Silikáty 33, s. 141—147 (1989)

DYNAMICKÉ CHOVÁNÍ CELOELEKTRICKÉ SKLÁŘSKÉ TAVICÍ PECE

Stanislav Kasa

Vysoká škola chemicko-technologická, katedra technologie silikátů, Suchbátarova 5, 166 28 Praha 6

Došlo 8. 4. 1988

Na fyzikálním modelu celoelektrické sklářské tavicí pece byly sledovány odezvy výstupní veličiny (teplota) na změny vstupní veličiny (elektrický příkon). Z naměřených hodnot byly metodou experimentální identifikace určeny konstanty matematických modelů ve tvaru diferenciálních a diferenčních rovnic, které popisují dynamické chování celoelektrické pece a mohou sloužit jako podklad pro sestavování řídících algoritmů. Výsledky mají praktický přínos jak v oblasti metodiky fyzikálního modelování sklářských tavicích pecí, tak i v oblasti zpracování procesních dat.

ÚVOD

Rozvoj sklářského průmyslu přináší s sebou zavádění zcela progresívních technologií a výrobních postupů, jejichž součástí jsou v současné době také prostředky automatizovaných systémů řízení technologických procesů. Tyto skutečnosti jsou vyvolány především tím, že se vyčerpávají zásoby surovin, stoupají ceny surovin dovážených a vzrůstá význam šetření energií a surovinami. Proto je nutné zvyšovat efektivnost výrobních procesů, tj. nastavovat technologické procesy pokud možno co nejblíže optimálním režimům. To se neobejde bez soustavného zdokonalování technologických procesů a sledování technologicky významných veličin, bez zkvalitnění informačních a řídících systémů. K technologiím, jejichž složitost a ekonomika si nasazení informačních a řídících systémů přímo vynucuje, patří technologie sklářských výrob a zvláště pak tavicí proces.

Aby řídící systémy technologických procesů (TP) pracovaly spolehlivě a splňovaly požadavky na ně kladené, je nutné znát dynamické chování TP. Výhodné je, podaří-li se dynamické chování TP popsat pokud možno jednoduchými diferenciálními a diferenčními rovnicemi, které potom slouží jako podklad pro sestavování řídících algoritmů.

REGULACE A ŘÍZENÍ

Hlavním a nejsložitějším článkem sklářské výroby je tavicí pec, která z hlediska regulace a řízení je nelineární mnohaparametrová soustava s x vstupními a y výstupními veličinami. Úkolem regulačních obvodů v automatizačních systémech je udržování (stabilizace) důležitých technologických veličin, při působení různých poruch, na požadovaných hodnotách. Teorie automatického řízení rozeznává v podstatě dva typy regulace, kterými jsou regulace analogová a číslicová. V analogové technice se používají tři typy spojitých regulátorů (proporcionální P, integrační I a derivační D), na jejichž základě a jejich kombinacích jsou zpracovávány regulované veličiny ve třech základních strukturách analogových regulačních obvodů. Jsou to:

— jednoduchý regulační obvod
— rozvětvený regulační obvod
— rozvětvený regulační obvod s kompenzací poruch

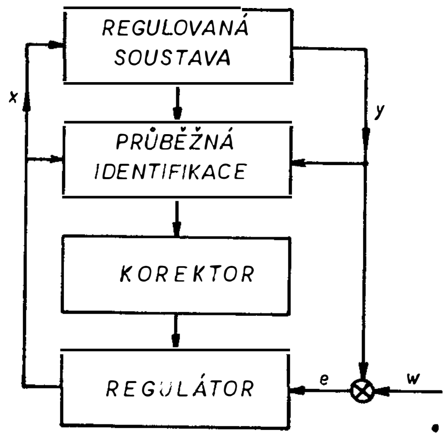
S rozvojem číslicové techniky se v poslední době používá především regulace číslicová, která na rozdíl od analogové nemá žádná omezení a u níž je možné zavést tak zvanou adaptivní regulaci pomocí samonastavitelného regulátoru, jehož princip je patrný na obr. 1.

Výstupní veličina y je přiváděna do identifikátoru, kde se na základě matematického modelu, nejčastěji ve tvaru diferenční rovnice, provádí identifikaci. V důsledku průběžné identifikace je možné soustavu regulovat s minimálním rozptylem regulovaných veličin i v případě, že se vlastnosti soustavy mění s časem. Tento princip řízení je zvlášť výhodný u stochastických soustav, k nimž patří i sklářská tavicí pec. Z číslicové regulace rozeznáváme dvě hlavní struktury:

— nadřazenou číslicovou regulaci (Supervisory Control)

— přímou číslicovou regulaci (Direct Digital Control)

V obou případech plní počítač funkci číslicového regulátoru a hovoříme o nasazení číslicového počítače in-line.



Obr. 1. Regulační obvod se samonastavitelným regulátorem.

DYNAMICKÉ CHOVÁNÍ TAVICÍ PECE

Složitost procesů probíhajících ve sklářské tavicí peci vede k tomu, že jako podklady pro tvorbu řídících algoritmů je nutné využívat modely technologických procesů. Při jejich vytváření se postupuje v zásadě dvěma způsoby. Jsou to matematicko-fyzikální analýza (MFA) nebo experimentální identifikace (EI).

Na našem pracovišti byly prováděny práce, kde na fyzikálním modelu celoelektrické sklářské tavicí pece byly aplikovány postupy experimentální identifikace a získány tak znalosti o dynamickém chování tavicí pece. Z výsledků je potom možné sestavit matematický model procesu ve tvaru diferenciálních a diferenčních rovnic.

Na fyzikálním modelu celoelektrické sklářské tavicí pece byla proměřena série pokusů, při nichž byly zjišťovány odezvy výstupní veličiny (teploty) na skokové změny veličiny vstupní (elektrický příkon). Z naměřených hodnot byly vypočteny parametry navržených matematických modelů.

V prvním přiblížení je možno chování fyzikálního modelu (stejně jako pece) aproximovat diferenciální rovnicí prvního řádu s konstantními koeficinty

$$T_s \cdot y' + y = kx. \tag{1}$$

Po provedení diskretizace a převedení diferenciální rovnice na diferenční, platí

$$y_i + \frac{T_v - T_s}{T_s} y_{i-1} = k \cdot \frac{T_v}{T_s} \cdot x_{i-1} \tag{2}$$

a po úpravě

$$y_i + Ay_{i-1} = Bx_{i-1}. \tag{3}$$

Potom pro hodnotu časové konstanty T_s a zesílení k platí

$$T_s = \frac{T_v}{1 + A}, \tag{4}$$

$$k = \frac{B}{1 + A}. \tag{5}$$

Zavedením dopravního zpoždění do rovnice (3) platí

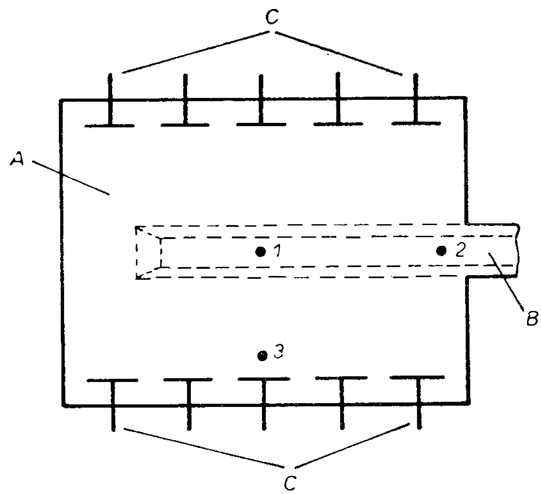
$$y_i + A \cdot y_{i-1} = B \cdot x_{i-D}. \tag{6}$$

Parametry modelu A a B se vypočtou metodou nejmenších čtverců a platí pro ně

$$A = \frac{\sum_1^N x_{i-D}^2 \cdot \sum_1^N y_i y_{i-1} - \sum_1^N y_{i-1} x_{i-D} \cdot \sum_1^N y_i x_{i-D}}{\sum_1^N x_{i-D}^2 \cdot \sum_1^N y_{i-1}^2 - (\sum_1^N y_{i-1} x_{i-D})^2}, \tag{7}$$

$$B = \frac{\sum_1^N y_i x_{i-D} \cdot \sum_1^N y_{i-1} - \sum_1^N y_{i-1} x_{i-D} \cdot \sum_1^N y_i y_{i-1}}{\sum_1^N x_{i-D}^2 \cdot \sum_1^N y_{i-1} - (\sum_1^N y_{i-1} x_{i-D})^2}. \tag{8}$$

Na základě vypočtených hodnot parametrů modelu A a B je možné pomocí (4) a (5) vypočítat hodnoty časové konstanty T_s, zesílení soustavy k a navrhnout matematicé modely popisující dynamické chování modelu celoelektrické sklářské tavicí pece. To bylo provedeno pro tři měřící místa v modelu pece, jak ukazuje obr. 2.



Obr. 2. Označení měřicích míst v modelu pece: A — tavicí část pece, B — průtok, C — elektrody, 1, 2, 3 — měřicí místa.

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Na fyzikálním modelu sklářské tavicí pece bylo provedeno osm pokusů simulujících dynamické chování. Hodnoty skokových změn eletrických příkonů do modelu v jednotlivých pokusech jsou v tabulce I.

Tabulka I

Skokové změny elektrických příkonů do modelu celoelektrické pece

Pokus č.	P_0 [VA]	P_s [VA]
1	55	60
2	60	55
3	60	67
4	67	60
5	60	75
6	75	60
7	67	75
8	75	67

Tabulka II

Vypočtené parametry soustavy

Pokus č.	Měřicí místo	A	B	T_s [min]	k
	1	—0,986	0,013	71,4	0,929
1	2	—0,993	0,005	142,9	0,714
	3	—0,994	0,005	166,7	0,833
	1	—0,984	0,007	62,5	0,438
2	2	—0,992	0,003	125,0	0,375
	3	—0,995	0,003	200,0	0,600
	1	—0,973	0,012	37,0	0,444
3	2	—0,994	0,002	166,7	0,333
	3	—0,992	0,006	125,0	0,750
	1	—0,967	0,012	30,3	0,363
4	2	—0,984	0,004	62,5	0,250
	3	—0,994	0,004	166,6	0,666
	1	—0,976	0,006	41,7	0,250
5	2	—0,984	0,008	62,5	0,500
	3	—0,992	0,005	125,0	0,625
	1	—0,989	0,006	90,9	0,545
6	2	—0,991	0,003	111,1	0,333
	3	—0,994	0,005	166,6	0,833
	1	—0,985	0,003	66,6	0,200
7	2	—0,994	0,003	166,6	0,500
	3	—0,992	0,006	125,0	0,750
	1	—0,976	0,005	41,7	0,208
8	2	—0,995	0,002	200,0	0,400
	3	—0,993	0,006	142,9	0,857

Vypočtené hodnoty konstant A a B ze vztahů (7) a (8), časových konstant T_s (4) a zesílení soustavy k (5) jsou v tabulce II. Z hodnot uvedených v tabulce II byly vypočteny parametry matematických modelů jak ve spojité, tak i diskrétní oblasti, jako průměrné hodnoty. Ty jsou uvedeny v tabulce III.

Tabulka III
Průměrné hodnoty parametrů matematických modelů

Měřicí místo č.	A	B	T_s [min]	k
1	—0,980	0,0080	50,0	0,400
2	—0,991	0,0038	111,1	0,417
3	—0,993	0,0050	142,9	0,714

Matematické modely popisující dynamické chování modelu celoelektrické sklářské tavicí pece mají v jednotlivých měřících místech tvar:

Měřicí místo 1

ve spojité oblasti $$50 \,.\, y' + y = 0{,}4x \tag{9}$$

v diskrétní oblasti $$y_i - 0{,}98y_{i-1} = 0{,}008x_{i-1} \tag{10}$$

Měřicí místo 2

ve spojité oblasti $$111{,}1 \,.\, y' + y = 0{,}417x \tag{11}$$

v diskrétní oblasti $$y_i - 0{,}991y_{i-1} = 0{,}0038x_{i-1} \tag{12}$$

Měřicí místo 3

ve spojité oblasti $$142{,}9 \,.\, y' + y = 0{,}714x \tag{13}$$

v diskrétní oblasti $$y_i - 0{,}993y_{i-1} = 0{,}005x_{i-1} \tag{14}$$

DISKUSE VÝSLEDKŮ

Jak je vidět z tabulky III, dosahuje časová konstanta T_s nejnižší hodnotu v měřícím místě 1, tj. uprostřed modelu pece ve výši tepelné bariéry mezi elektrodami. Z toho plyne, že v tomto místě se bude co nejrychleji vyrovnávat teplota, k čemuž velkou měrou přispívá i příznivé intenzívní proudění v této oblasti.

Z tabulky III jsou také patrné velké rozdíly mezi parametry matematických modelů (9), (11), (13) a (10), (12), (14) odpovídající zvoleným měřicím místům na fyzikálním modelu. Z toho plyne, že výběr míst pro umístění čidel je velice důležitý. Čidla je třeba umísťovat na taková místa, z nichž snímaná veličina podává co nejlepší a nejrychlejší informace o chování technologického procesu, neboť údaje z čidel vstupují do řídících programů, a tudíž přímo ovlivňují úspěšnost řízení. V našem případě se ukázalo, že vhodnější je umístit termočlánek, jako čidlo řídícího systému, do měřicího místa 1, než do míst 2 a 3.

V průběhu měření se projevovala největší nevyrovnanost měřených veličin v místě u elektrod (místo č. 3) a ve středu tavicího bazénu před průtokem (místo č. 2), což je možné vysvětlit rozdílným charakterem proudění v oblasti, kde se otavuje vsázka a v okolí deskových elektrod.

Z uvedeného vyplývá, že při počítačovém řízení provozu celoelektrických pecí není možno vycházet z údajů teplot snímaných v peci, neboť jejich odezva na nerovnovážný stav je pomalá a měřicí přístroje ji zaznamenají se značným zpožděním. Proto je výhodnější používat jako vstupní řídící veličinu jinou veličinu, např. elektrický odpor mezi elektrodami, vypočtený z napětí na elektrodách a elektrodami protékajícího proudu.

Z měření na modelu také vyplynulo, že navržené matematické modely neplatí pro celou periodu provozu, nýbrž je nutné, aby řídicí počítač neustále hodnoty parametrů dopočítával a upřesňoval.

ZÁVĚR

Technika modelování sklářských tavicích pecí dospěla již do takového stádia, že z hodnot naměřených na fyzikálních modelech je možné přesně určit chování tavicích agregátů. Proto je možné metodu fyzikálního modelování používat nejen jako zdroj informací pro konstrukční a elektrotepelné úpravy pecí, ale také při budování řídících systémů technologických procesů, kde je velice důležité znát jejich dynamické chování.

Seznam symbolů

x vstupní signál
y výstupní signál
T_s časová konstanta [sec]
T_v perioda vzorkování [sec]
A, B konstanty modelu
k zesílení soustavy
P_0 počáteční elektrický příkon do modelu [VA]
P_s elektrický příkon do modelu po skokové změně [VA]

Literatura

[1] Kubík S. at al.: *Teorie automatického řízení*, SNTL, Praha 1982.
[2] Drábek O., Macháček J.: *Experimentální identifikace a řízení systémů*, Skripta VŠCHT Pardubice, 1983.
[3] Marshall R. W.: The Glass Industry *63*, 14 (No. 11) (1982).
[4] Nixon S.: Glass *60*, 171 (1983).
[5] Kostrov V. N., Volf V. E.: Steklo i keramika 2 (No. 9) (1983).
[6] Kasa S., Staněk J.: Silikáty *30*, 339 (1986).

ДИНАМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЦЕЛЬНОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Станислав Каса

*кафедра технологии силикатов Химико-технологического института, 166 28 **Прага 6***

Динамическое поведение цельноэлектрической стекловаренной печи исследовали на физической модели. На подобранной серии модельных экспериментов измеряли реакции выходной величины (температура) на изменения входной величины (подводимая электрическая мощность). Измерения проводили на трех измерительных местах, как это приводится на рис. 2. С последовательностью измеряемых величин на модели устанавливали с помощью метода экспериментальной идентификации параметры математических моделей. Математические модели предлагаются в виде разностного урав-

нения первого порядка с постоянными коэффициентами (1) и в виде разностного уравнения (6) выведенного из дискретизаций.

Из сопоставления параметров матаматических моделей (таблица III) следует, что:

— постоянная времени T_s имеет самую низкую величину на местре измерения 1, т. е. в середине модели в уровне термического барьера, из чего следует, что в этом месте наиболее быстро выравнивается температура, чему в большой степени способствует также интенсивная конвекция,

— имеются большие различия между отдельными параметрами математических моделей, рассчитанными на разных местах измерения модели. Из того следует, что весьма важен правильный подбор размещения датчиков в процессе, из которых измеряемые величины входят в программы управления,

— характер конвекции оказывает влияние на величины параметров математических моделей (табл. III),

— реакция температур на неравновесное состояние системы оказывается небольшой и измерительными приборами регистрируются со значительным опаздыванием. Из того следует, что в качестве входной управляющей величины приходится использовать другую величину, напр. электрическое сопротивление между электродами,

— предлагаемые математические модели не действуют по весь период производства, поэтому необходимо, чтобы управляющая вычислительная машина непременно величины параметров урочняла.

На основании полученных результатов показывается пригодность применения физической модели стекловаренной печи в качестве одного из источников информации, служащих для разработки систем управления технологическими процессами.

Рис. 1. Система регулирования с автоподставительным регулятором.

Рис. 2. Обозначение мест измерения в модели печи: A — плавительная часть печи B — проток, C — электроды, 1, 2, 3 — места измерения.

DYNAMIC BEHAVIOUR OF ALL-ELECTRIC GLASS TANK FURNACE

Stanislav Kasa

Department of Silicate Technology, Institute of Chemical Technology, 166 28 Prague 6

The dynamic behaviour of an all-electric glass tank furnace was studied on a physical model. A selected series of model experiments were used to measure the responses of the output quantity (temperature) to changes in the input quantity (electric input). The measurements were carried out at three points, as shown in Fig. 2. The parameters of mathematical models were determined by experimental identification using the sequence of values measured on the physical model. The mathematical models were proposed in the form of a first-order differential equation with constant coefficients (1) and in the form of a difference equation (6) derived by discretizing.

A comparison of the parameters of mathematical models (Table III) showed that:

— the time constant, T_s, is lowest at measuring point 1, i.e. at the model centre and at the height of the thermal barrier, which means that the temperature is equalized most quickly at this point, this being largely contributed to by extensive flow in this region,

— there are great differences between the individual parameters of the mathematical models computed for the various measuring points of the model. It is therefore very important to choose correctly the positioning of sensors whose data enter the control programs,

— the character of the flow influences the parameter values in the mathematical models (Table III),

— the response of temperature to an inequilibrial state of the system is slow and the measuring instruments record it with a considerable delay. From this it follows that another quantity should be used as the controlling one, such as the electric resistivity between the electrodes

— the suggested mathematical models do not hold for the entire operation period, so that the control computer should continuously supplement and precision the parameter values.

The results have demonstrated that the physical model of the glass tank furnace is suitable as one source of information for the design of control systems for technological processes.

Fig. 1. Control circuit with an autoposition regulator.

Fig. 2. Designation of measuring points in the tank model: A — melting zone of the furnace, B — throat, S — electrodes, 1, 2, 3 — measuring points.