

Vlado Goglia, Ankica Kos-Pervan

Optimizacija rada zračnog konvejera

Optimisation of pneumatic conveyors working conditions

Prethodno priopćenje - Preliminary paper

Primljeno - received: 15.5.1996. • Prihvaćeno - accepted: 17.4.1997.

UDK: 621.316.72 i 621.63

SAŽETAK • U pogonima drvne industrije zračni su konvejeri veliki potrošači električne energije. Rad im se regulira unutar granica tehničke optimalnosti. U članku su razmotrene neke mogućnosti regulacije frekvencije vrtnje ventilatora kao postupak rješavanja optimizacije rada uređaja. Mjernim se pretvornikom neprekinuto tijekom rada transportera bilježila promjena tlaka i brzina zraka u cjevovodu. Izlazni napon pretvornika konvertiran u regulacijski napon pokreće frekvencijski pretvarač i prema stvarnoj potrebi snage za stvaranje struje zraka mijenja broj okretaja elektromotora odnosno ventilatora.

Ključne riječi: zračni konvejeri, tehnička optimalnost, regulacija, mjerni pretvornik, frekvencijski pretvarač.

SUMMARY • Since the pneumatic conveyors are great users of electricity in woodworking companies, especially in Croatia, there are some possibilities for improving energy consumption, by means of controlling the fan rpm. During the work of the a conveyor, the changing of air pressure and velocity will be registered by means of the measuring device. The incoming value of the voltage will be converged in regulating the voltage of the frequency converter. In that way, by changing the rpm of the electric motor, it is possible to control the value of the necessary air power.

Key words: Pneumatic conveyors, optimal limits, regulation, measuring converter, frequency converter.

1. UVOD 1. Introduction

U pogonima drvne industrije rabe se zračni konvejeri za odsis drvnih čestica i brusila (piljevine, blanjevine, bruševine i sl.) što nastaju pri radu radnih strojeva.

S razvojem proizvodnje i uporabom strojeva sa sve većim frekvencijama vrtnje

radnih vretena raste potreba za poboljšanjem kakvoće radnih uvjeta pokraj stroja, koja ponajviše ovisi o odsisu usitnjenoga drvnog ostatka nakon obradbe drva.

S obzirom na higijenu rada zračni konvejeri imaju mnoge izravne prednosti: omogućavaju slobodno kretanje oko stroja, održava se pogonski red te bolje iskorištava

Autori su izvanredni profesor i znanstvena novakinja na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Authors are associated professor and research assistant, respectively, at the Faculty of Forestry of the University of Zagreb

radni prostor. Prednosti su i u smanjenju opasnosti od požara, većoj proizvodnosti zbog nesmetanoga rada te mogućnosti iskorištenja skupljenog ostatka u ložištu toplane ili blizini pogona koji iskorištava drveni ostatak kao sirovinu za svoju preradbu (proizvodnja papira, ploča iverica i dr.).

Nema prikladnijega načina od usisavanja drvnih čestica zračnom strujom iz neposredne blizine alata, i to dok još nastaju, ali i drugoga otpada odnosno ostatka ili prašine iz radne okoline.

Nedostaci su zračnoga konvejera velika potrošnja električne energije za pogon sustava čiji su uređaji ponekad i nedovoljno iskorišteni. Ostali su problemi moguća oštećenja cjevovoda, npr. koljena, u kojima čestice udaraju u stijenke pri promjeni smjera, ili na mjestu odvajanja drvenih čestica od zraka, gdje katkad onečišćuju okoliš. Buka zbog rada ventilatora, ciklona ili lupanje krupnijih komada o unutrašnjost cijevi, ako je veća od dopuštene, nedostatak je zračnih konvejera.

Nedostaci zračnih konvejera koji su obrađeni u ovom radu jesu:

- mala korisnost uređaja, odnosno pogonskoga elektromotora
- neusklađenost potrebe za odsisavanjem sa snagom instaliranih uređaja
- nemogućnost prilagođavanja promjenama u pogonu koje nastaju prestankom rada pojedinih radnih strojeva i zatvaranjem njihovih usisnih ušća, te instaliranjem novoga stroja.

2. PRIJEPORNA PITANJA (problematika) 2. Research issue

U radu strojeva se kao problem redovno javlja razlika između instalirane pogonske točke ventilatora i stvarne potrebe za odsisavanjem tijekom rada sustava.

Proračunom odabrani ventilator i odgovarajući elektromotor, jednom uključeni, rade s dimenzioniranom snagom koja se sama od sebe ne usklađuje s promjenama snage potrebne za strujanje zraka u cjevovodu kad se neuporabljivana ušća zatvaraju te se nepotrebno ne gubi topli zrak iz radionice. Ako se zatvori dopuštenih oko 30 % ušća, zbog smanjene količine zraka, protoka se smanji približno za 15 % zbog ujednačenoga rada ventilatora i malo veće brzine strujanja zraka. Time se povećava otpor strujanju unutar cijevi. Takvim odsisom ventilator nije dovoljno iskorišten jer se smanjenjem protoka smanjuje i brzina strujanja i snaga potrebna za odsis zrakom. Naravno, u usisnoj cijevi može doći do taloženja zbog smanjenja brzine zraka.

Svaki stroj od kojega se odsisava drvena prašina iziskuje određenu brzinu strujanja zraka odnosno protoka zraka ovisno o

tome kojim se intenzitetom stvara drvni otpad. Da bi transportni sustav obavljao svoju zadaću, a pritom bio ekonomičan, treba se znati optimalnu, ali i donju granicu brzine, te odsisne protoke ispod koje snaga zračne struje ne smije pasti.

2.1. Pretpostavke rada zračnih konvejera unutar optimalnih granica

2.1. Working suppositions of pneumatic conveyors within optimal limits

Potrebna protoka smjese zraka i drvnih čestica ulazni je podatak za projektiranje sustava. Gustoća je zraka unutar konvejera ovisna o tlaku i temperaturi okolnoga zraka. Najčešće se za praktične proračune uzima $1,2 \text{ kg/m}^3$, a gustoća smjese zraka i drvnih čestica ovisi o količini nakupljenih čestica, njihovoj vrsti i vlazi drva. Na 1 m^3 zraka dolazi na odsis odnosno transport od 0,2 do $1,0 \text{ kg/m}^3$ drvnih čestica, a količina drvnih čestica veća od 1 kg/m^3 zraka ne bi smjela biti dopuštena.

Ventilator unutar sustava cijevi stvara razliku tlakova; podtlak u usisnome dijelu cjevovoda, a pretlak u tlačnome, koji uzrokuju brzinu strujanja kroz cjevovod.

Brzina koja odnosi drvene čestice mora biti veća od brzine lebdenja tih istih čestica. Za sustave koji postoje u drvnoindustrijskim pogonima ona se kreće:

- od 10 do 15 m/s za finu prašinu
- od 15 do 25 m/s za prosušenu piljevinu i bruševinu
- od 25 do 30 m/s za mokru piljevinu.

Pogonsku točku ventilatora (efektivna snaga i broj okretaja rotora) u pogonskom dijagramu statičkih tlakova određena je ovim ulaznim podacima:

- protokom
- padom tlaka koji treba svladati.

Korisnost ventilatora treba biti do 70%, a on osigurava zračnu sugu jednaku umnošku protoka i ukupnoga pada tlaka.

Elektromotor (EM) se odabire u skladu s potrebama ventilatora tako da se potrebna mehanička snaga povećava približno 10% zbog mogućnosti povećanog opterećenja rotora ventilatora nekim krupnim komadom drva. Elektromotor mora biti odabran u skladu s ventilatorom i s mogućnošću što većeg iskorištenja, kako samog EM-a koji treba biti barem 90 %, tako i cijelog uređaja.

2.2. Opis rada zračnog konvejera u pogonu finalne obrade kao objašnjenje potrebe za regulacijom

2.2. Description of work of pneumatic conveyors in a woodworking plant as a criterion for implementation of regulation

Istraživani zračni konvejer sastoji se od usisnoga i tlačnog dijela cjevovoda između kojih centrifugalni ventilator stvara

Tablica 1.

Prikaz minimalnih brzina i protoka instaliranih strojeva •
Minimal air velocity and flow quantity for installed machines

VRSTA STROJA MACHINE TYPE	SNAGA POWER	MINIMALNE BRZINE (vlaga drva%) MINIMAL VELOCITIES (moisture content%)	PROTOKA AIR FLOW QUANTITY
	kW	m/s	m ³ /s
tanjurasta brusilica Disc sander	4,5	14	0,233
tračna brusilica Belt sander	4,0	10	0,333
nadstolna glodalica Router	3,0	16	0,200
stolna glodalica Spindle moulder	4,0	16	0,200
kružna pila Circular saw	4,0	14	0,233
tračna stolarska pila Splitting band saw	4,0	13	0,333
			Σ1,523 m ³ /s

uvjete za strujanje zraka. Ventilator tipa TSV-6 preko klinastog je remena pogonjen trofaznim asinkronim elektromotorom nazivne snage 22 kW, frekvencije vrtnje 2 800 min⁻¹ pri 50 Hz.

Treba provjeriti je li dimenzionirana snaga istoga dobro iskorištena.

Do glavne usisne cijevi vodi veći broj usisnih cijevi kroz čija se ušća odsisavaju čestice nastale mehaničkom obradom na šest različitih strojeva. Kroz ušća ulazi smjesa zraka i drvenih čestica ili samo struja zraka ukoliko se alatom ne usitnjuje drvo.

Gustoća se smjese u cjevovodima mijenja od 1,4 do 2,2 kg/m³. U tablici 1. prikazane su vrste strojeva iz našeg primjera s pripadnom nazivnom snagom pogonskoga EM-a, najmanje brzine strujanja zraka za odsisavanje drvnih čestica te potrebna protoka.

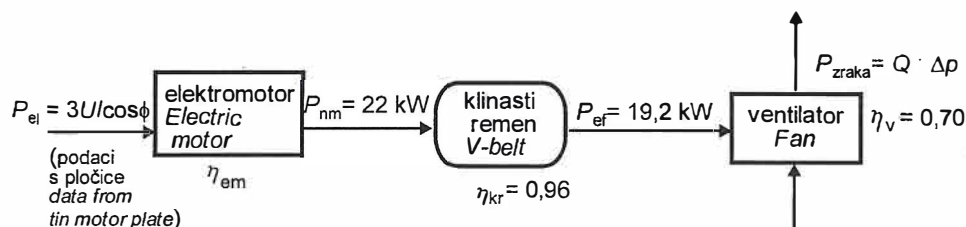
Ventilator je odabran prema protoci i ukupnom padu tlaka koje treba savladati. Postojeći EM ventilatora tipa TVS-6 nazivne je mehaničke snage 22 kW, što znači da efektivna snaga, odnosno mehanička snaga potrebna ventilatoru za rad iznosi 19,2 kW (96 % nazivne snage 22 kW zbog gubitaka na klinastom remenu i 10 % manje zbog predimenzioniranosti EM-a).

$$P_{mn} = \frac{P_{ef}}{\eta_{kr}} 1,1 = 22 \text{ kW}$$

$$P_{ef} = \frac{P_{mn}}{1,1} \eta_{kr} = \frac{22}{1,1} 0,96 = 19,2 \text{ kW} \quad (1)$$

Slika 1.

Shematski prikaz odnosa snaga i korisnosti uređaja •
Scheme of relation between power and usefulness of different devices



Pritom je:

P_{mn} - nazivna mehanička snaga koju elektromotor može dati ventilatoru, a koje se dio izgubi na klinastom remenu (otprilike 4 %)

P_{ef} - efektivna snaga koju ventilator prima za svoj rad

η_{kr} - korisnost prijenosa gibanja i snage klinastim remenom.

$$\eta_v = \frac{P_{zrak}}{P_{ef}} = \text{maxs. } 070$$

$$P_{zrak} = P_{ef} \eta_v = 19,2 \cdot 0,70 = 13,4 \text{ kW}$$

$$P_{zrak} = Q \Delta p \quad (2)$$

Pritom je:

η_v - korisnost ventilatora, do 70 %

P_{zraka} - snaga zračne struje koju ventilator proizvede, a iznosi 70 % ulazne efektivne snage (13,4 kW).

Navedeni odnosi snaga i korisnosti prikazani su shematskim prikazom na slici 1.

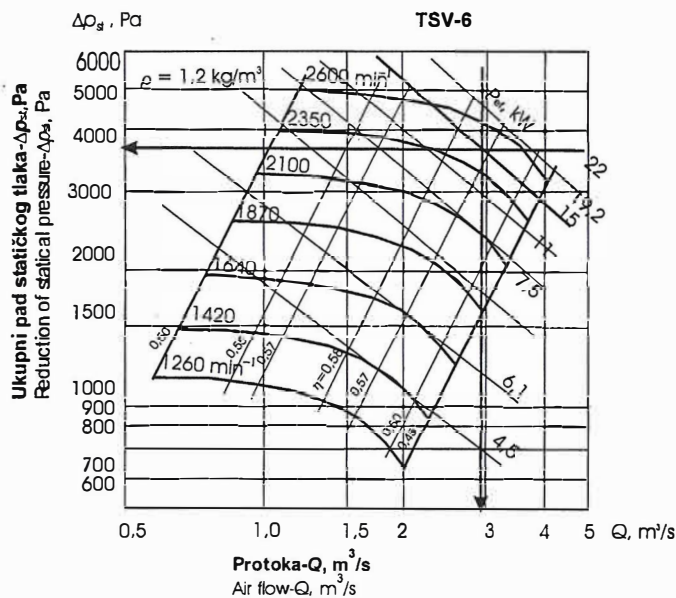
U dijagramu statičkih tlakova (Slika 2) potraži se položaj pogonske točke ventilatora, vrijednost njegove efektivne snage i broj okretaja ventilatora, a zatim i približan odnos pripadne protoke i pada tlaka prema izračunanoj zračnoj snazi.

Promjer remenice EM-a (d_{em}) jest 150 mm, a remenice ventilatora (d_v) 173 mm; njihov je omjer 0,86. Iz istog se omjera dobije broj okretaja rotora ventilatora. Broj okretaja (EM (η_{em}) jest 2 800 min⁻¹, a broj okretaja rotora ventilatora (n_v) 2 400 min⁻¹.

$$i = \frac{d_{em}}{d_v} = \frac{150}{173} = 0,86$$

$$n_v = i \cdot n_{em} = 0,86 \cdot 2800 = 2400 \text{ min}^{-1} \quad (3)$$

se njihova veća ekonomičnost, a time i poboljšala uporaba zračnog odsisnog uređaja.



Slika 2. Dijagram statičkih tlakova • Diagram of static pressures

Iz dijagrama statičkih tlakova (Slika 2) odčitava se približna vrijednosti protoke i pada tlaka koji iznose 2,9 m³/s i 4 kPa.

Promjer glavne usisne cijevi iznosi 300 mm. Brzinu strujanja zraka izračunava se kao omjer protoke i površine poprečnoga presjeka cijevi. Protoka očitana iz dijagrama iznosi 2,9 m³/s. U opisanom primjeru brzina iznosi 35 m/s, što je za sve vrste čestica i dopuštene gustoće smjese previše.

Izračunana je minimalno potrebna protoka za sve instalirane radne strojeve (1,523 m³/s). Za postojeći promjer usisnoga cjevovoda od 300 mm, minimalna bi brzina čestica u tom slučaju smjela biti 21,55 m/s.

$$v_{min} = \frac{4 \cdot Q_{min}}{d\pi} = \frac{4 \cdot 1,523}{0,3 \cdot \pi} = 21,55 \text{ m/s} \quad (4)$$

Razlika između stvarne i minimalno potrebne brzine jest 13,45 m/s (38,4 %).

3. SVRHA RADA I DOSADAŠNJA DOSTIGNUĆA

3. Aim of research and former attainments

Opisanim primjerom postojećega zračnog konvejera prikazana su prijeporna pitanja o neskladu pri njihovu radu. Budući su zračni konvejeri veliki potrošači električne energije, treba razmotriti mogućnost održavanja njihova rada unutar optimalnih granica. U našoj zemlji nije uvedeno regulacijsko upravljanje radom zračnog konvejera, barem nisu objavljeni radovi.

Regulacijom rada sustava postigla bi

4. OPIS REGULACIJE RADA ZRAČNIH KONVEJERA

4. Description of regulation solution for pneumatic conveyors

Veličina koju se treba mjeriti jest tlak unutar cijevi. Na usisnoj i tlačnoj strani cjevovoda potrebno je izbušiti mali otvor (približnog promjera 6 mm) za jednu stranu U-manometra (Pitotova cijev). Otvor U-manometra položen s unutrašnje strane cijevi, tik uz stijenku, pokazuje statički tlak, a na udaljenosti oko 1/3 promjera cijevi totalni tlak. Apsolutna vrijednost razlike tih dvaju tlakova (5) daje podatak o iznosu dinamičkog tlaka u cijevi (6), odnosno brzini (7) i padu tlaka (8).

U-manometrom dakle, dobivamo podatak o brzini strujanja zraka u cijevi, odnosno protoci (9), odnosno tzv. zračnoj snazi (10).

Spomenuti su odnosi:

$$p_{din} = |p_{tot} - p_{st}| \quad (5)$$

$$P_{din} = \frac{v}{2} \rho_{smjesa} \quad v = \frac{2p_{din}}{\rho_{smjesa}} \quad (6), (7)$$

$$\Delta p = p_{din} \cdot \xi \quad (8)$$

Pritom su ξ svi otpori koji se javljaju unutar cjevovoda.

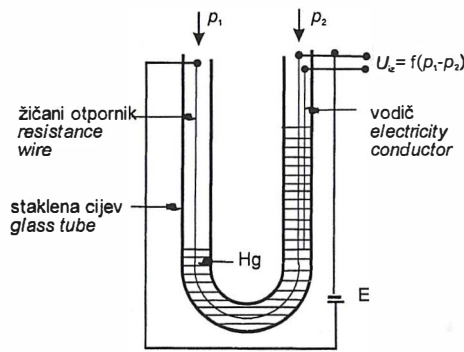
$$Q = A \cdot v \quad (9)$$

$$P_z = \Delta p \cdot Q \quad (10)$$

Mjerni je pretvornik razlike tlaka od staklene cijevi izveden kao na slici 3.

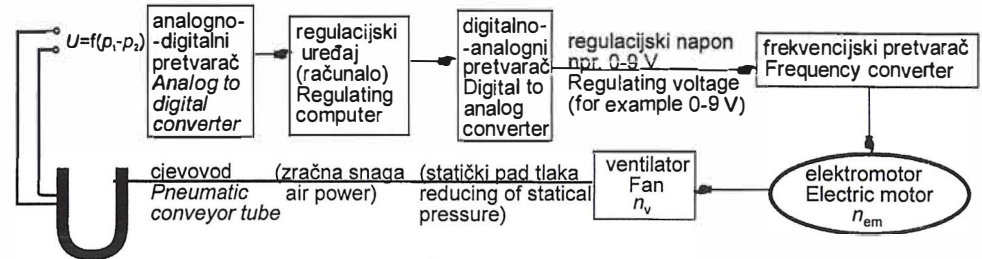
Slika 3.

Živin U-manometar: mjerni pretvornik za mjerenje totalnoga i statičkog tlaka •
Mercury U-manometer: a converter for measuring the total and static pressure



Slika 4.

Shematski prikaz reguliranja sustava zračnog transportera •
Scheme of pneumatic conveyor regulating system



U-manometar ispunjen živom, s ugrađenim žičanim otpornikom, spojen s vodičem u strujni krug daje izlazni napon razmjernan promjeni tlaka.

Tako izmjeren napon može se u analogno-digitalnom pretvaraču pretvoriti u brojčanu vrijednost statičkoga ili dinamičkoga tlaka. U regulacijskom uređaju (računalu) tako se dobivena vrijednost uspoređuje s optimalnom te se na osnovi toga određuje regulirajuća veličina u digitalnom obliku. Izlazna se digitalna vrijednost pretvara (digitalno-analognim pretvaračem) u naponski signal odnosno regulacijski napon.

Jednadžbe zakona afiniteta određuju odnos promjene broja okretaja rotora ventilatora s promjenom protoke (11), ukupnim padom statičkoga tlaka (12) i zračnom snagom (13):

$$n/n_1 = Q/Q_1 \quad (11)$$

$$(n/n_1)^2 = p/p_1 \quad (12)$$

$$(n/n_1)^3 = P_2/P_{21} \quad (13)$$

Vrijednosti s indeksom 1 odgovaraju novonastalim vrijednostima, dok početno stanje nema brojčanu oznaku.

Ako mjernim pretvornikom izmjerimo pad statičkog tlaka od 10 %, korekcijom frekvencije vrtnje rotora ventilatora iz jednadžbi zakona afiniteta dobije se smanjenje brzine s 2 400 min⁻¹ na 2 277 min⁻¹. Primjer:

$$\begin{aligned} (n/n_1)^2 &= p/p_1 \\ 0,9 &= p_1/p = (n_1/n)^2 \\ 0,9 &= (n_1 / 2\,400)^2 \\ n_{12} &= 0,9 n_2 = 0,9 \cdot 2\,400^2 \\ n_1 &= 2\,277 \text{ min}^{-1}. \end{aligned}$$

Ili, ako mjernim pretvornikom izmjerimo za 10 % veću zračnu snagu, broj bi se okretaja rotora ventilatora povećao s 2 400 min⁻¹ na 2 477 min⁻¹.

Frekvencija vrtnje može se regulirati frekvencijskim pretvaračem. Time se regulira i broj okretaja rotora ventilatora te, naposljetku, i brzina strujanja zraka u cjevovodu.

Regulacijski je napon izlazni signal dobiven opisanim sustavom regulacije shematski prikazan na slici 4.

Ulazni napon u frekvencijski pretvarač kojim se regulira izlazna frekvencija za neke pretvarače iznosi od 0 do 9 V.

Elektroničkim frekvencijskim pretvaračima moguće je prilagođavati izlazne frekvencije linearno u vrlo širokom rasponu.

Broj okretaja dvopolnoga asinkronoga EM-a iz primjera iznosi 2 800 min⁻¹ za frekvenciju 50 Hz. Smanjimo li frekvenciju struje kojom se napaja na 30 Hz, broj okretaja će biti malo veći od 1 700 min⁻¹.

4.1. Neki mjerni pretvornici kao moguće rješenje u krugu opisane regulacije 4.1. Some measuring converters as a possible solution in the described regulating circle

Elektrodinamičko osjetilo putem korelatora pokazuje brzinu strujanja drvnih čestica što ih registriraju njegove metalne elektrode unutar stijenki cjevovoda. To je vrsta elektromagnetskoga mjernog pretvornika.

Ionizacijski se pretvornik protoka sastoji od izvora zračenja i detektora (brojila) zračenja. Pokazivanje detektora razmjerno je protoku.

Ultrazvučni je pretvornik protoka izrađen od dva para predajnika s prijemnikom. Predajnik odašilje akustički val čije vrijeme putovanja niz promatranu struju smjese zraka i drvnih čestica registrira i obrađuje prijemnik.

5. ZAKLJUČAK 5. Conclusion

Novi se uvjeti odsisa stalno nadziru mjernim pretvaračem, čime je sustav

moгуće održavati u optimalnim granicama.

Na taj se način prilagođava između potrebnih i stvarnih uvjeta unutar cjevovoda zračnih konvejera radi njihova boljeg iskorištenja i optimiranja cjelokupnoga rada sustava.

U pogonima drvne industrije načelo automatske regulacije frekvencijskim pretvaračima primjenjuje se u različitim sustavima. Koliko nam je poznato, takvih rješenja nema u primjeni zračnih konvejera. Opravdanost primjene regulacije promjenom frekvencije struje u tim uvjetima tek treba istražiti. Ovdje izvršene postavke preliminarno su provjerene jednostavnim pokusom a o detaljima opsežnijeg pokusa izvijestit ćemo naknadno.

6. LITERATURA

6. References

1. Božičević, J. 1991: Temelji automatike, Školska knjiga, Zagreb
2. Božičević, J., Mandić, I., Stipeničev, D. 1986: Napredak teorije i primjene automatskog vođenja procesa i objekata, OZIR, Zagreb
3. Cebalo, R. 1993: Fleksibilni obradni sustavi (podloge za predavanje), Zagreb
4. Ostojčić, B. 1980: Digitalna automatizacija alatnih strojeva (atlas nacрта), Tehnički fakultet - Sveučilišta u Rijeci, Rijeka
5. Sever, S. 1988: Transport u drvenoj industriji, interna skripta Šumarskog fakulteta, Zagreb
6. Yan, Y., Byrne, B., Woodhead, S., Coulthard, J. 1995: Velocity measurement of pneumatically conveyed solids using electrodynamic sensors, Measurement Science & Technology, 6(5),515-537.