchní část, ve které proudí horké spaliny. Nejchladnější částí je právě místo, ve kterém se vyskytuje zpracovávaný materiál.

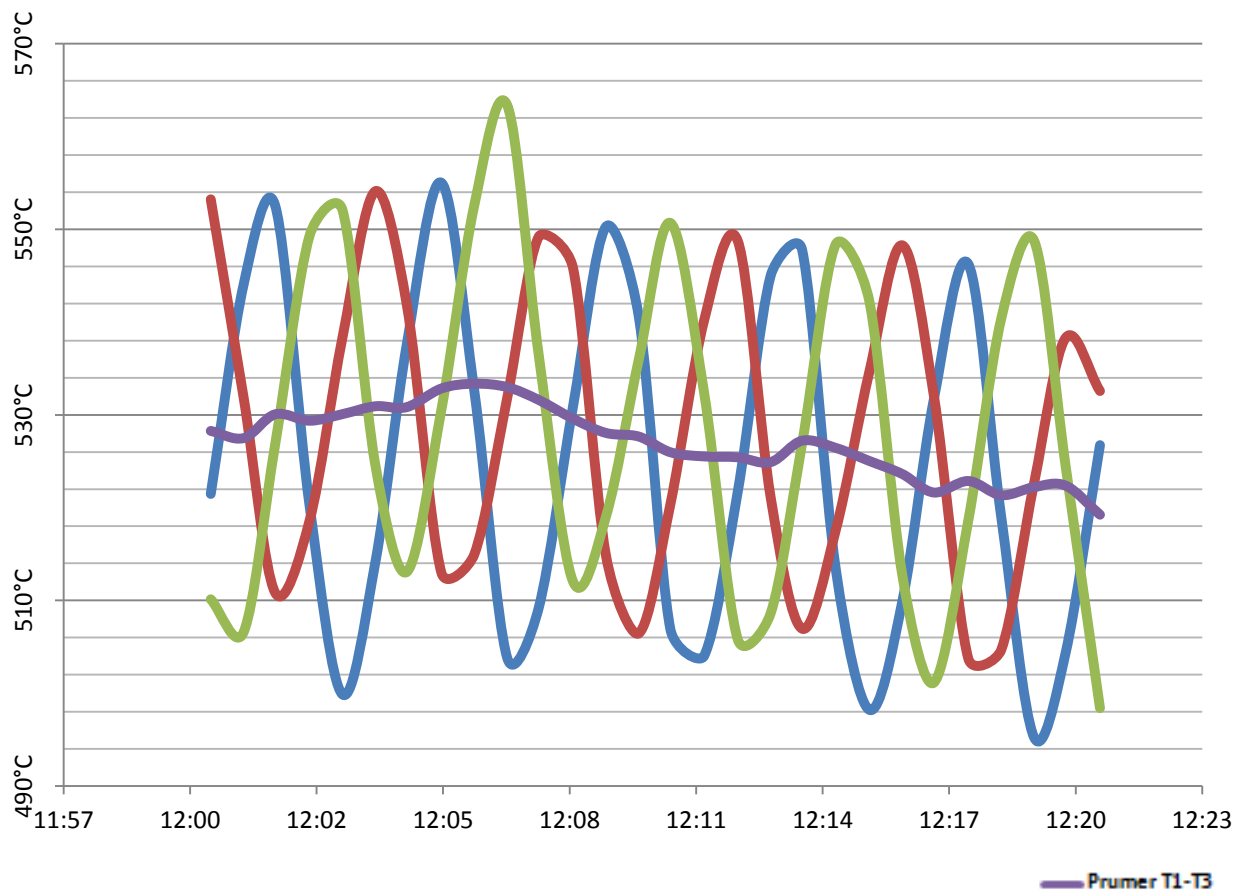
V rozboru naměřených dat budeme používat pouze hodnoty, které byly naměřeny v časovém úseku od 12:00 do 14:00 dne 26.2. 2013. Tento vzorový interval byl náhodně vybrán až po srovnání všech dat, kdy nebyly zjištěny zásadní odchylky v celém rozsahu měřených hodnot.



Obr. 22 Graf č. 1 Průběh teplot $T1$, $T2$ a $T3$ měřených pomocí bezdrátového *WirelessHART* převodníku 848

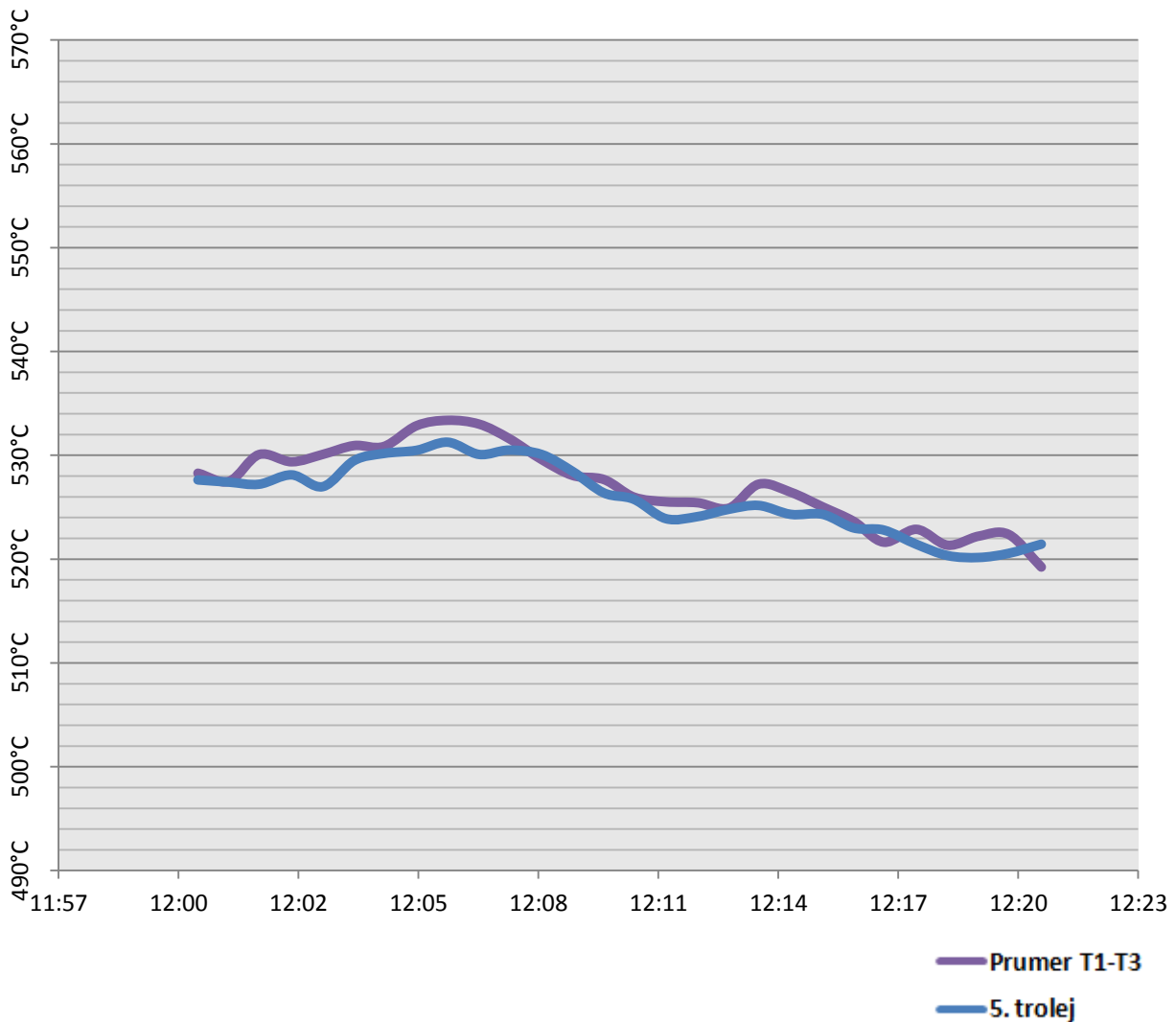
Na grafu č. 1 je vidět průběh jednotlivých teplot $T1$, $T2$ a $T3$. Vstupní data použita pro vykreslení jsou ze dne 26.2. 2013 od 12:00 do 12:20.

Jelikož je celá regulace postavena na průměrovaných teplotách z troleje, provedeme z naměřených hodnot průměr v každém časovém úseku a promítneme jej do grafu. Tímto způsobem získáme srovnávací teplotu pro klasické měření na páte troleji. Také z něj bude znatelné, zda se nově navrhované řešení výrazně liší od stávajícího a zda bude potřebné průměrnou teplotu $T1$ - $T3$ korigovat.



Obr. 23 Graf č. 2 Promítnutí průměrné teploty $T1-T3$

Po tomto kroku můžeme srovnat průměrnou teplotu $T1-T3$ měřenou bezdrátovým převodníkem s měřenou teplotou na páte troleji stávajícím způsobem.



Obr. 24 Graf č. 3 Srovnání průměrné teploty $T1-T3$ a teploty měřené stávajícím způsobem na páté troleji

Z grafu srovnání vyplývá, že zprůměrujeme-li bezdrátově měřenou teplotu $T1$, $T2$ a $T3$, dostaneme prakticky totožnou křivku průběhu teplot, jako v případě stávajícího měření na páté troleji.

Číselné srovnání ve zvoleném intervalu od 12:00 do 14:00 ze dne 26.2. 2013.

Zavedení pojmů:

- $T1$, $T2$, $T3$ – měřené teploty pomocí bezdrátového převodníku 848
- $T5$ – teplota měřena stávajícím způsobem na páté troleji
- $T1-T3$ – průměrná teplota z teplot $T1$, $T2$ a $T3$

Maximální odchylky teploty $T1-T3$ od měřené hodnoty $T5$: $-7,13\text{ °C}$ a $4,74\text{ °C}$

To znamená, že průměrná teplota $T1-T3$ byla měřena ve zvoleném rozsahu maximálně o $4,74\text{ °C}$ vyšší, než teplota $T5$ a také že $T1-T3$ byla měřena maximálně o $7,13\text{ °C}$ nižší než byla teplota $T5$.

Průměrná odchylka $T1-T3$ od teploty $T5$: $+1,017\text{ °C}$

Ve zvoleném rozsahu byla průměrná odchylka teploty $T1-T3$ od teploty $T5$ $+1,017\text{ °C}$.

Procentuální vyjádření průměrné odchylky z teploty $T5$: $+0,21\text{ %}$

Výsledky ukazují, že průměrný rozdíl mezi teplotou $T1-T3$ a teplotou $T5$ v daném rozsahu je $+0,21\text{ %}$, tedy teplota $T1-T3$ ukazuje o $0,21\text{ %}$ víc než teplota $T5$.

Shrnutí srovnání průběhů teplot

Po diskuzi se společností PRECHEZA a.s. a panem Ing. Lojdou bylo rozhodnuto, že tato odchylka je z hlediska řízení pece zanedbatelná, takže lze zavést průměrnou teplotu $T1-T3$ přímo do řídicího algoritmu beze změn a korekcí, čímž se velice usnadňuje implementace a nasazení bezdrátové technologie WirelessHART v tomto procesu řízení kalcinační pece.

6.5 Návrh nových měřících WirelessHART přístrojů a úprava řídicího systému

Testováním byla prokázána použitelnost WirelessHART přístrojů, které měřily ve srovnání se stávajícím měřením, se zanedbatelnou odchylkou. Toto v praxi znamená, že lze využít stávajících algoritmů pro samotné řízení pece. Pro to, aby mohlo být nové měření a regulace spuštěno, je potřeba instalovat do výrobní haly přijímací bránu 1420 a měřící bezdrátové přístroje. Tuto sestavu je následně potřeba zapojit do řídicího systému a naprogramovat vstupy.

Návrh nové přijímací brány 1420 - celkem 2ks, redundantní provedení

1420A2A3A4N1J1WL3RD		
1420	Popis:	Přijímací brána série 1420
A	Napájení:	24 V DC, 500 mA
2	Komunikace Ethernet - Fyzické připojení:	Duální Ethernet
A3	Skenovací frekvence, Wireless standard a Protokol:	Uživatelsky nastavitelná skenovací frekvence, 2.4 GHz DSSS, WirelessHART

A	Sériová komunikace:	Modbus RTU - RS485
4	Komunikace Ethernet - Protokol:	Webserver, Modbus TCP/IP, AMS Ready, OPC
N1	Certifikace výrobku:	ATEX certifikace pro ochranu Typu N
J1	Adaptéry:	Průchodky M20 x 1,5
WL3	Volba antény:	Oddělená všesměrová anténa, délka 6.1 m s kabelem 9.1 m, ochrana proti bleskům
RD	Volba redundance:	Redundantní přijímací brána

Návrh měření teploty na páte troleji – 1ks čtyř-vstupového převodníku 848

848TXI1S001WA3WM1B6HA1Q4		
848T	Popis:	Více-vstupový převodník teploty
X	Komunikační protokol:	WirelessHART
I1	Certifikace týkající se prostředí s nebezpečím výbuchu:	ATEX certifikace pro jiskrovou bezpečnost
S001	Specifikace vstupů:	Odporové teploměry a termoelektrické články
WA3	Skenovací frekvence, Wireless standard a Protokol:	Uživatelsky nastavitelná skenovací frekvence, 2.4 GHz, WirelessHART
WM1	Anténa a možnosti napájení:	Anténa s extendovaným dosahem, integrální anténa, napájecí modul, ATEX Eexia
B6	Volby montážní sady:	Montážní konzole pro montáž na 2" trubku, nebo na panel, SST
HA1	Volba pouzdra:	Hliníková hlavice s průchodkami, 5x 1/2" pro kabel 7,5 - 11,9 mm
Q4	Kalibrační certifikát:	3-bodová kalibrace

Napájecí modul pro převodník 848 – 1ks

701PBKKF		
701P	Popis:	Napájecí modul Smart
BK	Typ napájecího modulu:	Černý napájecí modul
KF	Certifikace:	FM, ATEX a IECEx certifikace pro jiskrovou bezpečnost

Návrh měření teploty na první troleji – 6ks převodníků 248

248DXI1D2WA3WK1B4Q4		
248	Převodník teploty:	Smart převodník teploty
D	Styl montáže:	Pro venkovní použití, Wireless
X	Výstupní protokol:	WirelessHART
I1	Certifikace výrobku:	ATEX certifikace pro jiskrovou bezpečnost
D	Pouzdro:	Hliníková hlavice, Wireless
2	Kabelový/přívodní vstup:	1/2" NPT
WA3	Skenovací frekvence, Wireless standard a Protokol:	Uživatelsky nastavitelná skenovací frekvence, 2.4 GHz, WirelessHART
WK1	Anténa a možnosti napájení:	Anténa s dlouhým dosahem, integrální anténa, napájecí modul, ATEX Eexia
B4	Montážní objímka:	Univerzální montážní konzole pro 2" trubku a panel – konzole a šrouby nerezová ocel
Q4	Kalibrační certifikát:	3-bodová kalibrace

Napájecí modul pro převodníky 248 – 6ks

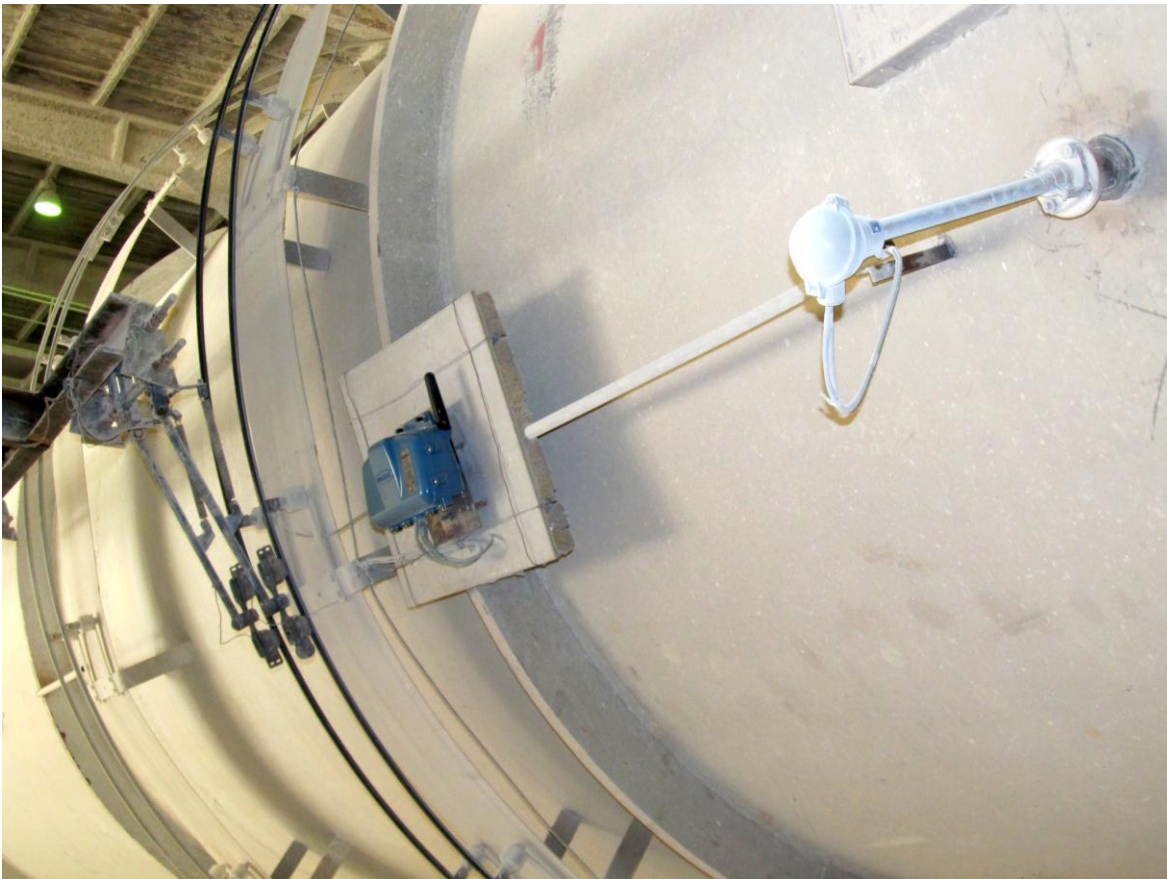
701PBKKF		
701P	Popis:	Napájecí modul Smart
BK	Typ napájecího modulu:	Černý napájecí modul
KF	Certifikace:	FM, ATEX a IECEx certifikace pro jiskrovou bezpečnost

Doporučené náhradní díly:

1ks	1420A2A3A4N1J1WL3RD
1ks	848TXI1S001WA3WM1B6HA1Q4
2ks	701PBKKF
2ks	248DXI1D2WA3WK1B4Q4

WirelessHART síť v této konfiguraci bude dostatečně robustní, aby vytvořila spolehlivou síť, kde nebude docházet ke ztrátě přenášeného signálu. První trolej by měla být osazena šesti převodníky série 248, kde každý jeden bude připojen k jednomu termoelektrickému článku. Pátou trolej je možné osadit jedním převodníkem 848. Přijímací brána by měla být instalována dle dispozičních možností v místnosti s rozvaděči. Tato brána disponuje oddělenou anténou, kterou je možné umístit do prostoru ve výrobní hale, kde by lépe pokrývala komunikační prostor. Druhá brána by měla být instalována stejným způsobem a

propojena s první bránou pomocí ethernetového kabelu. Tímto způsobem budou brány mezi sebou komunikovat a v případě výpadku jedné ji okamžitě nahradí druhá a do řídicího systému bude odesláno chybové hlášení o poruše. Obě přijímací brány je možné připojit do řídicího systému pomocí digitální komunikace MODBUS RS-485. Fyzicky je možné připojit kabel přímo do řídicí jednotky, takže odpadá nutnost vybavení řídicího systému novou vstupní kartou. Řídicí systém je následně potřeba nakonfigurovat, tedy hlavně provést průměr z teplot $T1$, $T2$ a $T3$ v reálném čase a to pro každou trolej a dále jej nastavit jako vstup do algoritmu řízení. V případě výpadku některého z komponentů je důležité mít skladem sadu doporučených náhradních dílů, které je možné okamžitě vyměnit, aby nedošlo k výpadku regulace pece.



Obr. 25 Převodník 848 připojený na páté troleji

7 ZÁVĚR

Úkolem této diplomové práce bylo prověřit, zda a jak by bylo možné elegantně nahradit stávající zastaralé měření teploty a jak jej začlenit do systému regulace. Prvotními testy se zjišťovalo, zda vůbec technologie WirelessHART může být provozována v tak náročném průmyslovém prostředí. Výsledky, které byly testy prokázány, ukazují, že tato nová technologie může bez větších problémů koexistovat s jinými zařízeními a překážkami. Dále byly provedeny testy vlastního měření teploty a jeho srovnání se stávajícím způsobem měření. Úkolem bylo zjistit, jak se chová teplota, když je měřena samostatně jednotlivými termoelektrickými články typu K vůči měření pomocí trolejí a sběracích uhlíků. Tento test byl prováděn za účelem co možná největšího zjednodušení samotné implementace nové technologie WirelessHART do stávajícího regulačního algoritmu, tedy najít vhodný poměr mezi měřenou teplotou na troleji a teplotou měřenou pomocí nového bezdrátového převodníku. Bylo prokázáno, že troleje jednotlivou teplotu průměrují a tudíž i teplota měřená převodníkem musela být zprůměrována. Vypočtená odchylka poukazuje na skutečnost, že při měření pomocí troleje a sběracích uhlíků pravděpodobně dochází ke ztrátě měřeného signálu v důsledku například znečištění troleje a podobně, což má za následek zanesenou doplňující nejistotu měření. Bylo také prokázáno, že není zapotřebí žádných velkých změn řídicího systému a ani jeho programování, což je považováno za veliký přínos celého testování a nového návrhu.

V případě, že by se společnost PRECHEZA a.s. rozhodla pro výměnu trolejí (v prvním kroku výměny by obě měření fungovala paralelně), získala by nové a moderní řešení daného problému měření a regulace. Získala by tím také mnohem lepší přehled o jednotlivých teploměrech a následně tím mohla zkvalitnit i případný servis a výměnu jednotlivých čidel. Navrhované přístroje jsou prakticky bezúdržbové a je možné je vzdáleně konfigurovat. Výhodou také je, že samy hlásí případnou nutnost výměny napájecího modulu, který by měl v tomto provozu vydržet zhruba 2,5 roku. Jelikož je technologie WirelessHART velice jednoduchá na další implementace přístrojů, mohla by společnost PRECHEZA a.s. využít přijímacích bran i pro jiné aplikace, u kterých v současnosti náklady na případnou kabeláž a instalaci převyšovaly efektivitu zřízení takového měření. Jedná se tak hlavně o monitorovací měření v těžko dostupných místech s velmi složitým přístupem a obsluhou.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CHUDÝ, V.; Palencár, R.; Kureková, E.; Halaj, M. Meranie technických veličin. 1. vydání: Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
- [2] KREIDL, M. Měření teploty – Senzory a měřící obvody. 1. vydání: Praha: BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [3] CARLSON, Daniel; SHAMSI, Moazzam; SCHNAARE, Ted; DAUGHERTY, Dan; POTTER, Jeff; NIXON, Mark: IEC 62591 WirelessHART® System Engineering Guide. Revision 2.2, EMERSON Process Management, 2010, 82 stran
Dostupné z: http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/EMR_WirelessHART_SysEngGuide.pdf
- [4] BEDNÁR, Anton; Bakalářská práce – MĚŘENÍ TEPLoty NA ROTAČNÍ PEČI POMOCÍ BEZDRÁTOVÝCH PŘÍSTROJŮ. VUT Brno, FSI, ÚAI 2011, 47 stran
Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38904
- [5] Lord Kelvin: [online]. Dostupné z WWW:<
http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lord_Kelvin_photograph.jpg >
- [6] Teplotní stupnice: [online]. [cit.20.2.2011] Dostupné z WWW:<
http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=4d6f6c656b756c6f76e12066797a696b61h&key=296>
- [7] Daniel Gabriel Fahrenheit: [online]. Dostupné z WWW:<
<http://expensiveplaces.com/original-thermometer-invented-by-fahrenheit-offered-at-auction/>>
- [8] Chapter 7 - Temperature Measurement: Reference Temperatures [online]. [cit.21.2.2011] Dostupné z WWW:<
<http://www.globalspec.com/reference/10944/179909/chapter-7-temperature-measurement-reference-temperatures>>
- [9] Seebeckův jev: [online]. Dostupné z WWW:<
http://3pol.cz/img/pic/0/2010/02/elektrina_z_tepla_02.jpg >

- [10] Charakteristika termoelektrických článků: [online]. Dostupné z WWW:<
<http://www1.fs.cvut.cz/cz/U12110/TEM/senzory/grafy.htm>>
- [11] Barevná značení termoelektrických článků: [online]. Dostupné z WWW:<
<http://www.thermibel.be/documents/thermocouples/thermocouples-color.xml?lang=en>>
- [12] Teplotní závislost kovových odporových senzorů: [online]. Dostupné z WWW:<
http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/kovove_snimace_tepl.htm >
- [13] Rosemount DIN-Style Temperature Sensors and Thermowells (Metric) [PDF dokument]. [cit.1.3.2011] Dostupné z WWW:<
<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0200-2654.pdf>>
- [14] Rosemount 1075 and 1099 Series High Temperature Thermocouples [PDF dokument]. [cit.15.3.2011] Dostupné z WWW:<
<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0400-2654.pdf>>
- [15] WirelessHART Standard Crowning Achievement in 15 Years of Success for HART Communication Foundation: [online]. Dostupné z WWW:<
http://www.hartcomm.org/hcf/news/pr2008/15th_anniversary.html >
- [16] Wireless products, Emerson Process Management [online]. [cit.28.3.2011] Dostupné z WWW:<
<http://www2.emersonprocess.com/en-US/plantweb/wireless/products/Pages/SmartWirelessGateway.aspx>>
- [17] Prokop Engineering Brno, spol. s r.o. [online]. [cit.29.3.2011] Dostupné z WWW:<
<http://www.prokop-engineering.cz/>>
- [18] iDNES.cz, Bývalá štola u Příbrami zásobuje plynem polovinu Česka [online]. [cit.1.4.2011] Dostupné z WWW:<
http://ekonomika.idnes.cz/byvala-stola-u-pribrami-zasobuje-plynem-polovinu-ceska-pil-ekonomika.aspx?c=A090108_211931_ekonomika_abr>
- [19] The infrastructurist, America under construction [online]. [cit.1.4.2011] Dostupné z WWW:<
<http://www.infrastructurist.com/2009/03/19/the-vocabulary-of-sprawl/>>

- [20] Engineerlive, Wireless communications mesh improves equipment monitoring [online]. [cit.1.4.2011] Dostupné z WWW:<http://www.engineerlive.com/Chemical-Engineer/Instrumentation/Wireless_communications_mesh_improves_equipment_monitoring/21220/>
- [21] Rosemount 848T Wireless Temperature Transmitter: [online]. Dostupné z WWW:<<http://www2.emersonprocess.com/en-us/brands/rosemount/temperature/high-density-measurement/848t-wireless/pages/index.aspx>>
- [22] Rosemount 648 Wireless Temperature Transmitter: [online]. Dostupné z WWW:<<http://www2.emersonprocess.com/en-us/brands/rosemount/temperature/single-point-measurement/648-wireless/pages/index.aspx>>
- [23] Product data sheet, Smart wireless gateway 1420 [online]. [cit. 4.2013] Dostupné z WWW:<<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0200-4420.pdf>>
- [24] Selection guide, ControlLogix [online]. [cit. 3.2012] Dostupné z WWW:<http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sg/1756-sg001_-en-p.pdf>
- [25] Application data sheet, Emerson Process Management [PDF dokument]. [cit.21.4.2011] Dostupné z WWW:<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Analytical%20Documents/Liq_ADS_3300-13.pdf>
- [26] Kovové odporové senzory teploty [online]. Dostupné z WWW:<http://jonatan.spse.pilsedu.cz/~mazanec/kovove_snimace_tepl.htm>

PŘÍLOHY

- CD-R digitální nosič
- Text této diplomové práce ve formátu PDF
- Tabulka dat z měření a testování bezdrátového měření ve formátu XLS