

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Fakulta pedagogická

Katedra fyziky  
(studijní obor : Měřicí a výpočetní technika)

## Bakalářská práce

Téma:

**Využití proporcionálních a proporcionálně-integračně-derivačních  
regulátorů v technické praxi**

Zpracoval: Josef Rus

Knihovna JU - PF



Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Šerý

Č. Budějovice 2005

JIHOČESKÁ UNIVERZITA  
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH  
PEDAGOGICKÁ FAKULTA  
KATEDRA FYZIKY  
- 48 -

2.12.2015 B. Jolán

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem vyznačil všechny prameny, z nichž jsem pro svou práci čerpal, způsobem ve vědecké práci obvyklým.

V Borovanech, říjen 2005



Josef Rus

## **Poděkování**

**Na tomto místě bych chtěl vyjádřit poděkování Ing. Michalu Šerému za odborné vedení a cenné připomínky při zpracování této bakalářské práce, kolektivu směnových techniků spol. Calofrig a.s. a celé mé rodině, zejména manželce.**

## **Anotace**

Tato práce se zabývá měřením a regulací teploty. Popisuje vývoj regulačních okruhů jedné výrobní jednotky, osvětluje důvody nasazení nové regulace, její technickou realizaci a celkově bilancuje nový regulační systém.

## Obsah:

|     |                                               |    |
|-----|-----------------------------------------------|----|
| 1   | Úvod .....                                    | 1  |
| 2   | Popis sériové výrobní linky .....             | 2  |
| 2.1 | Získávání suroviny .....                      | 2  |
| 2.2 | Předvýrobní příprava .....                    | 2  |
| 2.3 | Mokrá část .....                              | 3  |
| 2.4 | Rozprachová sušárna .....                     | 4  |
| 2.5 | Rotační pec .....                             | 5  |
| 2.6 | Třídění .....                                 | 6  |
| 3   | Popis původní regulace .....                  | 8  |
| 3.1 | Původní regulace .....                        | 8  |
| 3.2 | Regulátory a zapisovač .....                  | 8  |
| 3.3 | Regulované soustrojí .....                    | 10 |
| 3.4 | Snímače regulovaných veličin .....            | 11 |
| 4   | Nová regulace .....                           | 13 |
| 4.1 | Důvody nasazení nové regulace .....           | 13 |
| 4.2 | Řídicí systém .....                           | 13 |
| 4.3 | Regulační okruhy .....                        | 14 |
| 5   | Systém automatické regulace .....             | 17 |
| 5.1 | Popis řízení .....                            | 17 |
| 5.2 | Princip řízení .....                          | 17 |
| 5.3 | Zápis a vizualizace .....                     | 18 |
| 6   | Programovatelný automat Mitsubishi .....      | 19 |
| 6.1 | Parametry automatu: .....                     | 19 |
| 6.2 | Ukázky grafů ve vizualizaci ControlWeb: ..... | 22 |
| 7   | Fotodokumentace .....                         | 25 |
| 8   | Závěr .....                                   | 31 |

# 1 Úvod

S měřením a následnou regulací se setkáváme v technické praxi de facto na každém kroku. V současné době tento technický obor zasahuje napříč průmyslovými odvětvími a věnuje se mu nemalá pozornost. Podle mého názoru k tomu vede několik důvodů. Především je to snaha k maximálnímu využití potenciálu regulovaných objektů a zároveň snaha o co nejvíce hospodárný provoz. Dnešní ceny vstupních energií jsou na historickém maximu a fosilních paliv ubývá. Musíme brát také ohled na ekologické hledisko výroby ( emise skleníkových plynů apod.).

V této práci se věnuji vývoji v procesech regulace jedné výrobní jednotky, nezabývám se žádnými matematickými analýzami, ale popisuji důvody změny regulace a její faktickou realizaci v reálném prostředí.

## 2 Popis sériové výrobní linky

### 2.1 Získávání suroviny

Linka, de facto celé výrobní zařízení, kterým se budu v této práci zabývat, slouží ke zpracování surové křemeliny nacházející se v přílehlém povrchovém ložisku v hloubce cca 20 – 50 metrů pod povrchem země. Jedná se o vertikálně uložené sedimenty, které se skládají z křemičitých schránek druhohorních mikroskopických organismů.

Horizontální řez těženou částí sloje je veden od povrchu. Nejsvrchnější částí je ornice, jak zemědělsky obhospodařovaná tak i lesní. Pod ní se nachází vodou rozpustné písky a drobné kamenivo (výjimečně křemenné monobloky). Další vrstvou je nepropustná jílovitá zemina, takzvaná červenice, která se po vytěžení používá na zasypávání vytěžených jam nebo na rekultivaci. Komerčně využitelnou vrstvou je modrý kaolin, který se nachází těsně nad zmiňovanou vrstvou křemeliny. Modrý kaolin se používá na výrobu tvrdé keramiky, např. kameninové roury, el. izolátory, apod. Pod modřicí se vyskytuje tenká vrstva asi 30 cm zvětralého vápence. Pod ní se nachází těžená křemelina v mocnosti 5–10m. Samotná vrstva těženého materiálu je dělena na dva druhy křemeliny. Tyto druhy od sebe liší sytnou hmotnost (dále SH). Křemelina s nižší SH se hodí na výrobu filtračních materiálů, křemelina s vyšší SH na výrobu izolačních materiálů a vysoce absorpčních (např. Vapex, Termalit, aj.)

Tato dvojjakost již ve stadiu syrové hmoty klade vysoké nároky na diferenci obou složek. Jelikož obě frakce nejsou od sebe nikterak zvláště odlišné, klade již tato první výrobní operace až nadstandartní nároky na osádky těžkých zemních mechanismů. Tato popisovaná výrobní operace má zásadní vliv na další výrobní proces. Tyto nároky se daří splňovat spoluprací s provozní laboratoří, kde se průběžně určuje SH jednotlivých druhů. Vzorky se odebírají přímo z těženého řezu.

### 2.2 Předvýrobní příprava

Strojně natěžená surovina se pomocí těžkých nákladních vozidel dopravuje na vymezené deponie u zpracovatelské výrobní jednotky. Surovina vhodná pro

výrobu filtračních hmot by měla být v této deponii asi jeden až dva roky uložena v surovém stavu. V této době 2x přeložena, aby se odstranily drobné niance v kvalitě natěžené suroviny. Vše se provádí v úzké spolupráci s provozní laboratoří, která průběžně odebírá vzorky a určuje SH. Tímto se určuje hmotnostní poměr materiálu odebíraného z jednotlivých hromad deponie a exportovaného čelním nakladačem do komorového podavače, který je začátkem výrobního procesu. Tento podavač má za úkol surovinu mechanicky rozdrtit, aby na jeho výstupu byla největší frakce asi cca. 10 cm. Z výstupu komorového podavače se surovina dostává po pásovém dopravníku do tzv. mokré části.

### 2.3 Mokrý část

Mokrý část je již přímá součást popisované sériové linky. Začíná rozplavením materiálu v excelsioru. Excelsior je ocelová vana o objemu  $60 \text{ m}^3$ , ve které se na hřídelích pohybují lopatková kola otáčející se různou obvodovou rychlostí danou jejich průměrem a typem převodovky. Do excelsioru se též přivádí technologická voda, která materiál rozplaví na požadovanou hustotu danou provozními předpisy. Tato hustota je odvozena od konstrukcí dalších technologických prvků.

Rozmělněný a příslušně upravený materiál z excelsioru vytéká do přilehlé jímky o objemu cca  $8 \text{ m}^3$ . Z jímky je materiál čerpán odstředivým čerpadlem na hydrocyklonu  $150 \mu\text{m}$ . Cyklona je konstruována k tomu, aby hydrocyklickým efektem oddělila z rozmělněného materiálu složky menší než  $150 \mu\text{m}$ . Tyto frakce jsou pro další výrobu nevhodné. Jedná se např. o jemné křemenné úlomky písku, zemité částčky, apod. Odstředěný materiál stéká do další přilehlé jímky, odkud je dopravován odstředivým čerpadlem do hydrocyklony, která stejným hydrocyklickým efektem jako cyklona  $150 \mu\text{m}$  odstraňuje částice větší než  $300 \mu\text{m}$ . Dále odtéká emulze do zásobní čistírny o objemu cca  $20 \text{ m}^3$ , odkud je dopravována odstředivým čerpadlem do rotačních odstředivek Alfa-laval. Odstředivky Alfa-laval pracují na principu urychlení hmotnějších částí emulze, které při vhodných otáčkách bubnu ulpívají na jeho povrchu, kde jsou protiběžným šnekem stírány a doprovázeny na pásový dopravník. Zbytkové řídké a lehčí části odtékají do čističky odpadních vod. Tyto mnou zmiňované

odstředivky dánské výroby jsou větší a pomalejší modifikací mlékárenských odstředivek používaných v potravinářském průmyslu. Zhuštěná emulze, jejíž hustota je dána normou ISO 9001, se dopravníkem dostává do zásobního bazénu pro následující část výroby. Touto operací končí tzv. mokrá část. Její jednotlivé výrobní operace na sebe přesně navazují, a to jak časově tak z hlediska objemu zpracovávaných materiálů., provoz je kontinuální, nikde nevzniká dopravní zpoždění. Výrobní linky řídí zaškolená obsluha, proto nároky na mechanickou a elektronickou jsou minimální. Tento celek je z hlediska kvality a rychlosti výroby vyvážený, proto se o něm v dalších kapitolách nebudu zmiňovat.

## **2.4 Rozprachová sušárna**

Následující část se nazývá rozprachová sušárna – NIRO. Proces výroby v rozprachové sušárně začíná čerpáním emulze dané hustoty ze zásobního bazénu do atomizéru NIRO. Toto čerpání se provádí hadicovým excentrickým čerpadlem přesně řízeným frekvenčním měničem. Hadicové čerpadlo bylo nainstalováno pro svoji možnost absolutně přesného dávkování množství čerpání emulze na závislosti na jeho otáčkách. Přesné množství dodávané emulze je hlavní požadavek na přesný chod atomizéru. Toto čerpadlo pracuje periodicky (periodika je dána jeho konstrukcí), proto je za ním zařazen pulzní regulátor. Přesný objemově a tlakově stálý proud emulze vtéká do atomizéru NIRO. Srdce NIRA je extrémně namáhanou součástí výrobní linky. Slouží k protiproudému rozprachovému sušení emulze, která je vháněna do rozprachového kotouče otáčejícího se konstantní rychlostí 16 000 ot./min., o průměru 300 mm a na jehož obvodě je 6 trysek. Rozprášení se děje v podtlakové komoře, kde je pracovní podtlak snížen o 0,5 až 0,6 kPa oproti okolnímu tlaku vzduchu. Maximální podtlak je 1,1 kPa. Tento podtlak hlídá podtlakový rtuťový spínač nastavený na výše uvedenou hodnotu, který je každých 14 dní kontrolován. Systém má dva zdroje tepla. Primárním zdrojem je plynový hořák o výkonu 2,5 MW. Jeho regulaci v závislosti na stavových poměrech v podtlakové komoře se budu ještě dále zabývat. Sekundárním zdrojem je zbytkové teplo z rotační pece dodávané odtahovým ventilátorem. O podtlak v sušicí a spalovací komoře se stará mohutný sací ventilátor, jehož pohonem je kroužkový motor British Elektric o výkonu

280kW, přičemž doba rozběhu přes rozběhový reostat je 2 minuty, průměr oběžného kola 900 mm a otáčky 2020 ot./min.. Stálé tlakové podmínky v komoře zajišťuje škrticí klapka umístěná na sací straně ventilátoru ovládaná servomotorem. Nad sacím ventilátorem na jeho výtlačné straně je nainstalována mokrá pračka, kde se pomocí rozprachu vodního proudu zkrápějí jemné části sušeného materiálu, který ulétl ze sušicí komory. Tento odprach je odváděn potrubím do ČOV.

Pod sušicí komorou pomocí lopatkového turniketu, který zabraňuje přísávání do sušicí komory je usušený materiál pneumatickou cestou odváděn do mezizásobníku sušiny. Pneumatická cesta znamená, že pro dopravu suchého a posléze vypáleného materiálu se používá sacích ventilátorů, které pod tlakem ženou materiál do rukávových filtrů. Zde je pomocí elektronicky řízených protiproudých pulzů tlakového vzduchu sklepáván do dalších dopravních zařízení.

Mezizásobníkem sušiny je silo o výšce 6-ti metrů a průměru 3,3 m, do kterého je dopravována sušina ze sušicí komory. Odtud se již může sušina po napytlování expedovat jako finální výrobek nebo po přidání kalcinované sody v určeném poměru 1,5 % až 8 % váhového množství předávat na výpal do rotační pece.

Předáním materiálu do rotační pece končí provoz rozprachové sušárny, který běží ve 24 hodinovém pracovním cyklu se směnným obsazením technického personálu. Tento provoz je vysoce energeticky náročný. Jedná se sice o lineární linku bez dopravního zpoždění, ale vzniká zde silná zpětná vazba mezi množstvím sušeného materiálu, výkonem plynového hořáku a tahem sacího ventilátoru. Zde byla nainstalována část nové regulace, kterou se budu dále zabývat.

## **2.5 Rotační pec**

Finální částí výrobní linky je provoz rotační pece a třídění. Jak jsem se již zmínil v předchozí kapitole, materiál smíchaný s kalciovanou sodou je šnekem dopravován do rotační pece.

Rotační pec slouží k výpalu sušiny a tím jsou změněny její chemické i mechanické vlastnosti. Její parametry jsou :

- délka s hlavami: 40 m

- prázdná váha: 230 tun
- vnitřní průměr: 2 m
- vnější průměr: 3,4 m
- počet montážních celků: 4
- sklon: 5°

Tato pec se otáčí na čtyřech rolnách s vodou chlazenými koly. Jejím konstruktérem i stavitelem byla firma Gipsson Leeds. Dodávanou energii obstarává plynový hořák o jmenovitém výkonu 2,5 MW. O tahové poměry v peci se stará odtahový ventilátor, který z ní zajišťuje optimální odtah, a je řízen klapkou na výtlačné straně ovládanou servomotorem.

Pracovní teploty v rotační peci jsou závislé na druhu vypalovaného materiálu, pohybující se na vstupní části od 350 °C do 550 °C a na výstupní části od 980 °C do 1 200 °C.

Materiál ze šneku padá do tzv. přední hlavy pece, která je statická. Z přední hlavy pece se posouvá do další otáčející se části pece – těla. Pracovní otáčky jsou dané druhem vypalovaného materiálu a to v rozmezí od 1 až 1,2 ot./min. Minimální otáčky jsou jinak 0,3 ot./min. Rotační pec se nesmí za provozu zastavit z důvodu jejího trvalého poškození (průhyb praskliny vyzdívky a destrukce). Výstup z pece, tzv. zadní hlava, je statický vyzděný kužel v dolní části s vodou chlazeným obalem a šnekem. Doba pobytu materiálu v rotační peci se pohybuje v závislosti na jejích otáčkách od 35 min. do 45 min. Zde vzniká značné dopravní zpoždění. Materiál opouštějící pec se díky obsahu sody speče do kuliček o průměru 5 až 30 mm. O jejich rozdrčení a třídění dle frakcí se stará výrobní část třídění.

## 2.6 Třídění

Po výpadu z rotační pece je materiál pneumatickou cestou dopravován přes flashingpacktor sloužící k rozdrčení kuliček materiálu a dále přes větrný třídič do zásobníku. Třídič je technické zařízení, které pomocí proudu vzduchu odděluje jednotlivé frakce vypáleného materiálu. Změnou proudu vzduchu, to je snížením nebo zvýšením otáček lopatkového kola měníme hrubost odsávaného materiálu a tím i vlastnosti finálního výrobku. Tříděním ovlivňujeme především

filtrační rychlost, která se u jednotlivých druhů vyráběných filtračních křemelin liší. Filtrační rychlost se pohybuje od 200 do 700 litrů za hodinu. Tyto třídiče následují tři za sebou. Roztříděním, uložením do sil, následným zabalením do pytlů a expedicí do celého světa končí proces výroby filtrační křemeliny.

Poslední fáze je z hlediska řízení nejobtížnější. Vzniká značné dopravní zpoždění v rotační peci. Je zde mnoho zpětných vazeb. Kvalitu výrobky lze zjistit pouze na konci výrobního procesu, ale vstupní členy musíme regulovat již v jeho průběhu. Základem pro dodržení kvality výroby je přesné regulování teploty v rotační peci v rozsahu 1 °C, max. 2 °C. Teplotní změnou se radikálně mění parametry výrobku, jak syponu hmotnost, tak i filtrační rychlost. Regulací plynového hořáku, dodávající tepelnou energii rotační peci, se budu zabývat podrobněji.

### 3 Popis původní regulace

#### 3.1 Původní regulace

V roce 1975 – 1980 probíhala výstavba provozu plniva stavební firmou IPS. Technologii dodala firma Gipsson z Velké Británie. Jelikož britská technologie byla vyvinuta na spalování zemního plynu a u nás toto medium nebylo k dispozici, již od začátku výroby byly do provozu dosazeny tehdy československé mazutové hořáky s naší regulací ze ZPA Trutnov. Mazutové hořáky s parním rozstříkem a teplovodním přehřevem byly dostatečně výkonné, ale obtížně regulovatelné, náročné na obsluhu a servisní intervaly. Velký problém byl s různou (spíše horší) kvalitou topeného mazutu. V zimních měsících také s jeho zamrzáním.

#### 3.2 Regulátory a zapisovač

Regulace k tomuto zařízení byla dodána od firmy ZPA Trutnov. Jejím hlavním článkem byl regulátor Zepakom. Funkce regulátoru je odvozena od ukazovacího přístroje. Není to však od pohybu ručičky, jak je obvyklé, ale vytváří ji samostatný elektronický obvod. Skutečná hodnota regulované veličiny vyjádřená elektrickým signálem se získává z výstupu předzesilovače a přivádí se na jeden vstup komparátoru. Na druhý vstup komparátoru se přivádí elektrický signál odpovídající žádané hodnotě regulované veličiny. Žádaná hodnota je odvozena od samostatného přímočarého potenciometru. S běžcem potenciometru je mechanicky spojen ukazatel vyznačený na stupnici. Nastavením ukazatele do určitého místa stupnice se zadává žádaná hodnota regulované veličiny, příp. hodnota, jejíž překročení má být signalizováno. Jakmile se kryje ručka s ukazatelem žádané hodnoty, dojde k přepnutí kontaktů relé. Odpovídá to shodě obou vstupních signálů, což vyhodnotí komparátor, který přes zesilovací tranzistor ovládá relé s přepínacími kontakty. Výchylka ručičky měřícího ústrojí, jehož hlavní částí je lineární motorek představuje vždy skutečnou hodnotu regulované veličiny.

### Technické údaje regulátoru Zepakomp:<sup>1</sup>

|                          |                                      |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Vstupní signál           | a) napěťový ss<br>b) proudový ss     |
| maximální rozsah         | a) 0 až $\pm 10$ V<br>b) 0 až 20 mA  |
| minimální rozsah         | a) 0 až 10 mV<br>b) 0 až 100 $\mu$ A |
| potlačení počátku:       | max. 200 % rozpětí měření            |
| Vstupní signál odporový: |                                      |
| Maximální rozsah:        | 0 až 500 $\Omega$                    |
| Minimální rozpětí:       | 10 $\Omega$                          |
| Potlačení počátku:       | max. 500 % rozpětí měření            |
| Třída přesnosti :        | 1                                    |

Zapisování provozních hodnot a jejich následná archivace probíhala bodového zapisovače Zepakord. Základem bodových zapisovačů je magnetoelektrické měřicí ústrojí, které převádí signál z čidla na výchylku ručičky. V pravidelných intervalech dopadá na ručičku padací rámec, který ji přitlačí na barvicí pásek, čímž se na registrační papír otiskne bod v barvě odpovídající právě měřenému místu. Při pomalých změnách měřené veličiny se spojují body téže barvy v souvislou křivku. Je-li měřená teplota termoelektrickými snímači začíná obvykle stupnice přístroje teplotou srovnávacích spojů termoelektrického článku. Má-li stupnice přístroje začínat vyšší teplotou než jaká odpovídá teplotě srovnávacích spojů, je potlačení začátku rozsahu zapisovač vybaven strojem

---

<sup>1</sup> Katalogový list ZPA Jinonice č. 2 – 1005 - 01

referenčního napětí.<sup>2</sup> Je-li napětí termoelektrického článku vyšší než elektrické napětí, opírá se ručička přístroje o dorazovou pružinu.

Dalším postupem byla výměna topného media za LTO. Byly odstraněny problémy se zamrzáním a obtížným zapalováním hořáku, ale z hlediska regulace žádný posun. Po zavedení zemního plynu nastala výměna hořáků i regulace. Regulace byla osazena regulátory Honeywell. Tyto regulátory měly shodné parametry jako již zmiňované regulátory Zepakomp. Lišily se použitím výstupu na LCD display a dotykovým ovládáním ( viz. fotodokumentace) . Regulovanými soustrojími se staly plynové hořáky APH 25 z První brněnské strojírny.

### 3.3 Regulované soustrojí

Řada APH zahrnuje modernizované typy automatických plynových hořáků spalující středotlaký zemní plyn ve výkonovém rozsahu 45 až 8 500 kW. Hořáky splňují technické požadavky ČSN 075801. Nepřekračují emisní limity Ministerstva životního prostředí.

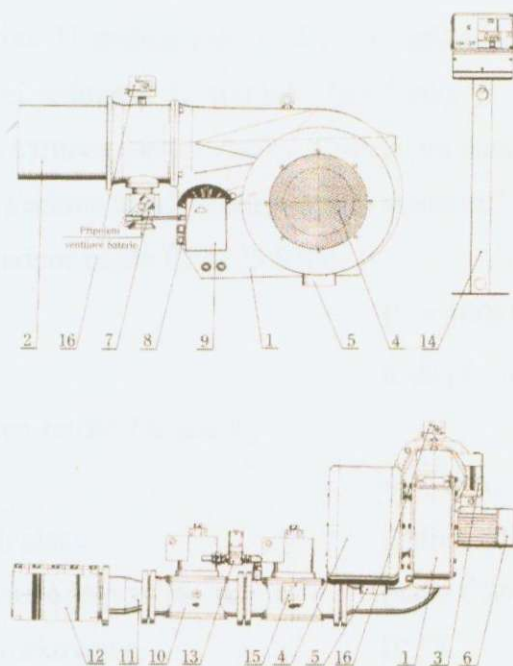
Chod hořáků je plně automatický nevyžadující trvalou obsluhu pouze občasný dohled. Spojitá regulace tepelného výkonu a nízký přebytek vzduchu při spalování zaručují vysokou účinnost.

Startovací cyklus s provětráním spalovacího prostoru a kontrolu těsnosti ventilů, regulaci tepelného výkonu a veškeré bezpečnostní funkce řídí mikroprocesorová automatika MA-2. Základním článkem automatiky jsou dva mikroprocesory 8051, které vzájemnou kontrolou algoritmu činnosti výrazně přispívají k bezpečnému a ekonomickému chodu. Kromě základních ovládacích funkcí umožňuje automatika zobrazit např. informace o okamžitém provozním stavu, úroveň ionizačního proudu hlídací elektrody, atd. Jako ochrana proti zpětnému sálání tepla ze spalovacího prostoru je program vybaven trvalým větráním při odstavení hořáku. Přes rozhraní RS – 485 je možno do automatiky připojit nadřazený počítač. Provoz hořáku umožňuje použít jak automatického tak ručního řízení tepelného výkonu.

Základní technické parametry:<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Katalogový list ZPA Jinonice č. 2 – 1005 - 01



1. skříň hořáku s ventilátorem
2. směšovací hlavice
3. vyklápěcí závěs
4. sání s regulací vzduchu a tlumičem hluku
5. vstupní hrdlo pro recirkulaci spalín
6. elektromotor
7. regulační orgán plynu
8. převodník s regulací plyn-vzduch
9. servomotor
10. ventilová baterie
11. přechodový kus
12. plynový filtr
13. odvěšovací ventil
14. ventil zapalovacího hořáčku s regulací množství plynu (pouze u typu APH-M 90 PZ)
15. manostat tlaku plynu
16. manostat tlaku vzduchu
17. automatika hořáku se stojanem

Prívodní napětí: 3x380/220V, 50Hz (-15 až + 10 %)

Krytí el. zařízení: IP 54

Palivo: zemní plyn, středotlak 20 kPa,  
výhřevnost 35600 kJ.m<sup>3</sup>(n)

### 3.4 Snímače regulovaných veličin

Regulovanou veličinou je, jak jsem se již zmínil, tepelný výkon regulovaného soustrojí. Proto sledovanou veličinou je teplota. K měření teploty i za současného provozu se používají termoelektrické teploměry tyčové s hlavicí. Jejich parametry dávají dostatečnou přesnost i pro současnou regulaci.

Odporové snímače jsou určeny pro dálkové měření teploty, pro které jsou svými vlastnostmi vhodné. Měřicí vložku tvoří stonková trubka s keramickým

<sup>3</sup> Technická dokumentace plynového hořáku APH. První brněnská strojárna a.s. Třebíč

izolátorem a měřícím odporem zakončená přírubou se svorkovnicí. Měřicí vložka je zasunuta do ochranné armatury, ukončené připojovací hlavicí s ucpávkou vývodkou. U snímačů do jímky a s jímkou je armatura opatřena šroubením pro upevnění snímače. U snímače bez jímky je připojovací šroubení přivařeno ke stonkové trubce měřicí vložky. Čidlem snímače je měřicí odpor.

Technické údaje odporového snímače:<sup>4</sup>

Měřicí odpor podle ČSN 25 8306,

typ Pt

$R_0 = 100\Omega$ ,  $W_{100} = 1,3850$

třída přesnosti 2

Proudové zatížení měřícího

odporu

do 5 mA

Odpor izolace

podle ČSN 25 8306, čl.2.5

Elektrická odolnost izolace

podle ČSN 25 8306, čl. 2.6

Krytí svorkovnice

IP 54

---

<sup>4</sup> Katalogový list ZPA Trutnov č. 7 – 0301 - 50

## 4 Nová regulace

### 4.1 Důvody nasazení nové regulace

Řeklo by se, že důvodem nasazení nové regulace bylo ekonomické nebo technické hledisko, ale ve skutečnosti první myšlenka vyšla z kontroly jakosti a kvality ISO.

Při této kontrole byl vznesen požadavek na přesnější a srozumitelnější zápis provozních dat a jejich dokumentaci. Provozní deníky a archaický zapisovač byly opravdu nedostatečné. Dnešním trendem i technickou nutností je tyto informace zobrazovat a uchovávat v elektronické podobě. Proto se musely nainstalovat AD převodníky, neboť všechna čidla, která indikují požadované hodnoty jsou analogová, a převod analogových signálů na digitální byl první krok k vytvoření regulačních struktur.

Po diskusi v týmu směnových techniků a ve vedení byly vzneseny na budoucí regulační zařízení tyto požadavky:

- 1) možnost napojení na stávající čidla a snímače
- 2) technická kompatibilita se zbývajících regulátory
- 3) relativně jednoduchá a srozumitelná ovladatelnost
- 4) prozatímní zálohovatelnost s původní regulací
- 5) bezporuchovost (práce v nepřetržitém provozu)
- 6) zohlednit ekonomiku provozu

Výsledkem této diskuse byl návrh na zavedení regulace plynových hořáků provoz NIRO a rotační pece.

### 4.2 Řídící systém

Jako řídicí systém pro regulaci teploty je zde použit průmyslový programovatelný automat od firmy Mitsubishi. Automatické řízení a ovládání je řešeno pomocí programu řídicího systému. Technologický automat je umístěn v rozvaděči RX, předává naměřená data a zjištěné stavy do PC na operátorské pracoviště ve velínu.<sup>5</sup> Zde použitý automat je pro účely dané regulace z hlediska rychlosti zpracování úplné programové smyčky plně vyhovující.

---

<sup>5</sup> Manuál monitorování provozních hodnot Terms CZ s.r.o.

Řídicí systém Mitsubishi je navržen především z následujících důvodů:

- řízení regulačních okruhů přes jeden systém umožňuje optimalizovat provoz
- data o provozu se ukládají v databance, odtud je možno je vyvolat, při výpadku napětí zůstávají všechna data zachována

Řídicí systém je volně programovatelný a může být upraven pro libovolnou aplikaci generováním specifického uživatelského programu. Aplikační program spojuje tyto programové části:

- aplikační program, který poskytuje řídicí a monitorovací funkce
- bodový popis dat, který obsahuje kompletní soubor informací, uživatelské a technické adresy, minimální a maximální hodnoty, stavový popis všech datových uzlů
- časové programy, které připojují k datovým uzlům spínací funkci
- texty, jako jsou uživatelské adresy, stavy a alarmy, které mohou být definovány uživatelem.

#### 4.3 Regulační okruhy

Regulace teploty v peci je na konstantní hodnotu. Dle teploty v peci snímané termočlánkem AI 1 ( viz. obrázek) je ovládán plynový hořák pece. Při dosažení mezních hodnot teploty dojde k vyhlášení alarmu, signalizace houkačkou, posléze vypnutí plynového hořáku. Termočlánkem AI 2 je snímána teplota na vstupu do RP. Signály termočlánků jsou přes převodníky napojeny do řídicího systému.

Regulace teploty v NIRU je dle výstupní teploty na konstantní hodnotu 120 °C až 140 °C. Dle výstupní teploty z NIRA snímané termočlánkem AI 4 je ovládán plynový hořák. Při dosažení mezních hodnot teplot AI 3 a AI 4 dojde k vyhlášení alarmu, signalizace houkačkou a vypnutí plynového hořáku. Signály z termočlánků jsou také přes převodníky napojeny do řídicího systému.

Pro měření množství křemeliny je využit stávající průtokoměr. Analogový signál je napojen na řídicí systém. Rozsah měření 0 – 7,2 m<sup>3</sup> x hod<sup>-1</sup> / 0 – 20 mA.<sup>6</sup>

---

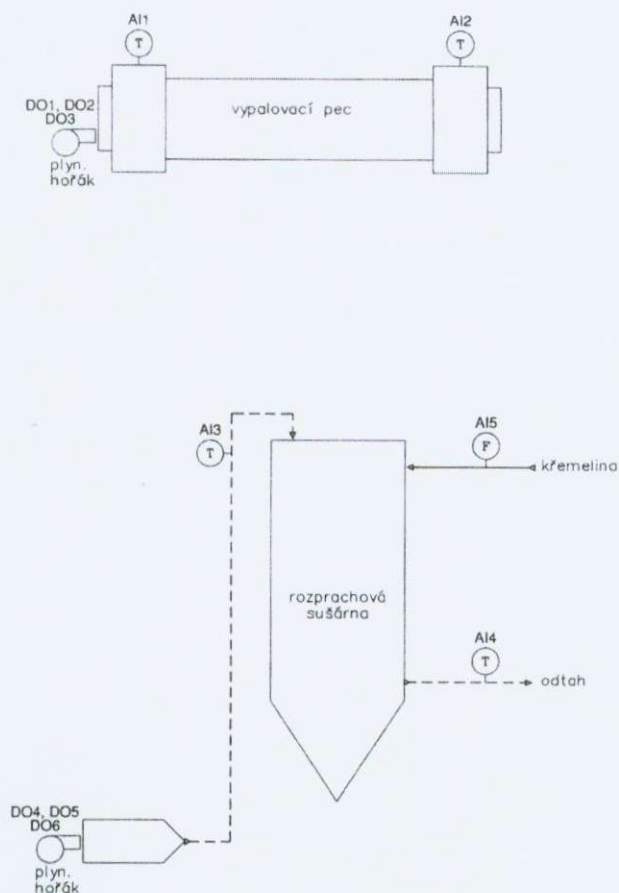
<sup>6</sup> Manuál monitorování provozních hodnot Terms CZ s.r.o.

Řídicí systém sleduje různé poruchové stavy. Při výskytu z některých poruchových stavů se dle nutnosti vypnou plynové hořáky a je vyhlášen alarm na obrazovce PC. Ke zpuštění regulace dojde až po odstranění poruchového stavu a potvrzením na PC.

Řídicím systémem Mitsubishi jsou hlídány následující poruchové stavy:

- teplota AI 1 nad 1200 °C
- teplota AI 1 pod 300 °C
- teplota AI 3 nad 600 °C
- teplota AI 3 pod 300 °C
- teplota AI 4 nad 160 °C
- teplota AI 4 pod 115 °C

Osazení čidel:



Čidla a ventily ( viz. obr.):

AI 1 ...termoelektrický článek „S“, Ø 5 mm

AI 2 ...termoelektrický článek „K“, tyčový

AI 3 ... odporový snímač teploty Pt 100, rozsah -200 °C až +600 °C

AI 4 ... odporový snímač teploty Pt 100, rozsah -200 °C až +600 °C

AI 5 ... průtokoměr DN 40/ PN 1

## 5 Systém automatické regulace

### 5.1 Popis řízení

K automatické regulaci teploty je použit programovatelný automat Mitsubishi, regulace teploty pece a NIRA je prováděna posíláním povelů pro přidávání nebo ubírání plamene do hořákové automatiky. Kromě povelů plus a minus ještě automat posílá povel k odblokování hořáku. Hořák pece je zablokovaný v případě, že je 5 sekund překročena max. teplota v peci. Jinak je odblokovaný. Hořák NIRA je zablokovaný, pokud je 5 sekund překročena teplota na vstupu NIRA. Jinak je odblokovaný. Pokud se teplota vrátí pod horní hranici, hořák se sám odblokuje, není třeba reset poruchy.

### 5.2 Princip řízení

Nejdříve popíšu princip řízení NIRA. Teplotní čidlo snímá teplotu na výstupu z NIRA a porovnává jej s nastavenou hodnotou teploty. Rozdíl těchto dvou teplot je převeden na dobu regulačního zásahu a jednou za minutu se provede regulační zásah, při kterém je vyslán povel plus nebo minus do hořákové automatiky, přičemž délka povelu je přímo úměrná rozdílu teplot. Povely lze také zadávat v ručním režimu, tlačítky plus a minus na vizualizaci.

Princip řízení pece spočívá v tom, že teplotní čidlo snímá teplotu na vstupu do pece a spolu s nastavenou teplotou ji předává na vstup PID regulátoru. PID regulátor vypočte regulační zásah, do tohoto výpočtu zahrne nejen aktuální odchylku, ale i předchozí vývoj regulace. Výsledek v rozmezí 0 až 100 % předá dále do modulu tříbodového řízení.<sup>7</sup> Modul tříbodového řízení funguje tak, že počítá dobu trvání povelů plus a minus, a na základě rozdílu této doby a doby potřebné k otevření hořáku na 100 %, určí aktuální polohu jeho nastavení. Pokud se aktuální nastavení hořáku liší od výstupu PID regulátoru, upraví se jeho nastavení tak, aby se obě hodnoty rovnaly. Pásmo necitlivosti je nastaveno minimální dobu sepnutí povelu řízení na jednu sekundu. Řízení hořáku lze provádět i ručním režimu řízení a to přímo zadáním požadované polohy nastavení

<sup>7</sup> Programming Manual (PID Control Instructions) – Mitsubishi Elektrik

hořáku. Pec se uvádí do automatického řízení stiskem tlačítka start, regulátor po startu nemá žádnou historii a začne regulovat pouze podle aktuální regulační odchylky. Regulátor po startu navazuje na polohu nastavenou v ručním řízení. Polohu upravuje podle aktuálních požadavků řízení a při přechodu zpět do ručního režimu zanechá poslední hodnotu polohy nastavení hořáku, ke které dospěje. Tuto hodnotu lze v ručním režimu libovolně upravovat. Vzhledem k tomu, že chybí zpětná vazba o skutečné poloze hořáku, je hodnota zobrazovaná počítačem pouze teoretická a občas je potřeba regulátor zkalibrovat. Provedení kalibrace je na uvážení obsluhy. Pohon sjede na minimální hodnotu, tam se vynuluje a najede zpět na svou původní polohu. Kalibraci lze provádět jak v ručním tak v automatickém režimu řízení. Modul třibodového řízení navíc v krajních polohách posílá dodatečné opravné pulsy, tzn. Pokud je požadovaná hodnota 0 nebo 100 %, vyšle modul dvou sekundový puls, kterým dorovnává případný rozdíl teoretické a skutečné hodnoty.<sup>8</sup>

### 5.3 Zápis a vizualizace

Na obrazovce počítače jsou k dispozici grafická znázornění časového průběhu skutečných a nastavených teplot pece i NIRA. Hodnoty teplot se zálohují do databází, přičemž každému dni odpovídá databázový soubor formátu /dbase3 a s časy jim odpovídajícími teplotami. Soubory z pece mají název Pec, datum v závorkách a koncovku dbf. Soubory z NIRA mají název Niro a datum s koncovkou totožné jako u pece.

Soubory jsou uloženy v adresáři Runtime/dbf., jejich maximální počet pro každou složku je 1000 souborů. Po překročení maximálního počtu se od nejstaršího souboru umazávají. Databázové soubory je vhodné archivovat na jiné medium, např. na CD, DVD, aj. Je možné je kdykoliv otevřít ve většině tabulkových procesorů, např. Excel.

Jako uživatelské rozhraní je použit počítač vybavený vizualizací ControlWeb. Vizualizaci tvoří tři obrazy, které se přepínají. První obrazovka je vizualizace technologie se zobrazením měřených teplot, nastavují se zde mezní hodnoty teplot, lze zde ovládat regulátory. Druhá obrazovka je grafické znázornění průběhu teploty v závislosti na čase. Třetí obrazovka znázorňuje totéž pro NIRO.

---

<sup>8</sup> Systém automatické regulace Terms CZ s.r.o.

## 6 Programovatelný automat Mitsubishi

### 6.1 Parametry automatu<sup>9</sup>:

|                          |                   |
|--------------------------|-------------------|
| počet regulačních smyček | max. 32           |
| vzorkovací frekvence     | 0,01 – 60s        |
| proporcionální konstanta | 0,01 – 100        |
| integrační konstanta     | 0,10 – 3000       |
| diferenční konstanta     | 0,00 – 3000       |
| rozsah vstupů            | –32 768 – 32 767  |
| rozsah výstupů           | – 32 768 – 32 767 |

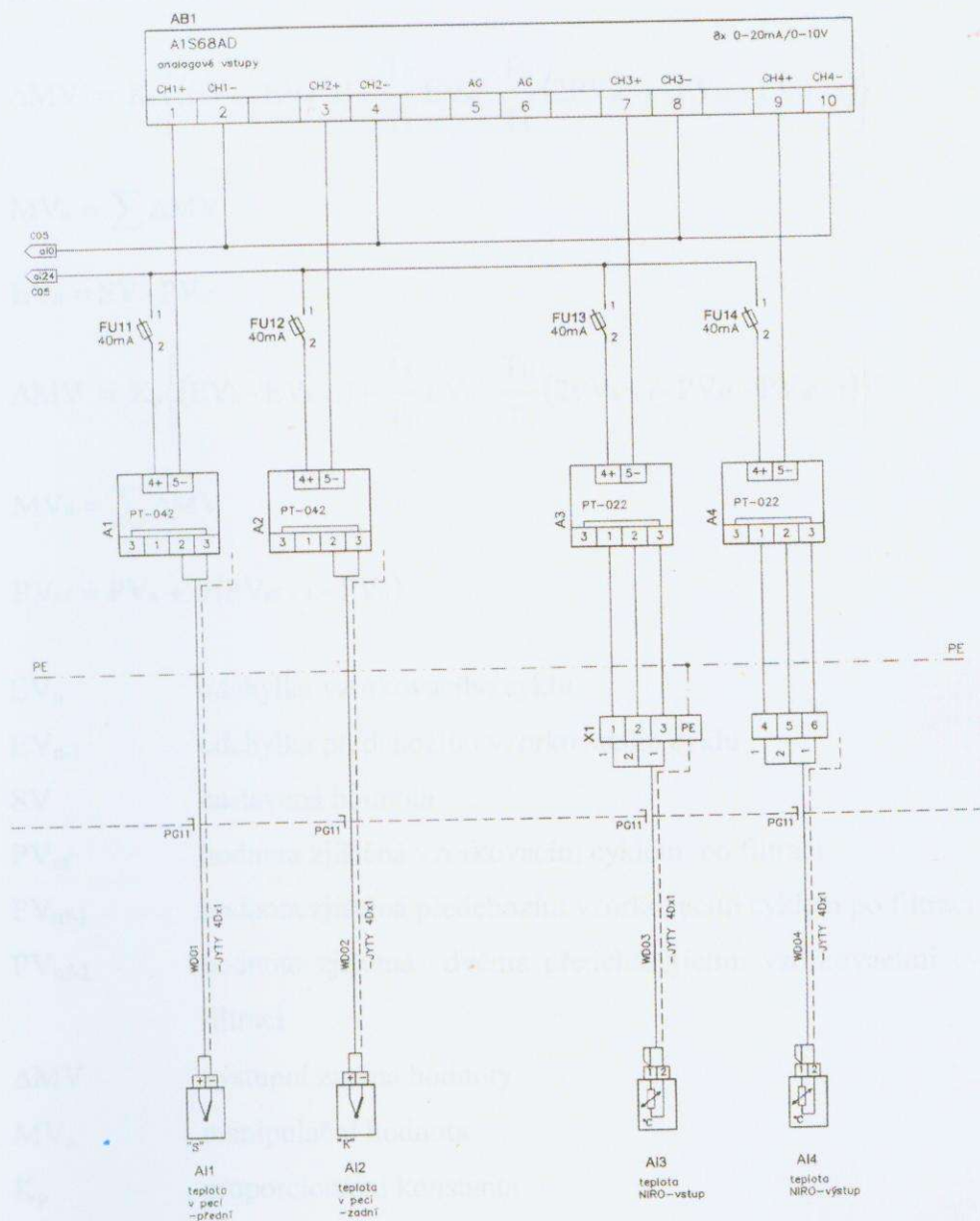
Blokové schéma automatu:

sběrnice A1S35B-E

|         |         |                               |                             |                           |                               |     |
|---------|---------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----|
| A1S61PN | Q2ASCPU | A1SJ71UC24-R2<br>– komunikace | A1S68AD<br>– analog. vstupy | A1SX80<br>– digit. vstupy | A1SY18AEU<br>– digit. výstupy |     |
| POWER   | CPU     | AB0                           | AB1                         | AB2                       | AB3                           | AB4 |

<sup>9</sup> Programming Manual (PID Control Instructions) – Mitsubishi Elektrik

Schéma zapojení vstupů automatu Mitsubishi<sup>10</sup>:



<sup>10</sup> Systém automatické regulace Terms CZ s.r.o.

Výpočtové vzorce automatu<sup>11</sup>:

$$EV_n = PV_{nf} - SV$$

$$\Delta MV = K_p \left\{ (EV_n - EV_{n-1}) + \frac{T_s}{T_i} EV_n - \frac{T_D}{T_s} (2PV_{nf-1} - PV_{nf} - PV_{nf-2}) \right\}$$

$$MV_n = \sum \Delta MV$$

$$EV_n = SV - PV_{nf}$$

$$\Delta MV = K_p \left\{ (EV_n - EV_{n-1}) + \frac{T_s}{T_i} EV_n - \frac{T_D}{T_s} (2PV_{nf-1} - PV_{nf} - PV_{nf-2}) \right\}$$

$$MV_n = \sum \Delta MV$$

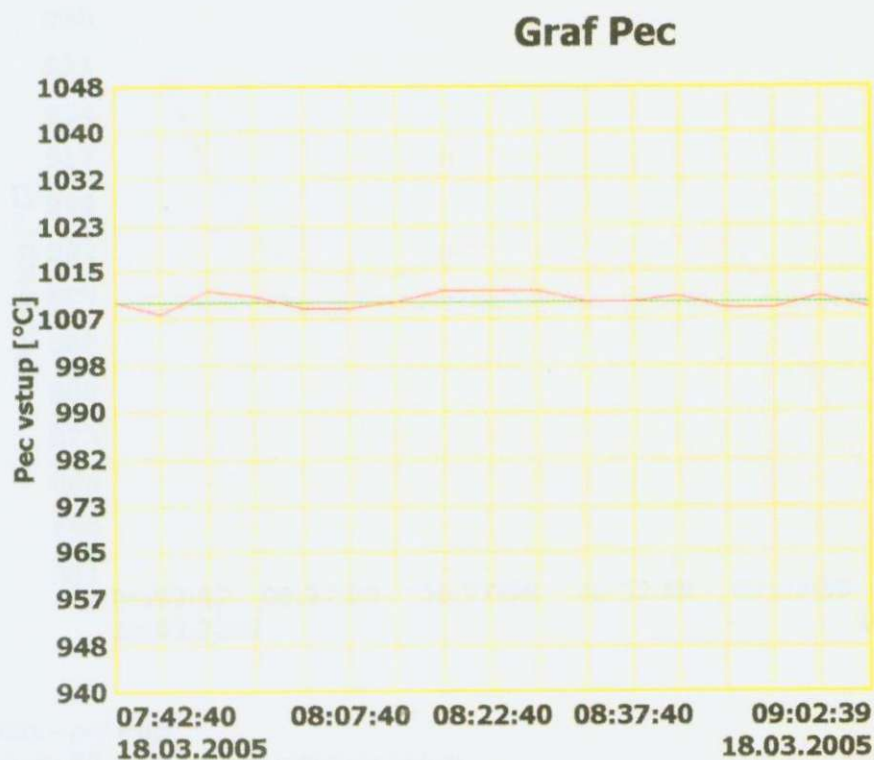
$$PV_{nf} = PV_n + \alpha (PV_{nf-1} - PV_n)$$

|             |                                                                       |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $EV_n$      | odchylka vzorkovacího cyklu                                           |
| $EV_{n-1}$  | odchylka předchozího vzorkovacího cyklu                               |
| $SV$        | nastavená hodnota                                                     |
| $PV_{nf}$   | hodnota zjištěná vzorkovacím cyklem po filtraci                       |
| $PV_{nf-1}$ | hodnota zjištěná předchozím vzorkovacím cyklem po filtraci            |
| $PV_{nf-2}$ | hodnota zjištěná dvěma předcházejícími vzorkovacími cykly po filtraci |
| $\Delta MV$ | výstupní změna hodnoty                                                |
| $MV_n$      | manipulační hodnota                                                   |
| $K_p$       | proporcionální konstanta                                              |
| $T_s$       | vzorkovací cyklus                                                     |
| $T_i$       | integrační konstanta                                                  |
| $T_d$       | derivační konstanta                                                   |
| $\alpha$    | filtrační koeficient                                                  |

---

<sup>11</sup> Programming Manual (PID Control Instructions) – Mitsubishi Elektrik

## 6.2 Ukázky grafů ve vizualizaci ControlWeb<sup>12</sup>:



*Legenda:*

*červená linka - pec vstup*

*zelená linka – pec požadavek*

*Ukázka standardní regulace PID regulátoru na konstantní teplotu.*

<sup>12</sup> Archivní soubory dbf. Calofrig a.s. Borovany

### Graf Pec



Legenda:

červená linka – pec vstup

Ukázka zásahu PID regulátoru na sestupnou teplotu.

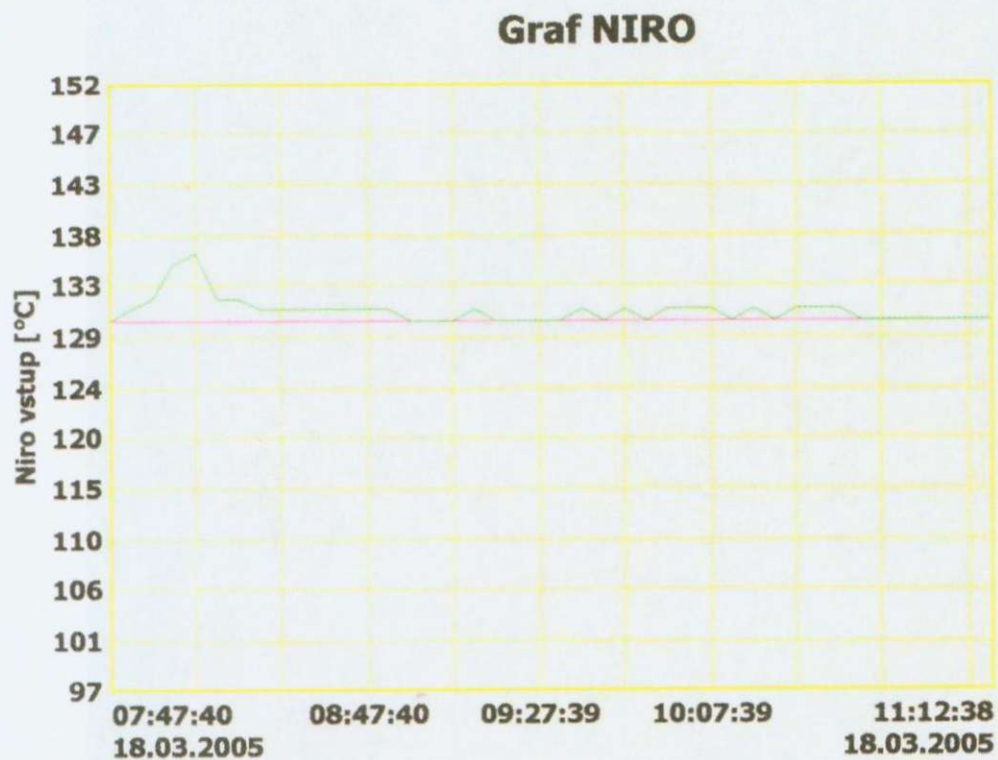
### Graf NIRO



Legenda:

červená linka – NIRO požadavek

zelená linka – NIRO vstup. Ukázka standardní proporcionální regulace teploty.



Legenda:

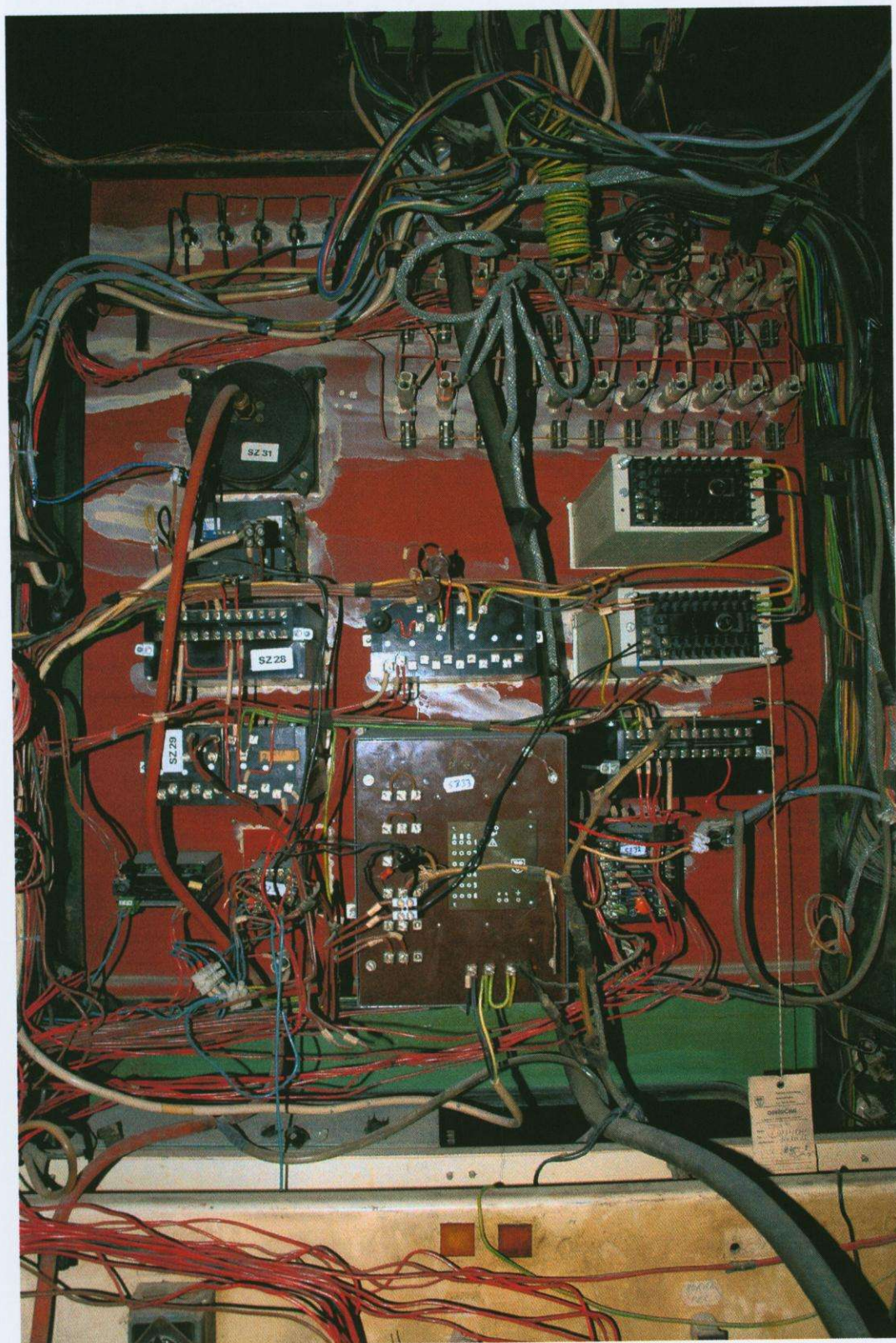
červená linka – NIRO požadavek

zelená linka – NIRO vstup

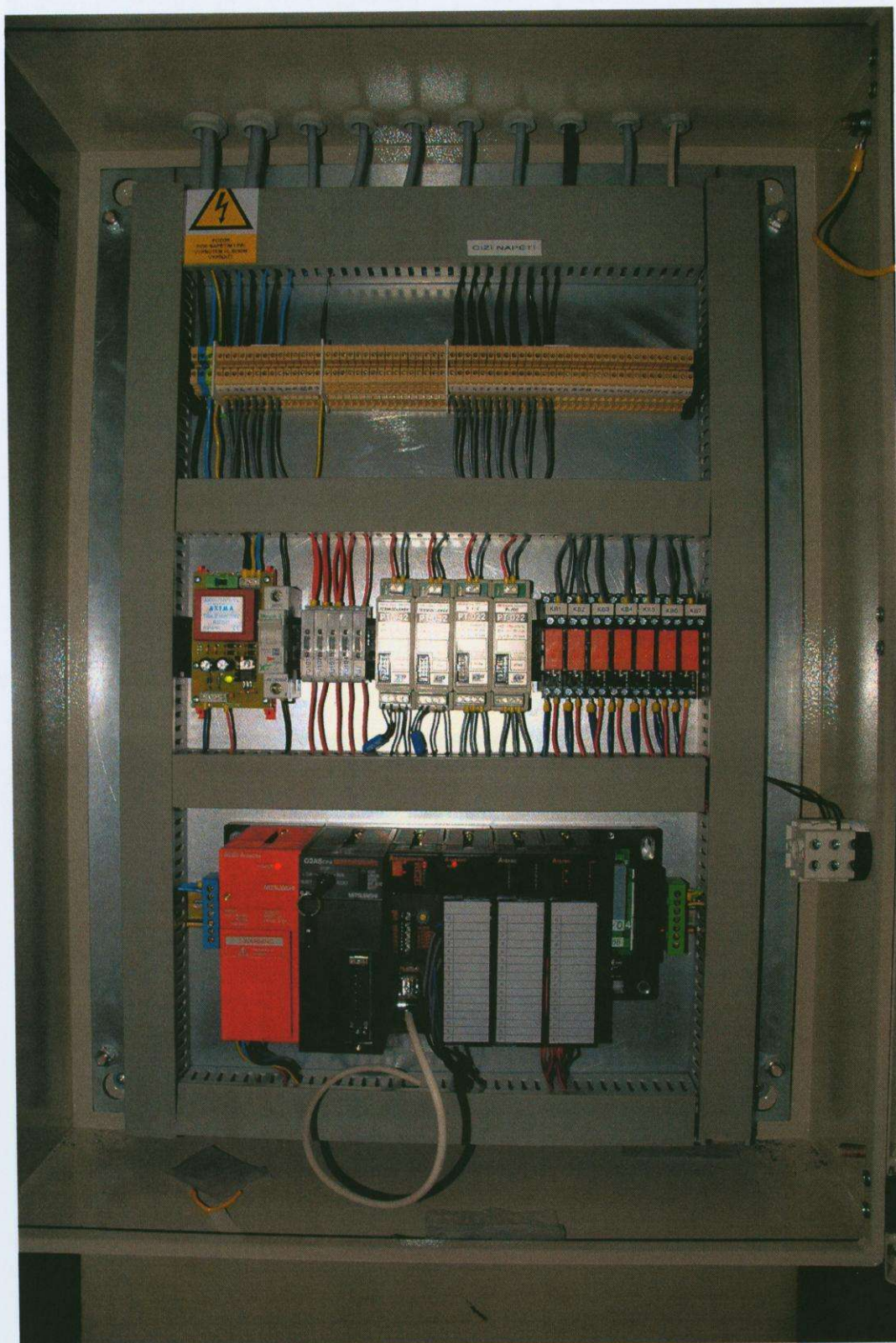
Ukázka zásahu proporcionálního regulátoru na změnu teploty.

## 7 Fotodokumentace

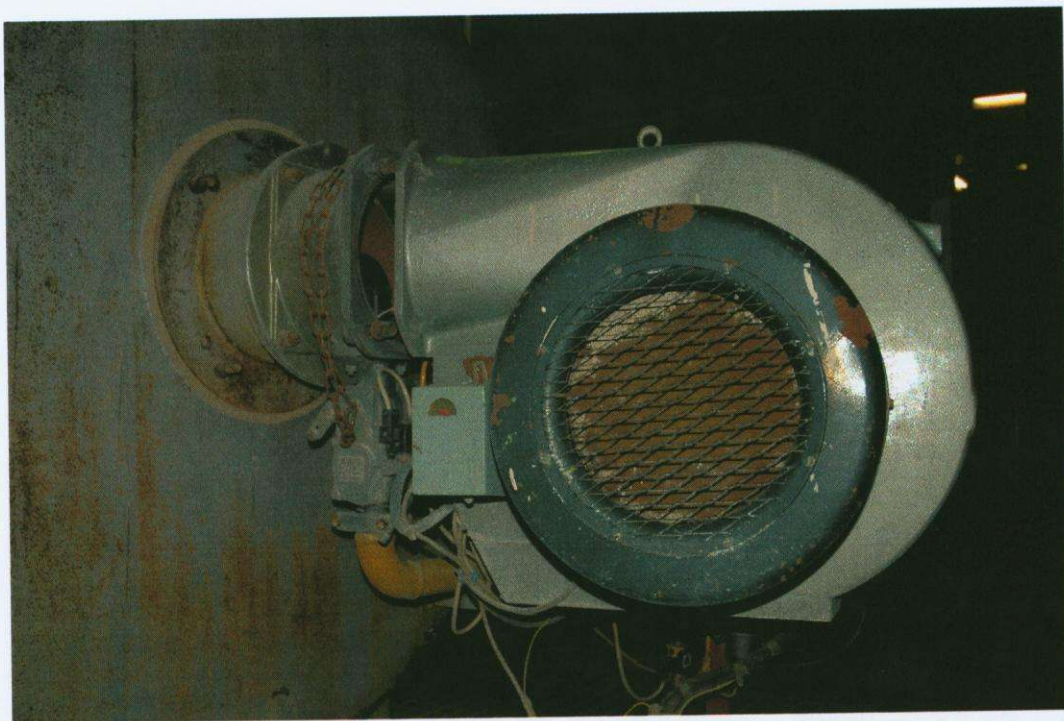
*Fotografie č.1 - Zapojení původní analogové regulace.*



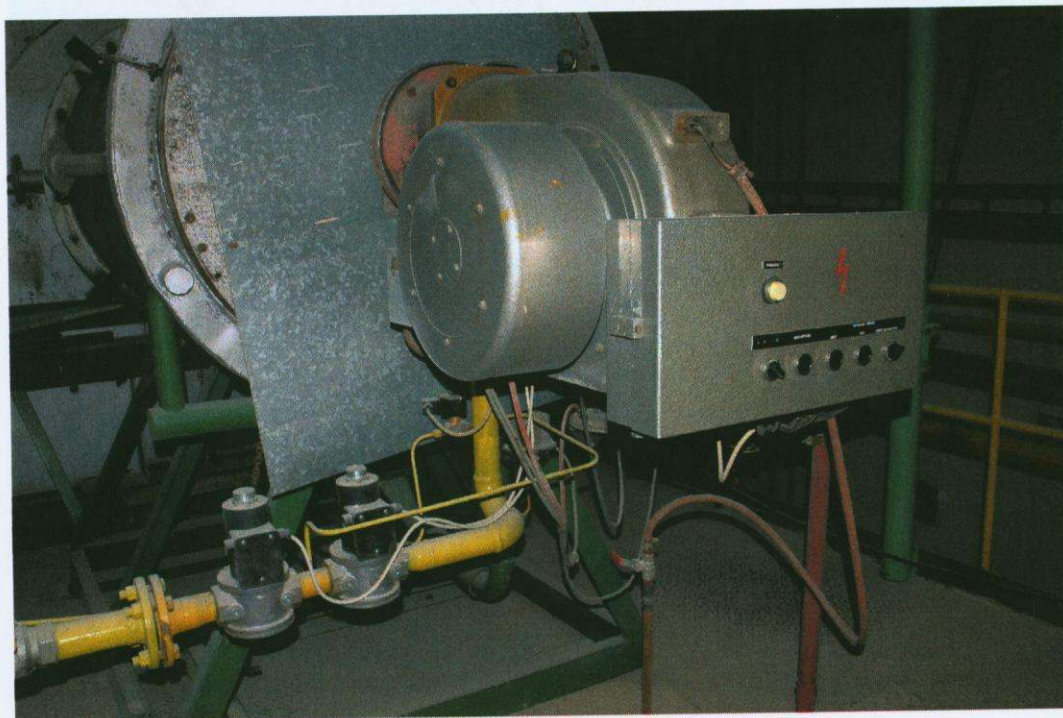
Fotografie č. 2 - Zapojení nové digitální regulace.



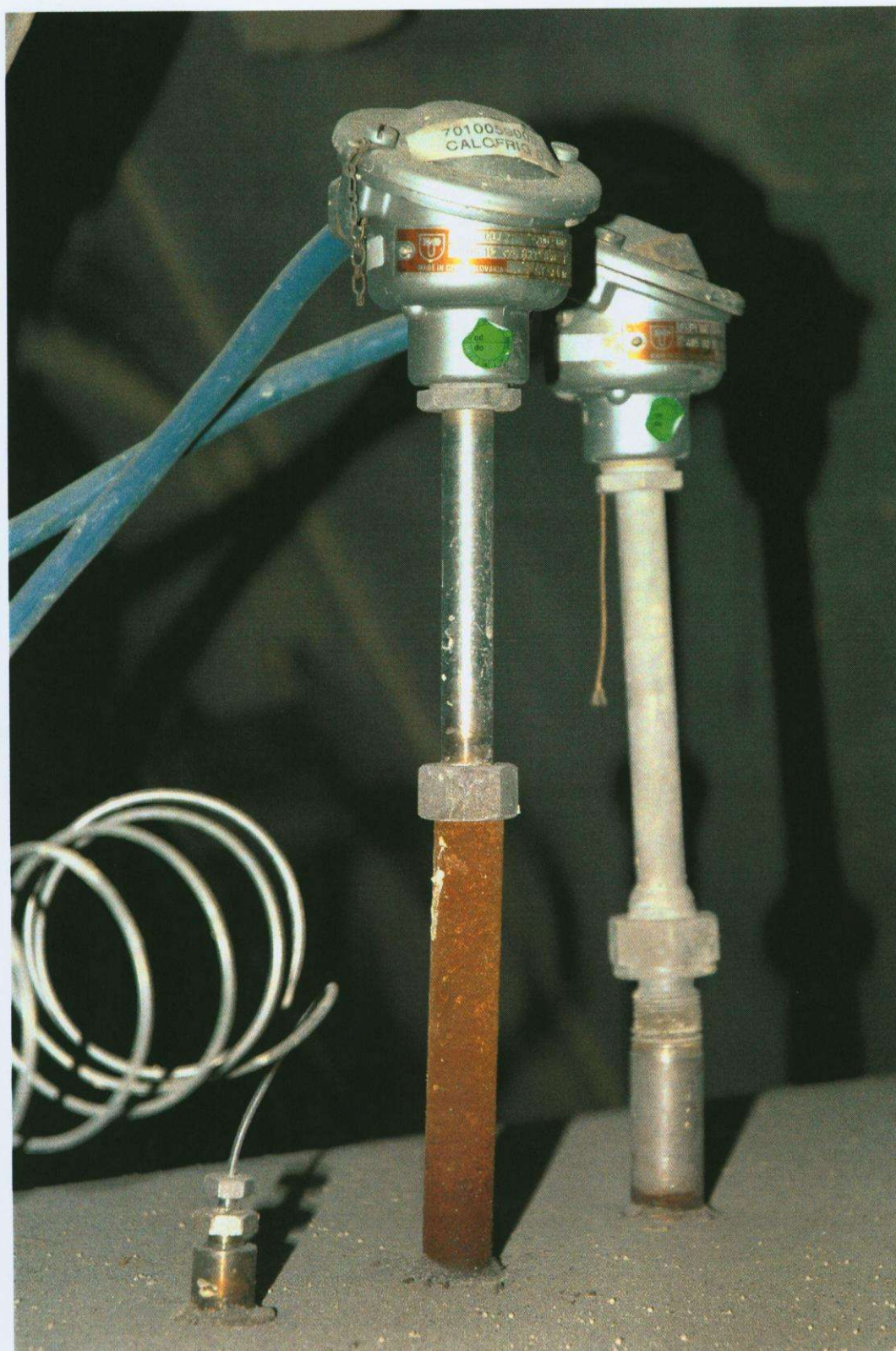
*Fotografie č. 3 - Regulované soustrojí – hořák NIRO*



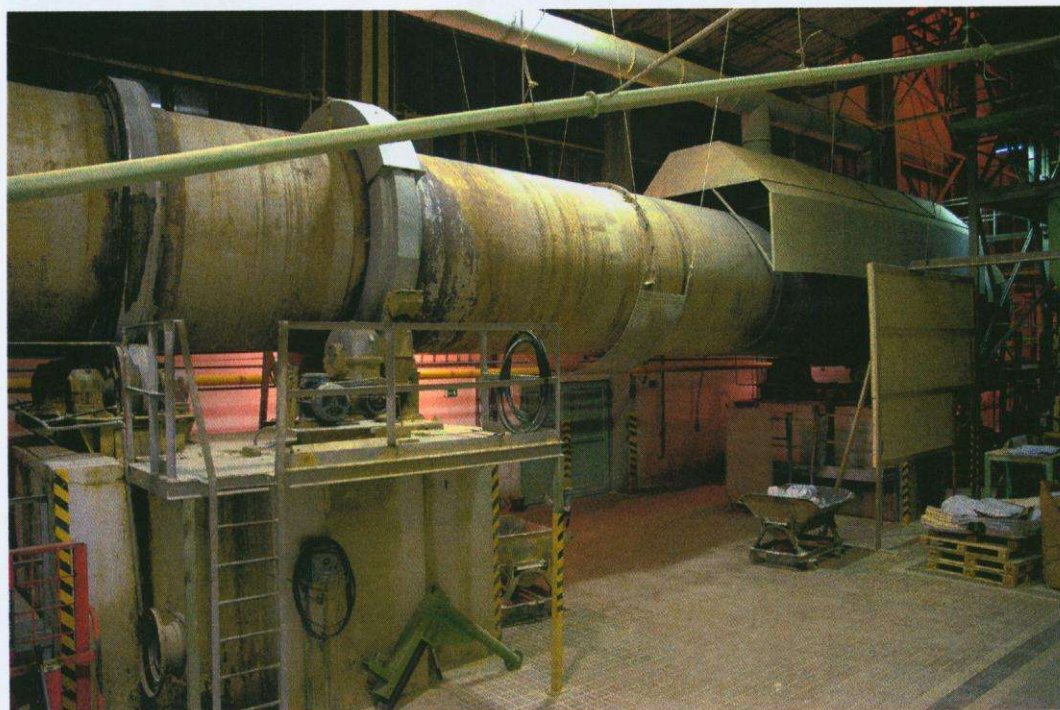
*Fotografie č. 4 - Regulované soustrojí – hořák pec.*



Fotografie č. 5 - Detail usazení snímačů teploty.



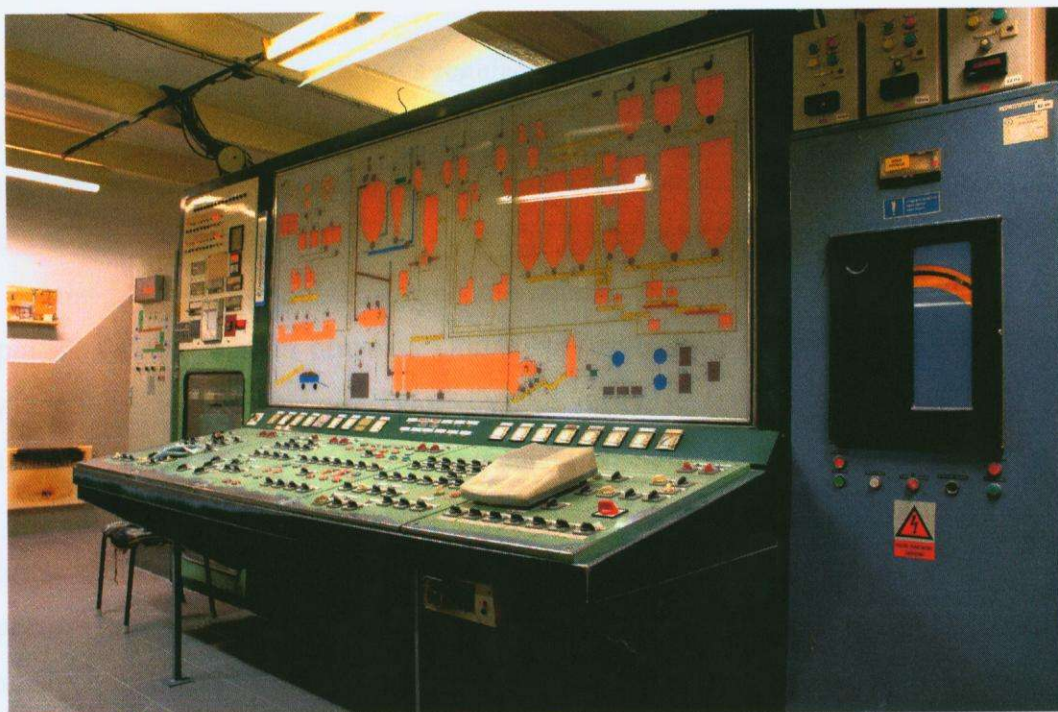
Fotografie č. 6 - Rotační pec – celek



Fotografie č. 7 - Původní regulátor Honeywell



Fotografie č. 8 - Pracoviště směnových techniků – velín



## 8 Závěr

Závěrem bych chtěl říci, že nová regulace přinesla nesporné výhody. Jeden z hlavních přínosů je výrazné zlepšení energetické bilance. Digitalizací vstupních a výstupních veličin vznikl velký potenciál následného rozvoje regulačních smyček. Také archivace provozních dat v digitální formě je nespornou výhodou.

Jedním z negativ bylo obtížné uvedení systému do reálného provozu, které trvalo půl roku ve zkušebním provozu. Obtíže byly způsobeny absencí jakékoliv analýzy zpětných vazeb systému. Tyto vlivy se řešily se tzv. za pochodu. K udržení nepřetržitého provozu se používala záloha (původní regulace). S možností spustit záložní systém se otevřela možnost empirického nastavení různých variant regulačních konstant a koeficientů, a zároveň současné udržení výroby v dostatečné kvalitě a kvantitě. Toto se odrazilo v ekonomice zkušebního provozu. Dočasně zálohovat systém se v praxi velmi osvědčilo.

V současné době běží nový systém v nepřetržitém provozu. Je vyvážený, výrazně nekmitá a nejeví známky nečekaných výpadků.

### **Seznam použité literatury:**

Katalogový list ZPA Jinonice č. 2 – 1005 - 01

Technická dokumentace plynového hořáku APH ( První brněnská strojírna a.s. Třebíč)

Katalogový list ZPA Trutnov č. 7 – 0301 - 50

Manuál monitorování provozních hodnot Terms CZ s.r.o.

Programming Manual (PID Control Instructions) – Mitsubishi Elektrik

System automatické regulace Terms CZ s.r.o.

Archivní soubory dbf. Calofrig a.s. Borovany

Technická dokumentace rotační pece ( Gibson Ltd.Leeds)

Technická dokumentace atomizér NIRO (Alha Laval, Denmark)

Technologické postupy pro provoz rotační pece ( Calofrig a.s., dle ISO 9001)

Technologické postupy pro provoz atomizéru NIRO( Calofrig a.s., dle ISO 9001)

Manuál pro nastavení výpočtového softwaru Mitsubishi ( Mitsubishi Ltd.)