

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

Obor 23 - 40 - 8

Katedra technické kybernetiky

Identifikace_cementárenských_pecí

S t a n i s l a v K U Ř Í K

Vedoucí práce : Ing. Miroslav Olehla, CSc. - VŠST

Konzultant : Václav Hanousek - VS VŠST

KTK ASŘ SF - 029

Rozsah_práce_a_příloh

Počet stran 52

Počet příloh a tabulek . 6

Počet obrázků 2

Vysoká škola: VŠST Liberec Fakulta: strojní
Katedra: technické kybernetiky Školní rok: 1981/82

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro s. Stanislava Kuřík a
obor automatizované systémy řízení výrobních procesů
ve strojírenství

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorozních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Identifikace cementárenských pecí

Zásady pro vypracování:

- 1) Seznamte se s principem výroby cementu a s principem práce na rotačních pecích.
- 2) Ověřte algoritmy pro identifikaci zvolených parametrů pece.
- 3) Proveďte výpočet přechodových charakteristik, impulzních charakteristik a koeficientů přenosu $F(z^{-1})$.
- 4) Vyhodnoťte rozdíly získaných modelů vztažených na přechodové charakteristiky.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 8
PSČ 461 17

Autorské právo se řídí směrnicemi
MŠK pro státní záv. zkoušky č.j. 31
727/62-III/2 ze dne 13. července
1962-Věstník MŠK (XVI), počet 24 ze
dne 31. 8. 1962 §17 aut. z. č. 115/53 Sb.

V 170/82 S

KTK/ASŘ-S

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy:

40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

1. Seukup, J.: Identifikace soustav; skriptu ČVUT Praha, SF, 1979.
2. Iserman, R.: Comparison of six On-line Identification and Parameter Estimation Methods; Automatica 10, 1974.
3. Sborníky IFAC Symposium - Identification.
Sborníky ASŘ TP - ČSVTS Ostrava.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Miroslav Olehla, CSc.

Václav Hanousek - VS VŠST

Datum zadání diplomové práce:

15.9.1981

Termín odevzdání diplomové práce:

4.6.1982




Doc. Ing. Ján Alaxin, CSc.

Vedoucí katedry


Doc. RNDr. Bohuslav Stríž, CSc.

Děkan

Liberci 11.9. 81
V dne 10

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

Radim Fiala

V Liberci 4.6.1982

Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení		Význam
R_{yy}	-	autokorelační funkce
R_{uy}	-	vzájemná korelační funkce
T_{ij}	-	elementární matice rotací
h	-	impulsní charakteristika
e	-	regulační odchylka
v	-	poruchová veličina
u	-	vstupní signál
y	-	výstupní veličina
T_u	-	doba průtahu
T_n	-	doba náběhu
n	-	řád soustavy
z	-	nezávisle proměnná v Z-transformaci
t	-	nezávisle proměnná času
Δ	-	perioda vzorkování

1	Úvod	7
2	Výroba cementu	8
	2.1 Portlandský cement	8
	2.1.1 Vlastnosti cementu	8
	2.1.2 Suroviny	9
	2.1.3 Příprava surovinové směsi	10
	2.2 Pálení surovinové směsi	13
	2.2.1 Palivo a jeho příprava	13
	2.2.2 Procesy při pálení surovinové směsi	14
	2.2.3 Rotační pece	16
	2.2.4 Zpracování slínku	21
	2.3 Automatizace technologických procesů	22
3	Identifikace	27
	3.1 Identifikace soustav	27
	3.2 Deterministické metody	31
	3.3 Výpočet impulsní charakteristiky z odezvy na obecný vstupní signál	32
	3.4 Výpočet přechodové charakteristiky z odezvy na obecný vstupní signál	36
	3.5 Elementární matice rotací	38
	3.6 Výsledky aplikace identifikace na data, naměřená na pecní lince 3000 td^{-1} v Pracho- vicích	43
	3.7 Vyhodnocování přechodových charakteristik ...	43
	3.8 Z-transformace a výpočet přechodových cha- rakteristik z diskrétních přenosů	44

4	Vyhodnocení a výsledky výpočtů	46
5	Závěr	48
	Literatura	50

Rozvoj národního hospodářství v Československé socialistické republice kladé stále větší nároky na stavebnictví a zejména na oblast výroby stavebních hmot. Rozhodujícím stavebním pojivem je a zůstane i nadále cement. S vývojem nových konstrukcí se stále zvyšují požadavky, především na portlandský cement. To vede nejen ke zlepšování, ale i k rychlému zavádění rozličných zvláštních cementů, které mnohem lépe vyhovují nejroznějším novým upotřebením. Vznikají další druhy betonů a budují se nové, automatizované závody. Zpětně je zase ovlivňována výroba cementu. Zjednodušuje se těžba vápence, zlepšuje se pásová výroba, vzrůstá hospodárnost pecí, volí se výhodnější způsoby mletí a vzrůstá podíl dopravy sypkého cementu.

Spotřeba cementu roste tak rychle, že již dosavadní suroviny ani nepostačují. Dochází tedy ke zpracování nových, dosud opomíjených, zejména různých odpadních látek, strusky, také jiných než vysokopecních zásaditých, přírodně i tepelně zpracovaných hornin, důlních uhelných odpadů, elektrárenských kotelních popílků.

Zvýšení spotřeby cementu se zabezpečuje buď modernizací existujících cementáren nebo výstavbou nových cementáren. V případě budování nových cementáren u nás i ve světě je taková zaměřenost, že se instalují v závodech velká výkonná výrobní zařízení, která jsou začleněna do cyklu výroby v jedné lince. Tyto stroje je nutné řídit s maximálním vyloučením přímých zásahů lidského činitele do výrobního cyklu, aby se dosáhlo požadovaných výkonů, kvality hotového produktu, rovnoměrného chodu těchto velkých strojů a úspory všech druhů energie. Vyloučení lidského činitele z řízení těchto strojů je důležité

proto, že jakýkoliv výpadek stroje se okamžitě projeví v plnění plánu výroby a má tudíž značné ekonomické dopady. Řízení výrobních agregátů se uskutečňuje na bázi využití výpočetní techniky, měřicí a regulační techniky v těsné vazbě na určitý systém ovládání a systém řízení závodu. Vytváří se automatizovaný systém řízení, ve kterém má člověk v procesu rozhodování aktivní úlohu.

Důležitost rozvoje výroby cementu se odráží i v péči státních a stranických orgánů. V /6/ je mimo jiné ve stati " Průmysl stavebních hmot " uvedeno: "Rozvojem výroby stavebních hmot krýt potřeby národního hospodářství v sortimentní skladbě, zaměřovat ji na dosažení co nejvyšších úspor spotřeby energie a paliv. Zvýhodňovat především výrobu materiálů a výrobků nenáročných na energii, paliva a kovy a s vyššími tepelně izolačními vlastnostmi, které šetří energii i při užívání stavebního díla. S cementem důsledně šetřit a jeho užití racionálně usměrňovat. Zlepšovat sortiment cementu a zprogresivňovat normy jeho spotřeby."

2 VÝROBA CEMENTU

2.1 Portlandský cement

2.1.1 Vlastnosti cementu

Portlandský cement je hydraulické pojivo, tvořené jemně semletým slínkem, který získáme vypálením surovinové směsi vhodného chemického složení do slinutí. Je složen hlavně ze křemičitanů vápenatých. Nejdůležitější složkou je kysličník vápenatý, jehož větší množství, je-li chemicky vázáno znamená zpravidla i vzrůst pevnosti. Samo chemické složení však nepostačuje k charakteristice cementu, tím méně k posouzení kvality

a trvanlivosti betonu, který z něho zhotovíme. Přesto lze na základě chemického složení usuzovat na řadu důležitých vlastností, jako na nerostné složení, způsob tuhnutí a tvrdnutí, velikost smršťování při vysychání betonu a rozpínání při jeho provlhání, obvyklá barva portlandského slínku je šedá, se slabým odstínem do zelenava.

Důležitou vlastností je i jemnost mletí. Normální cementy se nesmí mlít příliš jemně, neboť příliš jemný cement snadněji uskladňováním navlhne a hrudkovatí, počátek tuhnutí se zkracuje a doba tuhnutí prodlužuje, dochází k většímu smršťování a tím i ke vzniku trhlinek. Jemnější mletí však i některé vlastnosti zlepšuje, zejména počáteční pevnosti, zpracovatelnost, přilnavost i nepropustnost malty. Pro dosažení určitých vlastností portlandského cementu se mohou přidávat při mletí cementu speciální přísady, maximálně v množství do 1%.

K ochraně betonu před účinkem vod bohatých na rozpuštěné soli se používá cementu zvláštního mineralogického složení a k cementu se přidávají hydraulické přísady, které podstatně zlepšují odolnost cementu proti korozi. Požadavky na jakost portlandského cementu jsou těsně spjaty s úrovní stavební výroby. Široké zavádění efektivních montovaných předem předpjatých konstrukcí ve stavebnictví vyžaduje použití betonů vysokých pevností, vyrobených z vysokohodnotných cementů.

2.2 Suroviny

Suroviny k výrobě portlandského cementu mají obsahovat všechny složky potřebné ke vzniku dobrého slínku. Hlavními surovinami pro výrobu portlandského cementu jsou v přírodě značně rozšířené usazené vápenaté horniny s vysokým obsahem

uhličitanu vápenatého, hlinité suroviny s vysokým obsahem křemene a kyslíčnicků hlinitého a železitého. K vápenatým horninám používaným v cementářském průmyslu patří především vápence a křída. Tyto suroviny tvoří vápenatou složku surovinové směsi. K hlinitým horninám náleží hlína, hlinité břidly, spraš aj., které tvoří hlinitou složku surovinové směsi.

Zásadně důležitá je přítomnost dostatečného množství vápence v surovině, neboť jinak by se nemohly tvořit vysokovápennaté slínkové nerosty a nebyl by zajištěn potřebný vývin počátečních pevností. Velmi výhodnou surovinou pro výrobu portlandského cementu je křída, neboť se snadno rozplavuje v kal. K portlandskému cementu je dovoleno přidávat jemně mleté hydraulické nebo inertní přísady. Úkolem hydraulických složek cementářské suroviny je vázat při slinování vápno, uvolněné předchozím rozkladem vápence. Nejvíce používanou umělou hydraulickou přísadou je granulovaná vysokopecní struska. Je možné použít zásaditých a kyselých vysokopecních strusek z výroby slévárenského, ocelárenského a některého speciálního surového železa. Další důležitou surovinou je sádrovec, který se v cementářství přimísí ke slínku, aby zpomalil počátek tuhnutí portlandského cementu, jindy má zase za účel vyvolat rozpínání, upravit smršťování nebo pevnosti.

2.3 Příprava surovinové směsi

Suroviny zvolené k výrobě portlandského cementu je třeba rozmělnit a ve vypočteném poměru smísit tak, abychom získali směs, dávající v peci dobrý slínek. Tato příprava surovinové směsi se skládá z řady technologických úkonů, zejména ze semílání, třídění a mísení, volených a prováděných různými

stroji především podle povahy surovin. Podle nich se také řídí, postupuje-li se za mokra, polomokra nebo za sucha. V prvním případě se pracuje se surovinovým kalem, ve druhém se surovinovým těstem a ve třetím se surovinovou moučkou.

Postupem za mokra je výhodné vyrábět cement z měkkých, snadno rozplavitelných surovin, zejména se značným obsahem vlhkosti. K přednostem mokrého způsobu patří kromě snadnosti rozpojování u měkkých surovin snadnější manipulace, poměrná jednoduchost, tedy levnější investice a lepší možnost obdržet i při kolísajících surovinách stejnoměrný jakostní slínek. Nevýhodou je větší specifická spotřeba tepla, než při práci za sucha, a také složitější kontrola surovinového kalu. V případě postupu za polomokra vyrábíme portlandský slínek z cihel, vytvářených z těsta, které obsahuje 20 až 30% vody.

Při postupu za sucha se plní do pece surovinová moučka, buď ve formě moučky nebo zbriketovaná. Výhodou je menší spotřeba paliva, neboť se v peci odpařuje méně vody než při práci za mokra nebo polomokra. Surovinová moučka se skladuje v zásobnících se spodním odebíráním, její složení se koriguje malou přísadou vysokoprocenního vápence. Výhodou suchého způsobu je především menší spotřeba paliva, a tedy levnější provoz, také jednodušší kontrola. K nevýhodám patří do určité míry složitější zařízení.

Za dnešního stavu techniky lze jak mokrým, tak suchým způsobem vyrobit zcela rovnocenný jakostní cement, proto volba způsobu výroby záleží především na povaze surovin /vlhkost a drtitelnost/, na klimatických poměrech /deštěm změkklé suroviny/ a v současné době na ceně a druhu paliva /uhlí, ropa, plyn/.

Nejnáročnější na spotřebu elektrické energie je při výrobě

cementu drcení a mletí. Na drcení a mletí surovin, tuhého paliva, slínku, sádrovce a hydraulických přísad se spotřebuje 70 až 80% veškeré elektrické energie při výrobě cementu. Proto také správná volba způsobů drcení a mletí podstatně zlepšuje technickohospodářské ukazatele výroby cementu.

Jedním z nejdůležitějších pochodů při přípravě surovin k pálení je mletí, při němž se surovina v podobě zrn rozmělnuje v prášek. Jemnost mletí surovin má rozhodující vliv na rychlost tvorby slínku při pálení. K mletí surovin slouží mlýny pracující s otevřeným nebo uzavřeným okruhem. Mletí v otevřeném okruhu se vyznačuje tím, že materiál prochází mlýnem jen jednou. Aby všechny částčky byly rozemlety na danou jemnost, musí být ve mlýně delší doba. Mlýny pracující s otevřeným okruhem jsou konstrukčně jednodušší a provozně spolehlivější. Proto se jich také v cementářském průmyslu používá k mletí surovin při mokrému způsobu výroby. Jemné mletí surovin se provádí ve vícekomorových mlýnech s otevřeným okruhem. Uvnitř mlýna jsou vestavěny propustné mezistěny s otvory, které rozdělují vnitřní prostor na dvě, tři nebo čtyři komory. Materiál se mele tělesy, kterými je mlýn naplněn. V cementárnách se k tomu používá ocelových koulí nebo ocelových válečků. V případě mletí v uzavřeném okruhu surovina prochází mnohokrát mlýnem, který je spojen se zařízením pro třídění materiálu na jemné a hrubé frakce. jemné se dopravují k dalšímu zpracování a hrubé frakce se vrací zpět do mlýna k dodatečnému domletí.

K dávkování se v cementárnách používají nejčastěji automatické vážicí dávkovače. Vážicí dávkovače umožňují s velkou přesností řídit podávání materiálu do mlýna a tak udržovat vzájemný poměr složek.

Rozhodující vliv na provoz pece, životnost vyzdívky a jakost vyrobeného slínku má stálost chemického složení surovinové směsi určené k pálení. Aby bylo dosaženo potřebného stupně homogenizace surovinové směsi, je surovina po mletí korigována a homogenizována. V současné době se korekce a homogenizace směsi spojuje do jednoho sila, kde se obsah pneumaticky promíchává. Závěrem je nutné zdůraznit, že vážicí dávka-če dávkují surovinové materiály poměrně přesně, a proto surovinová směs potřebuje pouze nepatrné korekce.

2.2 Pálení surovinové směsi

2.2.1 Palivo a jeho příprava

Cementářský průmysl je velkým spotřebitelem technologického paliva, kterého je zapotřebí k pálení surovinové směsi, k sušení tuhého paliva, hydraulických přísad a surovin /při suchém způsobu výroby/ a také k výrobě páry na ohřívání oleje a rozmrazování surovin v zimní době. K pálení surovin v rotačních a šachtových pecích a též k sušení paliva a přísad v sušících bubnech se používá tuhého, tekutého paliva /olej/ a plynného paliva /přírodní nebo umělý plyn/. Aby bylo dosaženo vysoké teploty, potřebné k pálení surovinové směsi, spaluje se palivo bezprostředně v pecích, do nichž se přivádí potřebný vzduch pro hoření. V rotačních pecích se 25 až 35% z celkového množství vzduchu přivádí společně s palivem uhelnou tryskou. Tento venkovní chladný vzduch se nazývá primární a je dodáván ventilátory nebo rotačními dmychadly, ostatní vzduch, který se nazývá sekundární, se ohřívá teplem, které mu předává slínek při průchodu chladičem, a vstupuje do pece účinkem podtlaku v peci, vyvozovaného tahem komína.

Celková spotřeba vzduchu a poměr mezi primárním a sekundárním vzduchem závisí na druhu a jakosti používaného paliva.

K pálení surovinové směsi v rotačních pecích se může použít práškovitého, tryskou rozprášeného paliva připraveného ze směsi dvou druhů uhlí - dlouhoplamenného a krátkoplamenného nebo z uhlí jednoho druhu, má-li vyhovující výhřevnost a potřebný obsah těkavých látek.

V cementárnách, které jsou v blízkosti podniků zpracovávajících naftu, se k pálení surovin v rotačních pecích používá mazutu. V závodě se uskládá ve speciálních kovových zásobnících. Ze zásobníků se mazut čerpá do menších kovových spotřebních nádrží, z nichž se vede k tryskám, jimiž se vstříkuje do pece. Nutnou podmínkou pro dobré spalování mazutu v rotačních pecích je jeho velmi jemné rozprášení pomocí trysek a potom důkladné promíchání se vzduchem.

Jako paliva v cementárnách se používá také zemní plyn. Používají se i umělá plynná paliva, která se získávají při nízkotepevné a vysokotepevné karbonizaci tuhého paliva, při výrobě surového železa ve vysokých pecích, při zplyňování tuhého paliva v plynových generátorech a při podzemním zplyňování uhlí. Plynné palivo má ve srovnání s tuhým a tekutým palivem řadu předností. Plyn nepotřebuje zvláštní úpravu před spalováním, což značně snižuje investiční a výrobní náklady, jeho použití podstatně ulehčuje řízení technologického procesu při pálení a zjednodušuje způsoby automatizace pece.

2.2.2 Procesy při pálení surovinové směsi

Při teplotách 1400 až 1450°C při pálení surovinové směsi probíhají složité fyzikálně chemické a termochemické pochody, při nichž se tvoří minerály, které vytvářejí slinuté granálie

- portlandský slínek. Tvorba slínkových minerálů při pálení, složení slínku a vlastnosti cementu závisí na fyzikálních vlastnostech a chemickém složení pálené surovinové směsi, na druhu paliva, na teplotě a době výpalu a na rychlosti ochlazení slínku.

Základním zařízením k pálení slínku je rotační pec, kterou lze rozdělit podle charakteru procesů, které probíhají v jednotlivých částech pece na šest teplotních pásem, a to pásmo sušící, předehřívací, kalcinační, exotermické, slinovací a chladící. V sušícím pásmu probíhají od vstupu materiálu do pece pouze fyzikální pochody, jako vypařování vody z materiálu a vysoušení a předehřívání materiálu průměrně na 200 °C. Při mokrému způsobu výroby probíhá v tomto pásmu tvorba hrudek. Při dalším zahřívání se hrudky rozpadají na podstatně menší granálie. Ze sušícího pásma postupuje materiál do pásma předehřívacího, kde se zahřívá na 500 až 650 °C. V tomto pásmu začínají chemické reakce a mění se chemické složení a fyzikální vlastnosti surovinové směsi. V kalcinačním pásmu, v němž se teplota materiálu zvyšuje na 900-1200 °C, se dekarbonizuje uhličitán vápenatý a hořečnatý, čímž vzniká značné množství volného vápna, které se nachází v jemně rozptýleném stavu. V krátkém exotermickém pásmu se teplota zvyšuje na 1300 °C a dokončují se zde reakce v tuhém stavu. Ve slinovacím pásmu je teplota na počátku 1300 °C, potom se zvyšuje až na 1450 °C a na konci pásma opět klesá. Materiál se zde taví, vytváří tekutou fázi, která reaguje s produkty reakcí v tuhém stavu, probíhá proces slinování. Materiál vstupující do slinovacího pásma má silně pórovitou strukturu a přes smrštění materiálu má tuto strukturu i vznikající slínek. V posledním pásmu se teplota snižuje na 1100 až 1000 °C.

Část tekuté fáze, která tuhne, přechází do sklovitého stavu a ostatní část do krystalického.

2.2.3 Rotační pece

První rotační pec byla uvedena do pravidelného provozu až na přelomu 20.století. Postupem doby byla značně zlepšena a dnes na ni připadá většina světové výroby. Rotační pec je ocelový válec, který se skládá z jednotlivých článků-lubů, příčně a podélně svařovaných. Oproti dřívějšímu nýtovému spojení se dnes používá celosvařované konstrukce válce, kde je spotřeba kovu o 30% menší než u nýtované konstrukce a plášť je naprosto hermetický a tuhý. Pro účelné využívání tepla v peci je rozhodující poměr mezi délkou pece a jejím průměrem. Při mokrému způsobu výroby nemá být poměr mezi délkou a průměrem pece větší než 40 a při použití výměníků tepla za pecí 20 až 25. Průměr moderních pecí je 3 až 5,8 metru, délka 100 až 185 metrů při mokrému způsobu výroby a 95 až 130 metrů při suchém způsobu výroby. Tloušťka ocelového plechu, z něhož jsou luby zhotoveny, závisí na rozměrech pece a na teplotě pásu pece. Luby pro slinovací pásmo se zhotovují z ocelového plechu tloušťky 40-46mm a pro ostatní pásma z plechu tloušťky 24-40mm, což umožňuje dát plášti největší tuhost, která působí zvláště na trvanlivost vyzdívky. Podél délky pece se užívá 4 až 9 podpor, které se skládají z masivních ocelových desek s jedním párem kladek uložených na železobetonových základech. Plášť pece je opásán ocelovými bandážemi, z nichž každá se opírá o pár kladek. Pro kontrolu podélného pohybu pece, která mívá obvykle sklon 3 až 4%, slouží kontrolní kladky umístěné u podpory, které jsou u náhonového ozubeného kola pece a na zvlášť velkých pecích ještě u dvou nebo

tří bandáží. Pece mohou mít stejný průměr po celé délce, mohou mít rozšířené sušící pásmo, dvě rozšířená pásma - sušící a slinovací, rozšířené slinovací pásmo nebo rozšířené kalci-nační pásmo. Rozšířením pásma se prodlužuje doba pobytu páleného materiálu v pásmu a tím se zvyšuje intenzita pálení následkem lepší výměny tepla mezi materiálem a plyny.

Základní důležitost pro provoz pece má pohon pece, a proto se mu věnuje stálá pozornost. Obstarává její obvodový ozubený věnec, zhotovený z několika dílů z ocelové litiny. Aby měla pec i při pomalém otáčení klidný chod, volí se malé ozubení. Počet otáček za minutu je třeba podle potřeby měnit. Změna otáček pecí se dosáhne používáním komutátorových motorů, motorů s pomocí regulačních trafo nebo může být pohon pece i hydraulický. Dolní konec pece je ukončen vysunovatelnou hlavou s hořákem. Výhodné je umístění hlavice na kolečkách a kolejkách, neboť po zhasnutí pece usnadňuje odsunutí a přístup do pece za účelem oprav vyzdívky. Hořák je uložen pohyblivě, takže jej lze i při provozu podle volby nařídít na všechny strany, zasunout více nebo méně hluboko do pece, a tím měnit délku slinovacího pásma. Používá se i více hořáků v jedné peci, aby se lépe rozdělil žár a zkrátilo pálení. Některý hořák se trochu skloní, aby se hořlavá směs lépe promíchala. Nahlédací otvory v hlavě pece se vybavují tepelně odolným modrým zasklením, aby se pohled do pece zlepšil.

Velkou důležitost na výkon pece, chod pece i jakost slínku má plnění pece surovinou. Dnes se staví plnicí zařízení výborně řiditelné, které se s chodem pece synchronizuje.

U každé pece je třeba uvážit ještě úlet prachu, neboť kdyby se nevracel, znamenal by ztrátu suroviny. Obvykle se zachycuje filtry a samočinně vrací.

Aby byl úlet co nejmenší, má mít pec pouze jediný průměr. Je třeba zdůraznit, že prášení není škodlivé jen s ohledem na úsporu hmoty, ale také vzhledem k tepelné hospodárnosti, neboť zhoršuje přenos tepla sáláním.

Ke stabilizaci slínku a ke zvýšení obsahu alitu přispívá i chlazení pláště slinovacího pásma. Kromě toho se chlazením slinovacího pásma podstatně přispívá ke zvýšení trvanlivosti vyzdívky vývinem pevného ochranného nálepku.

Aby byl plášť rotační pece chráněn před účinkem vysokých teplot, vyzdívá se uvnitř žáruvzdornými hmotami, které zároveň slouží jako tepelná izolace proti nadměrným ztrátám tepla sáláním. Protože je vyzdívka v jednotlivých pásmech pece vystavena nestejným teplotním podmínkám a různému stupni opotřebení, vyzdívá se různými žáruvzdornými materiály. Prvé rotační pece měly šamotovou vyzdívku. Poznatek o vzniku nálepku, který byl původně považován za nalepený slínek vedl k tomu, že se ze slínkové hmoty dělala celá vyzdívka. Novější je vyzdívání rotačních pecí magnezitem. V zámoří je zaveden magnezit chemicky vázaný, tedy nepálený, za tepla lisovaný na plechové podložky, které v žáru shoří a vytvoří magnoferitické stmelení vyzdívky na jednolitou hmotu. Zvláště těžkým podmínkám je vystavena vyzdívka ve slinovacím pásmu, které je nejteplejším pásmem pece. Toto pásmo se vyzdívá tvárnice-
mi, které mají nejen vysokou žáruvzdornost a tepelnou odolnost, ale i vyšší odolnost proti korozi slínkem. Při provozu je vyzdívka vystavena různým teplotním a tepelně mechanickým účinkům, které na ni mají ničivý účinek. Odolnost vyzdívek ve slinovacím pásmu má pro chod pece neobyčejně velký význam, protože nutnost její výměny snižuje využití pece.

Nejrozšířenějším žáruvzdorným materiálem pro vyzdívku slinovacího pásma je chrommagnezit nebo speciální magnezitové tvarovky. Chrommagnezitová tvárnice má vysokou žáruvzdornost a odolnost proti korozi slínkem, značnou tepelnou vodivost a vysoký koeficient roztažnosti při odolnosti proti změnám teploty a malou odolnost k otěru.

Dokonalejším typem žáruvzdorných materiálů jsou chrommagnezitové tvárnice s nižším obsahem chromitu. Použití tohoto typu chrommagnezitových tvárnice umožnilo zlepšit výdržnost vyzdívky v rotačních pecích až 3krát ve srovnání s obvyčejnými chrommagnezitovými tvárnicemi. Lepší výdržnost je způsobena nejen menším obsahem chromitu, ale i tím, že při jejich použití se ve slinovacím pásmu vytváří vysokoteplotní sloučenina - magneziumferit.

Na vyzdívku slinovacího pásma lze použít magnezitových žáruvzdorných hmot se speciální odolností proti změnám teploty a žáruvzdorných materiálů s vysokým obsahem kysličníku hlinitého a materiálů fosferitových. Žáruvzdorná staviva s vysokým obsahem kysličníku hlinitého se vyrábějí z páleného bauxitu, přírodního a umělého korundu s použitím žáruvzdorného jílu jako pojiva. Výhodou je vysoká žáruvzdornost a odolnost proti změnám teploty. Nevýhodou je nedostatečná odolnost proti korozi slínkem. Speciální magnezitové tvarovky se vyrábějí z ostře páleného magnezitu s přísadou technického kysličníku hlinitého. Mají vysokou žáruvzdornost, dobrou odolnost proti změnám teploty a odolnost proti korozi slínkem. Vlivem vzájemné reakce mezi páleným slínkem a žáruvzdornou hmotou se na vyzdívce slinovacího pásma tvoří vrstva nálepky z páleného materiálu. Tento nálepek nereaguje s páleným materiálem, a tím chrání vyzdívku před rozru-

šováním, snižuje teplotu horkého povrchu vyzdívky a zmenšuje napětí, které v ní vzniká a také stupeň opotřebení. Nálepek také chrání tvarovky před kolísáním teploty uvnitř pece a rovněž před chemickým a mechanickým účinkem páleného materiálu.

Při mokrému způsobu výroby se používá dlouhých rotačních pecí s vnitřním zařízením pro výměnu tepla. Jako vnitřních zařízení se u těchto pecí používají řetězové clony, předehříváče kalu a kovové a keramické výměníky tepla. Pece mohou být vybaveny buď řetězovými závěsy, nebo řetězovými závěsy ve spojení s předehříváči kalu, nebo komůrkovými výměníky tepla a také všemi typy zařízení na výměnu tepla současně. Řetězová pásma se instalují v pecích, jejichž poměr délky k průměru je větší než 25, vestavují se do sušicího pásma na vzdálenost 3 až 5m od chladného konce pece.

Při suchém způsobu výroby se podle fyzikálně chemických vlastností surovin surovinová směs pálí v rotačních pecích různé konstrukce. Jestliže jsou suroviny neplastické a nelze z nich vytvářet granálie, dodává se do pece buď suchá surovinová mouka nebo mouka navlhčená v míchacích šnečích. Plastické suroviny se předběžně granulují a jako pevné granálie přicházejí do pece. Nejvíce jsou rozšířeny rotační pece bez zařízení pro výměnu tepla, ve kterých sušení, dekarbonizace a slinování probíhá v jednom zařízení. Dále se také používají pece s roštovým kalcinátorem. Hlavní předností této pece ve srovnání s dlouhými rotačními pecemi je nízká spotřeba tepla k pálení a malé rozměry, které umožňují snížit investiční náklady. Ke zvýšení intenzity pálicích pochodů v rotačních pecích se používá celé řady zařízení - rotační pece s předehříváči kalu, rotační pece s kalovými filt-

ry, rotační pece se zařízením na rozprašování kalu a rotační pece s předřazenými výměníky tepla.

Značný vliv na strukturu, mineralogické složení a melitelnost, na technické vlastnosti cementu má chlazení slínku páleného v rotační peci. V rotačních pecích se slínek ochlazuje poměrně rychle, proto ve slíncích těchto pecí je vždy přítomna skelná fáze. Cementy vyrobené z rychle chlazených slínek se vyznačují vyšším hydratačním teplem, větší odolností proti síranům a menším smrštěním. Slínek získaný v rotačních pecích při mokřém i suchém způsobu se chladí vzduchem v chladičích různých konstrukcí. Nejčastěji to jsou bubnové chladiče otevřené, planetové a roštové. Největší rychlost a stupeň ochlazení slínku dovolují roštové chladiče postavené pod pecemi nebo sloužící jako prodloužení pece. Roštový chladič má pohyblivý rošt složený z jednotlivých roštnic a uzavřený do nepohyblivého kovového pláště. Pod roštem je instalován šnek, který slouží ke shrnování drobného slínku k dopravě na společný slínkový dopravník.

2.2.4 Zpracování slínku

Nesemletý slínek nemá vlastnosti portlandského cementu. Musí být jemně mlet, aby s vodou reagoval. Ani potom moučka nemá žádané vlastnosti, neboť tuhne příliš rychle a někdy se i rozpíná. Čerstvý slínek se nechává před mletím odležet a pak se semílá spolu s 2 až 5% sádrovce a 15% hydraulické přísady ve mlýnech s otevřeným nebo uzavřeným okruhem. Portlandský slínek se mele nejčastěji v tříkomorových nebo čtyřkomorových trubnatých mlýnech, jejichž výkon je menší než u stejného mlýna surovinového, neboť slínek je tvrdší než vápenec. Při semílání přidáváme ke slínku přísady, které nám řídí dobu

tuhnutí, zlepšují jiné vlastnosti cementu a usnadňují mletí. Patří sem především sádrovec, který zpomaluje tuhnutí.

Zkrácení doby mletí se dosahuje přísadami koloidního uhlí, černého uhlí, kalafuny nebo sulfitových louhů. Cement se mletím značně ohřívá, a proto se cementové mlýny chladí sprchou vody, při dopravě cementové moučky pneumaticky nebo čeráním, je v zásobnících vzduchem zkypřována, a tím také chlazená. Cement lze také chladit tím, že zvolna stéká po chlazené ploše. Cement vyrobený v mlýnech se dopravuje potrubím pomocí pneumatických rotačních nebo komorových čerpadel nebo pásovými dopravníky do sil. V objektu sil jsou umístěny i stroje na balení cementu do pytlů. Dálkově se cement dopravuje nejrůznějšími prostředky: v autech, železničních vagónech i na lodích. Cement je možné dopravovat jako pytlovaný nebo volně ložený. Pro menší stavby zůstává, přes stále šířící se dopravu volně loženého cementu, pytlování výhodné.

2.3 Automatizace technologických procesů

Automatizace technologických procesů ve výrobě cementu přispívá ke zvýšení produktivity práce, protože se zmenší počet obsluhujícího personálu, zvýší se výkon zařízení, sníží spotřeba paliva a elektrické energie a zlepší se jakost cementu. Automatizovaný systém řízení se v oblasti výroby cementu buduje samostatně pro oblast automatizovaného systému řízení ekonomických a správních agend a oblast automatizovaného systému řízení technologického procesu /ASŘ TP/.

Pro cementárnu platí, že ASŘ TP je systém řízení technologického procesu racionalizovaný pomocí automatizační, regulační a výpočetní techniky podle předem daných kritérií.

Zdokonalení prostředků automatizace a použití počítačů pro regulační účely podstatně rozšířily a dále rozšiřují možnosti zavádění ASŘ TP v cementářském průmyslu.

ASŘ TP surovinového hospodářství po stránce skladby a chemické stabilizace surovinové moučky se dělí na řízení navážení surovin, včetně automatického odběru vzorku surovin a řízení skladby vlastní surovinové směsi. Řízení navážení surovin zajišťuje dlouhodobě co nejlepší využití ložiska včetně partií méně hodnotných vápenců a na druhé straně zajišťuje zásobování závodu dostatečným množstvím suroviny vhodné kvality. U nově budovaných cementáren se nyní běžně používá průtočného systému homogenizace. Úkolem algoritmu řízení skladby surovinové směsi je určování nastavení dávkovačů jednotlivých surovinových složek tak, aby kvalitativní parametry surovinové směsi vstupující do homogenizace se pohybovaly v požadovaných mezích. Činnost algoritmu dělíme na počáteční nastavení dávkovačů, ovládání analyzátoru, přebírání výsledků měření surovin, kontrolu provozu surovinové mlýnice, dávkovačů, homogenizačních sil, analyzátoru, identifikaci poruch, hlášení, integraci výkonu surovinové mlýnice, jednotlivých kysličníků a integraci výkonů jednotlivých dávkovačů surovinových složek. Tímto řešením přípravy surovinové moučky z hlediska chemické stabilizace dosahujeme nemalého ekonomického efektu - lepší využití ložiska, předpoklad pro výrobu jakostnějších cementů a tím cementů vyšších tříd, předpoklad pro stejnoměrnější chod rotační pece, a tím úspory paliva a prodloužení vyzdívek rotační pece a zvýšení časového využití rotační pece.

Z celé oblasti výroby cementu je nejsložitějším problémem automatické řízení technologického procesu výpalu slínku

zvláště tehdy, je-li úkolem dlouhodobé zvládnutí variability provozních podmínek a různých technologických situací, s cílem dosáhnout stabilní a efektivní výroby. Řešením je adaptivní systém řízení výpalu slínku, který se vyznačuje variantností způsobů řízení za různých situací a podmínek. Výhodné je to, že tento adaptivní systém řízení pracuje v několika úrovních. Cyklicky snímá měřené provozní veličiny, matematicky je zpracovává, např. filtrací, nebo vypočítává střední hodnoty, gradienty, nové odvozené hodnoty, a dále je ukládá do paměti počítače nebo zaznamenává tiskem v protokolech. Usnadňuje tak kontrolu i obsluhu výrobního zařízení a poskytuje potřebné vstupní veličiny pro řídicí programy. Na další úrovni plní systém svou hlavní řídicí funkci.

Na základě zjištění regulačních odchylek řízených veličin od jejich žádaných hodnot a s použitím dalších vypočtených veličin systém vypočítává dle zadaných algoritmů řídicí zásahy a vydává je jako akční veličiny do technologického procesu. Akční veličiny působí buď přímo na akční orgány /ventily, klapky atd./, nebo slouží k přestavování žádaných hodnot podřízených analogových regulátorů. Na této úrovni řídicího systému jsou algoritmy pro vytvoření adaptivních vlastností uspořádány v několika řídicích strategiích, které odpovídají různým technologickým podmínkám a provozním situacím. Rozhodnutí o způsobu řízení a použití se provede na základě identifikace okamžitých provozních podmínek nebo dle ručního zadání. Úkolem řídicí úrovně je náběh a řízení výkonu pecní linky při zvyšování výkonu po odstávkách s cílem lepšího využití tepla nebo zrovnoměrnění kvality slínku, stabilizační řízení teplotních a tahových poměrů pecní linky při malých regulačních odchylkách řízených veličin a při pevné

žádané hodnotě provozních parametrů, řízení teplotních podmínek v peci při velkých regulačních odchylkách teplot /zejména teploty ve slinovacím pásmu/, řízení v nouzových podmínkách při ztrátě /poruše/ některé měřené hodnoty řízené veličiny nebo při omezení řídicích zásahů, řízení roštového chladiče, průtoků vzduchu do komor a tahu v žárové hlavě pece.

Řídící úroveň je nadřazena dohlížecí úroveň, která zajišťuje identifikaci stavu procesu z hlediska řízení, výpočet žádaných hodnot a parametrů řízení a dlouhodobé sledování vývoje charakteristických veličin procesu a z něj vyplývající případné změny žádaných hodnot a parametrů řízení, výpočty pomocných a náhradních veličin řízení. Pro řízení v běžných provozních podmínkách slouží obě strategie především pro stacionární a nestacionární stavy procesu. První pracuje s číslicovými regulačními algoritmy, které vypočítávají akční zásahy na podávání paliva, podávání suroviny a průtok kouřových plynů na základě regulačních odchylek řízených veličin teplot ve slinovacím pásmu, plynů za pecí a za výměníky a obsahu kyslíku v kouřových plynech. Druhá strategie vstupuje v činnost při velkých výchylkách podmínek ve slinovacím pásmu /odpad nálepku, změna průtoku materiálu pecí/. Určuje logické akční zásahy na otáčky pece a podávání suroviny pro vyrovnaní poruchy a exponenciální návrat akčních veličin do výchozích hodnot. Je-li z jakýchkoliv důvodů nutné přejít na jinou výkonovou úroveň procesu, přechází systém na strategii řízení změn a náběhu výkonu, jejíž algoritmy vypočítávají sled programových změn akčních veličin při zachování žádaného průběhu výpalu. Algoritmy ze žádané změny výkonu postupně určují optimální sled zvyšování průtoku pa-

liva a průtoku plynů, změny žádaných hodnot teplot, změny podávání suroviny a otáček pece. Strategie je také určena pro řízení postupného náběhu provozu od určité výkonové úrovně např. 60%, až do požadovaného trvalého výkonu. Strategie v tomto případě pracuje s opakovanou kontrolou teplot v pecní lince na postupně zadávané meze, které umožňují vždy další zvýšení akčních veličin. Tento postup je aplikován i na řízení žádaných hodnot provozních veličin roštového chladiče.

Žádané hodnoty a parametry pro jednotlivé strategie jsou zadávány buď ručně, nebo adaptivně určovány dohlížecím programem. Další funkcí dohlížecího programu je sledování výkonu pecní linky, spotřeby paliva a otáček pece a jejich porovnávání s dlouhodobými relacemi, které jsou platné pro stacionární stavy pálícího procesu a které lze předem statisticky zjistit a vyjádřit. Poslední funkcí dohlížecího programu je automatický start a náběh celého řídicího programu do činnosti. Tato úloha usnadňuje obsluhu programu a odstraňuje zdlouhavé zadávání žádaných hodnot a parametrů řízení. Po identifikaci dosavadních průběhů řízených i akčních veličin program provede vyhodnocení rozptylů veličin, výpočet mezních a středních hodnot a jejich automatické zadání jako počátečních hodnot a kontrolních mezí řízení. Zároveň tato strategie náběhu programu rozhodne o připravenosti procesu k automatickému řízení.

Měřicí a regulační okruhy a akční orgány tvoří důležitý prvek mezi technologickým procesem a řídicím počítačem, a proto správná volba zařízení měřících a regulačních je jedním ze základních předpokladů úspěšné realizace a využití systému řízení. S ohledem na hlavní cíl automatického řízení, tj. dlouhodobou stabilizaci a řízení pálícího procesu, je

nejdůležitějším požadavkem, který musí měřicí okruhy splňovat, co nejdelší provozní spolehlivost bez přerušení měření a maximální objektivita měřené informace. Splnění těchto požadavků je zejména u pecní linky značně náročné, neboť čidla většiny technologických veličin jsou vystavena vysokým teplotám a přímému styku s materiálem. Při návrhu měřicích okruhů to znamená pečlivou volbu umístění měřicího místa, vybavení čidel doplňkovými okruhy, např. automatickým profukováním a automatickou standartizací, u měření teplot náhražka klasických termočlánků bezkontaktními pyrometry ve speciálních armaturách, případně prosávacími pyrometry a u řídících veličin vybavit měřicí okruh informací pro počítač o poruše měřicího okruhu, případně o ztrátě objektivitu signálu.

Obsah ASŘ TP v cementárnách je velice široký a z toho vyplývá i to, že je stále ještě mnoho problémů, které se musí v procesu budování řešit.

3 IDENTIFIKACE

3.1 Identifikace soustav

Při výrobě cementu je nejsložitějším problémem automatické řízení technologického procesu výpalu slínku. Prvním krokem řešení složitého problému řízení, jaký představuje cementářská pecní linka - proces s mnoha vstupy a výstupy, je proces identifikace.

Identifikací soustav se rozumí experimentální zjištění vlastností těchto soustav. Výsledkem identifikace jsou pak obvykle statické a dynamické charakteristiky soustav, matematický či logický popis chování soustavy a pod. Výsledky pak slouží pro odhad chování soustavy za daných podmínek,

pro řešení problémů optimálního řízení. Na základě výsledků identifikace je možno stanovit modely soustav a celých zařízení /fyzikální či jen matematické/ a řešit potřebné problémy mimo vlastní zařízení. Je možno vyzkoušet všechny varianty provozu bez nákladného a často i nebezpečného experimentování a vybrat z hlediska technického a ekonomického nejvýhodnější variantu řešení. Např. návrh vhodného regulátoru a správné nastavení jeho parametrů závisí od chování regulované soustavy. Předběžné určení chování /na základě výpočtu a konstrukčních a projektových dat/ nebývá pro účely optimalizace dostatečně přesné, a proto je nutno zjistit vlastnosti soustavy přesněji identifikací. Vlastnosti soustavy se však v čase mění v důsledku změn vnějších podmínek /změny zatížení, jakosti vstupního zařízení a pod./. V těchto případech je třeba identifikaci provádět opakovaně nebo i nepřetržitě. Hovoříme proto o identifikaci jednorázové /off-line/, kde se provádí nejdříve celé měření všech hodnot a pak jejich vyhodnocení a nakonec následuje využití výsledků a o identifikaci průběžné /on-line/, kde se měření, vyhodnocování i využívání všech výsledků provádí současně. Různé vypracované identifikační metody jsou pak vhodné pro použití v prvním nebo druhém případě.

Část potíží, na které při identifikaci regulovaných soustav podle informací získaných měřením narážíme, je způsobena tím, že identifikovanou soustavu, která je částí většího zařízení, nemůžeme zkoumat samu o sobě, nýbrž v souvislosti s celým ostatním zařízením a obvykle v pracovních podmínkách, při kterých nemůžeme odstranit působení druhých veličin v zařízení, ani veličin poruchových.

Všobecně existují dva možné přístupy k určování mate-

matických modelů daných procesů:

a/ analytický - matematicko-fyzikální analýza,

b/ experimentální.

Uvedené dva přístupy se přitom musí vzájemně doplňovat. Vysvětlíme nyní blíže uvedené základní přístupy:

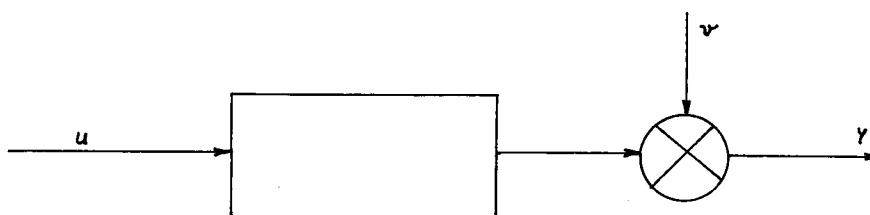
1/ Matematicko-fyzikální analýza:

Na základě konstrukčních údajů, tabelovaných parametrů, fyzikálních a chemických zákonů, analytických a intuitivních aproximací sestavujeme rovnice matematického modelu objektu řízení.

2/ Experimentální přístup:

Tento přístup předpokládá provozní měření vstupů a výstupů objektu a získaných záznamů pak využíváme k vyhodnocování matematického modelu nebo pouze k určování chybějících parametrů analytického modelu.

Na objekt, jehož dynamické vlastnosti chceme analyzovat, působí vstupní signál u a výstupní veličina je veličina y . Tato je obvykle zkreslena parasitní poruchovou veličinou v . /obr. 3.1.1/



obr. 3.1.1

Předpokladem obvykle je, že poruchová veličina v není korelována se vstupním signálem u , je stacionární náhodná veličina s konstantní střední hodnotou nulovou nebo nenulovou.

Jako nejběžnější vstupní signály se používají: skoková

vstupní funkce, obdélníková vstupní funkce, harmonický vstupní signál, pseudonáhodný signál, obecný vstupní signál, náhodný vstupní signál a pod.

Jelikož v některých jednoduchých případech je vliv šumu v na výstup y zanedbatelně malý, můžeme experimentální metody dělit do dvou skupin:

a/ deterministické - zanedbávají vliv poruchových veličin.

Např. k výpočtu impulsní charakteristiky nebo koeficientu matematického modelu ve tvaru diferenciální nebo diferenční rovnice se využívá teoreticky jen tolik dvojic údajů o vstupu a výstupu z objektu, resp. tolik určujících nebo podmínkových rovnic, kolik je hledaných parametrů.

b/ statistické - umožňují kvalitativní ohodnocení chyb podle statistických hledisek.

V praxi existuje řada statistických přístupů a metod, jako je např. metoda nejmenších kvadrátů odchylek, Markovův odhad parametrů, metoda maximální věrohodnosti, metoda minimálního rizika /Bayesův odhad/ apod.

Nejběžnějšího a největšího aplikačního rozšíření doznala metoda nejmenších čtverců, umožňující vyhodnocení výsledků měření. Hlavní předností je, že nevyžaduje velké apriorní znalosti týkající se statistických charakteristik působícího šumu. Ostatní statistické přístupy jako např. Markovovy odhady vyžadují většinou znalost kovarianční matice šumu. Odhady parametrů pak mají minimální rozptyl. To se týká i statistických odhadů ve smyslu maximální věrohodnosti a minimálního rizika. Při statistických přístupech chápeme parametry jako neznámé konstanty a úlohou je stanovit jejich odhady na základě měřených veličin procesu. Kromě těchto přístupů v současnosti nacházejí též uplatnění pravděpodobnostní přístupy,

kde neznámé parametry uvažujeme jako náhodný proces s daným apriorním rozložením. Identifikace pak znamená určování aposteriorních rozložení těchto veličin podmíněných pozorováním na soustavě. V obou jmenovaných případech předpokládáme, že popis systému je znám až na konečný počet neznámých parametrů.

Jak matematicko-fyzikální analýza, tak i experimentální identifikace mají určité přednosti a nedostatky. Matematicko-fyzikální analýza umožňuje hluboký rozbor před započítím výroby technologického zařízení, ale vyžaduje hluboké analytické znalosti - obvykle vycházejí složité výrazy, které je nutno aproximovat. Je-li řádně provedena experimentální identifikace, může dávat lepší výsledky, neboť respektuje řadu faktorů, které nebylo možné do výpočtu zahrnout, ale objekt musí být přístupný experimentu.

3.2 Deterministické metody

Mezi deterministické metody zahrnujeme ty identifikační metody, při nichž se dynamické vlastnosti soustavy určují z odezvy na deterministický vstupní signál. Tímto signálem může být speciální, pro tento účel vhodný a zvlášť generovaný vstupní signál nebo signál libovolného průběhu. Přímým výsledkem deterministické identifikace je naměřená odezva na definovaný signál /přechodová či impulsní charakteristika/, frekvenční charakteristika, koeficienty obrazového přenosu či koeficienty diferenciální resp. diferenční rovnice.

Podle tvaru vstupních signálů při vyhodnocení rozdělujeme deterministické metody na metody určení přechodových charakteristik resp. jejich derivace /impulsních charakteristik/, frekvenčních charakteristik a na metody, při kterých vstupní signál je obecného tvaru, splňuje však určité omezení, obvykle

$u/t=0$ pro $t<0$ / u/t / je vstupní signál/.

Při měření se snažíme co nejméně ovlivnit měřený fyzikální děj, aby regulační obvod, na kterém měříme, byl co nejblíže normálnímu provozu. V případě zavedení zkušebního signálu /např. ve tvaru skoku nebo harmonického průběhu/ se vyskytují potíže.

- a/ vytváření zkušebního signálu může být obtížné
- b/ při zavedení umělých zkušebních signálů může být ohrožen provoz či mohou vzniknout značné hospodářské ztráty
- c/ tím, že bývá zapotřebí použít signálů větší amplitudy, aby bylo možno rozeznat vliv zkušebních signálů, můžeme se dostat do nelineární oblasti charakteristik členů regulačního obvodu. Výsledky měření pak neodpovídají podmínkám normální funkce obvodu.

Deterministické metody jsou vhodné jen pro jednoparametrové soustavy, na které působí poruchové veličiny tak malé, že jejich vliv můžeme zanedbat. Pro víceparametrové soustavy můžeme těchto metod využít jen tehdy, mohou-li se během měření změny nesledovaných veličin vyloučit resp. zanedbat. Předpokládá se též lineárnost identifikované soustavy.

Metod deterministické identifikace existuje mnoho, většinou navazujících přímo na základy teorie regulace.

3.3 Výpočet impulsní charakteristiky z odezvy na obecný vstupní signál

Souřadnice impulsní nebo přechodové charakteristiky lze určit rovněž pro vstupní signál obecného průběhu. Vstupním signálem může být buď přímo signál skutečné soustavy nebo speciální generovaný signál, připočtený k signálu, který do soustavy vstupuje.

Mezi vstupním signálem obecného průběhu $u/t/$, odezvou $y/t/$ a impulsní charakteristikou platí konvolutorní integrál

$$y/t/ = \int_0^{\infty} h/\tau/ \cdot u/t-\tau/d\tau \quad (3.3-1)$$

Nejčastěji se používá přibližného numerického řešení rovnice /3.3-1/, kdy spojitý vstupní a výstupní signál nahradíme diskretním tvarem $y/i \cdot \Delta/$, $u/i \cdot \Delta/$ s periodou vzorkování Δ a pak rovnice /3.3-1/ přejde na tvar

$$y/i \cdot \Delta/ = \sum_{j=0}^{N-1} h/j \cdot \Delta/ \cdot u//i-j/ \cdot \Delta/ \quad (3.3-2)$$

kde $h/j \cdot \Delta/$ je diskretní náhrada impulsní charakteristiky v konečném časovém intervalu $/N-1/ \cdot \Delta/$. Při označení $y/i \cdot \Delta/ = y_i$, $u//i-j/ \cdot \Delta/ = u_{i-j}$, $h/i \cdot \Delta/ = h_i$ a rozepsáním rovnice /3.3-1/ získáme systém lineárních rovnic, které řešíme.

$$\begin{aligned} y_0 &= u_0 h_0 + u_{-1} h_1 + u_{-2} h_2 + \dots + u_{-N+1} h_{N-1} \\ y_1 &= u_1 h_0 + u_0 h_1 + u_{-1} h_2 + \dots + u_{-N+2} h_{N-1} \end{aligned} \quad (3.3-3)$$

$$y_{N-1} = u_{N-1} h_0 + u_{N-2} h_1 + u_{N-3} h_2 + \dots + u_0 h_{N-1}$$

Existuje však vhodnější metoda určení impulsní charakteristiky. Jestliže platí $h \rightarrow 0$ pro $t \rightarrow \infty$, lze určit $h/t/$ bez větší chyby. Předpokládáme, že $h/t/ = 0$ pro $t > T$ a že vzorkované vstupní a výstupní signály pro $0 \leq t \leq t_f = m \cdot \Delta$, kde $t_f \gg T$. Nyní máme větší počet informací, než je daným algoritmem žádáno $/0 \leq t \leq T/$. Tato data můžeme použít ke zlepšení aproximace impulsní charakteristiky. Na základě toho získáme systém rovnic /3.3-4/, který můžeme řešit např. metodou nejmenších čtverců.

$$y_{N-1} = u_{N-1}h_0 + u_{N-2}h_1 + \dots + u_0h_{N-1} \quad (3.3-4)$$

$$y_{M-1} = u_{M-1}h_0 + u_{M-2}h_1 + \dots + u_{M-N}h_{N-1}$$

Závažnou otázkou, na které ve značné míře závisí kvalita řešené úlohy je volba kritéria aproximace. Nejčastěji se volí integrální kritérium odchylky

$$Q = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |y_1/t - y_2/t|^{\nu} dt = \text{minimum} \quad (3.3-5)$$

Při $\nu=1$ se jedná o kritérium minima střední hodnoty absolutní odchylky, při $\nu=2$ o minimum střední odchylky druhé odmocniny z absolutní hodnoty. Často se používá kritérium minima střední hodnoty kvadratické odchylky, tj. $\nu=2$. Podle použitého kritéria bude také různým odchylkám odpovídat různě velká váha. Kritérium střední kvadratické odchylky přikládá větší váhu velkým odchylkám, naopak kritérium střední hodnoty odmocniny z absolutní odchylky přikládá relativně vyšší váhu malým hodnotám.

Pro řešení systému rovnic /3.3-4/ použijeme kritéria nejmenších čtverců

$$Q = \sum_{i=0}^{M-1} \left[y_i - \sum_{j=0}^{N-1} h_{ij} \cdot u_{i-j} \right]^2 \quad (3.3-6)$$

což při použití maticového zápisu lze napsat

$$Q = (Y - Uh)^T (Y - Uh)$$

minimalizací obdržíme

$$\frac{\partial Q}{\partial h_j} = 2 \sum_{i=0}^{M-1} \left[y_i - \sum_{j=0}^{N-1} h_{ij} \cdot u_{i-j} \right] \cdot \frac{\partial F_{i+j}}{\partial h_j} \quad (3.3-7)$$

zavedením parciální derivace a úpravou obdržíme

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{M-1} u_i y_i &= \sum_{i=0}^{M-1} u_i^2 h_0 + \sum_{i=0}^{M-1} u_i u_{i-1} h_1 + \dots + \sum_{i=0}^{M-1} u_i u_{i+N-1} h_{N-1} \\ \sum_{i=0}^{M-1} u_{i-1} y_i &= \sum_{i=0}^{M-1} u_i u_{i-1} h_0 + \dots + \sum_{i=0}^{M-1} u_{i-1} u_{i+N-1} h_{N-1} \\ &\dots \dots \dots \\ \sum_{i=0}^{M-1} u_{i-N+1} y_i &= \sum_{i=0}^{M-1} u_i u_{i-N+1} h_0 + \dots + \sum_{i=0}^{M-1} u_{i-N+1} u_{i+N-1} h_{N-1} \end{aligned} \quad (3.3-8)$$

Zavedením korelačních funkcí

$$\begin{aligned} R_{yu}/\tau/ &= E/y/t/u/t+\tau// = E/y/t-\tau/u/t// \text{ a} \\ R_{uu}/\tau/ &= E/u/t/u/t+\tau// = E/u/t-\tau/u/t/, \end{aligned}$$

kde platí $R_{yu}/\tau/ = R_{uy}/\tau/$ a $R_{uu}/\tau/ = R_{uu}/-\tau/$,

pak systém rovnic /3.3-8/ přechází na tvar

$$\begin{aligned} R_{yu}/0/ &= h_0 R_{uu}/0/ + h_1 R_{uu}/1/ + \dots + h_{N-1} R_{uu}/N-1/ \\ R_{yu}/-1/ &= h_0 R_{uu}/1/ + h_1 R_{uu}/0/ + \dots + h_{N-1} R_{uu}/N-2/ \\ &\dots \dots \dots \\ R_{yu}/-N+1/ &= h_0 R_{uu}/N-1/ + h_1 R_{uu}/N-2/ + \dots + h_{N-1} R_{uu}/0/ \end{aligned} \quad (3.3-9)$$

což je vlastně vztah pro určení impulsní charakteristiky metodou korelačních funkcí. Řešení systému rovnic /3.3-8/ je možné provést pomocí některé z metod určení kořenů systému lineárních rovnic. Vlivem nepřesného zadání koeficientů lineárních rovnic může být systém špatně podmíněný a řešení bývá problematické /výsledky mohou být silně zkresleny/. Podobné problémy se objevují i při inverzi matice $Y^T \cdot Y$ a jejich hlavní příčiny jsou:

- 1/ nevhodný vstupní signál - autokorelační funkce vstupního signálu nemá dostatečně výrazný a ostrý vrchol
- 2/ příliš velký počet odhadovaných parametrů

měření, pro n-tý vzorkovací okamžik platí:

$$y_{i+n}/ = \Delta u_{i+n}/f_0 + \Delta u_{i+n-1}/f_1 + \dots + \\ + u_{i+n-k}/ - u_{i-k-1}/ + c_0^* + c_1/i+n/ + c_2/i+n/^2 \quad (3.4-4)$$

Protože pro všechna n je ve vztahu /3.4-4/ výraz

$-u_{i+n-k-1}/f_k + c_0$ konstantní, je možno jej nahradit jedinou konstantou

$$c_0 = c_0^* - u_{i-k-1}/f_k \quad (3.4-5)$$

V uvedeném vztahu jsou uvažovány koeficienty trendu c_0 - konstantní člen, c_1 - lineární člen a c_2 - kvadratický člen trendu. Jestliže uvažujeme z koeficientů trendu jen c_0 , pak ve vztahu /3.4-5/ odpovídá: $u_p = c_0$

Provedením minimalizace a úpravou pomocí korelačních funkcí

$$\begin{bmatrix} R_{\Delta u y}/0/ \\ R_{\Delta u y}/1/ \\ \dots \\ R_{\Delta u y}/N-1/ \\ \sum_{i=0}^{M-1} y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\Delta u \Delta u}/0/ & R_{\Delta u \Delta u}/-1/ & \dots & R_{\Delta u u} & u_0 \\ R_{\Delta u \Delta u}/1/ & R_{\Delta u \Delta u}/0/ & \dots & R_{\Delta u u} & u_{-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{\Delta u u}/-N+1/ & R_{\Delta u u}/-N+2/ & \dots & R_{u u} & u_{-M+1} \\ u_0 & u_{-1} & \dots & u_{-M+1} & \sum_{i=0}^{M-1} u_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \dots \\ f_{N-1} \\ c_0 \end{bmatrix} \quad (3.4-6)$$

pro vlastní výpočet pomocí korelačních funkcí obdržíme jednodušší tvar

$$\begin{bmatrix} R_{\Delta u y}/0/ \\ R_{\Delta u y}/1/ \\ \dots \\ R_{\Delta u y}/N-1/ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\Delta u \Delta u}/0/ & R_{\Delta u \Delta u}/N-1/ \\ R_{\Delta u \Delta u}/1/ & R_{\Delta u \Delta u}/N-2/ + R_{\Delta u \Delta u}/N-1/ \\ \dots & \dots \\ R_{\Delta u \Delta u}/N-1/ & R_{\Delta u \Delta u}/0/ + \dots + R_{\Delta u \Delta u}/N-1/ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ \dots \\ f_{N-1} \end{bmatrix} \quad (3.4-7)$$

3.5 Elementární matice rotací

V technické praxi se často setkáváme s problémem určit koeficienty modelu pro rozsáhlé měření nebo pro průběžné měření a vyhodnocování. A právě tato metoda umožňuje tento princip výpočtu.

Při numerickém řešení lineárních rovnic můžeme dostat ne zcela přesný výsledek. Může se to stát jednak zaokrouhlováním mezivýsledků, způsobené konečnou délkou slova u počítače, která bývá především u řídicích počítačů a u speciálních číslicových regulátorů krátká, jednak tím, že koeficienty soustav jsou známy jen přibližně. Soustava rovnic z technické úlohy má koeficienty získané zpravidla experimentálně, a pak je nutno znát nejen řešení této soustavy, ale též vliv změn koeficientů na řešení. Může se totiž stát, že malá změna koeficientů vede k velkým změnám výsledků a tím je výsledek řešení bezcenný. Tento problém malé stability vzniká u soustav lineárních rovnic se špatně podmíněnou maticí /takto se nazývá čtvercová regulární matice, u níž je inverzní matice nestabilní/, která může být prakticky singulární, jsou-li prvky matice dány jen přibližně. V případě, že při řešení rekurentním způsobem použijeme inverze matice, kterou je samozřejmě nutno používat v každém kroku, můžeme se dostat do známých problémů inverze matice.

V mnoha případech je výhodné použít modifikace eliminační metody, při které se jako pomocná matice volí elementární matice rotací. Tato metoda vyžaduje čtyřnásobek výpočetních operací oproti např. Gaussově metodě, má však větší stabilitu a je málo citlivá na nepřesnosti vzniklé "malými" hodnotami determinantů pomocných soustav rovnic.

Doporučuje se použití přímo ortogonální matice tzv.

elementární matice rotací, což je matice tvaru

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & c & \dots & -s \\ & & s & \dots & c \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \quad \text{kde } c^2 + s^2 = 1 \quad (3.5-1)$$

Elementární matice rotací se liší od jednotkové matice nejvýše ve čtyřech prvcích ležících v průsečících řádků a sloupců s indexy i a j , $i < j$

Je zřejmé, že při násobení matice A maticí T_{ij} zleva se změní jen prvky v i -tém a j -tém řádku matice A . Bude totiž pro prvky matice ${}^1A = T_{ij} \cdot A$ platit

$$\begin{aligned} {}^1/a_{iL} &= ca_{iL} - sa_{jL} \\ {}^1/a_{jL} &= sa_{iL} + ca_{jL} \end{aligned} \quad L = 1, 2, \dots, n \quad (3.5-2)$$

Obdobně při násobení matice A zprava maticí T se změní jen prvky v i -tém a j -tém sloupci

$$\begin{aligned} {}^1/a_{Ki} &= ca_{Ki} + sa_{Kj} \\ {}^1/a_{Kj} &= -sa_{Ki} + ca_{Kj} \end{aligned} \quad K = 1, 2, \dots, n \quad (3.5-3)$$

Je-li alespoň jeden z prvků a_{iK} a a_{jK} různý od nuly, lze zvolit čísla c a s tak, aby prvek ${}^1/a_{jL}$ matice ${}^1/A = T_{ij} A$ byl roven nule. Stačí vzít

$$s = -\frac{a_{jL}}{\sqrt{a_{iL}^2 + a_{jL}^2}} \quad c = \frac{a_{iL}}{\sqrt{a_{iL}^2 + a_{jL}^2}} \quad (3.5-4)$$

a potom je

$${}^1/a_{iL} = \sqrt{a_{iL}^2 + a_{jL}^2} > 0, \quad {}^1/a_{jL} = 0$$

Věta: Každou regulární matici lze řetězcem násobení elementárními maticemi rotací převést v pravou trojúhelníkovou matici, jejíž všechny diagonální prvky, popř. s výjimkou posledního, jsou kladné.

Postup výpočtu je možné popsat na jednoduchém příkladě. Volíme např. matici $A_{3,3}$ a provedeme násobení maticí T_{12} zleva.

$$\begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} c_{12}a_{11} - s_{12}a_{21} = a_{11}^{/1/}, c_{12}a_{12} - s_{12}a_{22} = a_{12}^{/1/}, c_{12}a_{13} - s_{12}a_{23} = a_{13}^{/1/} \\ s_{12}a_{11} + c_{12}a_{21} = 0, s_{12}a_{12} + c_{12}a_{22} = a_{22}^{/1/}, s_{12}a_{13} + c_{12}a_{23} = a_{23}^{/1/} \\ a_{31}, a_{32}, a_{33} \end{bmatrix}$$

Koeficienty c_{12} a s_{12} určíme z podmínky

$$c_{12}^2 + s_{12}^2 = 1 \quad s_{12}a_{11} + c_{12}a_{21} = 0 \quad / = a_{21}^{/1/} /$$

$$s_{12} = -\frac{a_{21}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}} \quad c_{12} = \frac{a_{11}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}$$

Jestliže $a_{11} = a_{21} = 0$ položíme $c_{12} = 1$, $s_{12} = 0$. Násobením $T_{13}A$ zleva nulujeme prvek a_{31} a násobením $T_{23}A$ prvek a_{32}

$$A^{/3/} = \begin{bmatrix} a_{11}^{/3/} & a_{12}^{/3/} & a_{13}^{/3/} \\ 0 & a_{22}^{/3/} & a_{23}^{/3/} \\ 0 & 0 & a_{33}^{/3/} \end{bmatrix}$$

Pro vytvoření takovéto trojúhelníkové matice je obecně zapotřebí $\frac{1}{2}n(n-1)$ kroků.

V případě řešení lineárních rovnic je uvedená úprava

prováděna i na vektoru pravé strany

$$A^{/3/}_x = b^{/3/}$$

Uvažujme nyní soustavu lineárních algebraických rovnic

$$Ua = y + e$$

$$\sum_{j=1}^M \omega_j u_{ij} = y_i + e_i, i=1,2, \dots, N, N>M \quad (3.5-5)$$

Řešením /3.5-5/ můžeme a, odhad koeficientů ω , určit jen s určitou chybou

$$e = Ua - y$$

Naším úkolem je nalézt a tak, aby $\sum_{i=1}^N e_i^2$ byla minimální

Máme systém rovnic /3.5-5/ ve tvaru

$$Z \cdot r = e$$

$$\text{kde } Z = [U, y], r = [a, 1]^T \quad (3.5-6)$$

Tento systém rovnic násobíme zleva maticí elementárních rotací

$$T \cdot U = {}^*U \quad T \cdot e = {}^*e$$

Hodnota součtu kvadrátů chyb řešení se tím nemění, neboť platí

$${}^*e^T \cdot {}^*e = e^T \cdot T^T \cdot T \cdot e = e^T \cdot e \quad \text{a} \quad T^T \cdot T = I \quad (3.5-7)$$

Po ukončení eliminace obdržíme pravou trojúhelníkovou matici s upravenými koeficienty, ostatní koeficienty jsou vesměs nulové.

Ze získaného systému rovnic /3.5-8/ je zřejmé, že není možné nulovat prvek $z_{M+1, M+1} = e_{N+1}$ volbou koeficientu r_j .

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1M} & z_{1,M+1} \\ 0 & z_{22} & \dots & z_{2M} & z_{2,M+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & z_{MM} & z_{M,M+1} \\ \hline 0 & 0 & \dots & 0 & z_{M+1,M+1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_M \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_M \\ e_{M+1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5-8)$$

Součet kvadrátů: $\sum_{i=1}^N e_i^2 = \sum_{i=1}^{M+1} e_i^2$ (3.5-9)

Dosáhneme-li řešení /3.5-8/ minima součtu kvadrátu e_i , dosáhneme též minima součtu kvadrátu e_i , pro vhodně zvolené r_j , $j=1,2, \dots, M$. Otázka nalézt r_j minimalizující /3.5-9/ je jednoduchá. Ze systému rovnic /3.5-8/ je zřejmé, že kromě prvku $z_{M+1,M+1}$ je možné nulovat volbou r_j všechny ostatní prvky e_j / $j=1,2, \dots, M$ /. Koeficienty r_j můžeme tedy nalézt řešením systému rovnic

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1M} & z_{1,M+1} \\ 0 & z_{22} & \dots & z_{2M} & z_{2,M+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & z_{MM} & z_{M,M+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5-10)$$

Počáteční matici Z volíme vesměs s nulovými prvky a přidáme vždy jen podmínkovou rovnici z N -rovnic, počínaje první rovnicí

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1M} & z_{1,M+1} \end{bmatrix} \quad (3.5-11)$$

Tento řádek vynulujeme postupným násobením maticí T . Po vynechání celého řádku by se měl nulovat další řádek. Na výpočtu koeficientů r_j se však nic nezmění, jestliže novou rovnici zapíšeme na místo vynulovaného řádku, ten znovu vynulujeme a znovu nahradíme další rovnicí. Při nulování prvních M rovnic se nám vždy změní nulová řádka matice Z na nenulovou, počínaje první a je možno již vypočítat r_j . Výpočet lze opakovat pro další rovnice, kde součet kvadratických chyb udává hodnota posledního nenulového prvku na diagonále.

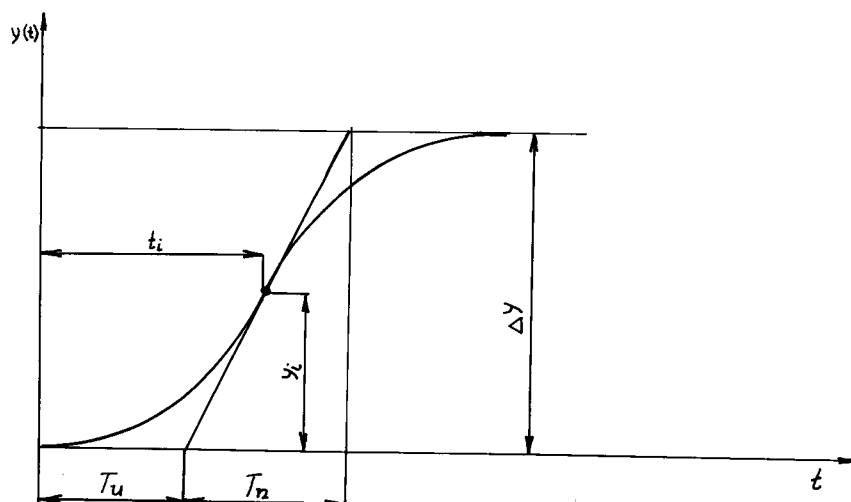
3.6 Výsledky aplikace identifikace na data, naměřená na pecní lince 3000 td^{-1} v Prachovicích

V průběhu prvního pololetí roku 1981 byla provedena čtyři měření /č.6, č.7, č.8, č.9/ normálního, povětšinou ručně řízeného provozu pecní linky. Pro výpočet přechodových charakteristik, impulsních charakteristik a koeficientů přenosu F/z^{-1} byla použita data z měření č.9, které obsahuje 492 cyklů s časovým intervalem 2 min 40 s. Pro výpočet přechodových a impulsních charakteristik bylo použito podprogramu REDUCE. Veškeré výpočty byly provedeny ve VS VŠST v Liberci. Potřebné údaje byly zaznamenány ke každému grafu, viz /Příloha I./.

3.7 Vyhodnocování přechodových charakteristik

Přesné určení dynamických vlastností regulované soustavy podle záznamů přechodových charakteristik běžně používanými měřicími a zapisovacími přístroji je prakticky nemožné. Proto se vyhodnocování přechodových charakteristik zpravidla spojuje s aproximací skutečných vlastností soustavy. Jedna z nejjednodušších použitelných aproximací je popsána v /9/.

Jedná se o aproximaci soustav libovolného řádu bez dopravního zpoždění. Je možno skutečné vlastnosti těchto soustav aproximovat soustavami buď n -tého řádu se stejnými časovými konstantami, nebo soustavami druhého řádu s různě velkými časovými konstantami. Pro první nebo druhý způsob aproximace se rozhoduje dle poměru τ doby průtahu T_u a náběhu T_n ($\tau = T_u/T_n$) podle obr. 3.7-1. Vychází se ze skutečnosti, že přechodová charakteristika statických soustav vyššího než prvního řádu je v okolí inflexního bodu takřka přímková, takže směrnice tečny je dosti přesně určena. Výsledky, kterých bylo dosaženo při vyhodnocování přechodových charakteristik aproximací skutečných vlastností soustavy - viz /Příloha I./.



obr. 3.7-1

3.8 Z-transformace a výpočet přechodových charakteristik z diskrétních přenosů

Podobně jako se u soustav spojitých používá při popisu vlastností soustavy, analýze i syntéze Laplaceovy /resp. Laplace - Wagnerovy/ transformace, u systémů impulsních se pou-

žívá Z-transformace. V Z-transformaci lze pak vyjádřit přenos impulsní soustavy, vyšetřovat výsledné přenosy složitých soustav použitím blokové algebry, lze řešit stabilitu obvodu i regulační pochody. Skutečný časový průběh veličin na impulsních soustavách se získá pak zpětnou Z-transformací, podobně jako zpětnou Laplaceovou transformací u soustav spojitých. U impulsních soustav lze však časový průběh určit obvykle mnohem snáze než u spojitých /zvláště zajímá-li nás jen krátký časový úsek/ přechodem na řešení diferenčních rovnic.

Při výpočtu přechodových charakteristik z diskrétních přenosů se vychází z obecného vztahu pro hodnotu výstupní veličiny v čase t

$$\begin{aligned} y/j/ &= a_1 y/j-1/ + a_2 y/j-2/ + \dots + a_n y/j-n/ + \dots \\ &\dots + b_0 u/j/ + b_1 u/j-1/ + \dots + b_n u/j-n/ \end{aligned} \quad (3.8-1)$$

po převedení do Z-transformace

$$\begin{aligned} y/z/ &= a_1 y/z/z^{-1} + a_2 y/z/z^{-2} + \dots + a_n y/z/z^{-n} + \dots \\ &\dots + b_0 u/z/z^0 + b_1 u/z/z^{-1} + \dots + b_n u/z/z^{-n} \end{aligned} \quad (3.8-2)$$

po úpravě

$$\begin{aligned} \frac{y/z/}{u/z/} &= \frac{b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{1 - a_1 z^{-1} - \dots - a_n z^{-n}} \\ \frac{y/z/}{u/z/} &= \frac{b_0 z^n + b_1 z^{n-1} + \dots + b_n}{z^n - a_1 z^{n-1} - \dots - a_n} \end{aligned} \quad (3.8-3)$$

ustálenou hodnotu přechodové charakteristiky můžeme určit dle vztahu

$$\lim_{l \rightarrow \infty} y_l = \lim_{z \rightarrow 1} z^{-1} \cdot \frac{z}{z-1} \cdot F/Z/$$

Přechodovou charakteristiku lze určit: $y/z/ = F/z/ \cdot \frac{z}{z-1}$

4 Vyhodnocení a výsledky výpočtů

Všechny výpočty, jejichž výsledky jsou uvedeny v přílohách, byly provedeny na počítači EC 1033 ve VS VŠST v Liberci a všechny programy byly vypracovány v jazyce FORTRAN.

V příloze I. je výpis zkušebních dat, pro které bylo provedeno ověření algoritmu pro výpočet přechodových a impulsních charakteristik. V této příloze je zároveň uvedeno několik přechodových a impulsních charakteristik ve formě grafického znázornění. Z grafického zobrazení charakteristik je zřejmé, že daného algoritmu je možné použít pro identifikaci dat, naměřených na pecní lince.

V příloze II. je uveden konkrétní program pro výpočet přechodových a impulsních charakteristik. V našem případě bylo použito dat, naměřených při měření č.9 na pecní lince 3000 td^{-1} v Prachovicích. Pro vyhodnocování bylo použito metody elementární matice rotací, neboť se v praxi velice často setkáváme s problémem určit koeficienty modelu pro rozsáhlá měření nebo pro průběžné měření a vyhodnocování, a právě tato metoda umožňuje takový princip výpočtu. Součástí programu je i podprogram pro grafické zobrazení přechodových charakteristik a impulsních charakteristik. Výpočet charakteristik je možné provádět pro různý počet koeficientů trendu /maximální počet roven 3/. V našem případě byl výpočet prováděn bez koeficientů trendu, a to jak u přechodových, tak i u impulsních charakteristik. Pro srovnání byl proveden výpočet některých přechodových charakteristik s koeficientem trendu. U přechodových charakteristik /bez koeficientu trendu/ je provedena aproximace soustavami prvního až třetího řádu. Všechny potřebné údaje jsou zaznamenány u každého grafu

s vysvětlením významu jednotlivých symbolů.

V příloze III. je uveden program pro výpočet koeficientů přenosu $F/z/$. Výpočet koeficientů byl proveden pro vybrané přechodové charakteristiky. U přechodových charakteristik vyššího řádu než prvního byl výpočet koeficientů proveden s volbou 3 a s volbou 4 koeficientů. Výsledky, kterých bylo dosaženo, jsou v této příloze uvedeny s označením příslušných vstupů a výstupů.

V příloze IV. je uveden program pro výpočet přechodové charakteristiky z přenosu $F/p/$, který byl získán vyhodnocením přechodových charakteristik. Na základě poměru doby průtahu a doby náběhu se skutečné vlastnosti soustav aproximovali soustavami n -tého řádu se stejnými časovými konstantami. Program je doplněn i grafickým znázorněním vypočítané přechodové charakteristiky, což přináší i možnost grafického porovnání skutečné a vyhodnocené přechodové charakteristiky. Jelikož jsme volili hladké křivky poměrně dosti blízko bodům vypočítané přechodové charakteristiky, vyhodnocené a vypočítané přechodové charakteristiky jsou blízké. Programu, který je uveden v této příloze, je možné použít pouze pro výpočet přechodových charakteristik z přenosu $F/p/$ řádu prvního.

V příloze V. je také uveden program pro výpočet přechodové charakteristiky s grafickým znázorněním z přenosu $F/p/$. Existuje zde možnost výpočtu vyšších řádu než prvního /předpokládá se zde znalost zpětné Laplaceovy transformace. Dosažené přechodové charakteristiky jsou uvedeny v příloze, vč. označení příslušného vstupu a výstupu.

V příloze VI. je výpis programu pro výpočet přechodových charakteristik z přenosu $F/z^{-1/}$

Pro výpočet používáme Pierova algoritmu, pomocí kterého je možné určit originál obrazu v Z-transformaci, je-li obraz vyjádřen racionálně lomenou funkcí. Tento program je také doplněn podprogramem pro grafické znázornění přechodové charakteristiky, což nám umožňuje vzájemné porovnání přechodových charakteristik a přesnost vypočtených koeficientů přenosu $F/z^{-1}/$. U přenosů vyššího řádu než prvního se využilo přenosu $F/z^{-1}/$ s počtem koeficientů přenosu rovno 3. Z časových důvodů byla zpětná Z-transformace provedena jen u některých závislostí, jejichž výsledky ukazují na možnost poměrně přesného vyjádření přechodových charakteristik pomocí koeficientů přenosu $F/z^{-1}/$.

5 Závěr

Cíl diplomové práce, identifikace cementárenských pecí, byl uskutečněn aplikací podprogramu REPUCE. Vyhodnocením přechodových charakteristik jsme získali popis soustavy ve tvaru přenosu $F/p/$ a výpočtem koeficientů přenosu $F/z^{-1}/$ jsme získali popis soustavy impulsní. Posléze jsme z těchto přenosů zpětně vypočítali příslušné přechodové charakteristiky. Větší přesnosti vzhledem k vyhodnocovaným přechodovým charakteristikám bylo dosaženo u přenosu $F/p/$.

V některých případech nebylo možné určité přechodové charakteristiky použít - v případě pecní linky se totiž jedná o regulovanou soustavu, vstupy nebyly náhodné, ale byly korelovány předcházejícími výstupy.

Závěrem diplomové práce bych chtěl poděkovat všem pracovníkům Katedry technické kybernetiky a VS VŠST, kteří mi umožnili a pomohli dokončit tuto práci, zejména pak svému

konzultantu ing. Miroslavu Olehlovi, CSc, Václavu Hanouskovi,
kteří mi svými radami a zkušenostmi pomohli alespoň částečně
proniknout do problematiky daného tématu.

Literatura

- / 1 / Hanuš, B. - Balda, M. a kolektiv: Základy technické kybernetiky - 1.část, Liberec, VŠST 1979
- / 2 / Olehla, M. - Tišer, J.: Praktické použití FORTRANU. Praha, NADAS 1979
- / 3 / Bárta, R.: Chemie a technologie cementu. Praha, ČSAV 1961
- / 4 / Lurje, J.S.: Portlandský cement. Praha, SNTL 1963
- / 5 / Melsa, D.L. - Sejdž, E.P.: Identifikaci a sistem upravlenija. Moskva, Nauka 1974
- / 6 / Hlavní směry hospodářského a sociálního rozvoje ČSSR na léta 1981-1985. Příloha deníku Rudé právo ze dne 15.4.1981
- / 7 / Aranovič, I.G. - Lunc, G.L. - Elsgole, L.E.: Funkcie komplexnej premennej - operátorový počet - teória stability. Bratislava, ALFA 1973
- / 8 / Soukup, J.: Identifikace soustav. Praha, ČVUT 1982
- / 9 / Strejc, V.: Aproximace aperiodických přechodových charakteristik - Slaboproudý obzor 18/1958/
- / 10 / Integrovaný systém riadenia výrobných procesov v cementárňach, Dom techniky ČSVTS Bratislava, 1979
- / 11 / Hanuš, B.: Základy teorie lineárního spojitého regulačního obvodu. Liberec, VŠST 1975
- / 12 / Strejc, V.: Syntéza regulačních obvodů s číslicovým počítačem. Nakladatelství ČSAV, Praha 1965

/ 13 / ASŘTP tepelných agregátů včetně topení uhlím. Výroční
zpráva za etapu E06, Přerovské strojírny,
listopad 1981

/ 14 / Koncepce decentralizovaného ASŘTP s využitím mikro-
počítačů. Zpráva za etapu E01, Přerovské
strojírny, listopad 1981

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha I. - zkušební data a vypočtené přechodové
a impulsní charakteristiky ze zkušebních dat
- Příloha II. - program HPJIDE1A a vypočtené přechodové
a impulsní charakteristiky z dat naměřených
na pecní lince
- Příloha III. - program HPJIDEN4 s vypočtenými koeficienty
přenosu $F/z^{-1}/$
- Příloha IV. - program na výpočet přechodových charakteristik
z přenosu $F/p/$, první řád
- Příloha V. - program na výpočet přechodových charakteristik
z přenosu $F/p/$, druhý a třetí řád
- Příloha VI. - program na výpočet přechodových charakteristik
z přenosu $F/z^{-1}/$

Charakteristika vstupů_a_výstupů

Vstupy /IVST/

- 12 ... množství mazutu do hořáku
- 13 ... surovinová moučka do V1
- 14 ... surovinová moučka do V2
- 15 ... otáčky rotační pece
- 16 ... otáčky pecního ventilátoru 1
- 17 ... otáčky pecního ventilátoru 2

Výstupy /IVYS/

- 1 ... teplota za cyklony 1. výměníku
- 2 ... teplota za cyklony 2. výměníku
- 4 ... otáčky roštu R2
- 5 ... otáčky roštu R3
- 6 ... teplota plynů do výměníku
- 7 ... teplota vzduchu do Lurgi-filtru
- 9 ... teplota sekundárního vzduchu
- 11 ... příkon hl. pohonu rotační pece

Symbole používané v programech

Hlavní programová jednotka HPJIDE1A

MT počet koeficientů trendu
MX počet vstupních hodnot
K krok tisku souřadnic
N počet měření
KP KP = 1 přechodová charakteristika
 KP = 0 impulsní charakteristika
IVST označení vstupu
IVYS označení výstupu

Hlavní programová jednotka HPJIDEN4

MT počet koeficientů trendu
MX počet koeficientů vstupu
MY počet koeficientů výstupu
N počet rovnic
K krok tisku koef. regrese

PŘÍLOHA I.

Zkušební data a vypočtené přechodové a impulsní charakteristiky ze zkušebních dat