

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 266

ISSN 1213-418X

Aleš Krejčí

**NETRADIČNÍ METODY ŘÍZENÍ
KOMPLEXNÍCH SYSTÉMŮ
S APLIKACÍ V ASŘ
TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ
VÝROBY STAVEBNÍCH HMOT**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE INŽENÝRSKÝCH ÚLOH
A INFORMATIKY

ING. ALEŠ KREJČÍ, CSc.

**NETRADIČNÍ METODY ŘÍZENÍ KOMPLEXNÍCH SYSTÉMŮ
S APLIKACÍ V ASŘ TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ VÝROBY
STAVEBNÍCH HMOT**

NON-TRADITIONAL METHODS OF COMPLEX SYSTEMS CON-
TROLLING
APPLIED IN ACS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF BUIL-
DING MATERIAL PRODUCTION

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2008

KLÍČOVÁ SLOVA

Modelování, řízení, řídicí systémy, fuzzy logika, selská logika, jazykové modely, kvalitativní modely, umělá inteligence, cementářská rotační pec

KEY WORDS

Modelling, control, control systems, fuzzy logic, common sense, linguistic models, qualitative models, artificial intelligence, cement rotary kiln

MÍSTO ULOŽENÍ ORIGINÁLU HABILITAČNÍ PRÁCE

Archiv děkanátu Fakulty stavební VUT v Brně

© Aleš Krejčí, 2008

ISBN 978-80-214-3654-1

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
NETRADIČNÍ METODY ŘÍZENÍ KOMPLEXNÍCH SYSTÉMŮ	6
1 ÚVOD.....	6
2 CEMENTÁŘSKÁ PECNÍ LINKA JAKO KOMPLEXNÍ SYSTÉM.....	7
3 VOLBA ŘÍDICÍHO SYSTÉMU CEMENTÁŘSKÉ PECNÍ LINKY	7
4 JAZYKOVÉ MODELY PRO ŘÍZENÍ CEMENTÁŘSKÉ PECNÍ LINKY	8
4.1 Struktura a strategie řídicího systému	12
4.2 První stupeň řízení.....	12
4.3 Druhý stupeň řízení	13
4.4 Třetí stupeň řízení	13
4.5 Strategie řízení.....	13
4.6 CIC–jazykové modely druhého stupně řízení	13
4.7 Čas provedení akčního zásahu	15
4.8 Váha akčního zásahu.....	15
4.9 CIC–jazykové modely třetího stupně řízení.....	15
4.10 Dosažené výsledky.....	16
5 KVALITATIVNÍ MODELY CEMENTÁŘSKÉ PECNÍ LINKY.....	17
5.1 Principy kvalitativního popisu	17
5.2 Kvalitativní model chování cementářské pecní linky	19
5.3 Kvalitativní model řízení cementářské pecní linky.....	23
5.4 Kvantifikace akčních zásahů.....	24
5.5 Srovnání VÝSLEDKŮ kvalitativního a jazykového modelu	26
5.6 Dosažené výsledky.....	27
6 ZÁVĚR.....	28
7 POUŽITÁ A CITOVANÁ LITERATURA	30
VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA	35
ABSTRACT.....	38

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Ing. Aleš Krejčí, CSc.

Narozen: 3. září 1953 v Brně



Vzdělání

- Základní (1959–1968)
Základní devítiletá škola v Přerově
- Středoškolské (1968–1972)
Střední průmyslová škola strojnická v Přerově, obor: Automatizační a přístrojová technika
- Vysokoškolské (1972–1977)
Elektrotechnická fakulta VUT v Brně, obor: Elektronické počítače
- Postgraduální, externě (1985–1990)
Stavební fakulta VUT v Brně, obor: Nauka o nekovových materiálech a stavebních hmotách

Průběh zaměstnání

- 1977–1978 Výzkumný ústav elektrických strojů točivých v Brně
Výpočetní středisko, technický asistent
- 1978–1983 Fakulta elektrotechnická VUT v Brně
Katedra samočinných počítačů, samostatný odborný referent specialista
- 1983–1997 Fakulta stavební VUT v Brně
Katedra řídicích systémů technologických procesů, odborný asistent
- 1997–1999 Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb, odborný asistent
- 1999–DOPOSUD Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, odborný asistent

Odborné stáže a praxe

- 1988–1989 Cementárna Mokrý, provoz rotačních pecí
- 1989–1989 Akademie věd Kirgizské SSSR a Polytechnický institut Frunze

Odborné zaměření

- Informační technologie, technologie Internetu a intranetu
- ASŘ technologických procesů, fuzzy logika, jazykové modely na bázi fuzzy logiky a jejich aplikace v ASŘTP, common sense, kvalitativní modelování a jeho aplikace v řízení a rozhodování
- Desktop publishing, profesionální design na webu
- Distanční vzdělávání, e-learning / blended-learning

Pedagogická činnost

- Vedení přednášek v BSP a MSP a konzultací v DSP: *ASŘ technologických procesů I a II, Programové vybavení PC I a II, Automatizace technologického projektování, Výpočetní technika, Základy informatiky a výpočetní techniky I a II, Expertní systémy (DSP), Informatika (doposud)*
- Vedení cvičení: *ASŘ technologických procesů I a II, Programové vybavení PC I a II, Automatizace technologického projektování, Výpočetní technika, Textové a tabulkové procesory, Základy informatiky a výpočetní techniky II, Informatika (doposud), Systémy CAD (doposud)*

- Spolupráce při zavádění nových předmětů a při zavádění, organizování a vedení kurzů CŽV
- Vedení diplomových prací, konzultace disertačních prací
- Vytváření příruček, skript a ostatních učebních textů, příprava učebních pomůcek
- Člen státní zkušební komise pro obor *Pozemní stavby* Fakulty stavební ČVUT v Praze a zkušební komise pro státní závěrečné zkoušky studentů studijního programu *Stavebnictví, geodézie a kartografie* Fakulty stavební ČVUT v Praze
- Člen Pedagogické komise děkana
- Člen Pedagogické oborové rady oboru *Architektura pozemních staveb*
- Člen Rady bakalářských a magisterských studijních programů FAST VUT v Brně
- Člen Rady bakalářského studijního programu *Architektura pozemních staveb*
- Člen Rady bakalářských studijních programů *Stavitelství* a *Stavební inženýrství*

Řešené projekty (spolupráce na řešení projektů / odpovědný řešitel)

- *Mostní tenzometrická váha řízená mikropočítačem pro podmínky provozů PREFA*. Armabeton Praha. 1988
- *Studie a návrh konfigurace řídicího systému*. PREFA Hýskov. 1989
- *Systém řízení procesu výpalu cementářského slinku aplikací metody fuzzy logic*. Řešitel části: *Zpracování dat postupy fuzzy matematiky se zřetelem na využití fuzzy matematiky v ASŘ TP* a části: *Systém řízení procesu výpalu cementářského slinku automatizovaným řídicím systémem na bázi fuzzy logiky*. Výzkumný úkol č. III–2–3/01.01/E04. 1989–1990
- *ASŘTP míšení betonové směsi*. PREFA Hýskov. 1989
- *Analýza tvorby aplikačního programového vybavení pro stavebnictví v podmínkách FAST VUT v Brně*. Výzkumný úkol VUT v Brně č. 732. 1990
- *Analýza fyzikálně chemických pochodů v technologických procesech výroby stavebních látek, jejich modelování a řízení*. Interní grant FAST VUT v Brně č. 29. 1991–1992
- *Návrh a realizace řídicího systému cementářské pecní linky v cementárně Mokrý*. Mokrý. 1992
- *Návrh a realizace automatizovaných řídicích systémů betonáren*. Kamena Brno, provozovna Blučina (1992), provozovna Hrušovany u Brna (1993) a provozovna Dolní Kounice (1994)
- *Návrh řídicího systému sušičky a třídičky dolomitů*. Kameňolomy a štrkopiesky Zlaté Moravce, prevádzka Malé Kršteňany. 1995
- *Návrh a realizace automatizovaného řídicího systému betonárny*. PREFA Tovačov. 1995
- *Expertní systémy pro řízení technologických procesů výroby cementu*. Mezifakultní grant GA ČR č. 103/98/0749 (FAST a FP VUT v Brně). Řešitel grantu. 1999–2001
- *Netradiční metody studia komplexních a neurčitých systémů*. Mezifakultní výzkumný záměr MŠMT č. CZ–200009, ID: J22/98/261100009. 1999–2004
- *Příprava e-learningové formy výuky pro distanční formu bakalářského studia*. Rozvojový projekt č. 456: Využití moderních technologií (přístrojové techniky) k rozvoji akreditovaných studijních programů. Vedoucí řešitelského kolektivu řešícího možnosti e-learningové formy výuky na FAST VUT v Brně. 2006
- *Integrovaný informační systém Fakulty stavební VUT v Brně*. Spolupráce na návrhu a realizaci. FAST VUT v Brně. 2000–2007
- *Rozvoj informačních a komunikačních technologií* (podpora akreditovaných studijních programů). Rozvojový projekt č. RP–90700111. 2007
- *Rozvoj studijních programů na FAST I*. Rozvojový projekt č. RA–90700122. 2007
- *Rozvoj studijních programů na FAST II*. Rozvojový projekt č. RA–90700136. 2007

NETRADIČNÍ METODY ŘÍZENÍ KOMPLEXNÍCH SYSTÉMŮ S APLIKACÍ V ASŘ TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ VÝROBY STAVEBNÍCH HMOT

1 ÚVOD

Při studiu chování, návrhu a realizaci řídicích systémů reálných procesů, mají své nezastupitelné místo všeobecně známé systémové disciplíny – modelování a simulace. Samostatnou kapitolou jsou však problémy popisu a řízení procesů vyznačujících se značnou složitostí (komplexností), velkou obtížností (až často nemožností) svého formálního matematického popisu a problematickou provozní měřitelností rozhodujících veličin. U takovýchto systémů pak narážejí klasické formální přístupy, založené na numerické matematické analýze a podporované aparátem matematické statistiky, na znalostní meze svého použití. Limity použití klasických matematických prostředků pramení z jejich principiálně precizních přístupů, založených na využití objektivních informací vyplývajících z obecných zákonů, které jsou interpretovány vztahy klasické matematiky.

Použití těchto přístupů u komplexních systémů pak často vede k nutným zjednodušením. Navíc zde vystupuje fenomén snižující se praktické použitelnosti matematického modelu při růstu složitosti jeho struktur. Nemůžeme-li (z důvodu přesně definovat realitu a instrumentální pojmy) popsat vazby mezi jednotlivými veličinami systému, můžeme postupovat dvojným způsobem.

- *Zavést zjednodušující předpoklady*, které „snižují složitost zkoumaného systému“ natolik, že je možný jeho přesný popis. Nedostatkem tohoto přístupu je možný rozdíl mezi popsáním a reálným systémem. Snadno se totiž může stát, že matematicky přesný popis má jen malou souvislost se zkoumaným systémem.
- *Snižit úroveň popisu* tak, aby bylo možno systém popsat bez zjednodušujících předpokladů. Tento způsob se stal běžným při popisu systémů, který k popisu užívá prostředků lidského jazyka. Při použití přirozeného jazyka pak neurčitost není překážkou, neboť jeho nejdůležitější vlastností je vágnost jeho sémantiky a schopnost s vágními pojmy pracovat. V matematice však donedávna nebyl k dispozici aparát, který by tento přístup umožnil, neboť klasická matematika se nedokázala s vágností popisu vyrovnat.

Uvedené nedostatky, nebo skutečnost, že selhání matematických modelů zapříčinil nedostatek informací o vyšetřované soustavě, lze eliminovat použitím metod, které přináší nová vědní disciplína – umělá inteligence. Principy přístupů umělé inteligence vesměs spočívají (zjednodušeně řečeno) ve využití poznatků založených nikoliv na platnosti obecných objektivních přírodních zákonů, nýbrž na lidských zkušenostech, tedy na znalostech subjektivních, heuristických. Takové přístupy využívají ke konstrukci efektivních modelových struktur pojmovou neurčitost a dovolují vytvářet nekonvenční nenumerické modely, které svojí použitelností mohou přesáhnout hranice konvenčních matematicko-analytických modelů. Na jejich bázi vznikají nové nekonvenční přístupy k řešení.

V praxi jsou v této oblasti při popisu chování a řízení složitých soustav využívány závěry získané jako výsledek rozhodovacích procesů v lidském mozku. I když jsou tyto závěry postaveny na porovnání ne zcela přesně definovaných parametrů popisované soustavy, je k jejich vyvození použito úplně jiného, než statistického aparátu. V tomto případě jde o efektivní využívání pojmové (slovní) neurčitosti, tzv. vágnosti, kdy při nasazení vhodných nenumerických algoritmů, které umožňují integrovat hluboké (objektivní) znalosti se znalostmi mělkými (subjektivními), dosáhneme vyšší kvality závěrů.

Vychází-li klasická matematická statistika ze zákonů empirické pravděpodobnosti s využitím znalostí o rozložení hustoty pravděpodobnosti náhodných jevů, vychází metody práce s vágností ze zákonů tzv. distribuce možností. I když mezi možnostmi a pravděpodobnostmi existují kvalitativní vztahy, jde o dva zcela odlišné přístupy.

Předložená práce se zabývá dvěma vybranými nekonvenčními nenumerními popisy dané soustavy, postavenými na principech umělé inteligence, a jejich využitím při návrhu automatických řídicích systémů technologických procesů. Konkrétně: *jazykovými modely* na bázi fuzzy logiky a *kvalitativními modely* využívajícími principy common sense (selského rozumu, zkušeností, pocitů, slovních popisů dějů a procesů apod.).

2 CEMENTÁŘSKÁ PECNÍ LINKA JAKO KOMPLEXNÍ SYSTÉM

Výpal cementářského slinku je nejdůležitější fází nejen jeho výroby, ale i celého technologického procesu výroby cementu, a do značné míry ovlivňuje jak kvalitu vyráběného produktu, tak i celkovou efektivnost výroby. Po všech stránkách patří k nejsložitějším procesům v průmyslu výroby stavebních hmot a k energeticky nejnáročnějším technologiím vůbec. Proto je řízení procesu výpalu věnována mimořádná pozornost. Jeho správným průběhem lze dosáhnout nejen úspor všech druhů energií, ale stabilním a rovnoměrným chodem pecní linky např. prodloužit i životnost vyzdívek pece, zvýšit tak její využití, snížit materiálové náklady a množství živé práce v případě oprav apod. Cementářská rotační pec se tak po mnoha stránkách stává rozhodujícím technologickým agregátem a všechny metody, které vedou ke stabilizaci jejího chodu, snižování energetické náročnosti, zvyšování jejího časového využití a zlepšení kvality slinku, jsou vysoce aktuální.

Cementářskou rotační pec můžeme z různých technologických pohledů charakterizovat jako chemický reaktor, spalovací komoru, výměník tepla, mechanický dopravník materiálu, či aerodynamický transportní kanál pro plyny. Podstata všech těchto dílčích procesů pozorovaných izolovaně je zanalyzována a prozkoumána, a je prakticky možno kterékoliv z výše uvedených zařízení řídit. Při technologickém procesu výpalu a chlazení cementářského slinku však dochází k obtížně definovatelnému prolínání fyzikálních a chemických pochodů, jako jsou mechanický protiproudý pohyb materiálu a plynů, endotermní (kalcinace) a exotermní (slinování) reakce, kvantitativní i kvalitativní změny materiálu, procesy tepelné výměny apod., jejichž současný průběh v cementářské rotační peci vytváří heterogenní systém vzájemně se ovlivňujících pochodů a reakcí, jejichž kvantifikace se za takovýchto podmínek stává téměř neřešitelným problémem.

Procesy probíhající v cementářské rotační peci tak navozují některé problémy řízení vyplývající z jejich charakteru, tj. složitosti, vzájemného prolínání se probíhajících dějů, časových konstant, omezených možností přímého měření některých veličin atd. Potíže vznikají i při provádění experimentů na cementářské pecní lince, které jednak zasahují do výrobního procesu, jednak je prakticky nemožná i jejich reprodukovatelnost, protože pro žádné opakované měření nelze zajistit stejné podmínky. Charakter procesu výpalu cementářského slinku tak způsobuje selhání snah exaktně definovat a popsat procesy probíhající při výpalu cementářského slinku, pokusů o řízení pecní linky klasickými regulátory apod.

3 VOLBA ŘÍDICÍHO SYSTÉMU CEMENTÁŘSKÉ PECNÍ LINKY

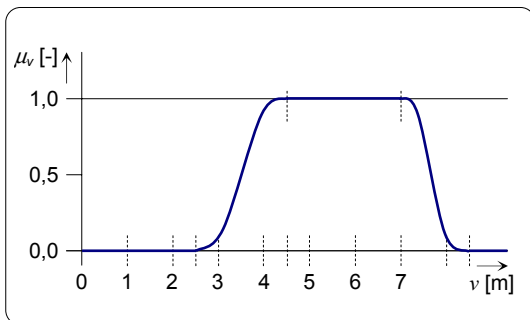
Z výše uvedeného důvodu jsem se při řešení problematiky řízení cementářské pecní linky odklonil od snahy exaktně definovat a matematizovat procesy probíhající při výpalu slinku a navrhl řídicí systém spadající do kategorie tzv. znalostních systémů. Šlo o řídicí systém založený na jazykových modelech na bázi fuzzy logiky. Ty byly vytvořeny na základě identifikačních měření a praktických znalostí, bez ohledu na vnitřní fyzikální a chemické závislosti. Znalosti o chování systému byly formulovány prostředky lidského jazyka, tedy užitím vágních pojmů.

Typickou vlastností vágního pojmu je skutečnost, že charakterizuje určitou třídu problémů, jejichž hranice bychom velmi těžce definovali. Vágnost však lze velmi elegantně formalizovat pomocí aparátu teorie fuzzy množin. *Fuzzy množina* je definována jako třída, která přiřazuje prvkům

neurčitost pomocí vlastnosti jejich částečné příslušnosti, a to formou tzv. *míry příslušnosti*, přičemž ve fuzzy množinové teorii, která je zobecněním teorie abstraktních množin, může tato míra příslušnosti nabývat libovolné hodnoty z uzavřeného intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Klasifikace prvku mírou jeho příslušnosti k určité fuzzy množině je přitom čistě subjektivní, odráží obecně koncept, z něhož je problém posuzován a závisí jen na vnitřním přesvědčení lidského experta o dané skutečnosti (proto z tohoto hlediska nelze zaměňovat míru příslušnosti se statistickou, objektivně vyčíslitelnou hodnotou pravděpodobnosti).

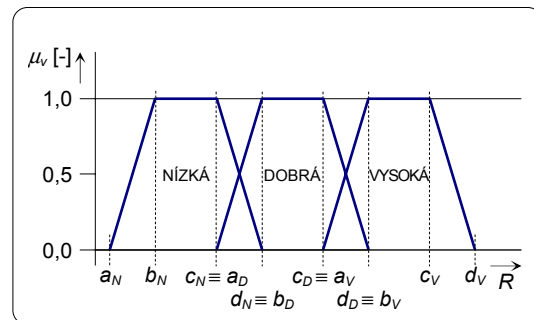
Jednou z možností, jak fuzzy množinu definovat, je grafický způsob, kdy na horizontální osu vynášíme hodnoty, kterých může daný prvek nabývat, a na vertikální osu odpovídající míry příslušnosti prvku o dané hodnotě do fuzzy množiny (viz obr. 1). Spojitou křivku, představující průběh velikostí míry příslušnosti v závislosti na velikosti prvku univerza, nazýváme *příslušnostní* nebo *charakteristickou funkcí* (fuzzy charakteristikou formalizovaného pojmu).

Pro ilustraci uveďme fuzzy množinu formalizující pojem středně vysoký strom. Za ně považujeme stromy s výškou v od 4,5 do 7,0 metru. Stromy nižší než 2,5 metru považujeme za nízké a stromy vyšší než 8,5 metru za vysoké. Grafické vyjádření příslušnostní funkce středně vysoký strom je znázorněno na obr. 1., kde na horizontální ose jsou vyneseny reálné výšky stromu v a na vertikální ose míra příslušnosti μ_v .



Obr. 1

Grafické vyjádření příslušnostní funkce „středně vysoký strom“



Obr. 2

Příklad definování příslušnostních funkcí jazykových hodnot

V uvedeném příkladě je výška stromu tzv. *jazykovou proměnou* a středně vysoký strom *jazykovou hodnotou* této jazykové proměnné.

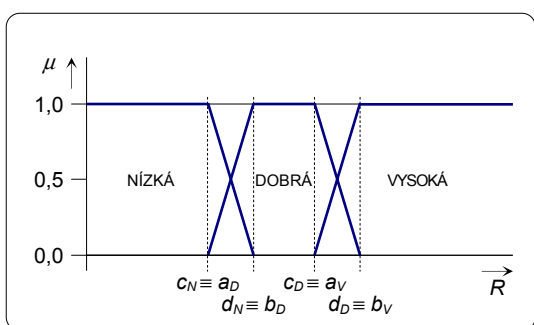
4 JAZYKOVÉ MODELY PRO ŘÍZENÍ CEMENTÁŘSKÉ PECNÍ LINKY

Při práci na řídicím systému cementářské pecní linky jsem navázal na výsledky práce ústavu matematiky FSI VUT v Brně, kde vyvinuli celou řadu jazykových modelů na bázi fuzzy logiky. Model nejvhodnější pro danou aplikaci (tzv. CIC–jazykový model) jsem upravil pro potřeby řízení technologických procesů a optimalizoval. Výsledný model je obecný a aplikovatelný na jakýkoliv technologický proces výše uvedených vlastností. Struktura a algoritmus zpracování těchto modelů jsou dány; jde tedy „jen“ o naplnění databáze, tj. o definování regulovaných a akčních veličin, jejich příslušnostních funkcí a formulování řídicích pravidel (viz dále).

Uvedený název modelu je odvozen od zkratk logických funkcí, využívaných při jeho zpracování. První písmeno v názvu modelu (C ~ konjunkce) vyjadřuje logický vztah mezi nezávisle proměnnými veličinami jazykového modelu (regulovanými veličinami), druhé písmeno (I ~ implikace) vyjadřuje logický vztah mezi nezávisle proměnnými a závisle proměnnou veličinou (regulovanými veličinami a akční veličinou) a poslední písmeno (C ~ konjunkce) vztah mezi jednotlivými pravidly jazykového modelu.

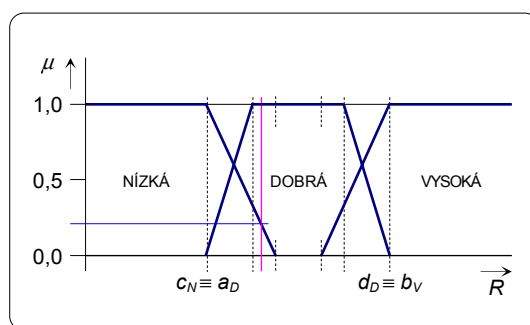
Nezávisle jazykové proměnné (regulované veličiny) jsou v jazykovém modelu (řídícím systému) popsány příslušnostními funkcemi majícími lichoběžníkové průběhy. Všechny nezávisle jazykové proměnné jsou přitom kvantifikovány nejjednodušším způsobem do tří úrovní (*jazykových hodnot*) vyjádřitelných výroky *nizký*, *dobrý* a *vysoký*. Z hlediska spojitosti řízení je přitom nutné, aby se příslušnostní funkce „sousedních“ jazykových hodnot překrývaly, např. tak, jak je naznačeno na obr. 2.

Při realizaci řídicích systémů se mi osvědčilo modifikovat průběhy příslušnostních funkcí jazykových hodnot regulovaných veličin v tom smyslu, že se tyto nekřížily na úrovni 0,5, jak je uvedeno na obr. 2 nebo obr. 3, ale nosič příslušnostní funkce jazykové hodnoty *nizká* zasahoval do jádra příslušnostní funkce jazykové hodnoty *dobrá*. Obdobným způsobem jsem modifikoval příslušnostní funkci jazykové hodnoty *vysoká* (viz obr. 4).



Obr. 3

Příklad definování příslušnostních funkcí jazykových hodnot regulovaných veličin

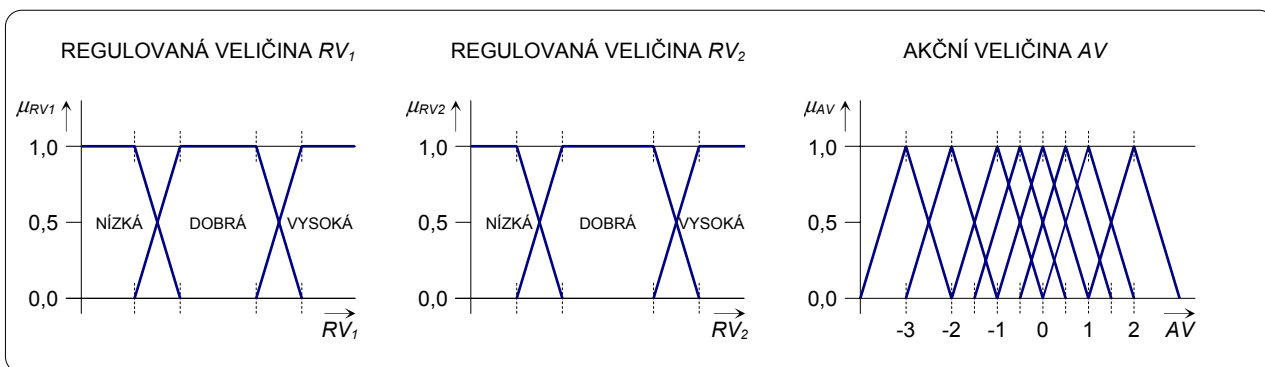


Obr. 4

Upravené průběhy příslušnostních funkcí jazykových hodnot regulovaných veličin

Z hlediska řízení má tato změna průběhu příslušnostních funkcí regulovaných veličin praktický význam v okamžiku, kdy hodnota regulované veličiny snímaná z řízeného technologického procesu začne opouštět střed jádra příslušnostní funkce jazykové hodnoty *dobrá* (začne klesat nebo stoupat). Dosáhne-li krajních mezí jádra příslušnostní funkce *dobrá*, tj. naměřená hodnota regulované veličiny se bude pohybovat v intervalu $\langle b_D, d_N \rangle$ resp. $\langle a_V, c_D \rangle$, začnou se v řídicím systému uplatňovat (byť s nízkým stupněm platnosti) řídicí pravidla pro případ, že daná regulovaná veličina je *nizká* resp. *vysoká*, a to již v okamžiku, kdy tato veličina ještě neopustila jádro jazykové hodnoty *dobrá*, to znamená, že „je stále ještě dobrá“.

Obdobným způsobem jsou definovány charakteristické funkce akčních veličin (závisle jazykových proměnných). Ty jsou však kvantifikovány do více úrovní, které odpovídají všem možným akčním zásahům vyskytujícím se v řídicích pravidlech jazykových modelů. U příslušnostních funkcí akčních veličin jsem však nevolil lichoběžníkové, ale trojúhelníkové průběhy (viz obr. 5).



Obr. 5

Průběhy příslušnostních funkcí veličin modelu definovaného v tab. 1

Jednotlivá řídicí pravidla jazykových modelů pak mají obecně tento tvar: Je-li hodnota regulované veličiny RV_1 *taková a* RV_2 *taková a* ... RV_n *taková*, pak proved' *takový* akční zásah na akční veličině AV. V případě řídicího systému cementářské pecní linky pak může mít řídicí pravidlo např. tento konkrétní tvar: Je-li teplota ve slinovacím pásmu rotační pece *vysoká a* teplota kouřových plynů před odtahovým ventilátorem *dobrá a* příkon hlavního pohonu rotační pece *dobry a* koncentrace O_2 v kouřových plynech *vysoká*, pak zvýš' dávkování surovinové moučky o 2 t/hod.

Teplota ve slinovacím pásmu rotační pece, teplota kouřových plynů před odtahovým ventilátorem, příkon hlavního pohonu rotační pece a koncentrace O_2 v kouřových plynech jsou regulované veličiny (nezávisle proměnné jazykového modelu), mezi kterými je konjunktní vztah vyjádřený spojkou *a*, dávkování surovinové moučky je akční veličinou (závisle proměnnou jazykového modelu). Mezi regulovanými veličinami a akční veličinou je vztah implicitní (viz definice CIC–jazykového modelu) vyjádřený slůvkem *pak*. Konjunktní vztah je i mezi jednotlivými pravidly jazykového modelu (platí to *a to a to a ... a to* řídicí pravidlo). Konkrétní příklad sestavení řídicích pravidel v řídicím systému (jazykovém modelu) cementářské pecní linky je naznačen níže.

Získání akčního zásahu pomocí jazykového modelu vyplývá z jeho „názvu“ a definic logických operací příslušejících použitým logickým funkcím:

- konjunkce \Leftrightarrow infimum: $x \wedge y = \min \{x, y\}$,
- odvážná konjunkce \Leftrightarrow logický součin: $x \otimes y = \max \{0, x + y - 1\}$,
- implikace \Leftrightarrow reziduum: $x \rightarrow y = \min \{1 - x + y, 1\}$.

Zmíněný postup vygenerování akčního zásahu můžeme demonstrovat na tomto příkladě: Předpokládejme CIC–jazykový model se dvěma regulovanými veličinami označenými obecně RV_1 a RV_2 a akční veličinou AV. Akční zásahy jsou též obecné a jsou v modelu prezentovány jako plus nebo mínus x jednotek na akční veličině. Tento fiktivní jazykový model je definován v tab. 1, průběhy příslušnostních funkcí jazykových hodnot regulovaných veličin a akční veličiny jsou patrné z obr. 5.

Tab. 1: Fiktivní jazykový model

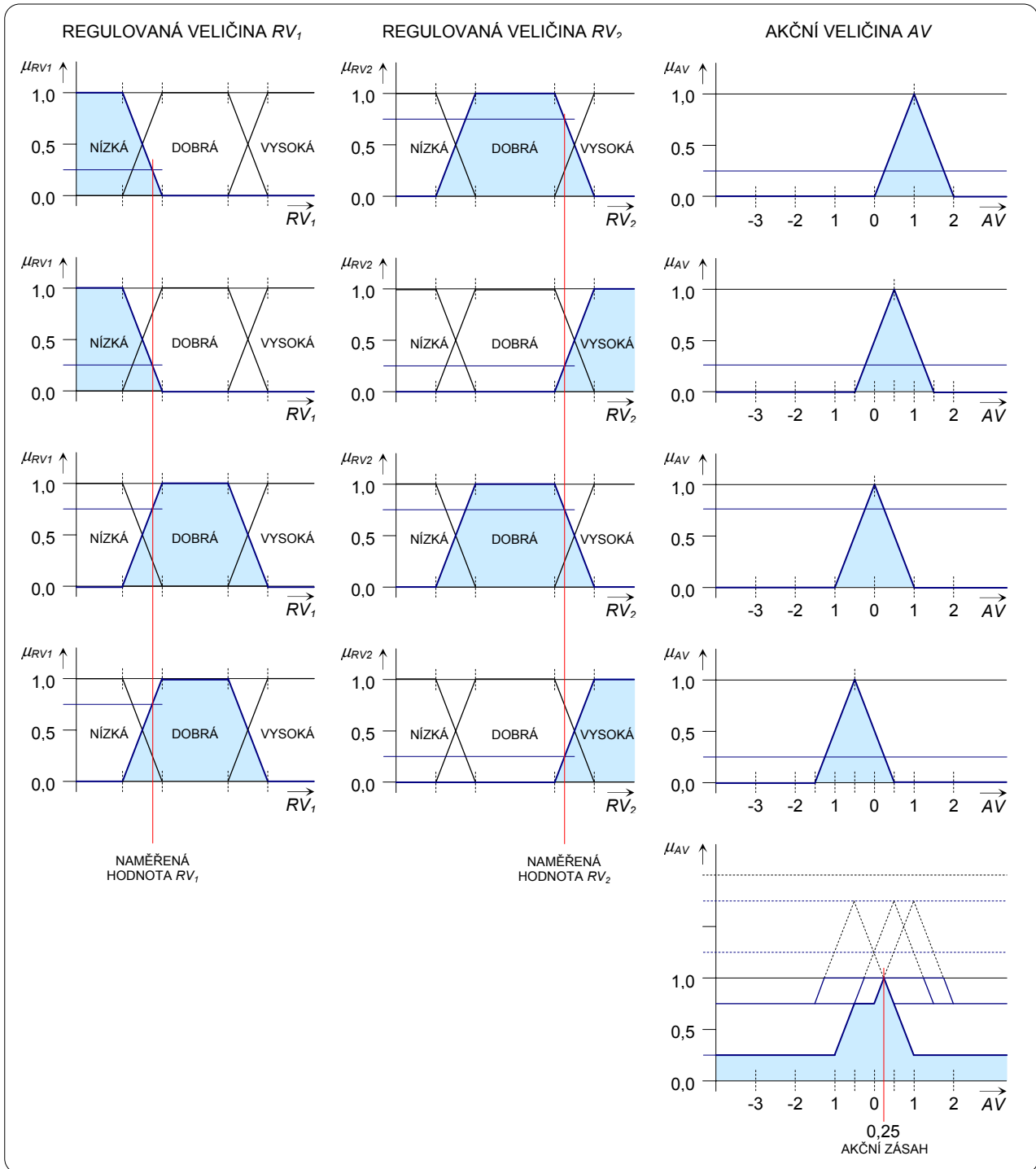
POŘ. Č.	RV_1	RV_2	AV
1	NÍZKÁ	NÍZKÁ	2,0
2	NÍZKÁ	DOBŘÁ	1,0
3	NÍZKÁ	VYSOKÁ	0,5
4	DOBŘÁ	NÍZKÁ	0,5
5	DOBŘÁ	DOBŘÁ	0
6	DOBŘÁ	VYSOKÁ	-0,5
7	VYSOKÁ	NÍZKÁ	-1,0
8	VYSOKÁ	DOBŘÁ	-2,0
9	VYSOKÁ	VYSOKÁ	-3,0

Při dvou regulovaných veličinách a jejich nejjednodušší kvantifikaci do tří úrovní, můžeme vytvořit celkem devět variací s opakováním hodnot regulovaných veličin, které odpovídají devíti možným stavům fiktivního systému. Bude-li např. neměřená hodnota regulované veličiny RV_1 *dobrá* se stupněm platnosti 1 a RV_2 *vysoká* též se stupněm platnosti 1, provede se akční zásah $-0,5$ jednotky na akční veličině (viz ř. 6 tab. 1). Obdobně tomu bude ve všech ostatních případech, kdy stupně platnosti jazykových hodnot obou regulovaných veličin budou rovny jedné – řízení (generování výsledného akčního zásahu) se bude účastnit vždy pouze jedno řídicí pravidlo jazykového modelu.

Uvažujme však situaci, kdy naměřená hodnota regulované veličiny RV_1 bude *dobrá* se stupněm platnosti 1, ale RV_2 bude *dobrá* se stupněm platnosti 0,75 a tudíž zároveň (viz obr. 5) *vysoká* se stupněm platnosti 0,25. V tomto případě se budou řízení účastnit již dvě řídicí pravidla, každé svojí vahou, která se bude rovnat menšímu z obou stupňů platnosti regulovaných veličin RV_1 a RV_2 v daném pravidlu – viz výše definice logického součinu. Konkrétně to tedy bude pravidlo č. 5 s vahou 0,75 a pravidlo č. 6 s vahou 0,25.

Další případ je graficky znázorněn na obr. 6, kdy naměřená hodnota regulované veličiny RV_1 je *nízká* se stupněm platnosti 0,25 a proto zároveň *dobrá* se stupněm platnosti 0,75 a regulovaná veličina RV_2 je *dobrá* se stupněm platnosti 0,75 a zároveň *vysoká* se stupněm platnosti 0,25. Z celkového počtu devíti řídicích pravidel jazykového modelu se bude řídicí zásah (v tomto případě) generovat ze čtyř řídicích pravidel (pravidel číslo 2, 3, 5 a 6). Získání výsledné křivky, ze které se odvozuje akční zásah, je graficky znázorněno v pravém dolním rohu obrázku. Tenkými čarami

jsou znázorněny „příspěvky“ jednotlivých řídicích pravidel (viz definice logické implikace), silnou čarou pak výsledná křivka (viz opět definice logického součinu), ze které se odvozuje akční zásah, definovaný jako střed maxima této křivky.



Obr. 6

Grafické znázornění vygenerování akčního zásahu pomocí CIC-jazykového modelu definovaného v tab. 1

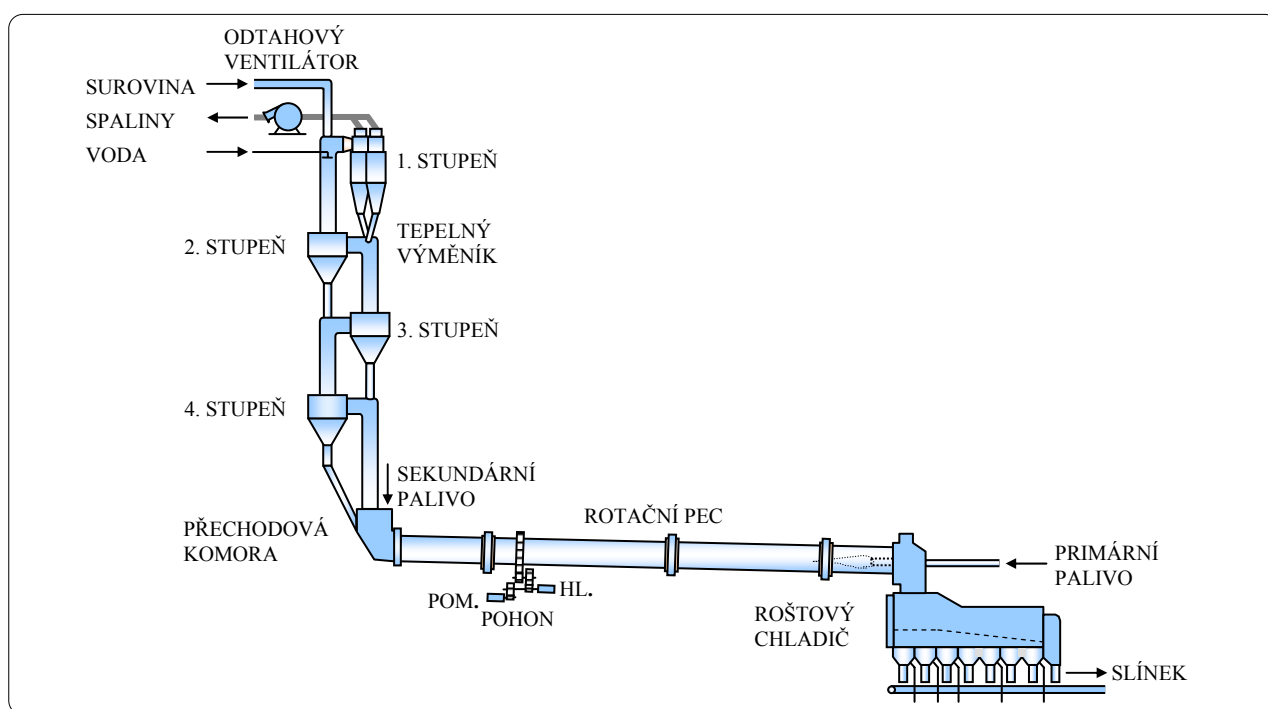
Při čtyřech regulovaných veličinách, které budou použity v reálném řídicím systému cementářské pecní linky, se tedy akční zásah může generovat z jednoho řídicího pravidla (nabývají-li všechny regulované veličiny stupně platnosti 1), nebo až z šestnácti řídicích pravidel.

Celkově můžeme (bez podrobnějších komentářů) charakterizovat CIC-jazykové modely těmito výhodami:

- Fuzzy množina reprezentující akční zásah je vždy konvexní (viz obr. 6); to znamená, že má jen jedno lokální (tj. i absolutní) maximum. K získání konkrétní hodnoty akčního zásahu tedy není zapotřebí použít jiných (např. statistických) charakteristik.
- Model neumožňuje vznik chybných regulačních zásahů (jsou-li řídicí pravidla chybně sestavena, jazykový model odpoví „nevím“. V tomto případě je nutno řídicí pravidla jazykového modelu opravit nebo doplnit další regulovanou veličinou, na základě které by se jazykový model „mohl rozhodnout“ pro konkrétní akční zásah.
- Regulované veličiny jsou regulovány spojitě, i když model pracuje s diskrétní množinou řídicích pravidel.
- Model má velmi nízkou algoritmickou náročnost a minimální nároky na paměť počítače.

4.1 STRUKTURA A STRATEGIE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Řídicí systém byl vyvíjen pro technologii se suchým způsobem výroby slínku, tj. cementářskou pecní linkou se čtyřstupňovým tepelným výměníkem, „krátkou“ rotační pecí a roštovým chladičem (viz obr. 7). Na základě rozboru procesů probíhajících v cementářské pecní lince, studia podmínek výpalu, identifikačních měření, zkušeností s „ručním“ řízením pecní linky atd., byla navržena tato struktura třístupňového řízení:



Obr. 7
Schéma cementářské pecní linky

4.2 PRVNÍ STUPEŇ ŘÍZENÍ

První stupeň řízení zajišťuje kontrolu řízeného systému (prováděnou každých 20 s), zejména z hlediska bezpečnosti provozu. Kontrola je zaměřena především na:

- zajištění bezpečnosti provozu pecní linky při spalování,
- překročení „alarmních“ mezí regulovaných veličin,
- překročení operátorem zadaných mezí některých dalších sledovaných veličin,
- kontrolu správné činnosti analyzátorů kouřových plynů (CO a O₂).

Při překročení např. povolené koncentrace CO v kouřových plynech řídicí systém automaticky vypíná elektrofiltry, v případě překročení operátorem zadaných mezí sledovaných veličin přepíná systém do ručního řízení apod.

4.3 DRUHÝ STUPEŇ ŘÍZENÍ

Jde o řízení pecní linky CIC–jazykovými modely (z matematického hlediska je pro každou akční veličinu vytvořen samostatný jazykový model), přičemž vypočtené akční zásahy jsou prováděny v rozmezí od 5 do 30 min. (viz tab. 3) v závislosti na:

- odchylce naměřených hodnot regulovaných veličin od žádané hodnoty,
- trendu regulovaných veličin.

K výpočtu času provedení akčního zásahu byl opět navržen originální algoritmus. Odchytkou a trendem hodnot regulovaných veličin je při řízení podmíněn nejen čas provedení jednotlivých akčních zásahů, ale i váhy akčních zásahů získané z CIC–jazykového modelu (viz dále).

4.4 TŘETÍ STUPEŇ ŘÍZENÍ

Třetím stupněm řízení je „zpětnovazební“ optimalizační program (opět CIC–jazykový model) adaptující parametry výpalu na základě:

- laboratorního rozboru vyráběného slinku (prováděného každé 2 hodiny),
- aktuálních parametrů surovinové moučky dávkované do pecní linky.

4.5 STRATEGIE ŘÍZENÍ

Řídicí systém tedy pracuje obecně tak, že každých 20 sekund snímá data z pecní linky a kontroluje bezpečnost jejího provozu při spalování, překročení zadaných mezí regulovaných a ostatních sledovaných veličin apod. (první stupeň řízení). Každou celou minutu (tj. každé třetí měření) pak řídicí systém počítá pro aktuální hodnoty regulovaných veličin akční zásahy a čas jejich provedení. Je-li vypočtený čas akčního zásahu menší nebo roven času, který uplynul od posledního akčního zásahu, právě vypočtený akční zásah se provede (druhý stupeň řízení). Každé dvě hodiny, po zadání litrové hmotnosti slinku (nebo obsahu volného vápna ve slinku) a stupně sycení surovinové moučky, je volán optimalizační podprogram (třetí stupeň řízení), který zpětnovazebně optimalizuje proces výpalu podle zadaných parametrů.

Kromě vlastního třístupňového řízení program dále zabezpečuje vypínání elektrofiltrů při překročení kritické meze koncentrace CO v kouřových plynech (tento případ však během provozu řídicího systému nenastal), adaptaci charakteristických funkcí jazykových hodnot některých regulovaných veličin v případě výpadku vstřikování vody mezi první a druhý stupeň výměníku a jednorázové zvýšení resp. snížení množství primárního paliva při výpadku resp. obnovení dodávky sekundárního paliva atd.

4.6 CIC–JAZYKOVÉ MODELY DRUHÉHO STUPNĚ ŘÍZENÍ

Na základě zmíněných rozborů procesů probíhajících v cementářské pecní lince, studia podmínek výpalu z hlediska chemické i technické termodynamiky, identifikačních měření provedených na pecní lince, zkušeností s „ručním“ řízením pecní linky atd., jsem stanovil regulované a akční veličiny a vztahy mezi nimi, které se pochopitelně v průběhu ladění řídicího systému postupně upřesňovaly.

Po provedených rozbořech byly pro druhý stupeň řízení vybrány čtyři regulované veličiny (diskuse jejich výběru není na tomto místě legitimní), přičemž těmto veličinám byla přiřazena jistá priorita (důležitost). Byly to:

- teplota kouřových plynů před odtahovým ventilátorem,
- proudový odběr hlavního pohonu rotační pece,
- teplota ve slinovacím pásmu rotační pece,
- koncentrace O₂ v kouřových plynech (horní analýza).

Každá z těchto regulovaných veličin byla kvantifikována výše uvedeným způsobem do tří úrovní. Řízená cementářská pecní linka se tak mohla nacházet v některém z $3^4 = 81$ možných provozních stavů, čemuž v řídicím systému odpovídalo 81 řídicích pravidel.

V tomto druhém stupni řízení byly akční zásahy prováděny pomocí čtyř akčních veličin, kterými jsou:

- změna množství sekundárního paliva,
- změna dávkování surovinové moučky,
- změna otáček rotační pece,
- změna množství primárního paliva dávkovaného do hlavního hořáku rotační pece.

Poznámka. Konkrétní průběh charakteristických funkcí regulovaných i akčních veličin zde záměrně neuvádím.

Druhý (hlavní) stupeň řízení je tak tvořen čtyřmi jazykovými modely. Při jejich sestavování jsem postupoval tak, že jsem vytvořil všechny možné variace (s opakováním) jazykových hodnot regulovaných veličin. Popsal jsem tak všech 81 základních provozních stavů řízeného systému. Pro každý takto popsaný stav pecní linky jsem definoval příslušné akční zásahy pro všechny čtyři akční veličiny. Získal jsem tak čtyři jazykové modely po 81 prohlášeních (řídicích pravidlech).

Vytvořená prohlášení jsem pak testoval CIC–jazykovým modelem, a to tak, že jsem programovou cestou generoval všechny možné stavy pecní linky, včetně stavů, kdy každá z regulovaných veličin byla dobrá se stupněm platnosti v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, a analyzoval odpovědi (akční zásahy) jednotlivých modelů. Úkolem tohoto kroku návrhu bylo najít případná sporná prohlášení. Ta se v modelu vyskytla. Bylo to v několika případech, kdy byly ne zcela přesně definovány akční zásahy v nestandardních stavech pecní linky. Důvod sporu jsem pak odhalil CI&–jazykovým modelem a po další analýze tato sporná prohlášení opravil.

Všechna prohlášení jsem pak během zkušebního provozu dále upřesňoval, podobně jako tvary příslušnostních funkcí jazykových hodnot (bylo to zejména z hlediska dynamiky provádění akčních zásahů). Výsledná podoba jazykových modelů druhého stupně řízení je nastíněna v tab. 2, ve které je (záměrně) opět uvedena pouze nepatrná část řídicích pravidel.

Tab. 2: Příklad řídicích pravidel jazykového modelu druhého stupně řízení (pro jednu akční veličinu)

Poř. číslo	REGULOVANÉ VELIČINY				AKČNÍ VELIČINA
	Teplota kouř. plynů před odtahovým ventilátorem [°C]	Teplota ve slinovacím pásmu [°C]	Proudový odběr hlavního pohonu pece [A]	Koncentrace O ₂ v kouřových plynech [%]	Změna dávkování surovinové moučky [t/h]
⋮					
68	VYSOKÁ	DOBŘÁ	DOBŘÝ	DOBŘÁ	+ 1
69	VYSOKÁ	DOBŘÁ	DOBŘÝ	VYSOKÁ	+ 2
70	VYSOKÁ	DOBŘÁ	VYSOKÝ	NÍZKÁ	+ 2
71	VYSOKÁ	DOBŘÁ	VYSOKÝ	DOBŘÁ	+ 2
72	VYSOKÁ	DOBŘÁ	VYSOKÝ	VYSOKÁ	+ 3
73	VYSOKÁ	VYSOKÁ	NÍZKÝ	NÍZKÁ	+ 2
⋮					

4.7 ČAS PROVEDENÍ AKČNÍHO ZÁSAHU

V řídicím systému je originálním způsobem řešen i čas provedení vypočteného akčního zásahu t_{AZ} v závislosti na stavu pecní linky. Tento čas je závislý na odchylkách hodnot regulovaných veličin od požadovaných hodnot, na jejich trendech a na stupni platnosti jejich jazykových hodnot *dobrý*.

Pro výpočet času t_{AZ} mezi jednotlivými akčními zásahy pak můžeme psát tyto jednoduché vztahy:

- $t_{AZ} = \min \{t_{AZ\ RV1}, t_{AZ\ RV2}, t_{AZ\ RV3}, t_{AZ\ RV4}\}$,
- $t_{AZ\ RVi} = \text{int} (t_{AZ\max\ RVi} - t_{AZ\text{dif}\ RVi} \cdot (1 - \mu_{\text{DOBRY}}(RV_i)))$ pro $i = 1, 2, 3, \text{ a } 4$,
- $t_{AZ\text{dif}\ RVi} = (t_{AZ\max\ RVi} - t_{AZ\min\ RVi})$.

Čas provedení akčního zásahu se tak v závislosti na stupni platnosti přísl. funkce *dobrý* jednotlivých regulovaných veličin mění spojitě od maximálního po minimální čas uvedený v tab. 3.

Tab. 3: Závislost času provedení akčních zásahů a jejich vah na odchylce a trendu regulovaných veličin

Znaménko odchylky RV_i od požadované hodnoty		+	+	-	-
Znaménko trendu RV_i		+	-	-	+
Čas provedení akčního zásahu – minimální	$t_{AZ\min\ RVi}$ [min]	10	5	5	10
Čas provedení akčního zásahu – maximální	$t_{AZ\max\ RVi}$ [min]	30	20	15	20
Váha akčního zásahu	ζ_{RVi} [-]	1.00	1.00	1.25	0.75

4.8 VÁHA AKČNÍHO ZÁSAHU

Stavem pecní linky jsem podmínil nejen čas provádění akčních zásahů, ale i jejich „váhy“. Váhy akčních zásahů jsou konstanty (viz tab. 3), kterými se vynásobí hodnoty akčních zásahů získané z jazykových modelů. Máme tak možnost za daného stavu pecní linky, kdy při stejných hodnotách regulovaných veličin generují jazykové modely vždy stejné akční zásahy, tyto zásahy modifikovat v závislosti na odchylce regulovaných veličin od žádané hodnoty, ale hlavně jejich trendu. Váhy nám umožňují provést akční zásahy ve vypočtené výši (je-li pecní linka stabilizována), akční zásahy „zdůraznit“ vynásobením vypočteného akčního zásahu vahou 1.25 (např. jde-li pec do „fuku“ a potřebujeme tento nepříznivý trend rychle zvrátit), nebo naopak akční zásah „zjemnit“ jeho vynásobením vahou 0.75. Při stejných hodnotách regulovaných veličin tak může jazykový model (v závislosti na trendu řízené soustavy) generovat celkem tři různé akční zásahy.

4.9 CIC–JAZYKOVÉ MODELY TŘETÍHO STUPNĚ ŘÍZENÍ

Třetí stupeň řízení je vlastně optimalizační CIC–jazykový model, který zpětnovazebně adaptuje řídicí systém (upravuje příslušnostní funkce regulovaných veličin jazykových modelů druhého stupně řízení) dle kvality vyráběného produktu, a to v závislosti na již uvedeném laboratorním rozboru slinku (litrové hmotnosti slinku nebo obsahu volného vápna ve slinku) a aktuálních parametrech surovinové moučky (stupně sycení). Tato adaptace je prováděna zpětnovazebně zejména ze dvou důvodů:

- laboratorní rozbor slinku jsou prováděny jednou za dvě hodiny,
- z důvodu velkého časového zpoždění informací (informace z laboratoře o parametrech slinku jsou opožděny za přítomností slinku ve slinovacím pásmu rotační pece, které má na jeho kvalitu rozhodující vliv, více jak o hodinu).

Třetí (adaptivní) stupeň řízení pracuje tak, že na základě zjištěných hodnot litrové hmotnosti slinku a stupně sycení surovinové moučky přizpůsobuje charakteristické funkce regulovaných veličin tím, že tyto funkce „posune po ose x “ vlevo nebo vpravo o konstantu definovanou v jazykovém modelu pro každou regulovanou veličinu zvlášť.

Je-li např. ve slinku velké množství volného vápna, pracuje rotační pec v „nedopalu“, tzn., že teplota ve slinovacím pásmu rotační pece je nízká. V tomto případě jazykový model třetího stupně řízení automaticky posune charakteristické funkce regulované veličiny *teplota ve slinovacím pásmu* doprava, tj. k vyšší hodnotám. Teplota, která byla doposud jazykovým modelem považována za „dobrou“, se tak stane „nízkou“ a systém začne generovat takové akční zásahy, aby se teplota zvýšila a stala se „dobrou“ podle adaptovaných funkcí. Obdobně se upraví charakteristické funkce ostatních regulovaných veličin.

4.10 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Řídicí systém byl nejdříve zkoušen off-line. Byl připojen k technologickému procesu, snímal hodnoty veškerých veličin, zobrazoval je na displeji řídicího počítače a generoval akční zásahy. Ty však byly pouze zobrazovány na obrazovce počítače a operátor je prováděl ručně. Systém tak pracoval jako „rádce operátora“.

Teprve po důkladném odladění řídicího systému, během kterého docházelo jak k úpravám příslušnostních funkcí všech veličin, tak k úpravám jednotlivých řídicích pravidel jazykových modelů, byl systém připojen k řízenému procesu on-line.

Zavedení a on-line provozování (byť relativně krátkodobé) popsaného řídicího systému cementářské pecní linky v nejmenované cementárně mělo tyto výsledky:

- zvýšila se produkce vyráběného slinku (ve sledovaném období cca o 3,5 %) při stejném tepelném příkonu pecní linky,
- snížila se celková energetická náročnost výroby, a to jak měrná spotřeba paliva (cca též o 3,5 %), tak i měrná spotřeba elektrické energie (cca o 1,6 kWh/t surovinové moučky),
- rovnoměrným provozováním pecní linky se snížilo tepelné namáhání vyzdívky rotační pece,
- zvýšila se kvalita vyráběného slinku, čímž se umožnil posun sortimentu výroby směrem k vyšším značkám cementů.

Při uvedeném snížení energetické náročnosti výroby by se daly roční úspory na energiích při současných cenách předpokládat v desítkách miliónů korun na jedné pecní lince.

Na automatické řízení byla pecní linka přepojována většinou v případě jejího rovnovážného stabilizovaného stavu. Řídicí systém jsme však měli možnost vyzkoušet i při nestandardních stavech, jako při nájezdu pecní linky po odstávce apod. Bylo prokázáno, že po odstávce pece je řídicí systém schopen převzít automatické řízení již při dávkování cca 75 t/h surovinové moučky (průměrné dávkování je 120 t/h) a během čtyř hodin dovést pecní linku na maximální výkon. (Výkon pecní linky byl závislý na parametrech surovinové moučky. Při její dobré reaktivitě dosahoval při automatickém řízení až 128 t/h surovinové moučky, což odpovídalo výkonu pecní linky cca 1840 t slinku za den. Garantovaný výkon pecní linky je přitom 1600 t/den.)

Celkově lze konstatovat, že řídicí systém při zkušebním provozu prokázal, že nasazení a trvalé provozování popsaného řídicího systému je možné. Aby jeho efektivita byla ještě vyšší, byl by nutný jeho další vývoj spojený s provozními měřeními a další identifikací řízeného procesu. Toto „laborování“ s reálným procesem mi však již neumožnil nový majitel cementárny, který v ní realizuje své záměry. Z tohoto důvodu též není systém v praxi v současné době provozován.

5 KVALITATIVNÍ MODELY CEMENTÁŘSKÉ PECNÍ LINKY

Ve třetí části práce je položen teoretický základ další z metodologií, spadající do oblasti umělé inteligence, a to kvalitativnímu modelování, které je též prakticky využitelné při modelování systémů uvedených vlastností. Kvalitativní modelování vzniklo přibližně před 50ti lety, jako produkt realizací vojenských aplikací. Je to technika založená na principech kvalitativní trendové analýzy, použité ke generování všech možných tzv. dynamických (časových) scénářů. Na rozdíl od kvantitativních postupů řešení zde nevádí jistá míra neznalostí. Přesné informace jsou zde nahrazeny formulacemi vykreslujícími znalosti nabyté na bázi common sense a dostatečně dlouhé praxe.

Kvalitativní model může být založen pouze na množině znalostních položek (hlubokých či mělkých znalostech), nebo může být kombinací obvyklých přesných kvantitativních rovnic a kvalitativního znalostního popisu. Výsledkem řešení kvalitativního modelu je pak množina kvalitativních řešení (tzv. scénářů) a množina všech možných přechodů mezi těmito řešeními. Základními výhodami kvalitativního modelování je skutečnost, že nejsou přítom zapotřebí žádné numerické hodnoty parametrů a konstant a že množina scénářů je prokazatelně kompletní.

Bude-li každý scénář reprezentován uzlem, a všechny možné přechody mezi nimi budou znázorněny orientovanými šipkami, pak výsledek řešení kvalitativního modelu může být interpretován jako přechodový graf. Jakékoliv chování studovaného systému v čase je pak možné charakterizovat jako orientovanou cestu v přechodovém grafu. Přechodový graf je tudíž způsob, jak velmi koncentrovaným způsobem popsat všechna možná neustálená chování studovaného systému. Přechodový graf může být s úspěchem použit i pro testování řídicího systému. Jestli je navržený řídicí systém schopen zvládnout všechna možná neustálená chování systému, tak je navržen dobře.

„Prosté“ řízení daného systému (technologického procesu) však nebývá konečným cílem, kterým je – kromě výroby příslušného produktu v požadované kvalitě a množství – např. minimalizace ekologického dopadu výroby, maximalizace zisku apod. Při řešení těchto problémů lze opět do kvalitativního modelu zakomponovat množinu nezávisle proměnných veličin a účelových funkcí, na základě kterých jsme schopni dosáhnout žádaného cíle.

Návrh kvalitativních modelů cementářské pecní linky, které jsou založeny na kvalitativních znalostech o jejím procesním chování, je proveden a popsán v šesté části práce. První uvedený kvalitativní model charakterizuje chování cementářské pecní linky, druhý pak, na základě formulace kvalitativních závislostí změn akčních veličin při daných trendech veličin regulovaných, definuje akční zásahy použitelné pro řízení.

5.1 PRINCIPY KVALITATIVNÍHO POPISU

Základním znakem kvalitativního uvažování je přechod k novému oboru proměnných, kdy místo reálných čísel, typických pro konvenční kvantitativní popis, se oborem hodnot stává konečná a uspořádaná množina hodnot, která umožňuje kvalitativně charakterizovat aktuální hodnoty kvantitativních proměnných.

Kvalitativní hodnota proměnné je tedy dána údajem, charakterizujícím polohu aktuální hodnoty kvantitativní proměnné vůči jejím významným mezním hodnotám a údajem o trendu (růstu či klesání) této hodnoty. Poloha aktuální hodnoty kvalitativní proměnné bývá při kvalitativním modelování charakterizována pomocí tří kvalitativních hodnot vyjádřitelných výroky:

kladná (rostoucí/positivní), nulová (konstantní) či záporná (klesající/negativní).

Tyto kvalitativní hodnoty kvalitativní proměnné X_i budeme dále obecně označovat symboly $K+$ (*kladná*), $K0$ (*nulová*) a $K-$ (*záporná*). Oborem hodnot kvalitativních proměnných je tedy množina kvalitativních hodnot $\{K+, K0, K-\}$.

Kvalitativní dynamické chování systému je popsáno pomocí hodnot derivací jeho proměnných. Zkušenosti s řešením reálných inženýrských problémů ukazují, že pro popis chování systémů je postačující uvažovat pouze první a druhou časovou derivaci dané proměnné. Dynamické chování kvalitativní proměnné X_i tak popisujeme ve tvaru tripletu:

$$[X_i, DX_i, DDX_i],$$

kde $DX_i = dX_i/dt$ je první a $DDX_i = d^2X_i/dt^2$ druhá derivace proměnné X_i vzhledem k nezávisle proměnné t (což bývá většinou čas).

Pro n kvalitativních proměnných modelu ($X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$) pak dynamické chování systému popisujeme pomocí n tripletů (tzv. n -tripletu):

$$[X_1, DX_1, DDX_1], \dots, [X_i, DX_i, DDX_i], \dots, [X_n, DX_n, DDX_n].$$

N -triplet definuje kvalitativní stav soustavy ve zvoleném časovém okamžiku, který je specifikací kvalitativního řešení n -dimenzionálního kvalitativního problému. Uvedený n -triplet nazýváme *kvalitativním scénářem*.

Řešením modelu nazveme množinu všech možných scénářů:

$$\{ [X_1, DX_1, DDX_1], \dots, [X_i, DX_i, DDX_i], \dots, [X_n, DX_n, DDX_n] \}_j, \text{ kde } j = 1, 2, \dots, m.$$

Výše uvedené skutečnosti můžeme stručně shrnout takto:

Kvalitativní průběh (průběh kvalitativní proměnné v čase) je funkce, která přiřazuje tzv. významným okamžikům, a intervalům mezi nimi, kvalitativní hodnoty. Časová osa je tak reprezentována uspořádanou množinou symbolů, odpovídajících významným okamžikům kvalitativní proměnné.

Kvalitativní vazby jsou relace, definované na kvalitativních hodnotách tak, aby co nejpřesněji popisovaly běžné aritmetické operace a vztahy derivací, rovností a nerovností. (Na rozdíl od kvantitativního popisu, kde jsou vazby funkcemi, jde v případě kvalitativních vazeb o relace, neboť výsledek aplikace kvalitativní operace na kvalitativní hodnoty nelze určit vždy jednoznačně. V této nejednoznačnosti spočívají některé obtíže kvalitativních simulací.)

Kvalitativní simulace spočívá v odvození kvalitativního průběhu jeho proměnných ze soustavy kvalitativních rovnic, které systém charakterizují, a z kvalitativních hodnot nezávisle proměnných ve zvoleném časovém okamžiku. Jinými slovy: jde o nalezení množiny všech kvalitativních scénářů.

Kvalitativní scénář definuje formou n -tripletu kvalitativní stav (dynamické chování) systému ve zvoleném časovém okamžiku.

Kvalitativní model soustavy je množina všech možných kvalitativních scénářů. Je vyjádřen pomocí formulí (kvalitativních rovnic, konfluencí), vytvořených z množiny kvalitativních proměnných a kvalitativních vazeb.

Všechny možné přechody mezi množinou jednodimenzionálních scénářů lze vygenerovat jednoduchým algoritmem. Tyto jednodimenzionální přechody jsou zachyceny v tab. 4, ze které je zřejmé, mezi kterými jednotlivými scénáři může dojít k přechodovému ději. Zároveň tato tabulka ukazuje, přes které další scénáře je možný přechod mezi dvěma scénáři, které přímý přechod mezi sebou neumožňují. K jejich vygenerování byl použit program Q-SENECA (zkratka je odvozena z anglického názvu Qualitative Sensible Expert Catalogue), což je specializovaný program vytvořený na Fakultě podnikatelské VUT v Brně.

Vstupem programu je kvalitativní model zapsaný v instrukcích programu, přičemž vstupním kvalitativním proměnným v něm můžeme přidělit omezující podmínky. V programu se dále specifikuje, pro které proměnné chceme výstupy počítat. Výstupy je pak seznam všech vygenerovaných scénářů, ve kterém každá počítaná proměnná je reprezentována kvalitativním tripletem, a soupis všechny možných přechodů mezi těmito vygenerovanými scénáři.

Tab. 4: Tabulka všech možných jednodimenzionálních přechodů

PŘECHOD ČÍSLO	Z	⇒	DO	NEBO DO	NEBO DO	NEBO DO	NEBO DO	NEBO DO	NEBO DO
			(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	+++	⇒	++0						
2	++0	⇒	+++	++-					
3	+-	⇒	++0	+0-	+00				
4	+0+	⇒	+++						
5	+00	⇒	+++	+--					
6	+0-	⇒	+--						
7	+ - +	⇒	+ - 0	+ 0 +	+ 0 0	0 - +	0 0 +	0 0 0	0 - 0
8	+ - 0	⇒	+ - +	+ - -	0 - 0				
9	+ - -	⇒	+ - 0	0 - -	0 - 0				
10	0 ++	⇒	++0	++-	+++				
11	0 + 0	⇒	++0	++-	+++				
12	0 + -	⇒	++-						
13	0 0 +	⇒	+++						
14	0 0 0	⇒	+++	---					
15	0 0 -	⇒	---						
16	0 - +	⇒	--+						
17	0 - 0	⇒	--0	--+	---				
18	0 - -	⇒	--0	--+	---				
19	- ++	⇒	- + 0	0 ++	0 + 0				
20	- + 0	⇒	- + -	- ++	0 + 0				
21	- + -	⇒	- + 0	- 0 -	- 0 0	0 + -	0 0 -	0 0 0	0 + 0
22	- 0 +	⇒	- ++						
23	- 0 0	⇒	- ++	---					
24	- 0 -	⇒	---						
25	- - +	⇒	- - 0	- 0 +	- 0 0				
26	- - 0	⇒	---	- - +					
27	- - -	⇒	- - 0						

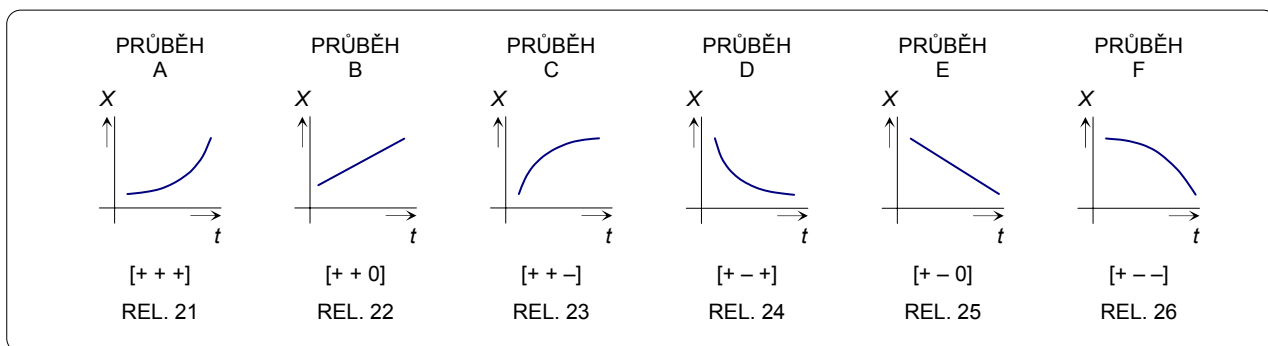
Multidimenzionální přechody pak musí korespondovat s přechody v tab. 4 pro všech n proměnných, tj. pro všech n jednodimenzionálních přechodů.

5.2 KVALITATIVNÍ MODEL CHOVÁNÍ CEMENTÁŘSKÉ PECNÍ LINKY

Pro zjednodušení modelu jsem v těchto ilustrativních modelech neuvažoval s regulovanou veličinou *teplota ve slinovací pásmu rotační pece* (T_{SP}), protože průběh této veličiny víceméně kopíruje průběh regulované veličiny *proudový odběr hlavního pohonu rotační pece* (PO). Model je tedy vytvořen s použitím těchto proměnných (regulovaných a akčních veličin):

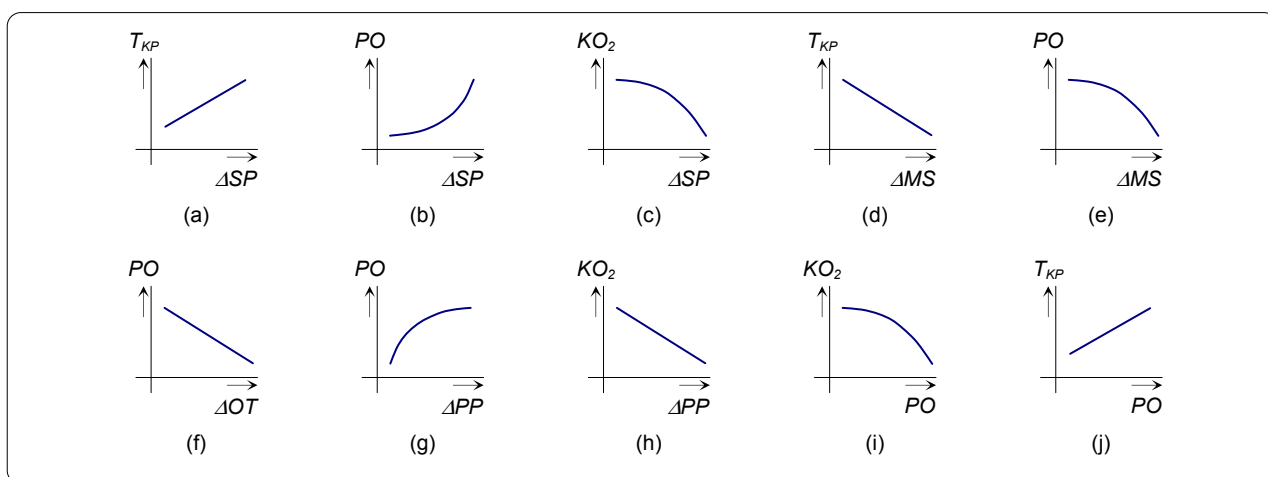
- regulované veličiny: *teplota kouřových plynů před odtah. ventilátorem* (TKP), *proudový odběr hl. pohonu rotační pece* (PO) a *koncentrace O_2 v kouřových plynech – horní analýza* (KO_2),
- akční veličiny: *změna množství sekundárního paliva* (ΔSP), *změna množství surovinové moučky dávkované do tepelného výměníku* (ΔMS), *změna otáček rotační pece* (ΔOT) a *změna množství primárního paliva* (ΔPP).

Vytvářené modely jsou založené výhradně na bezrovnocových znalostech. Možné typy kvalitativních vztahů jednotlivých veličin (konstantní závislost nás z hlediska generování akčních zásahů nemusí zajímat) jsou zachyceny a popsány na obr. 8.



Obr. 8
Možné kvalitatívne vzťahy veličín a jejich značení

Model M_1 cementárskej pecní linky je tvorený sústavou desiatich kvalitatívnych vzťahů, ktoré charakterizujú její chování. Tyto kvalitatívne vzťahy byly vytvořeny na základě rozboru procesů probíhajících v cementárskej pecní lince, studia podmínek výpalu z hlediska chemické i technické termodynamiky, identifikačních měření provedených na pecní lince, a znalostí nabytých na bázi common sense. Uvedené vzťahy, definující kvalitatívne vzťahy mezi jednotlivými veličinami, vesměs pak závislosti regulovaných veličín na změnách akčních veličín, jsou graficky znázorněny na obr. 9 a popsány v tab. 5.



Obr. 9
Model M_1 – kvalitatívne popis chování pecní linky (založený na bezrovnícových znalostech)

Tab. 5: Model M_1 – popis kvalitatívnych vzťahů modelu chování cementárskej pecní linky

POŘ. ČÍSLO	X	Y	OZN. VZTAHU	TYP PŘECH.	TRIPLET	KÓD
1	ΔSP	T_{KP}	(a)	B	++0	22
2	ΔSP	PO	(b)	A	+++	21
3	ΔSP	KO_2	(c)	F	+--	26
4	ΔMS	T_{KP}	(d)	E	+ - 0	25
5	ΔMS	PO	(e)	F	+ --	26
6	ΔOT	PO	(f)	E	+ - 0	25
7	ΔPP	PO	(g)	C	++-	23
8	ΔPP	KO_2	(h)	E	+ - 0	25
9	PO	KO_2	(i)	F	+ --	26
10	PO	T_{KP}	(j)	B	++0	22

Druhý a třetí sloupec tab. 5 specifikuje veličiny X a Y vstupující do daného kvalitativního vztahu, zbývající sloupce pak indikují kvalitativní závislosti těchto veličin. Sloupec OZNAČENÍ VZTAHU odkazuje na kvalitativní závislosti definované v obr. 9 a sloupce TYP PŘECHODU a TRIPLET na označení těchto závislostí uvedené v obr. 8. V posledním sloupci tabulky je uveden KÓD, specifikující typ přechodu, zadávaný do programu Q-SENECA.

Z důvodu nemožnosti vkládat do programu symboly a indexy, byly názvy regulovaných a akčních veličin pozměněny takto (pro regulované veličiny byly přitom zvoleny dvoupísmenové zkratky, pro akční veličiny třípísmenové): $T_{KP} \rightarrow TP$, $PO \rightarrow PO$, $KO_2 \rightarrow KO$, $\Delta SP \rightarrow DSP$, $\Delta MS \rightarrow DMS$, $\Delta OT \rightarrow DOT$ a $\Delta PP \rightarrow DPP$. Vstupy programu Q-SENECA, definující kvalitativní vztahy, pak mají tento tvar:

1	22	DSP	TP	0	6	25	DOT	PO	0
2	21	DSP	PO	0	7	23	DPP	PO	0
3	26	DSP	PO	0	8	25	DPP	KO	0
4	25	DMS	TP	0	9	26	PO	KO	0
5	26	DMS	PO	0	10	22	PO	TP	0

Výstupem programu je množina scénářů a množina přechodů. Kompletní množina všech existujících scénářů i přechodů je však v tomto konkrétním případě příliš velká; např. množina scénářů má celkem 1133 řešení. Je účelné proto specifikovat soubor tzv. dotazů, které budou (podle principů common sense) omezovat generátor scénářů. Můžeme např. vznést legitimní požadavek na vygenerování pouze takových scénářů, u kterých je hodnota všech veličin kladná (kvantitativní hodnoty regulovaných i akčních veličiny nabývají za provozu pevné linky kladných číselných hodnot; nemohou být nulové, ani záporné). Takový soubor dotazů zadávaný do programu Q-SENECA má tvar:

DSP +XX
DMS +XX
DOT +XX
DPP +XX
TP +XX
PO +XX
KO +XX

Jak je patrné, dotazy jsou charakterizovány specifikovanými tripletly. Např. použitý triplet [+ X X] indikuje, že hodnota dané veličiny je (má být) kladná a že první a druhá derivace nejsou známy, resp. nás nezajímají. Při této konkrétní volbě se množství vygenerovaných scénářů omezí na pouhých jedenáct (viz tab. 5).

Tab. 5: Model M_1 – množina scénářů vygenerovaná na základě uvedených kvalitativních vztahů a omezení

SCÉNÁŘ Č.	TP	PO	KO	DMS	DOT	DPP	DSP
1	+++	+++	+++	+--	+--	+++	+--
2	++-	++-	++-	+ - +	+ - +	++-	+ - +
3	++-	++-	++-	+ - +	+ - +	++0	+ - 0
4	++-	++-	++-	+ - +	+ - +	+++	+ --
5	+0+	+0+	+0+	+0-	+0-	+0+	+0-
6	+00	+00	+00	+00	+00	+00	+00
7	+0-	+0-	+0-	+0+	+0+	+0-	+0+
8	+ - +	+ - +	+ - +	+++	+++	+ - +	+++
9	+ --	+ --	+ --	+++	+++	+ --	+++
10	+ --	+ --	+ --	+++	+++	+ - 0	+ + 0
11	+ --	+ --	+ --	+++	+++	+ - +	+ + -

Vygenerované scénáře pak lze interpretovat takto (viz např. scénář č. 1 z tab. 5): Zvyšování teploty kouřových plynů před odtahovým ventilátorem $[+ + +]$, nárůst proudového odběru hlavního pohonu rotační pece $[+ + +]$ i zvyšování koncentrace O_2 v kouřových plynech $[+ + +]$, je způsobeno snížením množství surovinové moučky dávkované do tepelného výměníku $[+ - -]$ a snížením otáček rotační pece $[+ - -]$ a zvýšením množství primárního paliva $[+ + +]$ i při mírném snížení množství paliva sekundárního $[+ - -]$.

Tento scénář lze z technologického hlediska interpretovat také takto: Snížíme-li množství surovinové moučky dávkované do tepelného výměníku, pak:

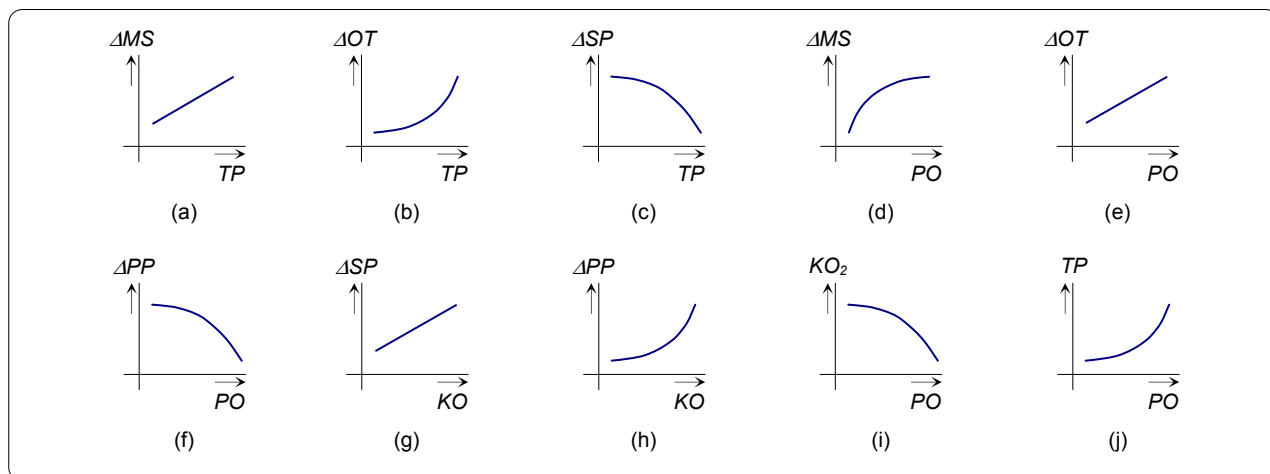
- zmenší se množství tepelné energie předávané spaliny surovinové moučky v tepelném výměníku, čímž dojde k mírnému nárůstu teploty kouřových plynů před odtahovým ventilátorem,
- do slinovacího pásma rotační pece přijde menší množství surovinové moučky, navíc lépe tepelně připravené, což se projeví – při stejném množství dodávané tepelné energie – následným zvýšením teploty ve slinovacím pásmu, a tím i zvýšením proudového odběru hlavního pohonu rotační pece; zvýšení teploty ve slinovacím pásmu má též vliv na zvýšení teploty odcházejících kouřových plynů.

K nárůstu uvažovaných teplot dojde i po zvýšení množství primárního paliva. Pakliže zároveň snížíme množství sekundárního paliva, může se mírně zvýšit koncentrace O_2 v kouřových plynech před odtahovým ventilátorem.

Obdobně bychom mohli interpretovat i ostatní vygenerované scénáře; uvedme ještě např. interpretaci posledního z nich (scénáře č. 11 z tab. 5): Snížení teploty kouřových plynů před odtahovým ventilátorem $[+ - -]$, snížení proudového odběru hlavního pohonu rotační pece $[+ - -]$ a pokles koncentrace O_2 v kouřových plynech $[+ - -]$, je způsobeno zvýšením množství surovinové moučky dávkované do tepelného výměníku $[+ + +]$ a zvýšením otáček rotační pece $[+ + +]$ a velkým snížením množství paliva primárního $[+ - +]$. Nežádoucím poklesu teplot při provedených zásazích však zvýšení množství sekundárního paliva $[+ + -]$ nezabrání.

Z technologického hlediska jde o špatný regulační zásah, kdy navýšení množství surovinové moučky, dávkované do tepelného výměníku, a navíc zvýšení otáček rotační pece, nebylo podpořeno úměrným zvýšením množství dodávané tepelné energie, konkrétně došlo dokonce ke snížení množství rozhodujícího primárního paliva.

Uvedené scénáře tohoto kvalitativního modelu tak velmi věrně charakterizují chování cementářské pecní linky. Zkusme však vytvořit model (M_2) jejího řízení.



Obr. 10

Model M_2 – kvalitativní popis řízení pecní linky (založený na bezrovnocových znalostech)

5.3 KVALITATIVNÍ MODEL ŘÍZENÍ CEMENTÁŘSKÉ PECNÍ LINKY

Zatím jsme uvažovali model M_1 , popisující chování cementářské pecní linky ve formě závislosti regulovaných veličin na změnách akčních veličin. Zkusme nyní tyto závislosti „otočit“ a formulovat požadované změny akčních veličin při daných trendech veličin regulovaných. Vytvořit tedy model M_2 , který by definoval akční zásahy použitelné pro řízení.

Nechť model M_2 je reprezentován soustavou deseti kvalitativních vztahů – viz obr. 10 a tab. 6.

Tab. 6: Model M_2 – popis kvalitativních vztahů modelu řízení cementářské pecní linky

POŘ. ČÍSLO	X	Y	OZN. VZTAHU	TYP PŘECH.	TRIPLET	KÓD
1	T_{KP}	ΔMS	(a)	B	++0	22
2	T_{KP}	ΔOT	(b)	A	+++	21
3	T_{KP}	ΔSP	(c)	F	+--	26
4	PO	ΔMS	(d)	C	++-	23
5	PO	ΔOT	(e)	B	++0	22
6	PO	ΔPP	(f)	F	+--	26
7	KO_2	ΔSP	(g)	B	++0	22
8	KO_2	ΔPP	(h)	A	+++	21
9	PO	KO_2	(i)	F	+--	26
10	PO	T_{KP}	(j)	A	+++	21

I v tomto případě je počet vygenerovaných scénářů příliš vysoký. Proto použijeme i u tohoto modelu specifikaci omezující generátor scénářů na vygenerování pouze takových scénářů, u kterých je hodnota všech veličin kladná. Při daných kvalitativních vztazích a uvažovaném omezení je modelem množina patnácti scénářů (tab. 7).

Tab. 7: Model M_2 – množina scénářů vygenerovaná na základě kvalitativních vztahů a definovaných omezení

SCÉNÁŘ Č.	TP	PO	KO	DMS	DOT	DPP	DSP
1	+--	+--	+++	+--	+--	+++	+++
2	+--	+--	++0	+--	+--	+++	++0
3	+--	+--	++-	+--	+--	++-	++-
4	+--	+--	++-	+--	+--	+++	++-
5	+--	+--	++-	+--	+--	++0	++-
6	+--	+--	++-	+--	+--	++-	++-
7	+0-	+0-	+0+	+0-	+0-	+0+	+0+
8	+00	+00	+00	+00	+00	+00	+00
9	+0+	+0+	+0-	+0+	+0+	+0-	+0-
10	++-	++-	++-	++-	++-	++-	++-
11	++-	++-	+0-	++-	++-	++-	+0-
12	+++	+++	+--	+++	+++	+--	+--
13	++-	++-	+--	++-	++-	++-	+--
14	++-	++-	+--	++-	++-	+0-	+--
15	++-	++-	+--	++-	++-	+--	+--

Vygenerovaných scénářů je sice patnáct, ale podrobnějším pohledem do tabulky zjistíme, že různých stavů – budeme-li za stav pecní linky uvažovat pouze od sebe různou kombinaci tripletů regulovaných veličin – je pouze jedenáct; stav č. 5 je totožný se stavem č. 6 (pro TP , PO a KO) a totožné jsou i stavy č. 13, 14 a 15. Tyto stavy se liší navrhovanými akčními zásahy, a to pouze v hodnotě jedné proměnné (změně množství primárního paliva).

Vygenerované scénáře pak lze interpretovat obdobně jako u modelu M_1 . Např. scénář č. 1 z tab. 7 lze interpretovat takto: Klesá-li mírně teplota kouřových plynů před odtahovým ventilátorem [+ – –] a klesá-li proudový odběr hlavního pohonu rotační pece [+ – +] a koncentrace O_2 v kouřových plynech mírně stoupá [+ + +], pak sniž množství surovinové moučky dávkované do tepelného výměníku [+ – –], sniž otáčky rotační pece [+ – –] a zvyš množství sekundárního a primárního paliva [+ + +].

Technologická interpretace tohoto scénáře je taková, že pokles proudového odběru hlavního pohonu rotační pece je způsoben poklesem teploty v jejím slinovacím pásmu. Tento pokles se projevil i snížením teploty odcházejících kouřových plynů.

Na tento nepříznivý stav je nutné předně zareagovat snížením množství surovinové moučky dávkované do tepelného výměníku a snížením počtu otáček rotační pece. Menší množství dávkované surovinové moučky má za následek nárůst teploty kouřových plynů, které své teplo v tepelném výměníku této surovinové moučce předávají, a zvýšení teploty této surovinové moučky před vstupem do rotační pece. Snížení počtu otáček rotační pece způsobí pomalejší postup materiálu rotační pecí, a tím jeho lepší tepelnou přípravu před vstupem do slinovacího pásma. Oba akční zásahy tak napomohou zvýšení jeho teploty. Tyto akční zásahy pak lze podpořit zvýšením množství sekundárního a/nebo primárního paliva, což dovoluje zvyšující se koncentrace O_2 v kouřových plynech.

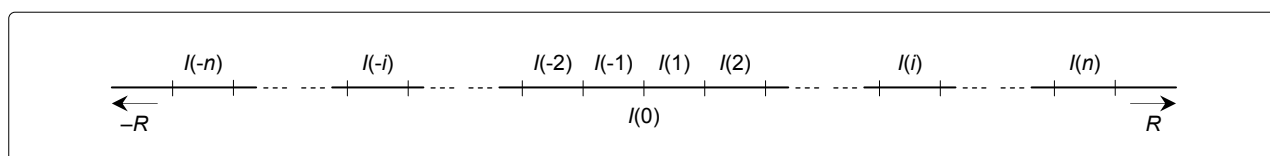
Obdobně bychom mohli interpretovat ostatní vygenerované scénáře modelu M_2 ; vyberme opět poslední z nich (scénář č. 15 z tab. 7). Z tohoto scénáře vyplývá, že stoupá-li teplota kouřových plynů před odtahovým ventilátorem [+ + –] a je přitom registrován nárůst proudového odběru hlavního pohonu rotační pece [+ + –], ukazující na nárůst teploty ve slinovacím pásmu rotační pece, a pokles koncentrace O_2 v kouřových plynech [+ – –], mělo by se zvýšit dávkování surovinové moučky do tepelného výměníku [+ + –] a můžeme i zvýšit otáčky rotační pece [+ + –], které způsobí rychlejší postup materiálu pecí do slinovacího pásma, a tím pokles jeho teploty. Současně můžeme mírně snížit množství dodávaného paliva [+ – –] z důvodu nárůstu uvedených teplot a poklesu koncentrace O_2 v kouřových plynech.

Z tab. 7 je též patrné, že vygenerovaný scénář č. 8, ve kterém jsou všechny veličiny popsány tripletem [+ 0 0], je scénářem ustáleného stavu pecní linky. Nyní je jen otázkou, jak z vygenerovaných scénářů, jejichž výstup je opět kvalitativní, získat kvantitativní akční zásahy.

5.4 KVANTIFIKACE AKČNÍCH ZÁSAHŮ

Jednou z možností, jak z kvalitativních vztahů vyvodit numericky orientované závěry, je použití tzv. semikvalitativních modelů. Jsou to v podstatě výše popsané kvalitativní modely, u kterých jsou numericky orientované závěry vyvozovány využitím metod intervalové matematiky. Jde tedy o kompromis mezi modelem konvenčním (a jeho přesností) a modelem kvalitativním (a jednoduchostí, s nímž lze sestavit). Zachovávají se tak výhody a eliminují nevýhody obou typů modelů.

Pakliže oborem hodnot kvalitativních proměnných je množina $\{K+, K0, K-\}$, zavádí semikvalitativní modelování „informaci o míře kvality“ pomocí kvantifikátorů, kterými jsou číselné intervaly. Parametry tripletů semikvalitativních proměnných pak mohou nabývat číselných hodnot, určených *semikvalitativními intervaly* (viz obr. 11).



Obr. 11
Grafické znázornění semikvalitativních intervalů

Každý semikvalitativní interval $I(i)$ tvoří jednodimenzionální interval na ose reálných čísel. Je-li počet kladných intervalů roven n , potom celkový počet intervalů je roven $(2n + 1)$. Množina semikvalitativních intervalů je tedy:

$$\{I(-n), I(-n+1), \dots, I(-2), I(-1), I(0), I(1), I(2), \dots, I(n-1), I(n)\},$$

kde $I(0)$ označuje nulový interval,

$I(i)$ označuje i -tý kladný interval, počínaje intervalem $I(0)$,

$I(-i)$ označuje i -tý záporný interval, počínaje intervalem $I(0)$.

Vzhledem k symetrii intervalů na ose reálných čísel vzhledem k intervalu $I(0)$ platí, že:

$$I(-(-n)) = -I(n), I(-(n+1)) = -I(n+1), \dots, I(-1) = -I(1).$$

Každý interval $I(i)$ je pak definován svojí horní $IH(i)$ a dolní hranicí $ID(i)$, nulový interval $I(0)$ je vždy reprezentován deterministickou hodnotou nula.

Existují tři standardní možnosti, jak vygenerovat hranice (meze) intervalů, viz např.:

- Aritmetická řada: $IH(i) = IH(1) + q \times (i - 1)$, pro $i = 1, 2, \dots, n$.
- Geometrická řada: $IH(i) = IH(1) \times q^{(i-1)}$, pro $i = 1, 2, \dots, n$.
- Uživatelská řada: $IH(i)$, pro $i = -n, -n+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, n-1, n$.

První dvě možnosti jsou vhodné pro plně automatizované rozdělení a lze je automaticky realizovat po zadání konstant q (kvocientu aritmetické/geometrické řady), prvního členu řady $IH(1)$ a počtu n semikvalitativních intervalů na jedné poloose. Třetí uvedenou možností je definování $(2n + 1)$ numerických hodnot expertem navrhujícím daný model. Tato varianta je flexibilní a umožňuje neekvidistantní vzorkování reflektující konkrétní případy.

Při semikvalitativních operacích, založených na aparátu intervalové matematiky, jsou vypočítávány meze intervalů jako výsledky operací (sčítání, násobení, dělení a derivace) mezi nimi. Aby při těchto operacích nedocházelo k nežádoucímu nárůstu nových intervalů, je zavedena metoda jejich „zaokrouhlování“ zavedením tzv. pásma necitlivosti takto:

Je-li $IH(k) < IH(i) + IH(j) < IH(k+1)$ a $[IH(i) + IH(j)] - IH(k) / [IH(k+1) - IH(k)] < m$, pak $IH(k+1) = IH(k)$.

Koeficient m definuje tzv. *pásmo necitlivosti*. V praxi je obvykle voleno $m = 0,05$.

Z inženýrského hlediska je však v praxi vhodné zavést tyto modifikace intervalové matematiky:

$IH(n) = +\infty$, neboli: $I(+n) +$ „cokoli pozitivního“ = $I(+n)$,

$ID(-n) = -\infty$, neboli: $I(-n) +$ „cokoli negativního“ = $I(-n)$.

Hodnoty $I(n)$ a $I(-n)$ nazýváme *absorpčními intervaly*, které reprezentují maximum a minimum semikvalitativních hodnot, které mohou být uvažovány.

Teoretické pozadí semikvalitativní algebry, je dáno intervalovou matematikou. Každá semikvalitativní operace je plně specifikována algoritmem pro určení parametrů korespondujících tripletů $[X(i), DX(i), DDX(i)]$. Zde proto uveďme pouze konstatování, že jsou-li při kvalitativním modelování kvalitativní proměnné X , DX a DDX ohodnoceny kvalitativními hodnotami $K+$, $K0$ a $K-$, pak každá z těchto proměnných je v semikvalitativním modelu specifikována $(2n + 1)$ intervaly.

Uvažujeme-li tedy objekt, popsáný x různými semikvalitativními proměnnými $X(i)$, jejichž dynamické chování je definováno třemi parametry $X(i)$, $DX(i)$ a $DDX(i)$, a každý z parametrů může nabývat jednu z $(2n + 1)$ semikvalitativních hodnot, potom existuje celkem $SS = 3x(2n + 1)$ různých semikvalitativních stavů (SS) sledovaného objektu.

Výsledkem semikvalitativní simulace jako výsledek řešení semikvalitativního modelu je opět množina semikvalitativních scénářů.

5.5 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ KVALITATIVNÍHO A JAZYKOVÉHO MODELU

Abychom mohli (alespoň velmi hrubě) porovnat výsledky v podobě scénářů kvalitativního modelu s výsledky získanými z řídicího systému na bázi jazykových modelů, zavedme předpoklad, že triplety kvalitativního modelu nám vypovídají o trendech sledovaných veličin, které kolísají kolem jejich střední (požadované) hodnoty. Necht' tedy jednotlivé triplety mají tento význam ve smyslu použitým u jazykových modelů:

[+ 0 +] hodnota veličiny je *nizká* (dále v tabulkách jen *N*),

[+ + 0] a [+ - 0] hodnota veličiny je *dobrá* (dále v tabulkách jen *D*),

[+ 0 -] hodnota veličiny je *vysoká* (dále v tabulkách jen *V*).

Poznámka: Triplet [+ 0 +] určuje „kvalitativní“ minimum, triplet [+ 0 -] „kvalitativní“ maximum a triplety [+ + 0] a [+ - 0] jsou inflexní body při změně z [+ + +] na [+ + -], resp. z [+ - -] na [+ - +].

Ostatní triplety můžeme interpretovat takto:

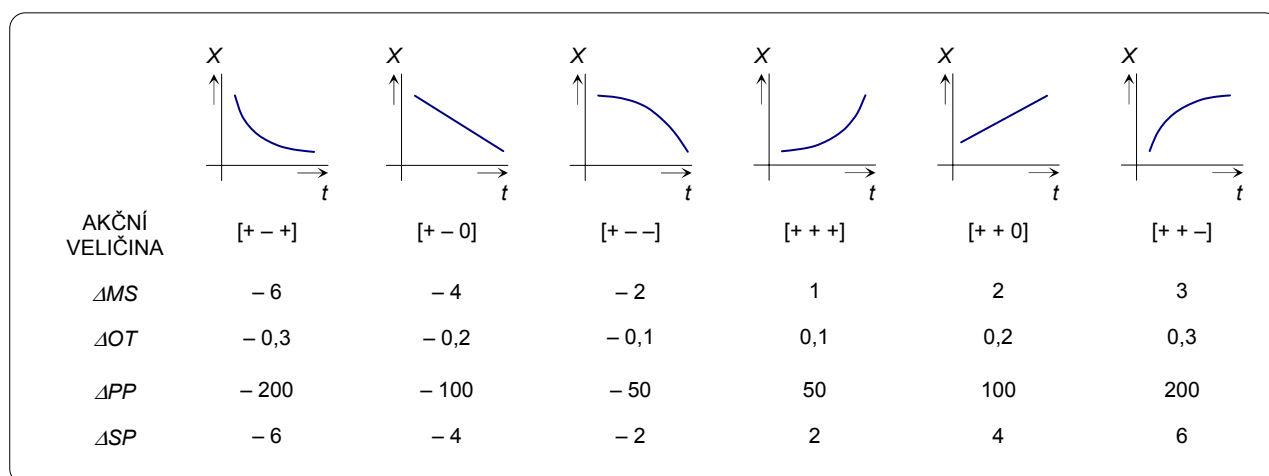
[+ + +] hodnota *nizká* se mění na hodnotu *dobrá*,

[+ + -] hodnota *dobrá* se mění na hodnotu *vysoká*,

[+ - -] hodnota *vysoká* se mění na hodnotu *dobrá*,

[+ - +] hodnota *dobrá* se mění na hodnotu *nizká*.

Pro každý kvalitativní vztah a každou akční veličinu dále definujeme konkrétní velikost akčního zásahu, jak je naznačeno na obr. 12. Zde jsou však definovány pouze akční zásahy u tripletů vyskytujících se v následujících srovnávacích tabulkách.



Obr. 12

Definování velikosti akčních zásahů v závislosti na kvalitativním vztahu

Definované akční zásahy lze vyjádřit slovy (v obr. 12 zleva doprava): *hodně sniž*, *sniž*, *mírně sniž*, *mírně zvyš*, *zvyš* a *hodně zvyš*.

Vraťme se k modelu M_2 a zkusme srovnat výsledky získané kvalitativním modelem (při uvedeném zjednodušení) s výsledky získanými výše popsáním jazykovým modelem.

Ze scénáře č. 1 modelu M_2 (viz tab. 7) vyplývá, že teplota kouřových plynů před odtahovým ventilátorem *TP* se (v terminologii jazykových modelů) mění z hodnoty *vysoká* na hodnotu *dobrá*, proudový odběr hlavního pohonu rotační pece *PO* se z hodnoty *dobrá* mění na hodnotu *nizký* a koncentrace O_2 v kouřových plynech před odtahovým ventilátorem se z hodnoty *nizká* mění na hodnotu *dobrá*.

Tab. 8: Scénář č. 1 modelu M_2

SCÉNÁŘ Č.	<i>TP</i>	<i>PO</i>	<i>KO</i>	<i>DMS</i>	<i>DOT</i>	<i>DSP</i>	<i>DPP</i>
1	+ --	+ - +	+++	+ --	+ --	+++	+++
VÝZNAM	$V \rightarrow D$	$D \rightarrow N$	$N \rightarrow D$	mírně sniž	mírně sniž	mírně zvýš	mírně zvýš

Budeme-li dále uvažovat předpoklad z úvodu této kapitoly, že proudový odběr hlavního pohonu rotační pece více méně kopíruje teplotu ve slinovacím pásmu rotační pece *TS*, pak tento scénář odpovídá (po přechodu) řídicímu pravidlu č. 29 jazykového modelu (úplné tabulky řídicích pravidel):

Tab. 9: Srovnání akčních zásahů def. scénářem č. 1 kvalitativního modelu a pravidlem č. 29 jazykového modelu

SCÉNÁŘ Č.	<i>TP</i>	$PO \approx TS$	<i>KO</i>	<i>DMS</i>	<i>DOT</i>	<i>DSP</i>	<i>DPP</i>
1	+ --	+ - +	+++	+ --	+ --	+++	+++
				- 2	- 0,1	2	50
PRAVIDLO Č.	<i>TP</i>	$PO \approx TS$	<i>KO</i>	<i>DMS</i>	<i>DOT</i>	<i>DSP</i>	<i>DPP</i>
29	<i>D</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	- 5	- 0,2	4	50

Usuzování kvalitativního modelu je v souladu s jeho naprogramovaným chováním: Jelikož teplota kouřových plynů před odtahovým ventilátorem stále ještě není *dobrá*, (což má vliv na tepelnou přípravu surovinové moučky před jejím vstupem do rotační pece a následné ovlivnění teploty ve slinovacím pásmu) a teplota ve slinovacím pásmu rotační pece klesá (z hodnoty *dobrá* se mění na hodnotu *nízká*), navrhl řídicí systém snížit množství surovinové moučky dávkované do tepelného výměníku, snížit otáčky rotační pece (zpomalit tak postup surovinové moučky rotační pece) a tyto akční zásahy podpořit mírným zvýšením množství dodávaného paliva. Stejnou strategii zastává i řídicí pravidlo č. 29 jazykového modelu. Obdobně lze srovnat i ostatní scénáře.

Ze srovnání všech vygenerovaných scénářů s odpovídajícími pravidly jazykového modelu vyplývá, že akční zásahy odvozené z těchto scénářů (navíc u zjednodušeného kvalitativního modelu) korespondují s akčními zásahy (řídicími pravidly) definovanými v jazykových modelech řízení pecní linky. Větší rozdíly jsou patrné jen ve změnách množství primárního paliva (50 a 100, resp. 50 a 200 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Vzhledem k celkovému množství přiváděného paliva (cca 6500 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) však jde o rozdíly 0,8, resp. 1,6 %.

I když uvedené výsledky vypadají velmi slibně, pro vlastní řízení cementářské pecní linky bych doporučil jazykové modely, které pracují s konkrétními kvantitativními hodnotami regulovaných a akčních veličin, a jsou hlavně použitelné i pro řízení v neustáleném stavu řízeného systému, včetně tzv. „nájezdů“ pecní linky apod. (Ustáleným stavem je zde – v terminologii operátorů – myšlen stav pecní linky, kdy hodnoty všech regulovaných veličin jsou *dobré* a není potřeba provádět – alespoň razantnější – akční zásahy.) U kvalitativních modelů bychom museli provádět další testy na hodnoty jednotlivých veličin, abychom zjistili, zda daný trend má veličina, která je (opět ve smyslu použitím u jazykových modelů) *nízká*, *dobrá*, či *vysoká* apod.

5.6 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Kvalitativní modely poskytují informace o charakteru jednotlivých proměnných v kvalitativní formě, která nenese žádnou míru kvantifikace. Z hlediska interpretace takovýchto modelů a jejich praktické použitelnosti v inženýrské praxi to je omezení, které sice částečně může eliminovat semikvalitativní modelování, ale celý systém se tak stává podstatně složitější.

U navrženého modelu byly vygenerované scénáře snadno interpretovatelné. Obecně to však nemusí platit. Jde o multidimenzionální nelineární systém a v nalezení zdánlivě iracionálních nebo těžko odvoditelných vztahů lze spatřovat jeden z hlavních půvabů této metody. Běžné optimalizační metody by třeba selhaly i v případě, že by byl kvantitativní model znám.

I když uvedené výsledky vypadají velmi slibně, pro vlastní řízení cementářské pecní linky bych v tomto konkrétním případě přece jen doporučil jazykové modely, které pracují s konkrétními kvantitativními hodnotami regulovaných a akčních veličin, a to nejen z důvodu, že jsou technikům bližší a srozumitelnější. Výsledky vedou i k formulaci závěrů. Kvalitativní modely se však v uvažované oblasti dají s úspěchem využít např. jako simulátory chování cementářské pecní linky při zaučování operátorů, při řešení problematiky nestandardních stavů, pro testování řídicího systému na jiné bázi apod. Dále mohou být využity již ke zmíněné predikci průběhů vágně známých nebo vůbec neměřitelných veličin, či nalezení zdánlivě iracionálních nebo těžko odvoditelných vztahů.

6 ZÁVĚR

Práce pojednává o netradičních metodách využitelných k popisu a řízení komplexních (složitých, klasickými prostředky obtížně popsatelných) systémů, z nichž byly podrobněji rozpracovány dvě metodologie spadající do vědní disciplíny zvané umělá inteligence. Umělá inteligence je výborným generátorem širokého spektra idejí, námětů, algoritmů, modelů a metodologií, které mohou být úspěšně použity právě pro řešení problémů z oblasti modelování, řízení a regulace systémů uvedených vlastností. Zvolenými a rozpracovanými metodologiemi jsou jazykové modely na bázi fuzzy logiky a kvalitativní modely na bázi selské logiky (common sense). Experimentální část práce potom popisuje aplikace těchto metodologií při návrhu a realizaci automatických řídicích systémů technologických procesů v oblasti výroby stavebních hmot, konkrétně při návrhu řídicích systémů cementářské pecní linky.

Popis první metodologie (kap. 2 habilitační práce) definuje obecný teoretický základ pro jazykové modely na bázi fuzzy logiky. Z provedeného srovnání jejich jednotlivých typů lze konstatovat, že pro řízení technologických procesů jsou nejvhodnější CIC–jazykové modely, které jsou modifikovány dle popsaných a zdůvodněných návrhů. Jde zejména o modifikace průběhů příslušnostních funkcí jazykových hodnot jednotlivých veličin jazykového modelu, modifikaci velikosti vygenerovaného akčního zásahu, stanovení času jeho vlastního provedení a v neposlední řadě také zavedení adaptivního zpětnovazebního algoritmu.

Algoritmus zpracování modelů vyplývá z jeho matematické interpretace. Při praktické aplikaci tak jde „jen“ o vhodnou volbu jednotlivých proměnných (regulovaných a akčních veličin), definování příslušnostních funkcí jazykových hodnot těchto proměnných a o naplnění databáze řídicích pravidel.

Řídicí systém na bázi těchto modelů (kap. 5) jsem dopracoval do úrovně aplikace, kdy jsem navrhl, realizoval a nasadil řídicí systém cementářské pecní linky v konkrétní cementárně. Práce spočívaly v realizaci měření požadovaných veličin, softwarové filtraci vstupních signálů z těchto měření, realizaci ovládání akčních členů, identifikaci cementářské pecní linky, návrhu regulovaných a akčních veličin (všech stupňů řízení) a průběhů jejich příslušnostních funkcí, vytvoření řídicích pravidel a sestavení a odladění modelů jednotlivých stupňů řízení včetně jejich softwarového vyjádření.

Navržený řídicí systém byl nejdříve provozován jako rádce operátora (generoval akční zásahy a zobrazoval je na monitoru počítače; operátor pak navržené akční zásahy konfrontoval se svými znalostmi a prováděl je ručně). Po zkušební době a doladění řídicích pravidel byl následně nasazen jako on–line řídicí systém. Dosažené výsledky jsou uvedeny v závěru kap. 5. Na jejich základě lze konstatovat, že řídicí systém na bázi těchto modelů plně prokázal svoji životaschopnost a vhodnost pro řízení technologických procesů podobných typů.

Z důvodu možnosti následného srovnání jsem stejný technologický proces (cementářskou pecní linku) použil pro demonstraci postupu vytváření kvalitativních modelů použitelných pro popis

chování či řízení komplexních systémů. Kvalitativní modelování (kap. 3) je ve své myšlenkové podstatě velmi jednoduché a tudíž inženýrsky snadno využitelné. Základní výhodou kvalitativní analýzy je její nenumernická orientace, a to, že množina řešení je vždy nadmnožinou inženýrsky rozumných řešení, tzn., že nic „rozumného“ nemůže být přehlédnuto.

Kvalitativní analýzy a kvalitativní modelování jsou vhodné všude tam, kde existují popisy chování odvozené na základě znalostí, na bázi znalostí vazeb a vztahů mezi veličinami, na bázi trendů a verbálních vyjádření. Toto je právě případ např. cementářské pecní linky (kap. 4), kdy jsou operátoři řídicí tuto linku schopni vágně popsat její chování i prováděné akční zásahy, zatímco chování vlastní pecní linky se klasickými matematickými prostředky popisuje obtížně.

Výstupem kvalitativní analýzy pomocí selské logiky (common sense) je seznam kvalitativních scénářů popisujících chování daného procesu na základě pozorování. Přitom seznam nemusí obsahovat všechny možné (teoreticky existující) scénáře. Stačí znalost jen některých, obvykle těch, které jsou reálné (tedy ve skutečnosti existující), nebo těch, které jsou nejznámější či nejobvyklejší.

Seznam scénářů (řešení) pak slouží jako výchozí bod pro generování přechodového grafu, který sumarizuje všechna možná dynamická chování analyzovaného procesu při respektování existence přechodů mezi jednotlivými stavy. Přechodový graf je vedle množiny scénářů dalším možným výstupem kvalitativní analýzy a může být s úspěchem použit pro vlastní řízení daného procesu.

Podle publikovaných teorií ne všechna kvalitativní řešení mají kvantitativní interpretaci. I když u modelu cementářské pecní linky bylo možné vygenerované scénáře snadno interpretovat (kap. 6), obecně to platit nemusí. Jedná se o multidimenzionální nelineární systém a právě v nalezení zdánlivě iracionálních nebo těžko odvoditelných vztahů lze vidět jeden z hlavních půvabů této metody.

Kvalitativní modelování, logika a optimalizace neeliminují konvenční přístupy k optimalizaci. Z hlediska průmyslové optimalizace je nejobtížnější problém vývoje takových metod, které by umožnily identifikaci scénářů, které kvantitativně neexistují. Dosud však není jasné, jak by se tato eliminace mohla udělat. Eliminační algoritmus, který by rozděloval vygenerované scénáře do tří skupin, a to na ty, které určitě kvantitativně existují, na ty, které určitě kvantitativně neexistují, a ty, o kterých to není možné rozhodnout, by byl velmi užitečný.

V každém případě se však podařilo zvládnout problematiku kvalitativního modelování, včetně interpretace výsledků v podobě množiny vygenerovaných scénářů, do tvaru akceptovatelného pro praxe, což ukazuje i srovnání výsledků získaných jazykovými modely (kap. 5) s výsledky získanými kvalitativním modelem (kap. 6). I když uvedené výsledky vypadají velmi slibně, pro vlastní řízení cementářské pecní linky bych přece jen doporučil jazykové modely, které pracují s konkrétními kvantitativními hodnotami regulovaných a akčních veličin, a to nejen z důvodu, že jsou technikům bližší a srozumitelnější.

Kvalitativní modely se však v uvažované oblasti dají s úspěchem využít např. jako simulátory chování cementářské pecní linky při zaučování operátorů, při řešení problematiky nestandardních stavů, pro testování řídicího systému na jiné bázi apod. Dále mohou být využity k predikci průběhů vágně známých nebo vůbec neměřitelných veličin, či již zmíněnému nalezení zdánlivě iracionálních nebo těžko odvoditelných vztahů. (Podrobněji viz habilitační práce.)

7 POUŽITÁ A CITOVANÁ LITERATURA (VYDANÁ PO ROCE 1980)

- [1] Rosa, J. ASŘTP: Automatické systémy řízení technologických procesů v průmyslu stavebních dílců. Skriptum FAST VUT v Brně. Praha: SNTL, 1982.
- [2] Rosa, J. ASŘTP I: Automatické systémy řízení technologických procesů v průmyslu stavebních dílců. Skriptum FAST VUT v Brně. Praha: SNTL, 1983.
- [3] Skopal, J. – Haška, M. Současné možnosti automatického řízení pecní linky v Prachovicích. *Stavivo*, 1983, roč. 61, č. 9. Praha: SNTL, 1983.
- [4] Novák, V. Fuzzy množiny a jejich aplikace. Praha: SNTL, 1986.
- [5] Müller, E. *Strategie řídicího systému rotační pece pomocí fuzzy logic*. Písemná práce k odborné zkoušce z kandidátského minima. Brno: FAST VUT v Brně, 1986.
- [6] Weber, M. *Řízení cementářské pece o výkonu 3000 t/d metodou fuzzy logic*. Písemná práce k odborné zkoušce z kandidátského minima. Brno: FAST VUT v Brně, 1987.
- [7] Slovák, V. *Návrh fuzzy pravidel pro automatické řízení cementářské rotační pece*. Kandidátská disertační práce. Brno: FAST VUT v Brně, 1987.
- [8] Chromý, S. Prozess der Portlandzementklinkerentstehung – Reaktivität und Brennbarkeit von Zement – Rohstoffen, Teil 1: Mechanismus der Entstehung von Portlandzementklinker. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1982, vol. 35, no. 4, s. 204–210.
- [9] Chromý, S. Prozess der Portlandzementklinkerentstehung – Reaktivität und Brennbarkeit von Zement – Rohstoffen, Teil 2: Kinetik der klinkerend Stehung. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1982, vol. 35, no. 7, s. 368–373.
- [10] Chromý, S. *Prozess der Portlandzementklinkerentstehung – Reaktivität und Brennbarkeit von Zement – Rohstoffen, Teil 3: Reaktivität und Brennbarkeit*. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1982, vol. 35, no. 10, s. 555–560.
- [11] Chromý, S. – Weber, M. Nový způsob řízení výpalu a kontroly surovinové skladby v cementárně. *Stavivo*, 1982, roč. 60, č. 9, s. 350–354. Praha: SNTL, 1982.
- [12] Chromý, S. – Těhník, V. Optimalizace výroby slinku v prachovické cementárně pomocí optické mikroskopie. Výzkumná zpráva. Brno: VÚSH, 1983.
- [13] Chromý, S. Teoretický rozbor a výsledky hodnocení pokusného provozu v cementárně Prachovice. Výzkumná zpráva. Brno: VÚSH, 1984.
- [14] Vlček, J. – Beran, V. Automatizované systémy řízení ve stavebnictví. Praha: SNTL, 1985.
- [15] Druckmüller, M. *Systém zpracování dat postupy fuzzy matematiky v technických disciplínách*. Kandidátská disertační práce. Brno: FS VUT v Brně, 1987.
- [16] Chromý, S. Schnelle quantitative Bestimmung von freiem CaO im Portlandzementklinker. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1986, vol. 39, no. 12, s. 693–695.
- [17] Chromý, S. Litrová hmotnost a řízení výpalu portlandského cementu. *Stavivo*, 1986, roč. 64, č. 2, s. 9–11. Praha: SNTL, 1986.
- [18] Holmblad, L. P. Erfahrungen mit der automatischen Ofenüberwachung durch einen Computer und Fuzzy Logic. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1986, vol. 39, no. 4, s. 192–196.
- [19] Miller, F. A. – Egelov, A. H. Zausammenhang zwischen dem NO_x – Gehalt der Abgase und dem Ofenbetrieb beim Zementbrennen. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1980, vol. 33, no. 6, s. 310–313.

- [20] Katsaki, T. – Hirayama, M. – Yano, M. Automatische Ofensteuerung mit Hilfe eines Prozess Rechners. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1986, vol. 39, no. 9, s. 506–508.
- [21] Egelov, A. H. Regfahrungen mit NO: Messungen bei der Fuzzy–Logik–Regelung von Drehöfen. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1982, vol. 35, no. 3, s. 000–000.
- [22] Chromý, S. – Weber, M. Zum Prozess der Ringbildung in Zement Drehöfen. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1981, vol. 34, no. 9, s. 453–457.
- [23] Show, D. – West, W. J. Quality by Measurement if NO in Kiln Exit Gases. *Technology*, 1983, no. 12, s. 874–876.
- [24] Holmblad, L. P. – Ostergaard, J. J. Fuzzy Logic Control: Operator Experience Applied in Automatic Process Control. *F. L. Smidth Revue*, 1981, no. 45, s. 11–16.
- [25] Holmblad, L. P. – Ostergaard, J. J. Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic. *F. L. Smidth Revue*, 1983, no. 67, s. 3–13.
- [26] Ying, P. Method and Parameters for Automatically Controlling a Rotary Cement Kiln. *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1980, vol. 33, no. 4, s. 171–176.
- [27] Sheridan, S. E. – Skjoth, P. Automatic Kiln Control at Oregon Portland Cement Company's Durkee Plant Utilizing Fuzzy Logic. *F. L. Smidth Revue*, 1983, no. 65, s. 3–8.
- [28] Cottet, Y. Hierarchic Process Computer System for controlling the new while Cement Manufacturing Plant at Le Teil, Ardeche (FRA). *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1980, vol. 33, no. 4, s. 000–000.
- [29] Hespel, D. W. – Taylor, R. A. High Level Kiln Control. *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1986, vol. 39, no. 4, s. 183–189.
- [30] Sugimoto, H. – Asakura, K. Computer Control Applied to Cement plant Operation. *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1986, vol. 39, no. 9, s. 512–514.
- [31] Scheuer, A. – Gardeik, H. O. Formation of NO in Cement Kiln Plants, Part 2: Model Calculations and Comparison with Measurements. *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1985, vol. 38, no. 3, s. 57–66.
- [32] Frölich, H. – Rümmler, G. Digital Measuring and Control Equipment for Modern Raw Meal feeding systems. *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1985, vol. 38, no. 3, s. 135–139.
- [33] Kruse, F. – Gonsior, A. – Rücker, P. Process Control Technology in the Cement Industry – Theory and Practice Illustrated by an Example. *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1986, vol. 39, no. 4, s. 203–211.
- [34] Rusek, J. *Řízení rotační pece pro výrobu cementu*. Písemná práce k odborné zkoušce z kandidátského minima. Ostrava: VŠB, Ostrava, 1989.
- [35] Kouda, R. – Choi, S. H. Mechanism and kinetics of Portland cement formation for an example of the solid–state reaction in the presence of a liquid phase. Proc. 5. ISCC. Part I, s. 163–171. Tokyo, 1968.
- [36] Henning, O. – Lach, V. *Chemie ve stavebnictví*. Praha: SNTL, 1983.
- [37] Weber, M. – Zavřel, Š. – Bojanovský, M. – Chromý, S. Výsledky využití optické mikroskopie k optimalizaci a řízení výroby cementu v cementárně Maloměřice. *Stavivo*, 1987, vol 65, no. 2, s. 68–90.
- [38] Řiháček, P. Vliv fázového složení a výpalu slinku na vlastnosti cementu. Výzkumná zpráva. Brno: VÚSH, 1988.

- [39] Müller, E. *Návrh optimalizovaného fuzzy řízení rotační pece*. Kandidátská disertační práce. Brno: FAST VUT v Brně, 1988.
- [40] Weber, M. 1989. *Stabilizace výpalu portlandského slinku v rotační peci*. Kandidátská disertační práce. Brno: FAST VUT v Brně, 1989.
- [41] Chromý, S. Optimisation of cement clinker manufacturing and optical microscopy. *Cement and Concrete*, 1988 no. 495, s. 51–57. The Cement Association of Japan.
- [42] Kovanic, P. A new theoretical and algorithmically basis for estimation, identification and control. *Automatics*, 1986, vol. 22, no. 6, s. 657–674.
- [43] *Průběžná zpráva o výsledcích řešení úkolu č. III–2–3/01.01, etap E03 a E04*. Výzkumná zpráva. Katedra řídicích systémů technologických procesů ve stavebnictví, FAST VUT v Brně. Brno: FAST VUT v Brně, 1987.
- [44] *Průběžná zpráva o výsledcích řešení úkolu č. III–2–3/01.01, etap E03 a E04*. Výzkumná zpráva. Katedra řídicích systémů technologických procesů ve stavebnictví, FAST VUT v Brně. Brno: FAST VUT v Brně, 1988.
- [45] *Průběžná zpráva o výsledcích řešení úkolu č. III–2–3/01.01, etap E03 a E04*. Výzkumná zpráva. Katedra řídicích systémů technologických procesů ve stavebnictví, FAST VUT v Brně. Brno: FAST VUT v Brně, 1989.
- [46] Rosa, J. Zum Problem des Fuzzy–Steuerung des Zementdrehofens. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1988, vol. 41, no. 4, s. 167–169.
- [47] Rosa, J. – Müller, E. Neuere Erfahrungen mit der Fuzzy–Steuerung von Zementdrehöfen. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1989, vol. 42, no. 12, s. 599–609.
- [48] Rosa, J. *Progressive Steuerung nach dem Konzept Fuzzy–Logik und ihre Anwendung*. Sborník z 5. Wissenschaftliche Konferenz „Anlagenautomatisierung“. Lipsko: 1986, s. 28–33.
- [49] Rosa, J. *Zum Problem des Fuzzy–Steuerung des Zementdrehofens*. Sborník z 10. IBAUSIL. Weimar: 1988, s. 13–22.
- [50] Rosa, J. – Müller, E. *Adaptivita při fuzzy řízení*. Sborník z 10. vědecké konference FAST VUT v Brně, sekce ASŘTP. Brno: FAST VUT v Brně, 1989, s. 33–39.
- [51] Haspel, D. W. Practical problems with the use and interpretation of NO_x for kiln control. *World Cement*, 1989, no. 5, s. 176–181.
- [52] Ibler, Z. – Karták, J. Modely výpočtů emisí oxidů dusíku při spalování fosilních paliv. *Energetika*, 1990, vol. 40, no. 9–10, s. 344–347.
- [53] Ostergaard, J. J. 1990. Fuzzy II: The New Generation of high Level Kiln control. *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1990, vol. 43, no. 11, s. 539–541.
- [54] Rosa, J. – Krejčí, A. Optimiertes Regelungssystem des Zementdrehofens auf linguistischer Modellbasis. *Zement–Kalk–Gips*, ZKG International: Edition B, 1991, vol. 44, no. 8, s. 408–415. ISSN 0722–4397.
- [55] Rosa, J. – Krejčí, A. *Optimised control system for rotary cement kilns based on a linguistic model*. *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1991, vol. 44, no. 8, s. 408–415 (8). ISSN 0722–4400.
- [56] Kvapilík, M. – Dohnal, M. An integration of quantitative and qualitative knowledge in process engineering. *Collection of Czechoslovak Chemical Communications*, 1992, vol. 58, no. 8, s. 1861–1873. ISSN 0010–0765.

- [57] Pokorný, M. *Umělá inteligence v modelování a řízení*. Praha: Nakladatelství BEN – technická literatura, 1996. ISBN 80–901984–4–9.
- [58] Zadeh, L. A. The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert Systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 1983, no. 11.
- [59] Zimmermann, H. J. *Fuzzy Set Theory – and its Applications*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1985.
- [60] Press, W. – Teukolsky, S. – Vetterling, W. et al. *Numerical Recipes in C*. Cambridge: Cambridge University Press. 1992.
- [61] Olehla, J. – Olehla, M. a kol. *Basic u mikropočítačů*. Praha: NADAS, 1988.
- [62] Bobrow, D. G. *Qualitative Reasoning about Physical Systems*. Amsterdam: North Holland Publ. Comp., 1984.
- [63] De Kler, J. – Brown, J. S. *A Qualitative Physics Based on Confluences*. Amsterdam: North Holland Publ. Comp., 1984.
- [64] Yung–Chog, P. Qualitative Reasoning with Deep-Level Mechanism Models for Diagnoses of Dependent Failures. Palo Alto, SCAS, NASA, 1984.
- [65] Jablonskij, S. V. *Úvod do diskrétní matematiky*. Bratislava: Alfa, 1984.
- [66] Chytil, M. *Automaty a gramatiky*. Praha: SNTL, 1984.
- [67] Popela, P. – Šiller, A. – Dohnal, M. *Kvalitativní modelování v inženýrské praxi*. In: sborník AI 87. Praha, 1987.
- [68] Dohnal, M. – Pokorný, M. A Fuzzy Upgrading of Integrated Vague Managerial and Engineering Knowledge. *International Journal of production Economics*, 1993, no. 32. Elsevier.
- [69] Kuneš, J. a kol. *Základy modelování*. TKI. Praha: SNTL, 1989.
- [70] Mařík, V. a kol. *Umělá inteligence I*. Praha: Academia, 1993.
- [71] Popper, M – Kelemen, J. *Expertné systémy*. Bratislava: Nakladatelství ALFA, 1988. ISBN 80–05–00051–0.
- [72] Pokorný, M. *Využití fuzzy metod v regresní analýze*. Disertační práce. Fakulta elektrotechnická a informatiky VUT v Brně. Brno: FEI VUT v Brně, 1993.
- [73] Pokorný, M. *Umělá inteligence v modelování a řízení*. Praha: BEN–Technická literatura, 1996, 189 s. ISBN 80–901984–4–9.
- [74] Vondrák, I. *Umělá inteligence a neuronové sítě*. Ostrava: TU VŠB, 1994.
- [75] Pivoňka, P. Neuronové regulátory. *Automatizace*, 1995, vol. 38, no. 2. Praha: Automatizace, spol. s r. o., 1995.
- [76] Dohnal, M. *Methodology of Qualitative Modelling*. Konference SCAI. Sborník z konference SCAI'89. Tampere, 1989.
- [77] Dohnal, M. A methodology for common–sense model development. *Computers in Industry*, 1991, vol. 16, no 6, s. 141–158. ISSN 0166–3615.
- [78] Krejčí, A. *Optimalizovaný řídicí systém cementářské rotační pece na bázi jazykových modelů*. Kandidátská disertační práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně. 1991.
- [79] Šiller, A. – Popela, P. – Dohnal, M. Linear Qualitative Models: Solution, Application and Engineering Interpretation, Part I: Qualitative Algebra. *Computers and Artificial Intelligence*, 1992, vol. 11, no. 6, s. 535–544. ISSN 0232–0274.

- [80] Šiller, A. – Popela, P. – Dohnal, M. Linear Qualitative Models: Solution, Application and Engineering Interpretation, Part II: Methodology, Case Study – Toxicity Analysis. *Computers and Artificial Intelligence*, 1993, vol. 12, no. 2, s. 195–206. ISSN 0232–0274.
- [81] Krejčí, A. – Dohnal, M. – Materna, A. Common Sense Reasoning in Civil Engineering. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 1999, vol. 7, no. 1, s. 21–26. Bratislava: Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology, 1999. ISSN 1210–3896.
- [82] Štaral, M. *Neuronové sítě – historie, současnost a trendy dalšího vývoje*. Letní škola: Informační systémy a jejich aplikace, Ruprechtov. Brno: Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky, Fakulta stavební VUT v Brně, 1999. ISBN 80–214–1397–2.
- [83] *Sborník referátů z mezinárodní konference APPLIED ELECTRONICS '99*. 1999. Plzeň: Nakladatelství ZČU Plzeň, 1999. ISBN 80–7082–512–X.
- [84] Mařík, V. – Štěpánková, O. – Lažanský, J a kol. *Umělá inteligence (1)*. Praha: Academia, nakladatelství AV ČR, 1993, 264 s. ISBN 80–200–0496–3.
- [85] Mařík, V. – Štěpánková, O. – Lažanský, J a kol. *Umělá inteligence (2)*. Praha: Academia, nakladatelství AV ČR, 1997, 374 s. ISBN 80–200–0504–8.
- [86] Mařík, V. – Štěpánková, O. – Lažanský, J a kol. *Umělá inteligence (3)*. Praha: Academia, nakladatelství AV ČR, 2001, 328 s. ISBN 80–200–0472–6.
- [87] *Inteligentní systémy pro praxi: fuzzy logika, neuronové sítě a expertní systémy*. Sborník přednášek ze 4. ročníku konference. Ostrava–Poruba: AD&M – konferenční servis, 1999. ISBN 80–238–4743–0.
- [88] Cohn, L. – Balfour, F. aj. Kde hledat podklady. *Euro*, 2003, vol. 6, no. 44, s. 64–67. 3. listopadu 2003. ISSN 1212–3129.
- [89] Krejčí, A. Aplikace jazykových modelů na bázi fuzzy logiky při řízení cementářské pecní linky. *Automatizace*, 2000, vol. 43, no. 8, s. 513–519. Praha: Automatizace, spol. s r. o., 2000. ISSN 0005–125X.
- [90] *Nostradamus 2000*. Sborník přednášek z mezinárodní konference Nostradamus 2000 – Prediction Conference (3). Zlín: Fakulta technologická VUT v Brně, 2000. ISBN 80–214–1668–8.
- [91] *Inteligentní systémy pro praxi: fuzzy logika, neuronové sítě, pravidlové expertní systémy a genetické algoritmy* Sborník přednášek z 5. ročníku konference. Ostrava–Poruba: AD&M – konferenční servis, 2000. ISBN 80–238–6140–9.
- [92] Šindelář, R. – Vlček, Z. – Attia, A. F. – Horáček, P. *Identifikace fuzzy modelu z dat*. In: Sborník přednášek k 6. ročníku konference „Inteligentní systémy pro praxi“, s. 179–186. Ostrava–Poruba: AD&M – konferenční servis, 2001. ISBN 80–238–7812–3.
- [93] Vícha, T. *Kvalitativní modelování ekonomických modelů*. In: IMEA 2006. Hradec Králové: Fakulta informatiky a managementu, Univerzita Hradec Králové, 15.–16. 5. 2006. ISBN 80–7041–164–3.
- [94] Vícha, T. – Dohnal, M. *Qualitative analysis of chaotic behaviors of complex systems – identification of all possible scenarios*. In: CHISA 2006, 17th International congress of chemical and process engineering. Mezinárodní konference, Česká společnost chemického inženýrství. Praha, 27.–31. 8. 2006. ISBN 80–86059–45–6.
- [95] Vícha, T. *Kvalitativní degradace časové řady cen ropy*. In: Mezinárodní Bařova doktorandské konference 2007. Mezinárodní konference, Fakulta managementu a ekonomiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Zlín, 12. 4. 2007. ISBN 978–80–7318–529–9.

VYBRANÉ PUBLIKACE AUTORA

- [1] Krejčí, A. – Rosa, J. Optimized control system for rotary cement kilns based on a linguistic model. *Cement–Lime–Gypsum*, ZKG International: Edition A, 1991, vol. 44, no. 10, s. 408–415. Příspěvek recenzovaný zahraničními lektory. ISSN 0722–4400. IF 0.115.
- [2] Krejčí, A. Řídicí systém cementářské rotační pece na bázi jazykových modelů. In *Sborník z mezinárodní konference Conference about Structural Materials: CONSTRUMAT '96 (2)*, 02.10.–04.10.1996, Kočovce. SVK. Bratislava: Vydavateľstvo STU Bratislava, 1996, s. 54–57. ISBN –.
- [3] Krejčí, A. Selská logika v Hi–Tech informačních technologiích. In *Sborník z mezinárodní konference Conference about Structural Materials: CONSTRUMAT '97 (3)*, 26.10.–28.10.1997, Herľany. SVK. Košice: Stavebná fakulta TU Košice, 1997, s. 79–84. ISBN 80–7099–300–6.
- [4] Prokeš, J. – Krejčí, A. *Mechanizace ve stavebnictví I: Bezpečnostní předpisy*. FAST VUT v Brně. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 1998. 115 s. Příručka využívaná školícími pracovišti a inspektoráty bezpečnosti práce v celé republice. ISBN: 80–214–1145–7.
- [5] Krejčí, A. Návrh řídicího systému cementářské pecní linky. In *Sborník přednášek z 3. odborné konference s mezinárodní účastí Stavebné fakulty TU Košice*, 13.05.–15.05.1998, Tatranské Matliare. SVK. Košice: Stavebná fakulta TU Košice, 1998, 9 s. ISBN –.
- [6] Krejčí, A. Modern control system of cement kiln line. In *Zborník vedeckých prací z Medzinárodnej vedeckej konferencie Stavebnej fakulty STU Bratislava*, 18.11.–20.11.1998, Bratislava. SVK. Bratislava: STU Bratislava, Stavebná fakulta, 1998. Sekcia: Materiálové inžinierstvo, s. 35–41. ISBN 80–227–1134–9.
- [7] Dohnal, M. – Krejčí, A. – Materna, A. Common sense reasoning in civil engineering. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 1999, vol. 7, no. 1, s. 21–26. Bratislava: Slovak University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 1999. Příspěvek recenzovaný zahraničními lektory. ISSN 1210–3896. IF –.
- [8] Krejčí, A. Využití jazykových modelů na bázi fuzzy logiky při řízení cementářské pecní linky. In *Sborník referátů z International Conference Applied Electronic '99 ZČU Plzeň*, 07.09.–09.09.1999, Plzeň. CZE. Plzeň: Nakladatelství ZČU Plzeň, 1999, s. 87–91. ISBN 80–7082–512–X.
- [9] Krejčí, A. Zkušenosti s aplikací jazykových modelů na bázi fuzzy logiky při řízení cementářské pecní linky. In *Sborník přednášek ke 4. ročníku odborné konference Inteligentní systémy pro praxi: Fuzzy logika, neuronové sítě a expertní systémy*, 03.11.–04.11.1999, Hrubá Skála. CZE. Ostrava: AD&M, 1999, s. 105–112. ISBN 80–238–4743–0.
- [10] Krejčí, A. – Rada, V. Selská logika v řízení technologického procesu cementářské pecní linky. In *Sborník přednášek ke 4. ročníku odborné konference Inteligentní systémy pro praxi: Fuzzy logika, neuronové sítě a expertní systémy*, 03.11.–04.11.1999, Hrubá Skála. CZE. Ostrava: AD&M, 1999, s. 133–136. ISBN 80–238–4743–0.
- [11] Krejčí, A. Řízení cementářské pecní linky a jazykové modely. *Automatizace*, 2000, roč. 43, č. 8, s. 513–519. Vyžádaný recenzovaný příspěvek. ISSN 0005–125X. IF –.
- [12] Dohnal, M. – Krejčí, A. – Rada, V. Selská logika a řídicí systémy I. *Automatizace*, 2000, roč. 43, č. 10, s. 670–674. Vyžádaný recenzovaný příspěvek. ISSN 0005–125X. IF –.
- [13] Dohnal, M. – Krejčí, A. – Rada, V. Selská logika a řídicí systémy II. *Automatizace*, 2000, roč. 43, č. 11, s. 753–758. Vyžádaný recenzovaný příspěvek. ISSN 0005–125X. IF –.

- [14] Krejčí, A. – Rada, V. Common Sense Logic used in the Control Systems of the Cement Kiln and of the Mill. In *Sborník z 3rd Conference on prediction, synergetic, behaviour of dynamic systems and its application in control theory, physics, chemistry, economy, and more... Nostradamus 2000 – Prediction Conference, Technical University of Technology Brno, Faculty of Technology, 02.10.–03.10.2000, Zlín, CZE. Zlín: Knihovna F. Bartoše, 2000. Část: Nostradamus 2000 – Prediction Conference (3), s. 210–215. ISBN 80–214–1668–8.*
- [15] Krejčí, A. – Rada, V. The Control System of the Cement Kiln using the Linguistic Models based Fuzzy Logic. In *Sborník z 3rd Conference on prediction, synergetic, behaviour of dynamic systems and its application in control theory, physics, chemistry, economy, and more... Nostradamus 2000 – Prediction Conference, Technical University of Technology Brno, Faculty of Technology, 02.10.–03.10.2000, Zlín, CZE. Zlín: Knihovna F. Bartoše, 2000. Část: Nostradamus 2000 – Prediction Conference (3), s. 216–221. ISBN 80–214–1668–8.*
- [16] Krejčí, A. – Dohnal, M. – Rada, V. A Formalized Common Sense Analysis of Cement Kiln Models Based on Shallow Knowledge. In *Sborník přednášek z 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002: Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation, 25.08.–29.08.2002, Praha. CZE. [CD-ROM] Praha: Process Engineering Publisher, 2002. 13 s. ISBN 82–86059–33–2.*
- [17] Dohnal, M. – Krejčí, A. – Koivisto, R. – Starzak, M. A Fuzzy Pooling of Coal Dust Knowledge. In *Sborník přednášek z 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002: Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation, 25.08.–29.08.2002, Praha. CZE. [CD-ROM] Praha: Process Engineering Publisher, 2002. 9 s. ISBN 82–86059–33–2.*
- [18] Krejčí, A. – Dohnal, M. – Dohnalova, J. – Loveday, B. K. – Rada, V. A Qualitative Dynamic Model of an Autogenously Mill. In *Sborník přednášek z 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002: Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation, 25.08.–29.08.2002, Praha. CZE. [CD-ROM] Praha: Process Engineering Publisher, 2002. 19 s. ISBN 82–86059–33–2.*
- [19] Krejčí, A. – Dohnal, M. – Rada, V. A Formalized Common Sense Analysis of Cement Kiln Models Based on Shallow Knowledge. In *Sborník abstraktů z 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002: Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation, 25.08.–29.08.2002, Praha. CZE. Praha: Process Engineering Publisher, 2002. CHISA 2002 – Summaries № 5: Systems and Technology, P7.126. ISBN 82–86059–33–2.*
- [20] Dohnal, M. – Krejčí, A. – Koivisto, R. – Starzak, M. A Fuzzy Pooling of Coal Dust Knowledge. In *Sborník abstraktů z 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002: Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation, 25.08.–29.08.2002, Praha. CZE. Praha: Process Engineering Publisher, 2002. CHISA 2002 – Summaries № 5: Systems and Technology, P7.160. ISBN 82–86059–33–2.*
- [21] Krejčí, A. – Dohnal, M. – Dohnalova, J. – Loveday, B. K. – Rada, V. A Qualitative Dynamic Model of an Autogenously Mill. In *Sborník abstraktů z 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002: Chemical Engineering, Chemical Equipment Design and Automation, 25.08.–29.08.2002, Praha. CZE. Praha: Process Engineering Publisher, 2002. CHISA 2002 – Summaries № 5: Systems and Technology, P5.212. ISBN 82–86059–33–2.*
- [22] Krejčí, A. Jazykové modely na bázi fuzzy matematiky pro řízení technologických procesů. In *Sborník z mezinárodní konference Conference about Structural Materials: CONSTRUMAT '95 (I), 24.09.–26.09.1995, Černice. CZE. Praha: Katedra stavebních hmot Fakulty stavební ČVUT Praha, 1995, s. 49–51. ISBN –.*

- [23] Krejčí, A. – Rada, V. Netradiční metody řízení komplexních systémů ve výrobě stavebních hmot. In *XII. Symposium on Science and Research in the Silicate Chemistry, Chemistry of Non-silicate Binders and Technology Application SILICHEM 2007*, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering & The Union of cement Manufactures if the Czech Republic & The Silicate Society of the Czech Republic, 19.09.–21.09.2007, Brno. CZE. [CD-ROM] Brno, FAST VUT v Brně, 2007. 13 s. ISBN 978–80–214–3475–2.
- [24] Krejčí, A. – Rada, V. Logistické řetězce a selská logika v řízení. In *Sborník přednášek k 6. ročníku odborné konference Inteligentní systémy pro praxi: Fuzzy logika, neuronové sítě a expertní systémy*, 06.11.–07.11.2001, Luhačovice. CZE. Ostrava: AD&M, 2001, s. 163–170. ISBN 80–238–7812–3.
- [25] Krejčí, A. Netradiční metody modelování a řízení komplexních systémů. In *Sborník přednášek k 6. ročníku odborné konference Inteligentní systémy pro praxi: Fuzzy logika, neuronové sítě a expertní systémy*, 06.11.–07.11.2001, Luhačovice. CZE. Ostrava: AD&M, 2001, s. 187–192. ISBN 80–238–7812–3.
- [26] Krejčí, A. *Informatika, modul M03: Technologie Internetu*. Elektronická studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Brno: FAST VUT v Brně, 2004. 69 s. ISBN: – .
- [27] Krejčí, A. – Rada, V. Selská logika v řízení komplexních systémů výroby stavebních hmot. In *XII. Symposium on Science and Research in the Silicate Chemistry, Chemistry of Non-silicate Binders and Technology Application SILICHEM 2007*, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering & The Union of cement Manufactures if the Czech Republic & The Silicate Society of the Czech Republic, 19.09.–21.09.2007, Brno. CZE. [CD-ROM] Brno, FAST VUT v Brně, 2007. 20 s. ISBN 978–80–214–3475–2.
- [28] Krejčí, A. – Rada, V. Non-conventional methods for controlling complex systems in the manufacture of building Material. In *Sborník z XII. Symposium on Science and Research in the Silicate Chemistry, Chemistry of No-nsilicate Binders and Technology Application SILICHEM 2007*, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering & The Union of cement Manufactures if the Czech Republic & The Silicate Society of the Czech Republic, 19.09.–21.09.2007, Brno. CZE. Brno, FAST VUT v Brně, 2007. Proceedings of Abstracts, s. 29–32. ISBN 978–80–214–3475–2.
- [29] Krejčí, A. – Rada, V. Operation of complex systems in production of construction materials and common sense logic. In *Sborník z XII. Symposium on Science and Research in the Silicate Chemistry, Chemistry of Non-silicate Binders and Technology Application SILICHEM 2007*, Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering & The Union of cement Manufactures if the Czech Republic & The Silicate Society of the Czech Republic, 19.09.–21.09.2007, Brno. CZE. Brno, FAST VUT v Brně, 2007. Proceedings of Abstracts, s. 33–36. ISBN 978–80–214–3475–2.

ABSTRACT

Modelling and simulation, generally known system disciplines, play unique roles at the studying of behaviour, design and implementation of control systems of real processes. Problems with the description and control of processes, however, are *sui generis* problems, which are characterised by a high complexity, high difficulty (often impossibility) of a formal mathematic description and problematic measurement of the decisive quantities in the production.

The first chapter of the work refers to the fact that in the case of such systems, classical formal approaches, based on a numerical mathematical analysis and supported by instruments of mathematical statistics, come up against an obstacle of limited knowledge of their application. Limits of the application of classical mathematical means arise from their principal precise approaches, based on the usage of objective information following from general laws interpreted by relations of classical mathematics.

The application of such approaches in the case of complex systems often leads towards necessary simplifications. What is more, a phenomenon occurs of a reduced practical application of the mathematical model as the complexity of model structures grows.

If it is not possible (due to the incapacity of an exact definition of the reality and instrumental terms) to describe relations between the individual quantities of the system, it is possible to proceed in two manners:

- Simplifying presumptions may be introduced which »simplify the complexity of the studied system« in such a manner that such system may be described then. A possible difference between described and real systems is a deficiency of such an approach. A mathematically exact description may easily have just little relation to the system studied.
- The level of description may be reduced in such a manner so that it is possible to describe the system without the application of simplifying presumptions. This approach has become current at the description of systems which use human language for such a description. When a natural language is used, vagueness does not represent any obstacle, as the vagueness of its semantics and the ability to work with vague terms are the most important characteristics of the natural language. However, until recently the mathematics has not had any instrument available which would enable such an approach, as the classical mathematics had no capacity to cope with the vagueness of the description.

The above-mentioned deficiencies, or the fact that the failure of mathematic models is caused by insufficient information of the studied system, may be eliminated by means of the application of methods which are enabled by a new scientific discipline – artificial intelligence.

In simple words, principles of the approaches towards artificial intelligence generally consist in the usage of knowledge which is not based on the validity of general objective laws of nature, but on human experience, which means on subjective, heuristic knowledge. Such approaches use term vagueness for the construction of efficient model structures, providing thus for the designing of non-conventional non-numerical models, the applicability of which may exceed borders of conventional mathematical-analytical models. On the basis of these, new non-conventional approaches towards solutions are created.

In practical application, when describing the behaviour and control of complex systems, conclusions are applied which result from decision-making processes in human brain. Although such conclusions are based on the comparison of not exactly-defined parameters of the described system, instruments completely different from the statistic ones are used for the deduction of such parameters. In such a case, term (verbal) vagueness is used; if adequate non-numerical algorithms are applied, integration is enabled of deep (objective) knowledge with superficial knowledge (subjective), a higher quality of conclusions is achieved.

While the classical mathematical statistics starts from laws of the empirical probability and uses knowledge of the probability density distribution of random events, methods applied for the working with vagueness start from the law of so-called possibility distribution. Although qualitative relations exist between the possibility and probability, these are two entirely different approaches.

The publication presented deals with two selected non-conventional non-numerical descriptions of determined systems based on the principles of artificial intelligence, and the application of these is described in the designing of automated control systems of technological processes. This publication deals specifically with fuzzy-logic based language models and qualitative models using the principles of common sense (experience, feelings, verbal description of events and processes, etc.).

In the second chapter of the work, basic (applied) terms are used from the field of fuzzy mathematics and fuzzy logic, and language models are characterised on the basis of fuzzy logic and they are defined as one of the forms of expert systems applicable for the control of complex multi-parameter non-linear systems. First publications from the field of fuzzy mathematics and fuzzy logic were published in the seventies of the last century. This theory penetrated very quickly into the practical application. The success of such a theory mostly consists in the fact that it deals with the term *vagueness* on the level of the interpretation of a mathematical theory, and it does not use the “vague formal instruments”.

In the third chapter of the publication, a theoretical base is laid of another methodology belonging to the field of artificial intelligence: the quantitative modelling, which is also applicable in practice for the modelling of systems of defined characteristics. The qualitative modelling originated approximately 50 years ago as a result of the implementation of military applications. This technique is based on the principles of a qualitative trend analysis applied for the generating of all possible so-called dynamic (time) scenarios. Contrary to quantitative procedures of solutions, a certain level of ignorance is not important in this case. Exact information is substituted with formulations describing knowledge obtained on the common-sense basis and sufficiently long practical experience.

The qualitative model may be based either only on a set of knowledge items (deep or superficial knowledge), or it may be a combination of conventional exact quantitative equations and qualitative knowledge description.

The fourth chapter of the publication deals with an introduction to the experimental part, in which the theories, described in the initial chapters, are applied in the designing of automated control systems of a cement kiln line. In this chapter, the determined system is described from the machine-technological point of view. A fact is pointed out that during burning and cooling processes of cement clinker, chemical and physical processes mingle in a manner difficult to define, such as mechanic counter current flow of materials and gases, endothermic (calcinations) and exothermic (sintering) reactions, quantitative and qualitative changes of material, heat exchange processes, etc. The simultaneous occurrence of such processes in the cement rotary kiln thus creates a heterogeneous system of processes which influence each other, and the quantification of these processes under such conditions turns out to be almost an irresolvable problem. The cement clinker burning process in a rotary kiln becomes, due to its nature, a multi-parameter non-linear system, the description and optimisation of which becomes almost impossible from the point of view of exact mathematical methods.

The fifth chapter shows the application of fuzzy-logic based language models when designing an automated control system of a cement kiln line. I designed and implemented a three-level structure of a language-based control system supported by an analysis of processes taking place in the cement kiln line, study of conditions of burning from the perspective of chemical and technical thermodynamics, identification measurements made on the kiln line, experience with the kiln line control, etc.

This chapter also offers a description of the designed modifications of such language models (changes to the course of language value classification functions), and an original algorithm of the calculation of the time of action interference which depends on values and trends of controlled values, and also results are described obtained in the practical application of the designed control system. First, such a system was tested off-line and operated as an advisor of the operator (the system was connected to the technological process, taking values of all the quantities, visualising these on a display of the process control computer, and generated action interventions – however, the system did not implement such interventions directly). Only after a thorough tuning-off of the control system, it was connected on-line to the process controlled.

The sixth chapter describes and presents in a similar manner a design of qualitative models of a cement kiln line, which are based on qualitative knowledge of the process behaviour of such a line. The first qualitative model presented characterises the behaviour of the cement kiln line; the second model defines action interventions applicable in the control on the basis of a formulation of qualitative dependences of changes of action quantities under defined trends of controlled quantities. Results then lead towards a formulation of conclusions, according to which, in this field, qualitative models may be successfully used e.g. as simulators of the behaviour of modelled processes, for the solution of problems related to non-standard statuses, for the testing of control systems on a different basis, or these may be used to predict the tendencies of vaguely known or completely immeasurable quantities, etc.

In the last chapter, a general comparison of both approaches is made, and conclusions following from both approaches are drawn. On the basis of practical experience, it may be said that a control system which uses fuzzy-logic based language models fully demonstrated its suitability for the purposes of the control of technological processes of the determined types. Also in the field of qualitative modelling, the determined problems were successfully addressed so that results could be acceptable for the practical application.

Although the mentioned results seem very promising, in this specific case I would rather recommend the application of language models for the control of a cement kiln line, as language models work with specific quantitative values of controlled and action quantities. I base my recommendation not just on the fact that such models are more understandable and familiar for the technicians. However, in this field, qualitative models may be successfully applied e.g. as simulators of the behaviour of a cement kiln line when training operators, resolving problems related to non-standard statuses, testing a different-base control system, etc. Such models may be also applied in the already-mentioned prediction of the course of vaguely known or completely immeasurable quantities, or for the determination of quasi irrational or hard-to-deduce relations.