

Ušteda energije u industrijskim sistemima komprimovanog vazduha kroz saniranje curenja

1. Uvod

Komprimovani vazduh ima vrlo široku primenu u industriji. Skoro svako industrijsko postrojenje, od malih zanatskih radionica do velikih industrijskih postrojenja, ima neki tip sistema za komprimovan vazduh. U mnogim slučajevima, sistem za komprimovani vazduh je vitalno važan, toliko da postrojenje ne bi moglo da funkcioniše bez njegovog angažovanja. Snaga kompresorskog postrojenja može da varira od 3 kW pa i do preko 30.000 kW [1], [2].

U mnogim industrijskim postrojenjima kompresori troše više energije nego bilo koji drugi deo opreme.

Zbog toga, neefikasnost kod ovih sistema treba svesti na najmanju moguću meru. Unapređivanjem rada opreme kod sistema komprimovanog vazduha, može se uštedeti od 20 – 50% električne energije [3]. Za mnoga postrojenja to je ekvivalentno hiljadama ili čak stotinama hiljada € godišnje uštede. Zavisno od upotrebe, pravilno upravljanje sistemom komprimovanog vazduha može uštedeti energiju, redukovati troškove, smanjiti vreme zastoja, povećati produktivnost i poboljšati kvalitet proizvoda.

2. Curenje kod sistema sa komprimovanim vazduhom

Isticanje vazduha kroz pukotine može predstavljati značajan gubitak energije, nekad i do 30% od količine vazduha koja izade iz kompresora. Kod tipičnog pogona koji nije pravilno održavan curenje vazduha je reda 20% od ukupne proizvedene količine vazduha.

Pravilnim preduzimanjem preventivnih mera, detekcijom i popravkom mesta curenja, ovu vrstu gubitka možemo svesti na manje od 10% od ukupne proizvodnje [4].

Rezime

Isticanje vazduha kroz pukotine (curenje) može predstavljati značajan gubitak energije, nekad i do 30% od količine vazduha koju kompresor šalje u sistem. Curenje izaziva pad pritiska u sistemu, a pad pritiska može smanjiti efikasnost opreme koja koristi komprimovani vazduh. Takođe, zbog rada na nižem pritisku, produžava se rad opreme, pa curenje smanjuje radni vek i samog kompresora. Povećanje vremena rada povećava potrebe za održavanjem i neplanirane zastoje. Na kraju, curenje dovodi do nepotrebног povećanja kapaciteta kompresora. Pravilnim preduzimanjem preventivnih mera, detekcijom i popravkom curenja ovu vrstu gubitka možemo svesti na manje od 10% od ukupne količine proizvedenog vazduha. Sistematska implementacija jednostavnih mera prikazanih u ovom radu, kroz program sanacije i prevencije curenja, neminovno vodi do povećanja efikasnosti preduzeća kao celine.

Ključне reči: komprimovani vazduh, curenje, energetska efikasnost.

Energy Savings in Industrial Compressed Air Systems through Leakage Reduction

Key words: Compressed air, leakage, energy efficiency.

Curenje predstavlja gubitak energije, ali takođe može prouzrokovati ostale gubitke. Izaziva pad pritiska, a pad pritiska može smanjiti efikasnost uređaja koji koriste komprimovani vazduh. Takođe, zbog rada na nižem pritisku oprema mora raditi duže, pa curenje smanjuje radni vek skoro sve opreme uključujući i sam kompresor. Povećanje vremena rada opreme povećava potrebe za održavanjem i neplanirane zastoje. Na kraju, isticanje dovodi do nepotrebног povećanja kapaciteta angažovanog kompresora.

Curenje se pojavljuje kod bilo kog dela opreme, najčešće na:

- spojevima, crevima, cevima i priključcima,
- regulatorima pritiska,
- otvorenim odvajačima kondenzata i isključnim ventilima,
- spojevima cevi, zaptivačima, spojevima opreme i cevi, pukotinama i rupama.

Za procenu količine vazduha koja curi iz sistema mogu se, u osnovi, koristiti dva metoda:

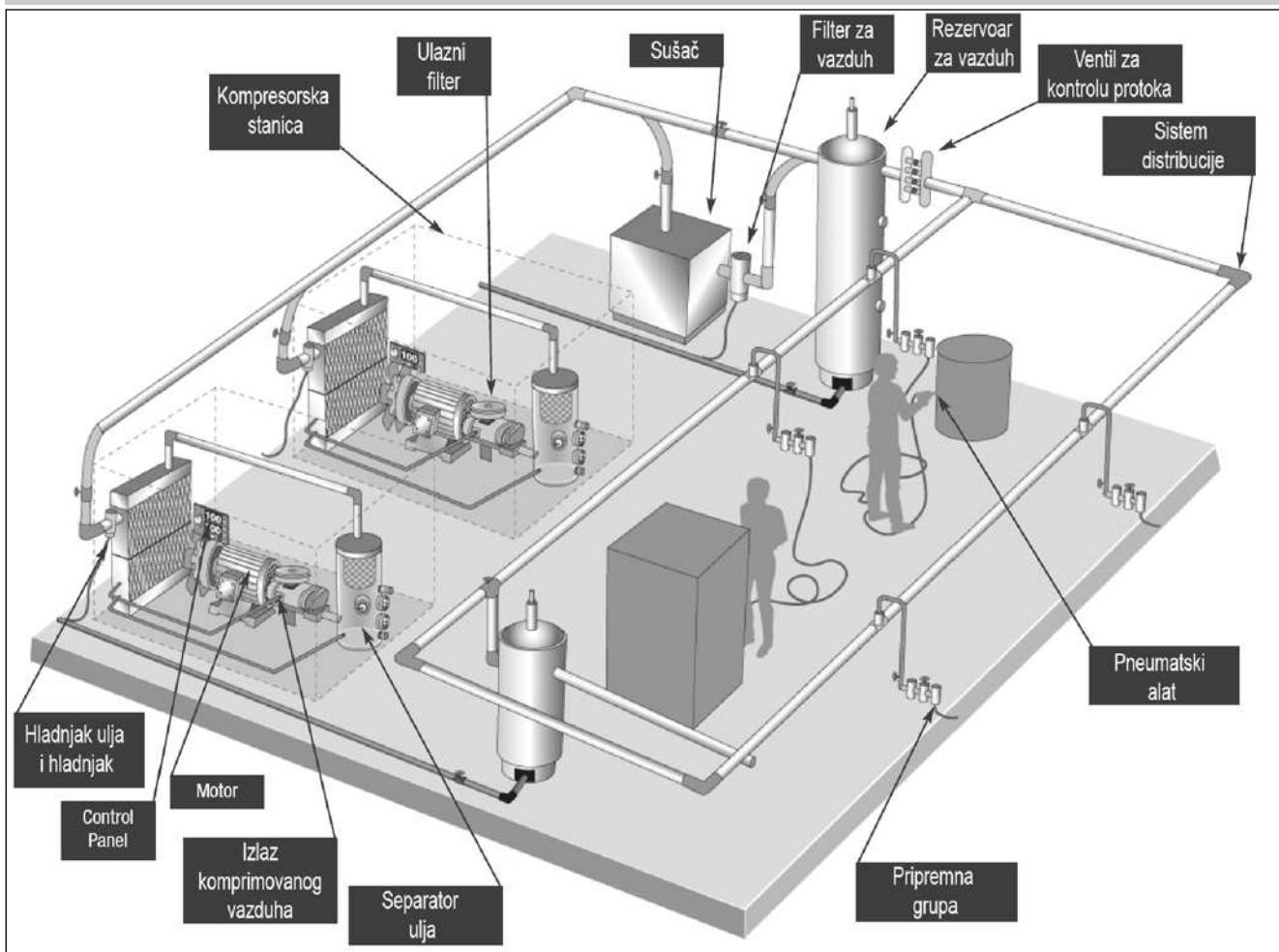
- 1) određivanje ukupne količine vazduha koja curi iz sistema
- 2) određivanje količine vazduha koja curi kroz uočene pukotine, na osnovu kojih se ocenjuje ukupno curenje sistema.

Za kompresore koji imaju start – stop upravljačku strategiju može se koristiti prvi način za procenu količine vazduha koji ističe. U trenutku kad je sva oprema isključena (kada nema potrošnje), potrebno je pokrenuti kompresor. Isticanje vazduha izaziva pad pritiska u sistemu, pa će se zato kompresor uključivati i isključivati. Ukupno curenje izraženo u procentima kapaciteta kompresora $Q_{m rel} [\%]$, može se izračunati kao:

$$Q_{m rel} = \frac{t_r}{t_r + t_s} \cdot 100 [\%],$$

gde su:

Slika 1 Sistem komprimovanog vazduha



t_r [min] – vreme rada kompresora,
 t_s [min] – vreme zastoja kompresora.
 Za drugi metod, potrebno je odrediti količinu vazduha koja curi kroz uočene otvore. Količina vazduha u jedinici vremena (maseni protok Q_m [kg/s]) koja isciši kroz otvor, može se računati iz sledećeg izraza [5], [6]:

$$Q_m = A \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\chi}{\chi - 1} \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left[\left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left(\frac{p_a}{p_1} \right)^{\frac{\chi-1}{\chi}} \right]},$$

gde su:

A [m^2] – površina otvora,
 α [-] – koeficijent protoka (zavisi od oblika otvora i režima strujanja vazduha, a može se približno odrediti kao $\alpha=0,64$ za pukotine oštih ivica, tj. $\alpha=0,97$ za otvore ili pukotine zaobljenih ivica),

p_1 [Pa] – apsolutni pritisak u instalaciji na mestu isticanja,

p_a [Pa] – apsolutni atmosferski pritisak, ρ_1 [kg/m^3] – gustina vazduha u instalaciji na mestu isticanja,

$\chi = 1,41$ – eksponent izentrope za vazduh.

U slučaju da je pritisak u sistemu veći od 1,894 bar (za atmosferski pritisak od

1 bar), tj. kada je odnos pritisaka p_1/p_a manji od kritičnog odnosa 0,528, za protok vazduha koristi se sledeći izraz:

$$Q_m = A \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \cdot \chi \cdot p_1 \cdot \rho_1 \cdot \left[\frac{2}{\chi + 1} \right]^{\frac{\chi+1}{\chi-1}}}$$

Na osnovu ovako određenog masenog protoka vazduha, godišnji troškovi zbog curenja komprimovanog vazduha kroz otvor T_{kos} [€] mogu se izračunati korišćenjem sledećeg izraza:

$$T_{kos} = \frac{3.600 \cdot Q_m}{\rho_1} \cdot P_{sp} \cdot t \cdot C_e,$$

gde su:

P_{sp} [kW/ m^3/h] – specifična potrošnja električne energije za komprimovanje vazduha,

t [h/god] – godišnje angažovanje sistema komprimovanog vazduha,

C_e [€/kWh] – (osrednjena) cena električne energije.

U slučaju kada radni pritisak u sistemu (koji radi proseku 6000 h/god) iznosi 7 bar, specifična porošnja električne energije 0,11 kW/ m^3/h , procenjeni godišnji troškovi zbog curenja vazduha kroz otvore kružnog poprečnog preseka

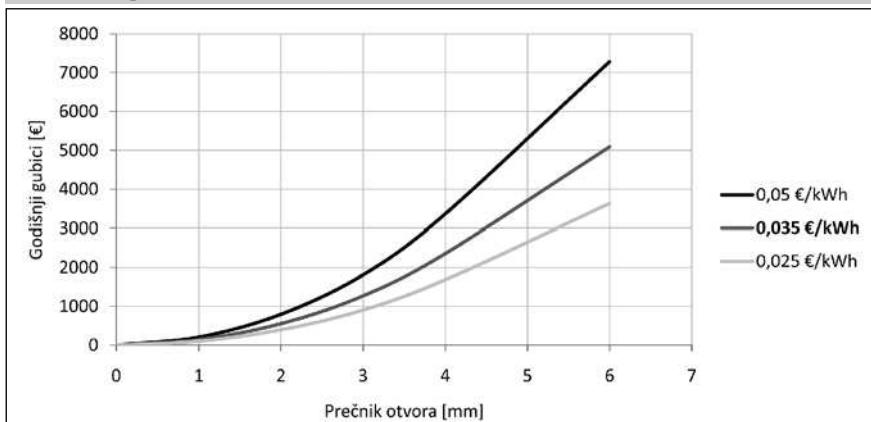
u funkciji od cene električne energije i prečnika otvora, prikazani su na slici 2. Očigledan je značajan porast troškova sa povećanjem prečnika otvora iz kojeg ističe komprimovani vazduh. Može se zapaziti da su godišnji troškovi curenja kroz otvore značajni i pri trenutnoj relativno niskoj prosečnoj ceni električne energije u industriji Srbije (0,035 €/kWh). Ne treba zaboraviti da u velikom broju naših industrijskih preduzeća, zbog dugogodišnjeg neadekvatnog održavanja, ima na desetine lokacija kod kojih se javlja curenje vazduha (kao što je prikazano na slici 3).

3. Detektovanje i popravka mesta curenja

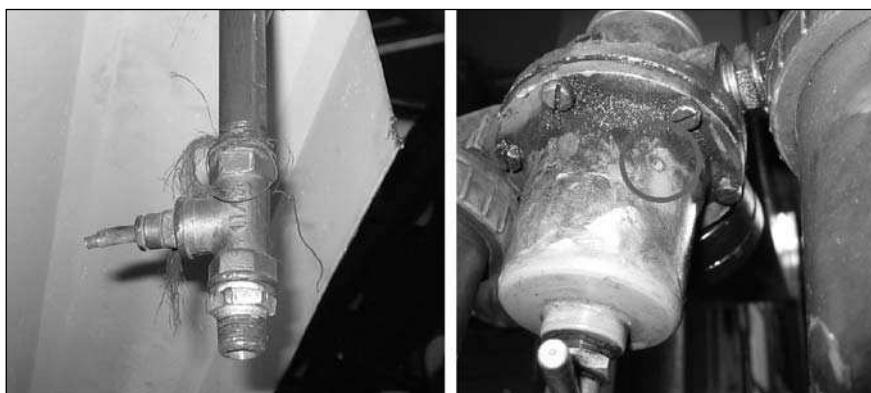
Curenje vazduha je skoro nemoguće vizuelno uočiti, pa postoje druge metode za njegovo lociranje.

Ultrazvučno detektovanje curenja je najrasprostranjeniji način detektovanja curenja. Ultrazvučni detektor se sastoji od usmerenog mikrofona, pojačala, audio filtera i obično vizuelnog indikatora ili slušalice za detektovanje curenja (slika 4). Ultrazvučni senzor detektora je fokusiran na ultrazvučni deo opsega frekvencije zvuka, koji se generiše pri turbulentnom strujanju

Slika 2 Godišnji troškovi zbog curenja vazduha kroz otvore u funkciji cene električne energije i prečnika otvora kružnog poprečnog preseka

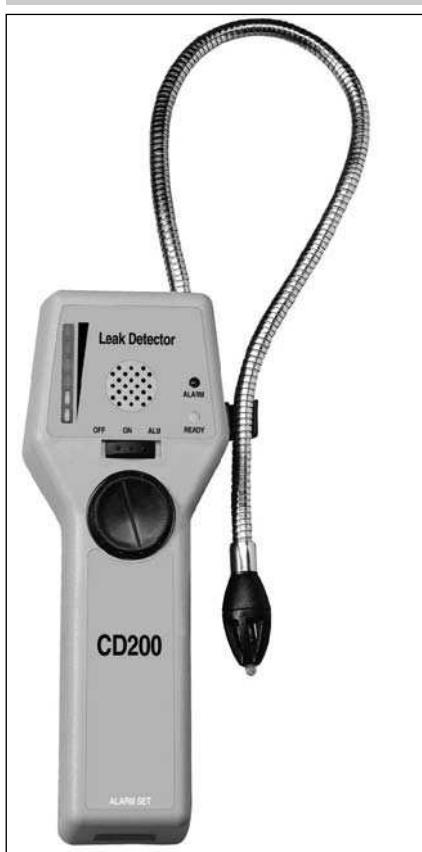


Slika 3 Primeri neadekvatnog održavanja instalacija komprimovanog vazduha u jednom domaćem industrijskom preduzeću [7]



a) neispravan ventil-slavina, b) otvor prečnika 3,5 mm na pripremnoj grupi

Slika 4 Ultrazvučni detektor curenja



vazduha kroz otvor. Pošto je ultrazvuk kratkotalan signal, nivo zvuka je najviši na mestu curenja i intenzitet brzo opada kako se udaljenost od izvora povećava. Pozadinski zvukovi u čujnom opsegu u principu ne utiču na rad ultrazvučnih detektora, pošto se ti signali filtriraju.

Ovim detektorima se mogu otkriti mesta "srednjih" i "velikih" curenja. Prednost ultrazvučnog detektovanja curenja je svestrana primena, brzina, lakoća upotrebe, mogućnost ispitivanja opreme u radu i sl. Obuka operatora je minimalna, pa je već nakon 15 minuta osposobljen za rad. Zbog svoje prirode, ultrazvuk je najjači na svom izvoru. Skeniranjem oblasti, moguće je vrlo lako i brzo odrediti tačno mesto curenja. Iz tih razloga, ultrazvučno detektovanje je ne samo brzo, već i vrlo pouzdano.

Jednostavniji metod detekcije curenja je nanošenje četkom mešavine vode i sapuna na mesta kod kojih očekujemo curenje. Iako pouzdan, ovaj metod zahteva više vremena.

Curenja se najčešće pojavljuju na spojevima i vezama. Često se može lako i jednostavno zaustaviti uvršćivanjem spojeva a nekad

složenijim radovima kao što je zamena neispravnih delova (cevi, filtera, sušača...). U mnogim slučajevima curenje je izazvano neočišćenim navojima na spojevima, ili lošim i nepravilnim postavljanjem zaptivača. Treba odabratи visoko kvalitetnu opremu, cevi, i pravilno izvršiti montažu sa prikladnim zaptivačima.

Oprema koja se ne koristi takođe može biti izvor curenja. Takvu opremu treba (ukoliko se ne koristi duži period) izolovati ventilom od ostatka sistema.

Drugi način da se smanji curenje je smanjenje pritiska u sistemu.

Održavanje pritiska sistema na najnižem primenljivom pritisku će minimizirati curenje iz sistema.

Jednom kad su curenja popravljena, potrebno je ponovo proceniti mogućnosti uštede, analiziranjem upravljačkog sistema kompresora.

4. Uspostavljanje programa za prevenciju curenja

Postoje dva osnovna tipa ovih programa: program „označi curenje“ i program „pronađi i popravi“. „Pronađi i popravi“ je najjednostavniji, treba jednostavno locirati pukotinu i odmah je sanirati. Kod drugog programa potrebno je najpre označiti sva mesta curenja pa vršiti popravku u narednom periodu. On se najčešće sprovodi u dve etape: u prvoj se označava mesto curenja, a u drugoj etapi aktivnosti se angažuje sektor održavanja, pri čemu se identificuje lokacija i veličina i daje opis mesta curenja koje treba popraviti. Najbolji pristup zavisi od tipa, veličine i radnih običaja postrojenja. Najčešće je najbolje kombinovati oba programa. U oba slučaja imamo nekoliko ključnih elemenata za uspešno izvršenje programa:

- **utvrđivanje postojećeg stanja potrošnje komprimovanog vazduha,**
- **procena gubitaka vazduha usled curenja;**
- **određivanje troškova (cene) vazduha koji curi** (ova cena je jedan od najvažnijih aspekata ovog programa);
- **određivanje mesta curenja;**
- **dokumentovanje curenja** (dokumentovanje lokacije, veličine, tipa i procenjenih troškova curenja) Sva dokumentacija mora biti usaglašena sa fabričkom dokumentacijom o održavanju i svaka popravka mora biti dokumentovana, tako da može da se prati broj i efektivnost popravki;
- **određivanje prioriteta za popravku** (najvažnije je najpre popraviti najveće kvarove);

- **prilagođavanje upravljačkog sistema** (jednom kad su popravke završene potrebno je prilagoditi upravljački sistem kompresora);
- **dokumentovanje popravki** (pričazom popravljenih mesta curenja i ušteda koje su nastale, pokazuje korisnost programa održavanja, i obezbeđuje mu jaču podršku od strane menadžmenta. Dokumentovanjem popravki i tipa curenja, takođe se može identifikovati oprema kod koje se problem iznova javlja. Kad se to desi, treba otkriti uzrok u procesu i pronaći trajno rešenje, da bi se sprečio ponovni nastanak curenja.);
- **poređenje pre i posle** (potrebno je poređiti stanje u sistemu pre i posle primenjenih mera i odrediti uštedu. Tada program treba prikazati menadžmentu kao i ciljeve koji su dostignuti. Ovo je veoma bitno, zbog toga što prikaz uštede može dati podršku za nastavak programa.);
- **krenuti sve iz početka** (curenje vazduha će se pojavljivati opet i opet, pa je ovaj program u stvari jedan staljan proces).

5. Primeri dobre prakse

Održavanje sistema komprimovanog vazduha predstavlja izazov zbog naglašeno kratkih perioda otplate, posebno karakterističnih za mala ulaganja i redovne sanacije. Od preko 1000 primera primene pomenutih mera u automobilskoj industriji, kod kojih je prosečni period isplativosti bio je oko 5 meseci, u narednom delu teksta biće prikazani najupečatljiviji [8].

Odeljak "Metal Casting Operations" iz Michigan-a firme "General Motors Powertrain Group" smanjio je potrošnju energije za više od 21 milion kWh godišnje smanjenjem isticanja komprimovanog vazduha. "Ford" je u svoje projekte procene uključio i program saniranja mesta curenja. Procenitelji identifikuju isticanja komprimovanog vazduha korišćenjem ultrazvučne opreme i uočavaju problematične oblasti korišćenjem etiketa za pukotine. Nakon popravke pukotina, kompresorima se dodaju upravljačke jedinice da bi se iskoristio dodatni kapacitet dobijen popravkom. Na primer, izvan SAD, fabrika "Ford Stamping Plant" iz Geelong-a, Victoria (Australija), koristila je ultrazvučnu opremu za pregled pri detektovanju isticanja vazduha. Nakon popravke pukotina, uštedela je preko 83.200 \$ godišnje. Periodi isplativosti bili su manji od 1 meseca. Osim toga, fabrika "Visteon Monroe", Michigan, (prethodno u sastavu "Ford Motor Company"), primenila je program sanacije isticanja vazduha 1989. godine.

Program je uključio podršku rukovodstva kao i radnika na traci i kvalifikovanih radnika. Smanjenje troškova usled smanjenja potrošnje električne energije iznosilo je 560.000\$ godišnje, što je jednak smanjenju potrošnje električne energije od 11,5% (8,9 miliona kWh godišnje). Takođe, došlo je do smanjenja habanja svih komponenti sistema (kompresora, isušivača, cevi, filtera, krajnjih korisnika) usled nižeg radnog pritiska. Kod velikih isticanja, "Toyota" koristi jednostavnu metodu - test sa kesom, da bi se odredilo da li se isplati popravljati mesto curenja. Pri ovom testu, plastična kesa se stavi na mesto isticanja i nadgleda brzina kojom vazduh puni kesu. U opštem slučaju, njihova politika je da, ako isticanje nije čujno, ne isplati se popravka. Tipični troškovi opravke pukotine iznose 400 \$. U jednoj fabriči u Japanu, identifikovane su i popravljene sve pukotine. Postignuto je smanjenje utroška energije komprimovanog vazduha od 15 %, iako je popravka manjih isticanja bila manje profitabilna.

[5] MEEI - Mreža za energetsku efikasnost u industriji Srbije, **Mogućnosti povećanja energetske efikasnosti kod sistema za komprimovani vazduh**, Best Practice Booklet no 3.

[6] Frank Yeaple, **Fluid power design handbook**, Marcel Deckker inc., New York 1996.

[7] Dušan Gordić, Milun Babić, et. al., **Analiza stanja i definisanje mera za bolje gazdovanje potrošnjom komprimovanog vazduha u "Zastava automobili"** a.d., Studija projekta NPEE 232007 Programi uštede energije i racionalnog gazdovanja energijom u grupi Zastava vozila, 2007

[8] Dušan Gordić, Milun Babić, et. al., **Povećanje energetske efikasnosti i mogućnost smanjenja troškova u automobilskoj industriji**, Studija projekta NPEE 232007 Programi uštede energije i racionalnog gazdovanja energijom u grupi Zastava vozila, 2007

6. Zaključak

Sistemi komprimovanog vazduha su usko vezani za pojam industrijske proizvodnje i vrlo često su najveći potrošači električne energije u postrojenju. Racionalno gazdovanje i održavanje ovih sistema predstavlja izazov zbog naglašeno kratkih perioda otplate, posebno karakterističnih za mala ulaganja i redovne sanacije.

Dobar program za sprečavanje curenja komprimovanog vazduha je veoma važan za poboljšanje efikasnosti, pouzdanosti, stabilnosti i cene koštanja bilo kog sistema sa komprimovanim vazduhom.

Literatura

- [1] Royce N. Brown, **Compressor: Selecting & Sizing**, Butterworth - Heinemann, 1997.
- [2] Babić Milun, Stojković Svetislav, **Turbomašine**, Mašinski fakultet Kragujevac, 1989.
- [3] Beals Chris, Ghislain Joseph, Kemp Henry i drugi, **Improving Compressed Air System Performance**, U.S. Department of Energy, Washington D.C., 2004.
- [4] Beals Chris, Ghislain Joseph, Kemp Henry i drugi, **Energy Tips - Compressed Air (1 - 14)**, U.S. Department of Energy, Washington D.C., 2004.