

ALGORITAM ZA UPRAVLJANJE SASTAVOM BINARNE GASNE SMEŠE U DINAMIČKOM VAKUUMU

Miodrag Zlatanović, Ivan Popović, Dragoljub Obradović, Zoran Zirojević, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj - U radu je opisan algoritam za kontrolu sastava binarne smeše gasova u dinamičkom vakuumu. Upravljanje sastavom gasne smeše bazira se na softverskoj obradi signala sa merača apsolutnog pritiska i pirani merača pritiska, čiji izlazni signal zavisi od promene toplote provodnosti smeše pri datom pritisku u sistemu, i na korišćenju prethodno snimljenih kalibracionih krivih ventila za upuštanje gasova u sistemu. Razvijen je programski paket za simulaciju ponašanja realnog vakuumskeg sistema. Simulacija je zasnovana na korišćenju prethodno snimljene baze mernih podataka relevantnih veličina u procesu i modela osnovnih elemenata vakuumskeg sistema. Simulacioni paket pruža mogućnost jednostavne implementacije različitih algoritama za upravljanje sastavom gasne smeše, posebno prilagođenih za različite tipove procesa koji se odvijaju u tom sistemu. Algoritam služi za automatsko podešavanje otvora ventila u cilju postizanja i održavanja zadate vrednosti koncentracije gasova i pritiska u sistemu sa dinamičkim vakuumom. U regularnim intervalima vremena simulacioni program vrši proračun mernih signala na osnovu prethodnog stanja sistema i promena upravljačkih signala. Algoritam se može primeniti, na primer, za vođenje procesa obrade materijala u plazmi.

1. UVOD

U procesnoj industriji, termičkoj obradi materijala, mikroelektronici i u mnogim laboratorijskim merenjima koriste se sistemi kod kojih je neophodno obezbediti precizan sastav gasne smeše koja čini radnu atmosferu za dati proces. Ovo je naročito značajno kada je u određenoj zapremini ili na određenoj površini neophodno obezbediti uslove za odvijanje željene hemijske reakcije u procesima na pritisccima nižim od atmosferskog pritiska. Sistemi može raditi u statičkom ili dinamičkom režimu, odnosno sa unapred pripremljenom smešom gasova ili sa kontinualnim dotokom pojedinih gasova koji se međusobno mešaju neposredno pre ulaska u procesnu komoru. Zbog složenosti procesa koji se odvijaju u vakuumu i potrebe za kontinualnim podešavanjima velikog broja parametara procesa neophodno je korišćenje računara ili sistema baziranog na mikrokontrolerskoj podršci za merenje relevantnih parametara sistema i upravljanje procesom.

Jedan od primera industrijskih procesa kod kojih varijacije parametara značajno utiču na sam kvalitet i rezultate procesa je proces plazma nitriranja i plazma depozicije, pa je od velikog interesa tačno poznavanje sastava smeše gasova u sistemu.

Karakteristično vreme odziva sistema pri promeni pritiska i sastava radne smeše je reda veličine 10-100 s, odnosno procesi su sporopromenljivi u odnosu na vreme obrade podataka, pa je primenom računara omogućeno

korišćenje relativno složenih struktura baza podataka za proračun i procesiranje upravljačkih veličina [1]. Ponovljivost procesa u manuelnom režimu rada zbog postojanja velikog broja parametara koji utiču na ponašanje sistema je veoma mala, te se nameće potreba računarske simulacije pomenutog procesa u cilju nalaženja efikasnog algoritma za upravljanje radom sistema.

U ovom radu je opisan jedan model računarske simulacije upravljanja sastavom binarne gasne smeše baziran na korišćenju prethodno izmerenih vrednosti relevantnih parametara sistema i modela njegovih osnovnih elemenata. Ovakav pristup rešenju problema je pogodan sa stanovišta analize različitih algoritama za kontrolu parametara procesa u cilju projektovanja što efikasnijeg računarskog upravljačkog sistema.

Kod procesa, kao što su procesi plazma nitriranja i plazma depozicije, postoji potreba za promenom sastava radne atmosfere i ukupnog pritiska u sistemu tokom vremena. Kod većine postojećih sistema problem dobijanja željenog sastava gasne smeše je rešen podešavanjem relativnog protoka komponentnih gasova u dinamičkom režimu. U ovom slučaju primenom kvalitetnih kontrolera pritiska može se postići delimično, ali ne i potpuno precizna kontrola sastava smeše, pogotovo ukoliko se neki od komponentnih gasova u procesu troši.

Računarsko upravljanje sastavom binarne smeše zasnovano je na korišćenju računarske merno-upravljačke jedinice, koja koristi zavisnost izlaznog signala pirani sonde od promene termalne provodnosti gasne smeše, tj. od promene njenog sastava pri datom pritisku [2]. Prednost ovakvog sistema je korišćenje standardnih i znatno jeftinijih senzora u odnosu na rešenje bazirano na korišćenju maslenih spektrografa za merenje sastava binarne smeše gasova.

U cilju rešavanja postavljenog problema razvijen je programski paket za simulaciju ponašanja realnog sistema i pomoću njega je implementiran jedan algoritam za postizanje i održavanje zadatog sastava gasne smeše i pritiska u dinamičkom vakuumskeg sistemu.

2. TEORIJSKE OSNOVE PONAŠANJA SISTEMA

Osnovni pristup rešavanju problema određivanja koncentracije gasne smeše zasnovan je na korišćenju senzora pritiska Pirani tipa. Rad ovakvog tipa senzora zasnovan je na podešavanju napona napajanja usijane niti koja se hladi odvođenjem toplote kondukcijom kroz okolni gas čiji se pritisak meri.

Zavisno od promene provodnosti binarne gasne smeše vrši se i promena signala napajanja potrebna za održavanje konstantne struje usijane niti. Promena signala predstavlja ujedno i meru pritiska u sistemu. Kako se termalne

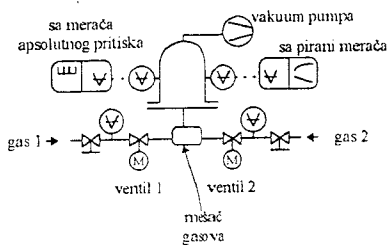
provodnosti razlikuju za različite gasove, merena veličina zavisi, pored pritiska u sistemu i od vrste i koncentracije gasova u vakuumskom sistemu.

Apsolutni merac pritiska baziran na piezorezistivnom efektu koristi silicijumsku membranu na koju su napareni otpornici za merenje promene mehaničkog napona σ_s na površini membrane. Relativna promena otpornosti kod ovakvih otpornika povezanih u most je proporcionalna pritisku koji deluje na membranu:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = P_s \cdot \sigma_s \quad (1)$$

gde je P_s piezootporna konstanta koja zavisi od orijentacije kristala, σ_s mehanički napon na površini membrane, a ρ specifična otpornost otpornika na membrani.

Na slici 1. prikazana je šema vakuumskog sistema koji je modeliran u cilju simulacije ponašanja u realnom okruženju.

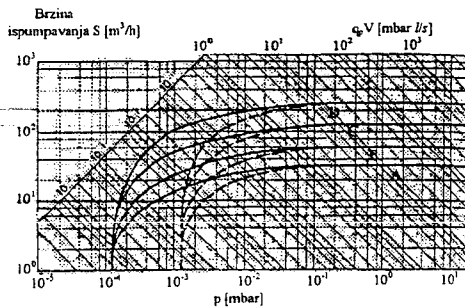


Slika 1. Šema vakuumskog sistema

Sistem sadrži dve podstanice za snabdevanje sistema gasom sa reductorima, stabilizatorima i mehaničkim meracima pritiska. Na osnovu zadate koncentracije gasova u smeši postavljaju se položaji ventila 1 i 2 potrebni za formiranje željene smeše. Tokom uspostavljanja stacionarnog stanja u određenim vremenskim intervalima očitavaju se vrednosti pritisaka i vrši se proračun trenutne vrednosti koncentracije gasova u sistemu. Proračun je zasnovan na procesiranju postojeće baze podataka predhodno formirane na osnovu velikog broja merenja za različite procentualne sastave smeše gasova koji se koriste za formiranje binarne gasne smeše.

Merac pritiska registruje rezultantnu vrednost pritiska smeše gasova koja je jednaka zbiru parcijalnih pritisaka komponentnih gasova. Pošto sistem radi u dinamičkom režimu, vrednost pritiska u stacionarnom stanju određena je brzinom ispušavanja višestepene rotacione pumpe i ukupnim pritiskom gasova koji se upuštaju u vakuum komoru.

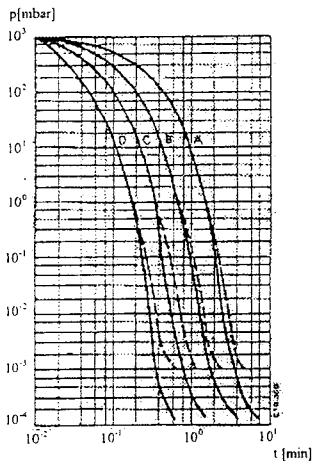
Kako brzina ispušavanja postojećih rotacionih pumpi zavisi od trenutnog pritiska u sistemu, matematički model ponašanja sistema je znano komplikovaniji. Grafik zavisnosti brzine ispušavanja dvostruke rotacione pumpe DUO 030A korišćene u sistemu, od ulaznog pritiska dat je na slici 2.



Slika 2. Zavisnost brzine ispušavanja (— sa gas balastom, --- bez gas balasta) dvostruke rotacione pumpe DUO 030A (grafik A) od ulaznog pritiska u sistemu. Krive B, C i D odnose se na druge tipove pumpi

Grafik pokazuje da se brzina ispušavanja, odnosno propusna moć smanjuje veoma naglo kada se pritisak približava donjem graničnom pritisku za tu pumpu. Međutim, kako su u opsegu (0.5 do 13 mbar) u kome su vršena snimanja izlaza pirani podsistema i sonde apsolutnog pritiska, promene brzine ispušavanja pumpe male, može se uvesti pretpostavka da je brzina ispušavanja pumpe u zavisnosti od trenutnog pritiska približno konstantna.

Kako je za detaljnu računarsku analizu ponašanja sistema potrebno poznavati vremenski oblik promene pritiska u opsegu od interesa, potrebno je modelirati oblik krive zavisnosti promene pritiska od vremena ispušavanja za korišćenu dvostepenu rotacionu pumpu [3]. Oblik ove zavisnosti prikazan je na slici 3.



Slika 3. Zavisnost promene pritiska od vremena ispušavanja (— sa gas balastom, --- bez gas balasta) za pumpu DUO 030A (grafik A). Krive B, C i D odnose se na druge tipove pumpi

Sa slike 2. određena je zavisnost brzine ispumpavanja pumpe od vremena i modelirana funkcijom $f(p)$:

$$\frac{dV}{dt} = f(p) \quad (2)$$

Polazeći od jednačine stanja idealnog gasa za posmatrani sistem se dobija da je zavisnost promene broja čestica gasa u sistemu od vremena, kao posledica dejstva posmatrane rotacione pumpe, data jednačinom:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{p}{kT} f(p) \quad (3)$$

gde je N_i broj izlaznih čestica iz sistema, p je trenutni pritisak u sistemu, k Bolcmanova konstanta, T temperatura, a $f(p)$ zavisnost brzine ispumpavanja pumpe DUO 030A od pritiska u sistemu.

Da bi se odredila vremenska zavisnost promene pritiska u sistemu, potrebno je poznavati i vremenski oblik zavisnosti promene broja ulaznih čestica komponentnih gasova u sistemu. Jednačina (4) daje oblik te zavisnosti u odnosu na položaje otvora ventila (θ_1 i θ_2) za upuštanje komponentnih gasova u binarnoj smeši, gde su k_1 i k_2 konstante koje zavise od vrste gasa, a f_{v_1} i f_{v_2} prikazuju zavisnost protoka gasova od otvora ventila.

$$\frac{dN_v}{dt} = k_1 f_{v_1}(\theta_1) + k_2 f_{v_2}(\theta_2) \quad (4)$$

Na osnovu jednačina (3) i (4). uz uslov da nema otpora protoku gasova između komore i vakuum pumpe, dobijena je vremenska zavisnost promene pritiska u funkciji relevantnih parametara sistema.

$$\frac{dp}{dt} = kT \left(-\frac{p}{kT} f(p) + k_1 f_{v_1}(\theta_1) + k_2 f_{v_2}(\theta_2) \right) \quad (5)$$

Jednačine (2)-(5) predstavljaju matematički model ponašanja sistema korišćen u programskom paketu za simulaciju procesa.

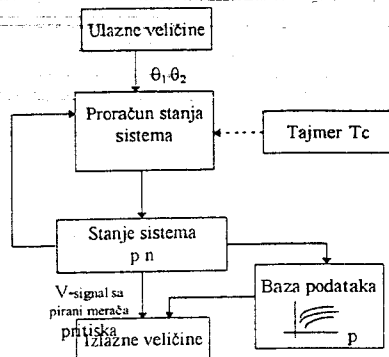
3. OPIS PROGRAMSKOG PAKETA ZA SIMULACIJU PROCESA

U regularnim intervalima vremena na osnovu ulaznih promenljivih i prethodnog stanja sistema proračunava se novo stanje sistema i izlazne veličine. Položaji otvora ventila predstavljaju ulazne veličine, dok pritisak u sistemu, kao i koncentracije gasnih komponenti predstavljaju stanje sistema. Izlazne veličine određuju se na osnovu prethodno snimljenog baze podataka koja predstavlja zavisnost izlaza pirani podsistema od apsolutnog pritiska za različite vrednosti koncentracije komponentne smeše.

Na slici 4. dat je prikaz uprošćenog algoritma rada simulatora koji prikazuje povezanost izlaznih veličina procesa simulacije sa ulaznim parametrima sistema i vrednostima trenutnih stanja sistema u trenutcima proračunavanja ponašanja sistema. Najveći uticaj na tačnost dobijenih rezultata simulacije ima rezolucija prethodno snimljenih kalibracionih krivih otvora ventila, jer ona

direktno utiče na rad samog algoritma korišćenog u procesu simulacije.

Programski paket za simulaciju sadrži grafički korisnički interfejs za jednostavno i efikasno menjanje ulaznih veličina i posmatranje stanja sistema i izlaznih veličina.

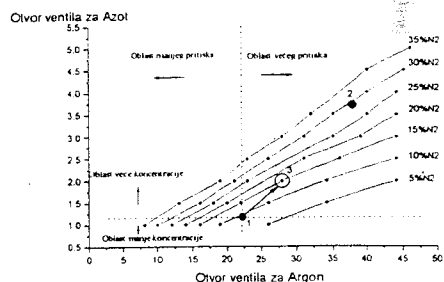


Sl.4. Blok dijagram rada simulatora

4. OPIS RADA ALGORITMA

U radu je opisan jedan od mogućih algoritama za postizanje i održavanje zadate koncentracije komponentata gasne smeše i apsolutnog pritiska u sistemu, na osnovu prethodnih teorijskih razmatranja.

Osnovu algoritma predstavlja podešavanje upravljačkih signala za kontrolu ponašanja sistema na osnovu trenutnog i ciljnog stanja sistema. U polju kalibracionih krivih otvora ventila koji predstavljaju upravljačke signale određuje se nova vrednost postizanja zadatog pritiska i koncentracije.



Sl.5. Grafički prikaz određivanja novog položaja otvora ventila (V_1 , V_2) u cilju dostizanja zadatog stanja

Na slici 5. prikazan je jedan korak u radu ovog algoritma. Polazna tačka (1) odgovara trenutnom stanju vrednosti otvora ventila i koncentracije, dok stanje (2) predstavlja ciljno stanje sistema. Na osnovu položaja ovih tačaka algoritam u polju familije krivih određuje tačku (3) koja predstavlja jedno od prelaznih stanja u sistemu. Zbog ograničenja brzine promene otvora ventila, kao i radi efikasnijeg i preciznijeg upravljanja procesom, algoritam teži

da malim relativnim promenama otvora ventila prevede sistem u željeno stanje.

Kriterijum za postavljanje otvora ventila određuje najbližu prelaznu tačku u polju familije kalibracionih krivih tako da relativni priraštaji pritiska i koncentracije komponentnih gasova budu u smeru potrebne promene. Na taj način sistem sukcesivno prelazi u željeno stanje.

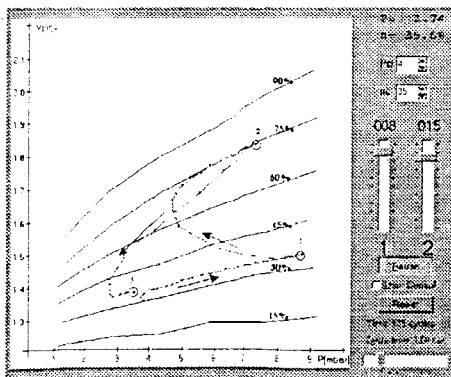
Efikasnost algoritma u velikoj meri zavisi od tačnosti snimljene baze podataka, a vreme dostizanja željene vrednosti zavisi od simulacionih parametara sistema.

5. REZULTATI RADA ALGORITMA

Korisnički interfejs je osmišljen tako da korisniku pruža komfor u praćenju relevantnih parametara sistema u toku odvijanja procesa (trenutni pritisak u sistemu, postignuta koncentracija i trenutni otvori ventila za upuštanje gasova), kao i pri kontroli samog procesa u sistemu. Omogućeno je u proizvoljnom trenutku vremena postavljanje željenih vrednosti pritiska i koncentracije, pri čemu je moguće simulirati rad u automatskom režimu rada kada se određivanje otvora ventila vrši prema opisanom algoritmu, i manuelnom režimu rada kada korisnik proizvoljno zadaje otvore ventila.

Na slici 6. dat je izgled korisničkog ekrana u toku procesa simulacije. Na osnovu vrednosti zadatog apsolutnog pritiska i željene koncentracije binarne gasne smeše sukcesivno se određuju vrednosti otvora ventila u cilju dostizanja zadatih vrednosti. Na ekranu se prate trenutne vrednosti koncentracije i pritiska u sistemu kao i vrednosti trenutnih otvora ventila.

Po uspostavljanju stacionarnog stanja u tački 1. određenoj sa $p_1=8.8$ mbar i $n_1=35\%$, zadata je željena vrednost pritiska $p_2=7.2$ mbar i koncentracije $n_2=75\%$. Prema opisanom algoritmu parametri sistema su se najpre kretali u cilju dostizanja zadate koncentracije n_2 , a zatim i pritiska p_2 . Zatim su zadate vrednosti niže koncentracije i nižeg pritiska $p_3=4$ mbar i $n_3=35\%$, što je prikazano krivom 2→3. Po dostizanju zadatog stanja algoritam podešava parametre sistema u cilju održavanja postignutog stanja.



Slika 6. Izgled korisničkog ekrana u toku simulacije

6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan jedan algoritam za automatsko podešavanje otvora ventila u cilju postizanja željenog sastava gasne smeše i pritiska u radnoj komori sistema sa dinamičkim vakuumom. Pokazano je da korišćenjem efikasnog algoritma zasnovanog na poznavanju mernih signala sa standardne pirani sonde i korišćenog piezorezistivnog merača apsolutnog pritiska moguće postići i održavati željenu procesnu atmosferu u sistemu korišćenjem prethodno snimljenih kalibracionih krivih otvora ventila i proračunatih parcijalnih pritisaka u sistemu.

Prikazani algoritam u okviru realizovanog simulacionog okruženja postiže željene rezultate primenljive na kontrolu procesne atmosfere u procesima plazma nutriranja i plazma depozicije.

LITERATURA

- [1] M. Zlatanović, I. Popović, D. Dujković, "Programski paket za formiranje baze podataka za određivanje sastava gasne smeše", YUINFO'97, pp.882-887, April 1997.
- [2] M. Zlatanović, I. Popović, D. Dujković, "Sistem za merenje i upravljanje sastavom smeše gasova u vakuumskom sistemu pomoću računara", IT'97, pp. 356-359, Mart 1997.
- [3] Balzers, "Vacuum components", Edition 86/88, pp. B12-B14

Abstract - An algorithm for efficient control of the gas composition in a dynamic vacuum system is presented. The control of the binary gas composition is based on the calculation of the actual gas composition by processing the signal from absolute piezoresistive pressure sensor and the pirani sonde. A standard pirani pressure gauge output signal depends on thermal conductivity of the gas composition and density (pressure). A memory stored data base which contains a set of the gas concentration versus valve position data is used in the algorithm for the process. We developed a program support for simulation of a real vacuum system. The simulation is based on previously recorded measured values of relevant signals in the system and a model of the vacuum installation elements. Simulation software gives the possibility of simple implementation of various algorithms specially designed for different processes. Implemented algorithm automatically adjust valve position in the dynamic vacuum to achieve and to hold the given value of a gas mixture and pressure in the system. In the regular time intervals simulation software calculates actual values of measured signals using previous state of the system and control signals variation. The algorithm is suitable for control of process parameters in plasma processing of materials.

ALGORITHM FOR BINARY GAS MIXTURE CONTROL

Miodrag Zlatanović, Ivan Popović, Dragoljub Obradović, Zoran Zirojević