

# Skladištenje energije pomoću komprimiranog zraka za primjenu u pogonu vozila

---

**Jurkić, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:955030>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-02**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**SKLADIŠTENJE ENERGIJE POMOĆU  
KOMPRIMIRANOG ZRAKA ZA PRIMJENU U POGONU  
VOZILA**

**Diplomski rad**

**Josip Jurkić**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMATIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

|   |   |
|---|---|
| <b>Ime i prezime pristupnika:</b>   | Josip Jurkić  |
| <b>Studij, smjer:</b>   | Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika  |
| <b>Mat. br. pristupnika, god.</b>   | D-1454, 07.10.2022.   |
| <b>JMBAG:</b>   | 0165083021  |
| <b>Mentor:</b>  | prof. dr. sc. Željko Hederić  |
| <b>Sumentor:</b>  |   |
| <b>Sumentor iz tvrtke:</b>  |   |
| <b>Predsjednik Povjerenstva:</b>  | doc. dr. sc. Goran Rozing   |
| <b>Član Povjerenstva 1:</b>   | prof. dr. sc. Željko Hederić  |
| <b>Član Povjerenstva 2:</b>   | dr. sc. Željko Špoljarić  |
| <b>Naslov diplomskog rada:</b>  | Skladištenje energije pomoću komprimiranog zraka za primjenu u pogonu vozila  |
| <b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>  | <b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>  |
| <b>Zadatak diplomskog rada:</b>   | Sustavi pohrane energije iz obnovljivih izvora danas se razvijaju u različitim oblicima potencijalnih reverzibilnih elektrana i njihovih hibridnih rješenja. Komprimirani zrak kao spremnik energije zahtjeva relativno jednostavne i poznate tehnologije za korištenje, te osigurava pohranu energije na duži period vremena. Najveći problem vozila na komprimirani zrak je gustoća energije koja je 7 puta manja od fosilnog goriva, ali je volumenski jednaka električnoj bateriji. S druge strane kružni proces punjenja i pražnjenja ima svega 70% efikasnosti. Zadatak rada je da se za laboratorijsku |
| <b>Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>  | 23.09.2024.   |
| <b>Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>  | Vrlo dobar (4)  |
| <b>Datum obrane diplomskog rada:</b>  | 04.10.2024.   |
| <b>Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):</b>  | Vrlo dobar (4)  |
| <b>Ukupna ocjena diplomskog rada:</b>   | Vrlo dobar (4)  |
| <b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:</b> | 19.10.2024.   |



**FERIT**

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

## IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 19.10.2024.

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| Ime i prezime Pristupnika:          | Josip Jurkić   |
| Studij:                             | Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika |
| Mat. br. Pristupnika, godina upisa: | D-1454, 07.10.2022.  |
| Turnitin podudaranje [%]:           | 2  |

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Skladištenje energije pomoću komprimiranog zraka za primjenu u pogonu vozila**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Željko Hederić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. UVOD .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2. PREGLED SUSTAVA S KOMPRIMIRANIM ZRAKOM U VOZILIMA.....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>2.1. Motor s komprimiranim zrakom.....</b>   | <b>2</b>  |
| <b>2.2. Integracija u današnja vozila .....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>2.3. Hibridni pogon s komprimiranim zrakom .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>3. MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA DVOTAKTNOG I ČETVEROTAKTNOG<br/>HIBRIDNOG MOTORA S KOMPRIMIRANIM ZRAKOM.....</b> | <b>17</b> |
| <b>4. MJERENJE I SIMULACIJA .....</b>   | <b>22</b> |
| <b>5. ZAKLJUČAK.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>6. LITERATURA .....</b>  | <b>30</b> |
| <b>7. SAŽETAK.....</b>  | <b>32</b> |
| <b>8. ABSTRACT .....</b>  | <b>33</b> |
| <b>9. ŽIVOTOPIS.....</b>  | <b>34</b> |
| <b>10. PRILOZI .....</b>  | <b>35</b> |

## 1. UVOD

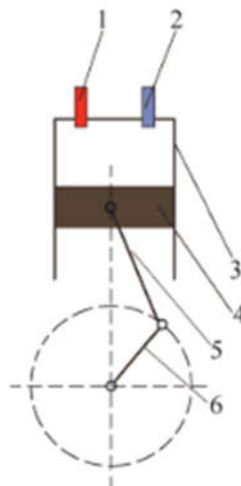
Pošto se posljednjih godina pokušava približiti nuli što se tiče emisije plinova u atmosferu kako bi industrija vozila postala što ekološki prihvatljivija, jedna od potencijalnih opcija koja je postala zanimljiva su sustavi s pogonom na komprimirani zrak. Kako bi pronašli zamjenu za konvencionalne motore s unutrašnjim izgaranjem, istraživači su proučavali nekoliko vrsti motora koji koriste zelenu energiju da bi odredili izvedivost ugradnje takvih motora u motorna vozila, kao npr. električni motori, motori na prirodni plin i motori na vodik [1]. Kao oblik pogonske energije, motori s komprimiranim zrakom koriste se u SAD-u i Europi od početka dvadesetog stoljeća [2]. Cilj ovog rada je prikazati neke tehnologije koje koriste skladištenje komprimiranim zrakom u vozilima. U prvom dijelu dat će se pregled sustava s komprimiranim zrakom koji se koriste u vozilima. Analizirat će se način rada motora s komprimiranim zrakom i integracija u današnja vozila nekih tvrtki kao što su Tata Motors i EngineAir. Nadalje prikazat će se različiti operacijski modovi u hibridnim sustavima koji koriste komprimirani zrak i načini na koje se skladištenje komprimiranim zrakom koristi u hibridnim sustavima. U drugom dijelu pokazat će se modeliranje i optimizacija dvotaktnog i četverotaktnog benzinskog motora na rad s komprimiranim zrakom. Nakon toga obaviti će se mjerenje, simulacija i analiza rezultata jednog spremnika za skladištenje energije.

## 2. PREGLED SUSTAVA S KOMPRIMIRANIM ZRAKOM U VOZILIMA

Sustav komprimiranog zraka u vozilima uobičajeno se koristi na razini pomoćnog pogona dodatnim sustavima, a tek pojedini prototipovi koriste komprimirani zrak za potpomaganje pogona vozila. U ovom poglavlju će se dati pregled motora na komprimirani zrak koji se koriste i u hibridnom sustavu pogona vozila.

### 2.1. Motor s komprimiranim zrakom

Tipični se jednocilindrični motor s komprimiranim zrakom sastoji od 6 dijelova. (Slika 2.1.) Pod 1 označen je usisni ventil, pod 2 ispušni ventil, pod 3 cilindar, pod 4 klip, pod 5 klipnjača, pod 6 vratilo. Radni ciklus sastoji se od dva takta, ekspanzije i ispuha.



Slika 2.1.: Konstrukcija motora s komprimiranim zrakom. [3]

Prvi dio ciklusa počinje kada komprimirani zrak ulazi u motor kroz usisni ventil u trenutku kada je klip u gornjoj mrtvoj točki što osigurava potisni tlak koji gura klip i stvara kretnju. Svo to vrijeme ispušni ventil ostaje zatvoren. Drugi dio ciklusa je kretanje klipa između gornje mrtve točke i donje mrtve točke, pri tome usisni ventil ostaje zatvoren kako bi se iskoristila energija ekspanzije komprimiranog zraka. Ispušni ventil još uvijek je zatvoren. Tek kad klip dođe do donje mrtve točke, ispušni ventil se otvara čime počinje treći dio ciklusa i zamjena ekspanziranog zraka (zbog podmazivanja klipova postoji razlika u sastavu ulaznog i izlaznog zraka). Četvrti dio ciklusa je pomak klipa od donje mrtve točke do gornje mrtve točke, pri čemu je usisni ventil stalno zatvoren, a kroz ispušni ventil se iznosi ekspanzirani zrak iz cilindra. Prije nego što klip dođe do

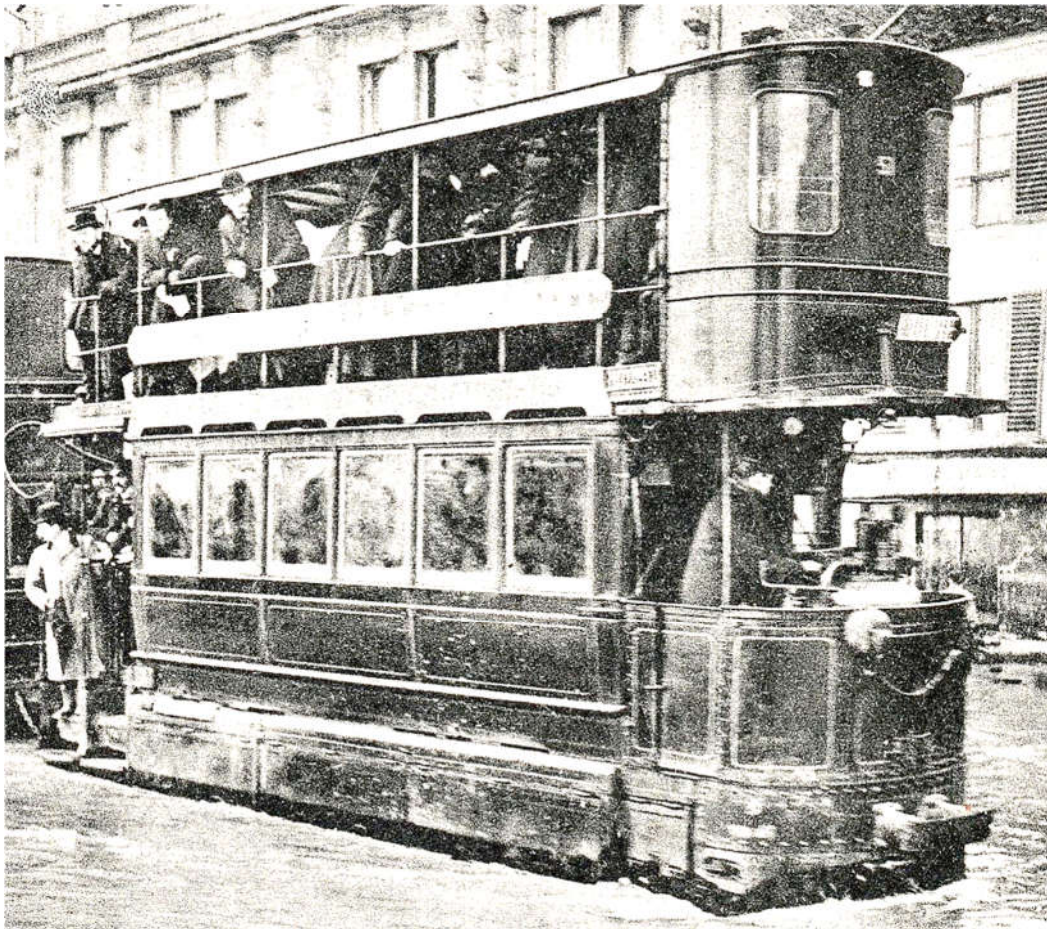
gornje mrtve točke, ispušni ventil se zatvara i stvara se proces izotropske kompresije što smanjuje ukupnu energiju zbog potrebnog rada za kompresiju zraka. Sva energija iz komprimiranog zraka u ciklusu prenosi se na osovinu. Otvaranje i zatvaranje usisnog i ispušnog ventila mora biti usklađeno s osovinom.

Energetska jednadžba za ovakav cilindar može se prikazati kao:

$$C_V m \frac{dT}{dt} = a A_w (T_a - T) + (C_p T_a - C_V T) G_1 - R T G_2 - p \frac{dV}{dt} \quad (2-1)$$

gdje je  $C_V$  specifična toplina toplina pri konstantnom volumenu,  $m$  masa zraka cilindra,  $T$  temperatura zraka cilindra,  $a$  koeficijent prijenosa topline,  $A_w$  površina prijenosa topline,  $T_a$  temperatura atmosfere,  $C_p$  specifična toplina pri konstantnom tlaku,  $G_1$  tok mase usisnog zraka,  $R$  plinska konstanta,  $G_2$  tok mase ispušnog zraka,  $p$  tlak zraka cilindra i  $V$  volumen zraka cilindra.

Pokazatelji izvedbe motora s komprimiranim zrakom uključuju srednji izlazni moment i radnu učinkovitost koja pokazuje omjer idealne izlazne snage i potrošene snage zraka. [4]



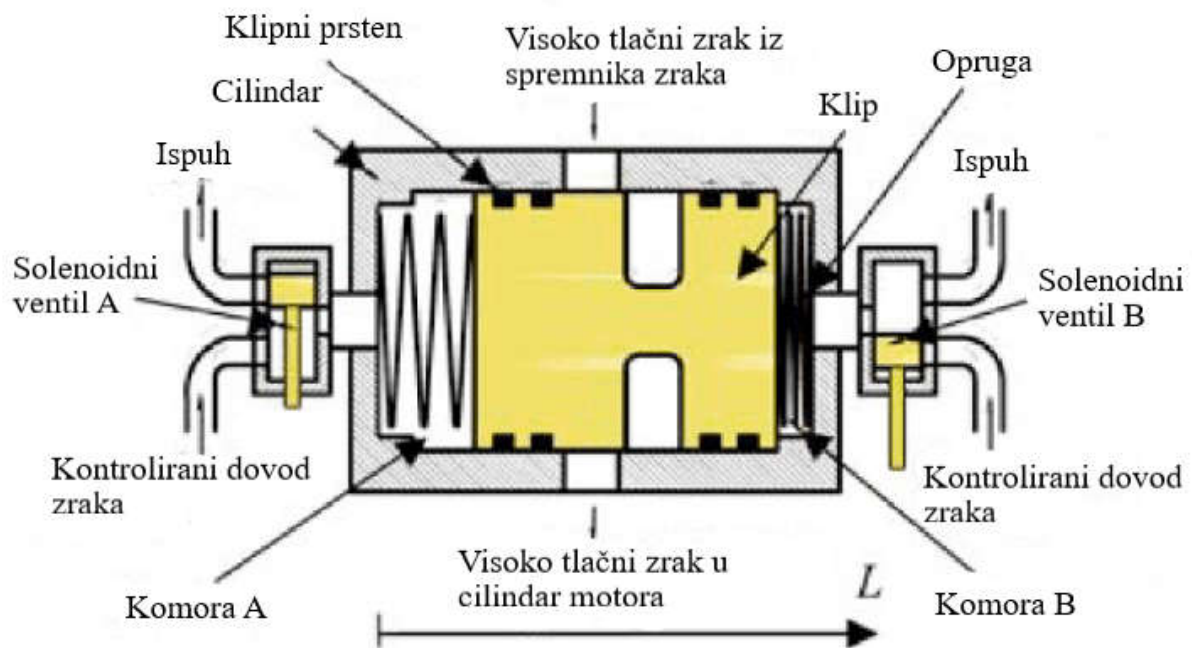
Slika 2.2.: Mekarski tramvaj u Parizu 1910.



Krajem 19. stoljeća pogon na komprimirani zrak koristio se u transportu u lokomotivama prije izuma motora s unutrašnjim izgaranjem koji koristi fosilna goriva. Taj pogon smatrao se jednostavnim, sigurnim i jeftinim. Prvi takav uporabljivi lokomotivni sustav je razvio 1886. godine Louis Mekarški (na slici 2.2. prikazan tramvaj na ulicama Pariza kao prvo takvo sredstvo grupnog prijevoza poslije kočija). Tramvaj se pokretao pomoću jednocilindričnog motora s komprimiranim zrakom koji je koristio grijač spremnika tople vode za grijanje komprimiranog zraka prije ekspanzije u motornom cilindru [5]. U to vrijeme, stroj na komprimirani zrak također se koristio i u rudnicima ugljena. Lokomotiva pogonjena komprimiranim zrakom ima poželjna svojstva jer ne stvara ogromnu toplinu ili iskru pri radu i samim time je sigurnije raditi s njom. Zbog sigurnosti lokomotiva se nadopunjavala komprimiranim zrakom izvan opasnih prostora. Kako se odmicalo od početka 20. stoljeća počeli su se razvijati visoko učinkoviti motori s unutrašnjim izgaranjem. Posljedica potreba ratne industrije vremena 1. Svjetskog rata je pad cijena fosilnih goriva te je naglo rasla popularnost motora na fosilna goriva koji su u potpunosti izgurili motore s komprimiranim zrakom iz uporabe u pogonu vozila. Motori s komprimiranim zrakom praktično su bili zaboravljeni do 1970-ih osim uporabe u industriji kao alat.

Razvoj energetske efikasnosti i osviještenosti fosilnim zagađenjem dovodi do promjena krajem prošlog stoljeća i 1992. godine francuski inženjer Guy Negre predložio je dizajn vozila pogonjenog komprimiranim zrakom. Kao što je opisano u dizajnu, prototip vozila mogao je preći 200 km koristeći 300 litara komprimiranog zraka na 300 bara pohranjenog u posebnim spremnicima od ugljičnih ili staklenih vlakana. Procijenjeno je da će za jednu vožnju trebati puniti spremnik zraka unutar 3 minute po cijeni od 1.5 euro [6]. Većina istraživanja vršena na motorima s komprimiranim zrakom zasnovana su na strukturi s naizmjeničnim klipovima (razvijena tehnologija za motore sa fosilnim gorivima) te su pokazala izvrsne rezultate (u [7,8] je napravljen matematički model motora s komprimiranim zrakom). Budući da postoji pretvorba energije u ciklusu rada motora na komprimirani zrak, postoje i gubici koji su se nastojali smanjiti kroz različite varijante izvedbe motora i kontrole procesa usisa i ispuha. U [9] proučavan je proces smanjenja tlaka komprimiranog zraka tijekom usisa i zaključeno je da se učinkovitost može poboljšati za 15-40% kad se usvoji smanjenje pritiska ekspanderom umjesto prigušnog smanjenja tlaka, a da se mogućnost pretvorbe energije komprimiranog zraka da povećati 10-60% ako se usvoji smanjenje tlaka u dva stupnja. U [10,11] napravljen je matematički model i eksperimentalni prototip s tlačno kompenzirajućim usisnim ventilom. Rezultati naznačuju u optimalnim radnim uvjetima izvedba motora s komprimiranim zrakom može biti poboljšana s originalnih 22% na 50%, a prosječni izlazni

moment poraste s 22.047 Nm na 22.439 Nm. Postoje i varijante[11] gdje se vrši puna varijabilna aktivacija ventila koja prilagođava vrijeme ventila prema radnim uvjetima. (Slika 2.3.)



Slika 2.3.: Shema elektro pneumatskog sustava varijabilnih ventila. [12]

EPV (elektropneumatski ventil) sustav (Slika 2.3.) temelji se na kombinaciji mehaničkih i pneumatskih komponenti kako bi kontrolirao kretanje klipa unutar cilindra, s glavnom svrhom upravljanja protokom komprimiranog zraka u motorni cilindrar. Ključne komponente sustava uključuju klip, pneumatski cilindrar, solenoidne ventile, klipne prstenove i opruge. Opruge unutar sustava imaju ulogu amortiziranja udarca klipa kada dođe do krajnjih pozicija u cilindru, čime se smanjuje mogućnost oštećenja i povećava trajnost sustava.

Solenoidni ventili u ovom sustavu su odabrani zbog svojih specifičnih karakteristika: promjer od 4 mm i mogućnost visokofrekventnog prebacivanja od 120 Hz. Ovi ventili postavljeni su na suprotne krajeve cilindra te imaju različite načine rada – jedan entil je u normalnom stanju otvoren, dok je drugi zatvoren. Ova razlika u načinu rada ključna je za upravljanje kretanjem klipa i kontrolu protoka zraka.

Kada sustav nije aktiviran (solenoidni ventili su isključeni), ventil A ostaje otvoren, dok ventil B ostaje zatvoren. To omogućava ulazak zraka pod visokim pritiskom u komoru A. Posljedica toga je da zrak gura klip prema desnom kraju cilindra, čime se zatvara protok komprimiranog zraka u cilindrar motora. Ovakva regulacija omogućuje precizno upravljanje radom motora i optimizaciju

njegovog performansa. EPV sustav predstavlja učinkovit način upravljanja protokom zraka u pneumatskim sustavima, s ključnom funkcijom zaštite od preopterećenja.

## 2.2. Integracija u današnja vozila

Mnogi proizvođači automobila su pokušavali napraviti vozila na komprimirani zrak. Prvi takav prototip zvao se AIRPod koji je izašao 1998, tvrtke MDI koju je osnovao Guy Negre. (Slika 2.4.)



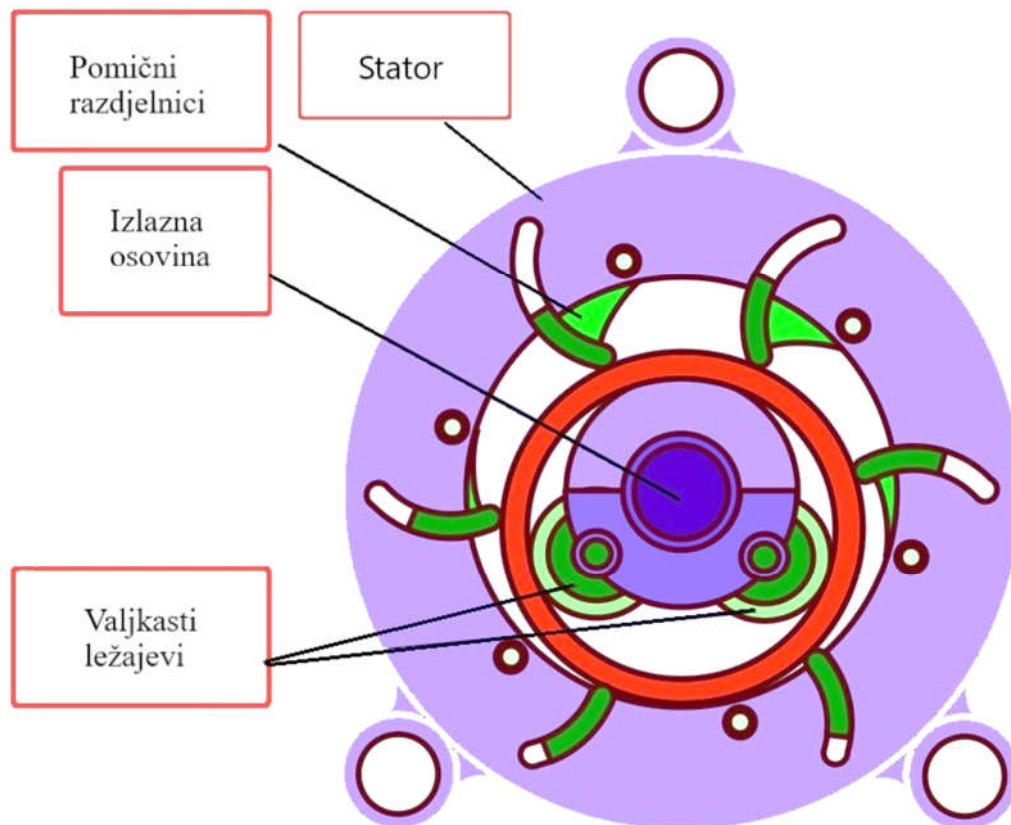
Slika 2.4.: AIRPod.

Nakon toga MDI je izbacio i druge prototipe poput OneFlowAir, CityFlowAir, MiniFlowAir i MultiFlowAir. Od 2000. MDI je također postigao dogovor s tvrtkom Tata Motors, koja je trebala proizvoditi i prodavati automobile OneCAT u Indiji. (Slika 2.5.)



Slika 2.5.: Tata OneCAT.

Druga izvješća pokazuju da Tata također gleda na oživljavanje planova za verziju Tata Nano s komprimiranim zrakom, [13] koja je prethodno razmatrana kao dio njihove suradnje s MDI-jem [14]. Osim te dvije kompanije, postojale su i druge koje su radile na motoru s komprimiranim zrakom. Jedna od njih je firma EngineAir iz Australije u kojoj su razvili rotacijski motor na zrak koji se zove Di Pietro motor. On je drugačiji od ostalih rotacijski motora jer koristi osovinski pokretač koji se okreće bez trenja unutar cilindričnog statora. (Slika 2.6.)



Slika 2.6.: Di Pietro motor. [15]

Di Pietro motor radi bez klipa jer se sastoji od šupljeg cilindričnog osovinskog pokretača u cilindričnoj šupljini statora. Ekspanzijske komore šire se i skupljaju tijekom rada motora. Izlazna osovina prolazi kroz sredinu statorske šupljine i osovinskog pokretača i ima pomaknute ležajeve koji su na unutarnjoj površini osovinskog pokretača. Kroz ulazne otvore ulazi zrak pod pritiskom. Konstantna ekspanzija i kompresija komora oko opsega osovinskog pokretača uzrokuje kombinaciju rotacijskih kretnji oko osovinskog pokretača i posljedične rotacije izlazne osovine.

### 2.3. Hibridni pogon s komprimiranim zrakom

Pogonski sklop pokretan komprimiranim zrakom pokazuje jedinstvenu prednost zbog njegove koristi za okoliš jer je zrak jedina emisija. Međutim, primjena motora na komprimirani zrak ograničena je zbog nekoliko tehničkih nedostataka uključujući nisku učinkovitost i izvor komprimiranog zraka. Pogonski sklop pokretan komprimiranim zrakom mogao bi biti prikladniji za djelovanje kao pomoćna pogonska jedinica u hibridnom pogonskom sklopu. Takav hibridni sustav komprimiranog zraka može se ostvariti na vozilu kombinacijom dva neovisna tipa pogonskih podsustava uključujući i pogonski motor na komprimirani zrak i konvencionalni motor s unutarnjim izgaranjem. Tijekom proteklih nekoliko desetljeća, objavljena su različita istraživanja o različitim vrstama hibridnog sustava komprimiranog zraka. Na primjer, prototip hibridnog vozila komprimiranog zraka koji je razvio PSA Peugeot Citroen, prikazan je na Sajmu automobila u Ženevi 2013. PSA je tvrdio da ova tehnologija ima isti učinak na potrošnju goriva kao hibridni električni, s manjom složenošću u uređenju sustava i nižom cijenom. Ova tehnologija nije jedini pokušaj korištenja komprimiranog zraka kao alternativnog izvora energije za pogon vozila. [16]



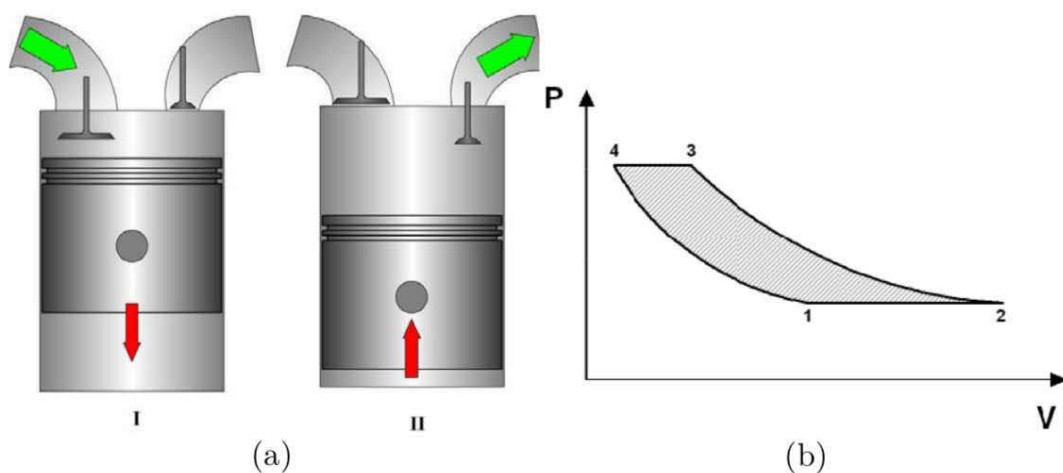
Slika 2.6.: PSA Peugeot Citroen hibridni automobil na zrak. [17]

Najveća prednost nad električnim hibridima je ta što je električnim hibridima potreban dodatni pogonski sustav i velike, teške baterije što jako utječe na cijenu vozila. Hibrid s komprimiranim zrakom koristi motor s unutarnjim izgaranjem kao pogonski izvor i puno jeftiniji spremnik pod tlakom za pohranu energije koji je spojen na glavu cilindra. Također je potreban sustav za pokretanje varijabilnih ventila.

Inovativno kod ovog vozila su novi operacijski režimi rada. Pri usporavanju vozila motor se koristi kao kompresor koji pretvara kinetičku energiju vozila u potencijalnu energiju u obliku komprimiranog zraka pohranjenu u spremniku pod tlakom. To se naziva kompresorski režim (engl. *compressor mode*-CM). Nakon mirovanja motor se koristi kao zračni motor koji koristi zrak pod tlakom iz spremnika da bi ubrzao vozilo. To je poznato kao režim zračnog motora (engl. *air-motor mode*- AM). Moguć je i treći režim rada koji se zove režim rada pomoć snage zraka (engl. *air-power assist mode*- APAM). Tijekom APAMa pohranjeni komprimirani zrak koristi se za nadopunjavanje motora kad je potreban veći moment. Kada snaga nije potrebna od motora, u praznom hodu i kad je papučica gasa otpuštena, motor s unutarnjim izgaranjem može se potpuno ugasiti što znači da neće biti potrošnje goriva i emisije ispušnih plinova.

Glavna ideja hibrida s komprimiranim zrakom je da koristi motor s unutarnjim izgaranjem za kompresiju atmosfetskog zraka i pohrani ga u spremnik pod pritiskom pri usporavanju vozila. Taj isti komprimirani zrak može se koristiti za ubrzavanje vozila ili da se nadopuni motor da bi mogao podnijeti veće opterećenje.

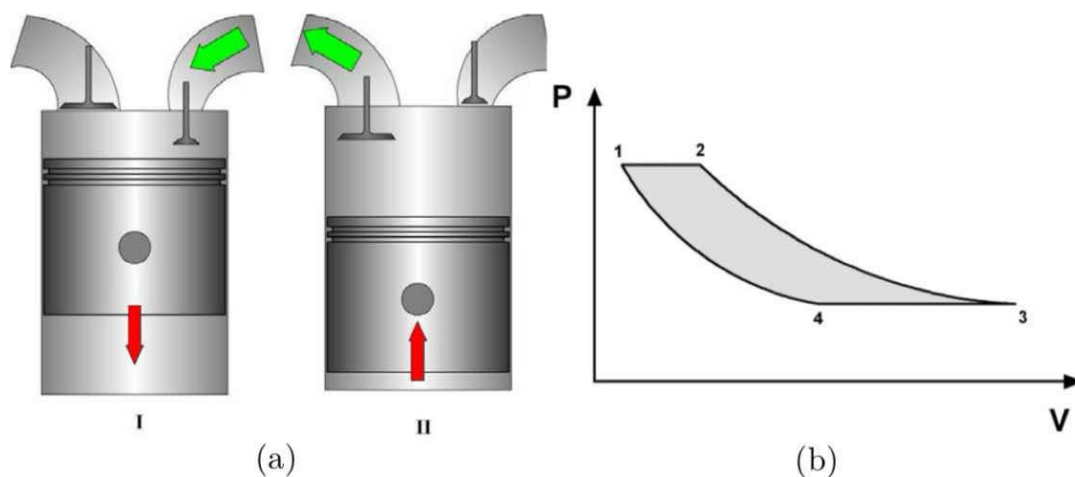
U kompresorskom modu motor se koristi kao dvotaktni kompresor kako bi se usporilo vozilo. Kinetička energija vozila u usporavanju pretvara se u potencijalnu energiju u obliku komprimiranog zraka. Idealni operacijski ciklus kompresorskog moda vidi se na slici 2.7.



Slika 2.7.: Kompresorski režim.

Na slici 2.7. a) prikazana je ilustracija operacije kompresorskog režima, tj. usis svježeg zraka i kompresija zraka i punjenje spremnika pod tlakom. Pod b) je naveden PV dijagram pri idealnom kompresorskom režimu. Korak 1-2 je usisni takt. Ulazni ventil otvara broj stupnjeva kuta koljena nakon gornje mrtve točke i dovodi svježi zrak u cilindar. Na kraju takta usisa, kad klip dosegne donju mrtvu točku, ulazni ventil se zatvara. Korak 2-3 je kompresijski takt gdje pokrenuti klip počinje komprimirati zrak zarobljen u cilindru dok se penje dalje od donje mrtve točke. Korak 3-4 je period punjenja tj. prijenosa komprimiranog zraka iz cilindra u spremnik pod tlakom. To počinje kada se otvori ventil spremnika između dvije mrtve točke i traje dok se ventil ne zatvori kratko poslije gornje mrtve točke. Na kraju ovoga cilindar sadrži komprimirani zrak pod istim tlakom kao i zrak u spremniku. Korak 4-1 predstavlja ekspanzijski takt. Kako se klip spušta od gornje mrtve točke, komprimirani zrak zarobljen u cilindru širi se. Otvaranje usisnog ventila događa se kada se postigne tlak okoline u cilindru. Ovo je proces koji troši energiju.

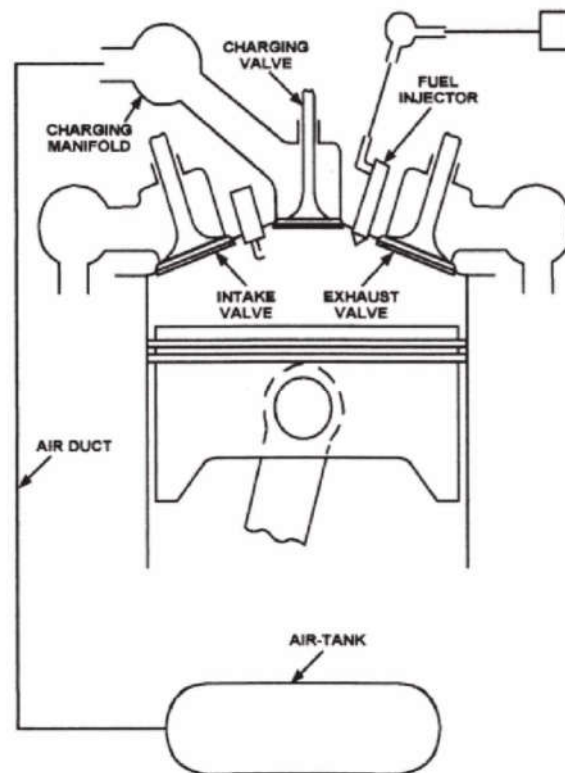
U režimu zračnog motora, motor se koristi kao dvotaktni zračni motor koji koristi potlačeni zrak iz spremnika pod tlakom kako bi ubrzao vozilo. Potencijalna energija iz zraka pretvara se u mehaničku energiju na radilici koja se na kraju pretvara u kinetičku energiju. . Idealni operacijski ciklus moda zračnog motora vidi se na slici 2.8. Može se primijetiti da je PV dijagram isti kao i kod kompresorskog moda, samo obrnuto.



Slika 2.8.: Režim zračnog motora.

Na slici 2.8. a) prikazana je ilustracija punjenja cilindra potlačenim zrakom i ispuh zraka. Pod b) je PV dijagram. Korak 1-2 je period punjenja. Otvaranje ventila spremnika događi se kod gornje mrtve točke ili neposredno nakon i zrak ispuni cilindar kako bi dao potreban moment za ubrzavanje vozila. Između dvije mrtve točke ventil spremnika se zatvori. Što je duže ventil otvoren to će više

potlačenog zraka doći u cilindar što će proizvesti veći moment. Korak 2-3 je ekspanzijski takt. Klip se spušta prema donjoj mrtvoj točki i zrak u cilindru se expandira. U donjoj mrtvoj točki ulazni ventil se otvara. Korak 3-4 je ispušni takt. Dok se klip kreće od donje mrtve točke, zrak iz cilindra izbacuje se u ulazni razvodnik. Ulazni ventil se zatvara između dvije mrtve točke. Kad klip dosegne gornju mrtvu točku zrak u cilindru komprimira se na istu razinu tlaka kao i onaj u spremniku. Ovdje se događa smanjenje učinkovitosti rada zračnog motora jer zbog kasnog vremena zatvaranja ventila može doći do toga da će tlak u cilindru biti ispod razine tlaka spremnika, a čim se ventil otvori doći će do ispuhivanja zraka pod tlakom u cilindar.



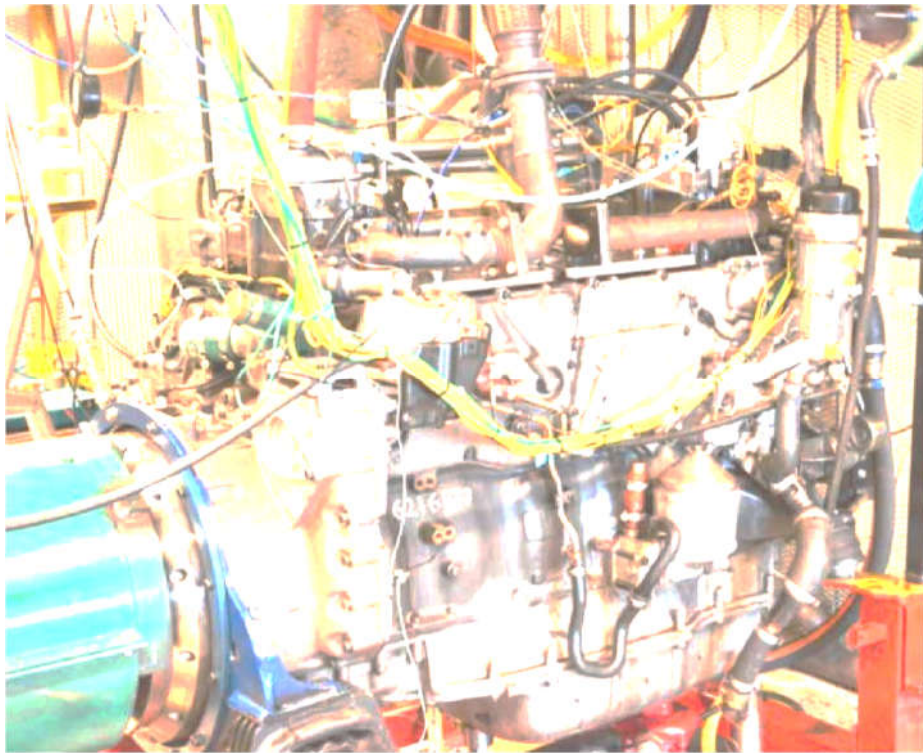
Slika 2.9.: Shema hibridnog motora s komprimiranim zrakom. [18]

APAM je operacija u kojoj se motor nadopunjava kako bi se povećao teret. Ovaj režim se može koristiti kako bi se smanjio turbo-lag kod vozila s velikim turbopunjačem. Turbo-lag je pojam koji se odnosi na odgodu ili kašnjenje u isporuci snage motora kod vozila opremljenih turbopunjačem. Do ovog kašnjenja dolazi jer turbopunjač koristi ispušne plinove za pokretanje turbine, koja komprimira zrak i povećava snagu motora. Međutim, kod niskih okretaja motora (RPM), nema dovoljno ispušnih plinova da turbina odmah postigne optimalne brzine, zbog čega motor ne proizvodi punu snagu čim vozač pritisne papučicu gasa. To stvara osjećaj privremenog gubitka odziva motora, koji se osjeti kao „turbo-lag“. Količina zraka u cilindru može se povećati



ubrizationem potlačenog zraka što znači više goriva, što znači postizanje većeg tereta. Moment se može povećati nadopunjavanjem. Potlačeni zrak može se ubrizgati u donjoj mrtvoj točki, gornjoj mrtvoj točki ili tijekom kompresijskog takta.

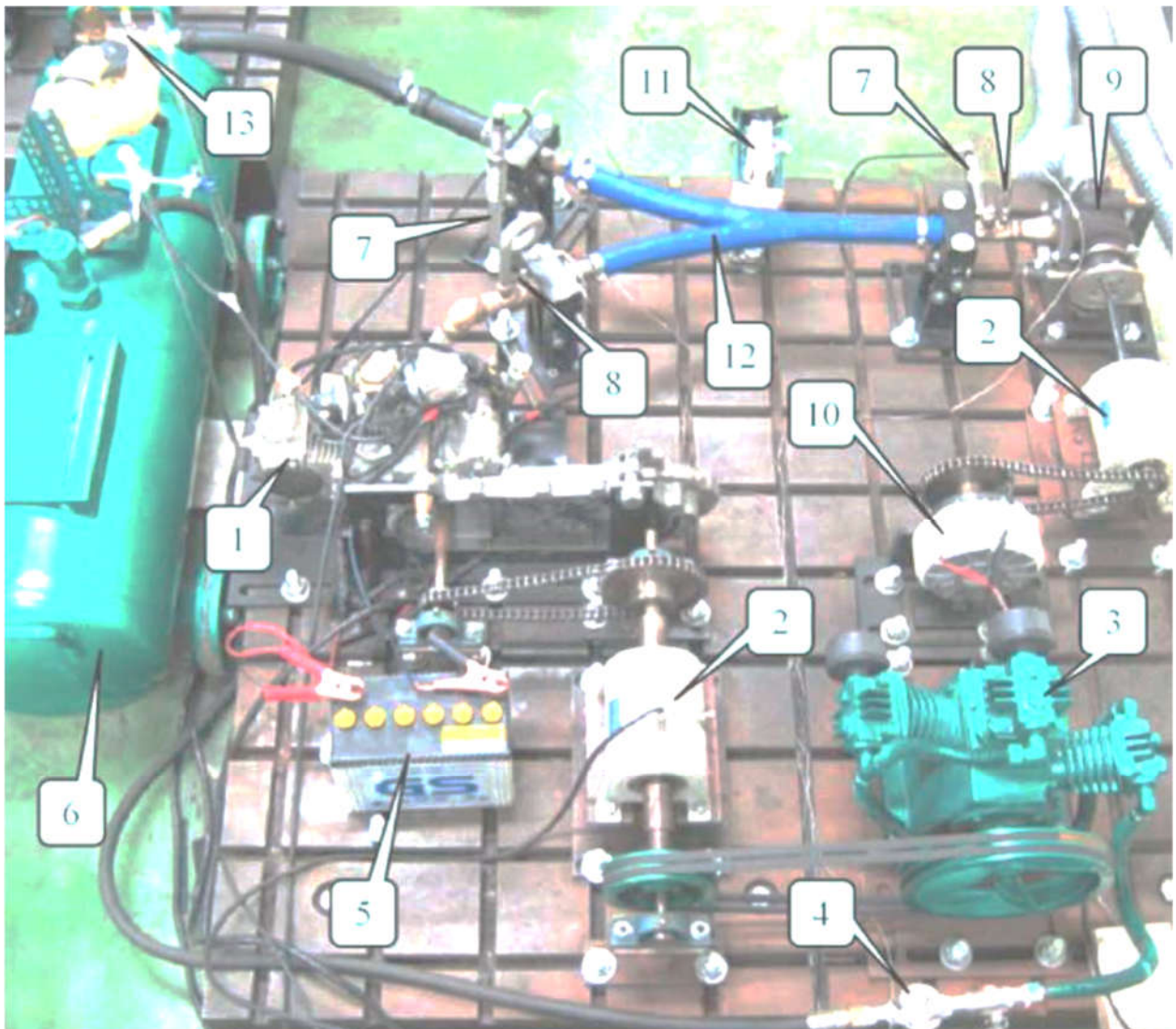
Načelo regenerativnog kočenja je povrat otpada kinetičke energije vozila tijekom faze kočenja i pretvaranje i dostupnu energiju poput baterije. Slično, regenerativno kočenje može se koristiti za proizvodnju komprimiranog zraka u hibridnom sustava komprimiranog zraka. Glavna razlika je u tome što se energija baterije obnavlja kroz proces punjenja temeljen na kemijskoj reakciji, dok je komprimirani zrak proizveden kompresijskim procesom kompresora. U usporedbi s hibridnim električnim pogonskim sklopom, hibridni sustav na komprimirani zrak je kompaktniji jer se kompresija i izlazna snaga mogu ostvariti na istom motoru. [16]



**Slika 2.10.:** Hibridni motor s komprimiranim zrakom dobiven modifikacijom Scania D12. [19]

Kao što je prethodno objašnjeno, regenerativno kočenje je glavni oblik pneumatske hibridizacije vozila, koja može povratiti energiju kočenja kao komprimirani zrak, a zatim ponovno koristiti ovaj dio energije tijekom ubrzanja vozila. Pneumatska hibridizacija nije ograničena na regenerativno kočenje. Treba naglasiti da otpadna toplina proizvedena tijekom izgaranja goriva konvencionalnog motora zauzima približno 60% ukupne energije goriva u obliku rashladne tekućine motora i energije ispušnih plinova, pokazujući veliki potencijal u povratu otpadne topline.[16]

Komprimirani zrak mogao bi imati koristi od povrata otpadne topline jer je njegova dostupnost povećana nakon apsorpcije topline, što bi dovelo do boljih performansi kada je motor pokretan komprimiranim zrakom. [20]



**Slika 2.11.:** Sustav hibridnog pneumatskog pogona. [21]

Slika 2.11. prikazuje sustav hibridnog pneumatskog pogona koji reciklira ispušni plin motora s unutarnjim izgaranjem. Na slici se mogu vidjeti dijelovi sustava. Pod (1) motor na benzin, (2) senzor momenta, (3) kompresor zraka, (4) stabilizacijski ventil napona, (5) baterija, (6) spremnik skladištenja zraka, (7) senzor tlaka, (8) senzor temperature, (9) turbina, (10) teretna ćelija, (11) električni motor, (12) cijev za spajanje energije, (13) kontrolni ventil.

U usporedbi s regenerativnim kočenjem i povratom otpadne topline, izgaranje kontrolirano mlazom komprimiranog zraka drugačiji je način pneumatske hibridizacije budući da komprimirani

zrak nije izravno uključen u učinak mehaničkog rada. Ideja izgaranja upravljanog mlazom komprimiranog zraka je grana kompresijskog paljenja kontrolirano mlazom kako bi se ostvarila kontrola faze izgaranja u sustavu sagorijevanja s vrućom mješavinom dizela. [16]

Za razliku od konvencionalnog dizelskog izgaranja, gorivo i zrak su prethodno pomiješani vremenskim razmakom ubrizgavanja naprednog goriva pa je onda smjesa zapaljena vanjskim stimulatorom kao što je plameni mlaz ukapljenog naftnog plina. [22]

Ovakvo izgaranje dokazano je veće toplinske učinkovitosti i s manje emisija zagađivača. Komprimirani zrak može poslužiti kao jedna od vanjskih stimulacija za paljenje prethodno izmiješane mješavine dizela i zraka budući da bi visoko tlačni mlaz mogao dramatično povisiti tlak u cilindru i zadovoljiti granicu paljenja. [16]

U usporedbi sa stlačenim pogonskim sklopom, hibridni pogonski sklop s komprimiranim zrakom kombinira motor s komprimiranim zrakom i konvencionalni motor s unutarnjim izgaranjem modificiranjem konvencionalnog sustava motora s unutarnjim izgaranjem za pneumatsku hibridizaciju. Ubrižgavanje goriva pauzira se tijekom faze kočenja, a usis motora se komprimira u spremnik zraka kroz dodatni ventil za punjenje postavljen na glavu cilindra, a komprimirani zrak može se koristiti za pogon motora tijekom faze pokretanja ili ubrzanja. Takvo pneumatsko regenerativno kočenje ključ je pneumatske hibridizacije budući da je jedini izvor komprimiranog zraka hibridni motor. Mogu postojati i druge izvedive metode za proizvodnju komprimiranog zraka, kao što je kompresor kojeg pokreće motor s unutarnjim izgaranjem. Izravna ekspanzija smatra se glavnom metodom pretvorbe energije za komprimirani zrak prikupljen tijekom faze kočenja. Aktualne studije usmjerene su na procjenu učinka smanjenja potrošnje goriva pneumatske hibridizacije, dok je nekoliko istraživača razmatralo optimizaciju performansi tijekom razdoblja pogona komprimiranim zrakom pomoću povrata otpadne topline iz konvencionalnog motora s unutarnjim izgaranjem. Osim toga, mlaz komprimiranog zraka može se koristiti za kontrolu faze izgaranja prethodno pomiješane smjese dizel-zrak. Problem niske učinkovitosti ekspanzije komprimiranog zraka može se potencijalno eliminirati inovativnim kompresijskim paljenjem kontroliranim mlazom komprimiranog zraka. [16]

Regenerativno kočenje na osnovu komprimiranog zraka znači da se može proizvesti komprimirani zrak tijekom kočenja vozila bez dodatnih zahtjeva za kompresore zraka te da se potrošnja goriva može smanjiti. Nažalost, učinkovitost motora pod pogonom komprimiranog zraka još uvijek je ispod 20%. Kod hibridnih sustava temeljenih na povratu otpadne topline, učinkovitost pod pogonom komprimiranog zraka može se povećati prikupljanjem otpadne topline iz

konvencionalnog motora koji može raditi u stabilnim uvjetima kako bi smanjio potrošnju goriva i emisiju zagađivača. Takav sustav još uvijek treba izvor komprimiranog zraka koji se može riješiti kompresorom kojeg pogoni motor. Još jedan nedostatak je da je sustav zamršeniji pošto su konvencionalni motor i motor s komprimiranim zrakom odvojeni. Kod kompresijskog paljenja kontroliranim mlazom komprimiranog zraka, komprimirani zrak nije uključen u izravnu izlaznu snagu što eliminira probleme niske učinkovitosti, ali potrebno je još potvrda za njegov učinak jer su proučavanja većinom vršena u simulacijama, a manje u praksi. Kako god, može se zaključiti da bi regenerativno kočenje na osnovu komprimiranog zraka trebalo biti bitan dio za hibridni pogon na komprimirani zrak, dok se metode iskorištavanja energije komprimiranog zraka mogu kombinirati ili izabrati prema različitim uvjetima.

Čisti pogonski sklop sa stlačenim zrakom možda nije izvediv za pogonski sustav vozila zbog niske učinkovitosti i male gustoće energije dok primjena hibridnog pogona na komprimirani zrak može smanjiti potrošnju goriva konvencionalnog motora s unutarnjim izgaranjem metodama kao što je regenerativno kočenje i pneumatska vožnja. Interesi za hibridni pogon na komprimirani zrak su mnogo manje od drugih električnih rješenja budući da se električna energija smatra sljedećom generacijom izvora za vozilo. Neki kritičari čak tvrde da će konvencionalna vozila na motor s unutarnjim izgaranjem biti potpuno zamijenjena baterijskim električnim vozilima u budućnosti budući da potonji ne proizvode zagađenje ispušne cijevi, stoga proučavanja o tehnologiji uštede goriva za konvencionalni motor s unutarnjim izgaranjem nemaju smisla. [16]

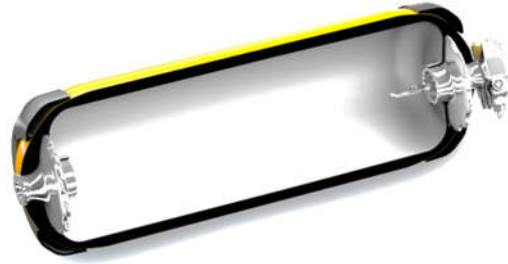
Dodatno, uloga motora s unutarnjim izgaranjem još uvijek je nepokolebljiva u teškim komercijalnim vozilima. S obzirom na praktičnu primjenu vozila poput teretnih kamiona, korištenje baterije kao jedinog izvora energije nije izvedivo jer bi težina baterija dramatično smanjila kapacitet tereta. Potpuna zamjena vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem s baterijskim električnim vozilima nije toliko izvediva osim ako se u sljedećih nekoliko desetljeća ne dogodi dramatičan tehnološki razvoj baterija. Kao štedljiva i ekološki prihvatljiva tehnologija, hibridni pogon na komprimirani zrak još uvijek ima svoju potencijalnu vrijednost u prometnom sektoru. Glavni izazov za hibridni pogon na komprimirani zrak je ukupna energetska učinkovitost budući da je rad motora pod pneumatski pogonjenim načinom rada određen masom i tlakom komprimiranog zraka oporavljena tijekom faze kočenja, kao i proces pretvorbe energije komprimiranog zraka. Prema trenutnim studijama, putničko vozilo s volumenom spremnika 50 l moglo je preći samo kratke udaljenosti pomoću komprimiranog zraka, dok je volumen spremnika strogo ograničen zbog razloga prostornog rasporeda. Za teška gospodarska vozila je moguće postaviti spremnik zraka s većim volumenom, kada se pažljivo odredi pritisak skladištenja za

transportnu primjenu. Pouzdanost spremnika zraka može se postići s napretkom u razvoju materijala skladišnih spremnika. [16]

Novi materijali, poput ugljičnih kompozitnih vlakana, razvijaju se u tvrtkama za skladištenje visoko tlačnog vodika za vozila na gorive ćelije, a tlak skladištenja može biti čak 70 Mpa(700 bara). [23] (Slika 2.12. i Slika 2.13.)



**Slika 2.12.:** Spremnik visokotlačnog plina od ugljičnih vlakana.



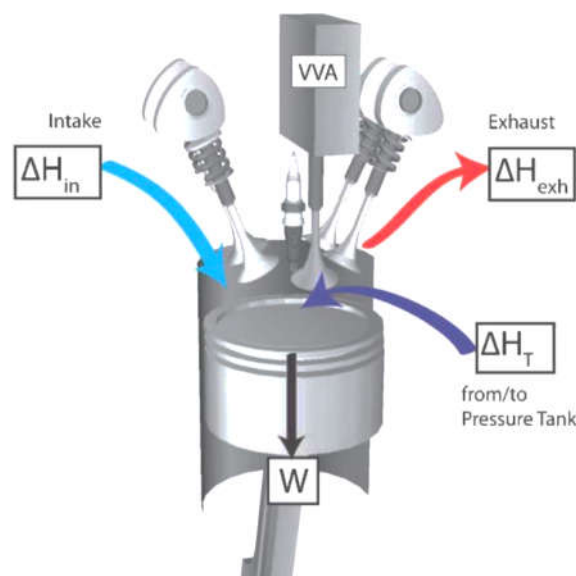
**Slika 2.13.:** Presjek spremnika visokotlačnog plina od ugljičnih vlakana.

Tehnologija visoko tlačnog skladištenja također se može primijeniti za skladištenje komprimiranim zrakom zbog svoje nezapaljivosti. Osim tlaka spremnika, proces oporavka energije komprimiranog zraka trebao bi također biti uzet u obzir budući da komprimirani zrak trpi velike gubitke energije tijekom toka i cilindra u spremnik. Nažalost, ograničena proučavanja su objavljena i usmjerena na fizičke mehanizme procesa toka komprimiranog zraka, stoga ne mogu postojati nikakve relativne teorijske smjernice za smanjenje gubitaka energije i ostvarenje učinkovitijeg regenerativnog kočenja. Daljnje studije o procesu strujanja komprimiranog zraka temeljene na stlačnom fluidu i teoriji udarnih valova mogle bi biti moguće rješenje. [16]

### 3. MODELIRANJE I OPTIMIZACIJA DVOTAKTNOG I ČETVEROTAKTNOG HIBRIDNOG MOTORA S KOMPRIMIRANIM ZRAKOM

U ovom poglavlju će se prikazati način modeliranja sustava pogona korištenjem komprimiranog zraka i provesti će se određena razina optimizacije za potrebe upravljanja.

Slika 3.1. pokazuje četverotaktni hibridni motor s komprimiranim zrakom. Za dvotaktni pneumatski režim rada još bi bilo potrebno i sustav pokretanja varijabilnih ventila i na usisnim i ispušnim ventilima.



Slika 3.1.: Shema četverotaktnog hibridnog motora s komprimiranim zrakom. [24]

U ovom dijelu primijenjeno je pojednostavljeno termodinamičko modeliranje na pneumatske režime rada. To je početak svakog optimiziranja detaljnijih modela. Za sve režime rada potrebne su sljedeće pretpostavke:

1. Zrak je idealan i kalorično savršen plin.
2. Ventili su idealizirani zanemarujući vremena otvaranja i zatvaranja kao i ograničenja toka
3. Prijenos topline na zidove cilindra je zanemaren
4. Zbog 3. brzina vrtnje motora ne utječe na modeliranje
5. Volumen stlačenog spremnika je bar za jedan red veličine veći od volumena cilindra. Promjene temperature i tlaka spremnika tijekom pokretanja ventila punjenja su stoga zanemarene za modeliranje prijenosa entalpije.

6. Temperatura spremnika  $T_T$  jednaka je temperaturi koja nastaje iz adijabatske kompresije, koju predstavlja koeficijent  $k$ , od usisnog tlaka  $p_{in}$  i usisne temperature  $T_{in}$  do tlaka spremnika  $p_T$  što daje:

$$T_T = T_{in} \left( \frac{p_T}{p_{in}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3-1)$$

7. Pod pretpostavkom da je spremnik adijabatski, cilj je cjeloviti prijenos entalpije iz spremnika u cilindar i obrnuto.

Kad je tlak na početku kompresijskog takta jednak onome na kraju ciklusa, unutarnja energija u cilindru u donjoj mrtvoj točki ne mijenja se preko 2 ili 4 takta. Zato je prenesena entalpija  $\Delta H_T$  iz spremnika u cilindar minimizirana radom  $W$  ako je razlika usisne entalpije i ispušne entalpije maksimizirana.

Dvotaktni način rada zračnog motora karakteriziran je jednim taktom zračnog udara i jednim taktom ispuha za svaki okretaj cilindra. Takt zračnog udara događa se tijekom spuštanja klipa, dok se zrak pod tlakom iz spremnika ubrizgava u cilindar. Tijekom dizanja klipa, zrak se ispušta ili preko usisnih ventila ili preko ispušnih ventila.

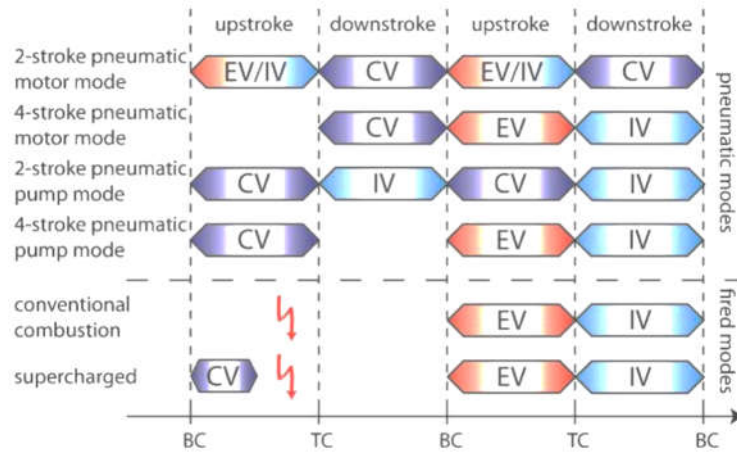
Četverotaktni način rada zračnog motora radi kao ciklus konvencionalnog motora s unutarnjim izgaranjem s prekidom goriva. Međutim, tijekom takta ekspanzije, ubrizgava se zrak pod tlakom kako bi generirao pozitivni moment.

Dvotaktni kompresorski način rada djeluje tako da takt kompresije prema gore prenosi zrak u tlačni spremnik kad tlak u cilindru postigne tlak spremnika. Sljedeći takt prema dolje je ekspanzijski takt s fazom usisa zraka kad tlak cilindra dosegne tlak okoline. Ovo se događa svaki okretaj motora za svaki cilindar.

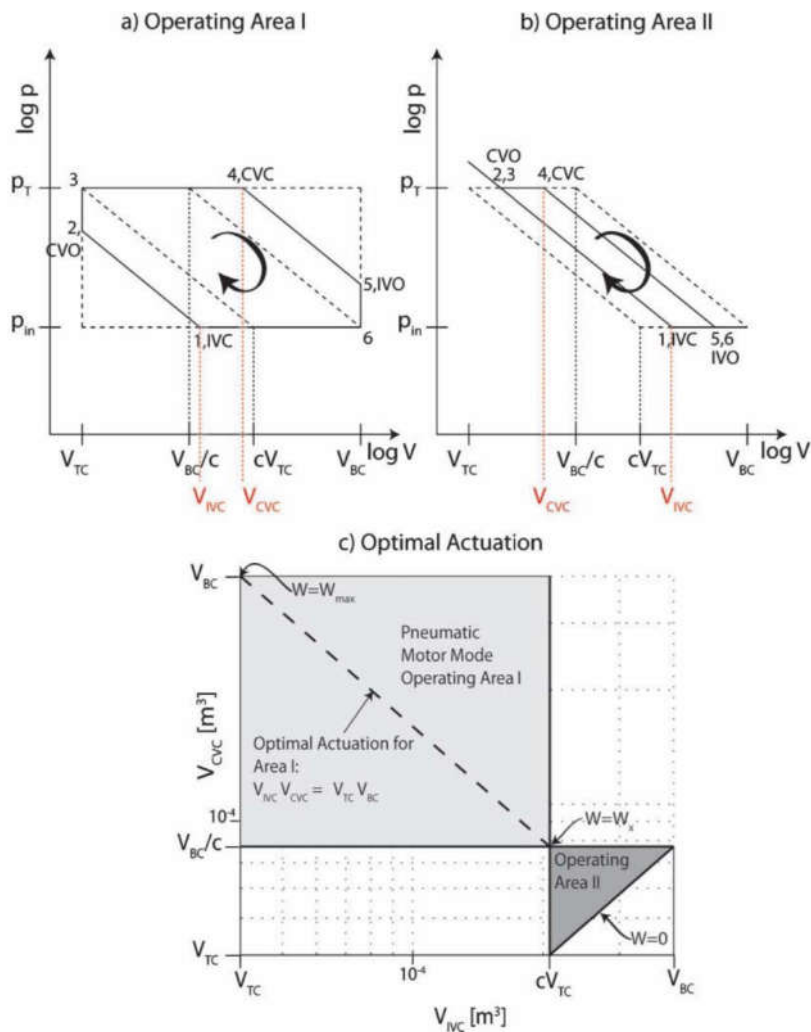
Četverotaktni kompresorski način rada djeluje kao ciklus konvencionalnog motora s unutarnjim izgaranjem s prekidom goriva, ali je u ovom slučaju zrak prenesen tijekom takta kompresije na spremnik pod tlakom nakon što tlak u cilindru dosegne tlak spremnika.

Slika 3.2. prikazuje operacije ventila za sve načine radova motora gdje EV predstavlja ispušni ventil, IV usisni ventil, CV ventil punjenja, BC donju mrtvu točku, TC gornju mrtvu točku. Prva četiri retka predstavljaju pneumatske načine rada koji su prethodno objašnjeni, a oni su dvotaktni način rada zračnog motora, četverotaktni način rada zračnog motora, dvotaktni kompresorski način rada i četverotaktni kompresorski način rada. Druga dva retka predstavljaju načine rada s izgaranjem a to su konvencionalno izgaranje i nadpunjavanje. Po stupcima su podijeljeni taktovi

po tome kreće li se klip prema gore ili dolje. Prema toj podjeli znamo koji ventili su operativni u kojem trenutku za određene načine rada.



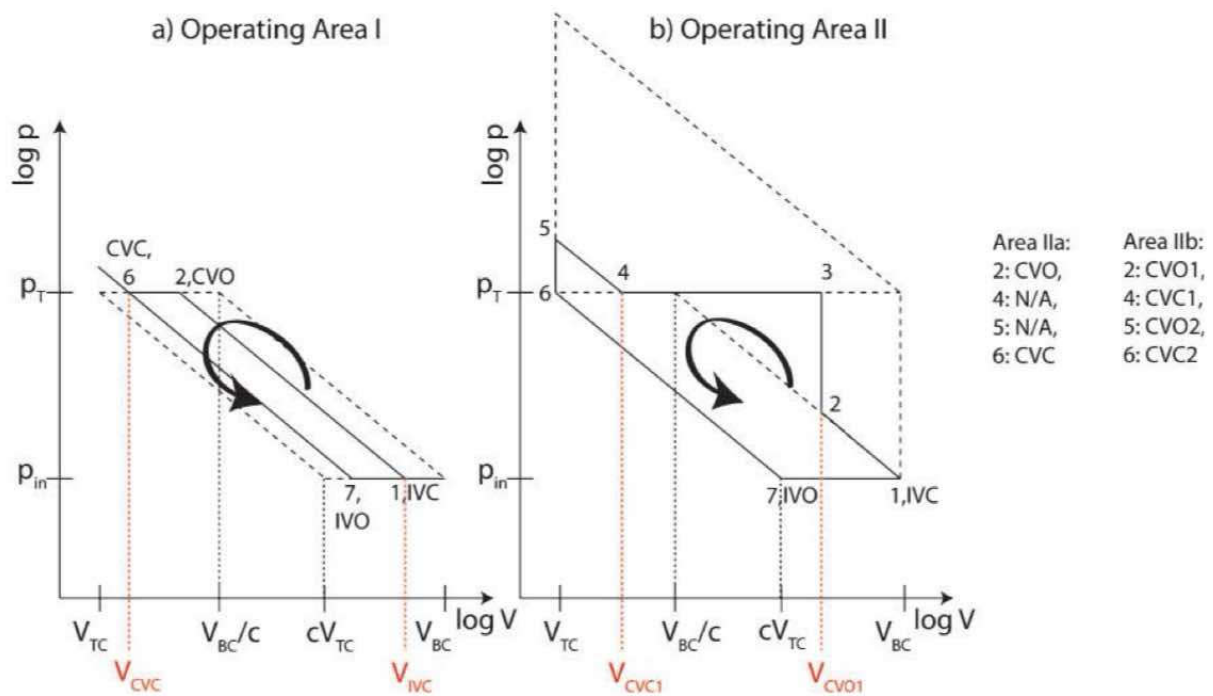
Slika 3.2.: Pregled operacija ventila. [24]



Slika 3.3.: Dvotaktni način rada zračnog motora: a) visoki moment, b) niski moment, c) optimalno pokretanje ventila. [24]



Slika 3.3. prikazuje p-V dijagrame za operativna područja I i II pod a) i b). Pod c) je prikazano ograničenje za operativno područje I i optimalno rješenje, a za operativno područje II cijelo područje je prihvatljivo.



Slika 3.4.: Dvotaktni kompresorski način rada: a) niski negativni moment, b) visoki negativni moment. [24]

Za optimalno pokretanje ventila za operativno područje I kod korištenja načina rada zračnog motora cilj je ispuniti zahtjev za momentom. Iako više nego jedna kombinacija ( $V_{IVC}$ ,  $V_{CVC}$  koje predstavljaju volumene zatvaranja usisnog i ventila punjenja) može proizvesti potreban rad, moguće je odrediti energetska optimalnu kombinaciju ( $V_{IVC}$ ,  $V_{CVC}$ ). Za dani rad  $W_0$  po ciklusu entalpija  $H_T$  prenesena iz spremnika mora biti minimizirana kako bi se osigurala niska potrošnja energije spremnika. Rješenje za ovaj problem optimizacije može se zapisati kao:

$$V_{IVC}V_{CVC} = V_{TC}V_{BC} \quad (3-2)$$

Za operativno područje II opet je cilj minimizirati prenesenu entalpiju  $H_T$  iz spremnika dok se zadovoljava traženi rad  $W$  po ciklusu. Tu je još i važno kako maksimizirati učinkovitost:

$$\eta = \frac{W}{H_T} = 1 - \left(\frac{p_{in}}{p_T}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (3-3)$$

Pošto učinkovitost ovisi samo o tlaku spremnika, a ne o  $V_{IVC}$  i  $V_{CVC}$  jednostavno se može koristiti optimizacija:

$$V_{IVC} = cV_{TC} \quad (3-4)$$

gdje je  $c$  :

$$c = \left(\frac{p_T}{p_{in}}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (3-5)$$

dok  $V_{CVC}$  varira između  $V_{TC}$  i  $\frac{V_{BC}}{c}$ .

U dvotaktnom kompresorskom načinu rada zbog korištenja motora s unutarnjim izgaranjem kao pumpe zbog učinkovitosti se uzima u obzir omjer prenesene entalpije  $H_T$  i iskorištenog rada  $W$  koji su različiti od nule. Zato se može definirati koeficijent performansa COP slično kao i kod toplinskih pumpi:

$$COP = \frac{H_T}{W} \quad (3-6)$$

COP se maksimizira tako što se maksimizira promjena entalpije usisa.

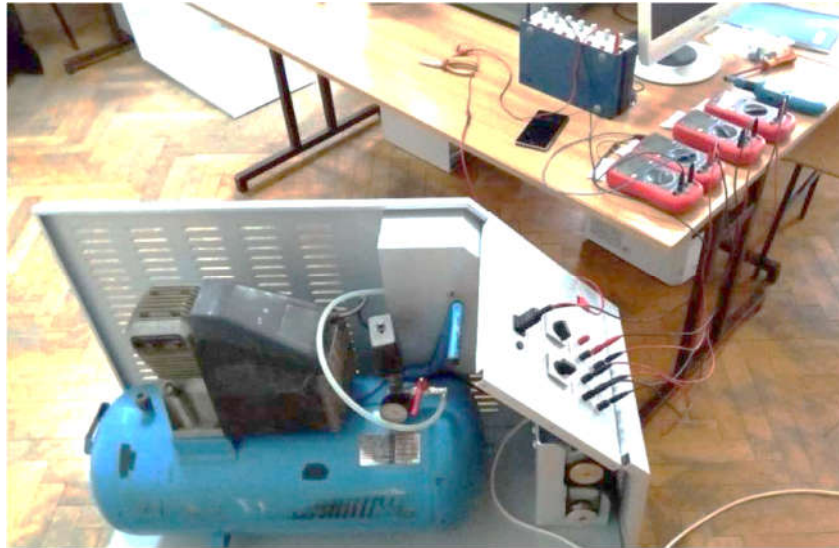
U praksi moguća strategija za pokretanje ventila u operativnom području I je:

$$V_{CVC} = V_{TC} \quad (3-7)$$

dok  $V_{IVC}$  varira između  $V_7$  i  $V_{BC}$ .

## 4. MJERENJE I SIMULACIJA

U ovom poglavlju obaviti će se mjerenja na postojećem modelu jednog sustava sa spremnikom energije u laboratoriju na FERITu u Osijeku. Na slici 4.1. može se vidjeti eksperimentalni postav mjerenja.

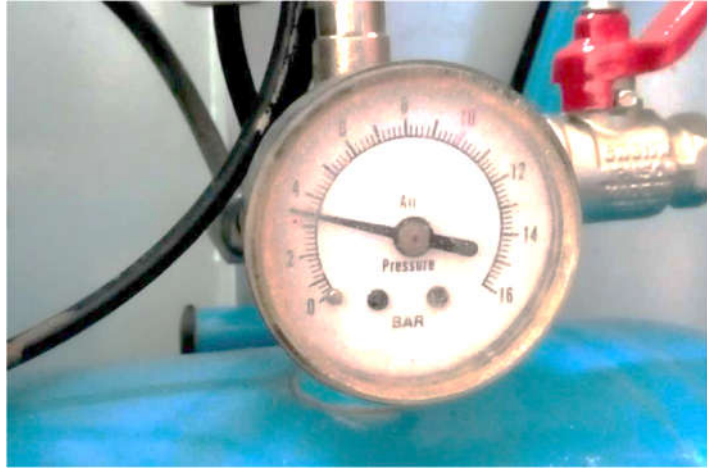


Slika 4.1.: Eksperimentalni postav.

Na gradsku mrežu spojen je jedan jednofazni asinkroni motor. Prilikom njegova rada provjereni su nazivni podaci sa natpisne pločice tj. izmjereni su struja i napon. Kao što je i očekivano okvirna vrijednost nazivne snage motora iznosila je 1,5 kW ili 2KS. Jednofazni motor pogoni zračni kompresor koji zrak iz okoline komprimira u spremnik sve dok tlak u spremniku ne dođe do nazivne vrijednosti koja iznosi 8 bara. Nakon toga, motor se isključuje automatski kako ne bi došlo do oštećenja spremnika ili drugih dijelova te je u tom trenutku u spremniku pohranjena energija u obliku komprimiranog zraka. Ventil se otvara po potrebi i zrak prolazi kroz regulator tlaka koji će osigurati stalan protok zraka radi stalne brzine vrtnje generatora. Onda zrak dolazi na zračni motor pod određenim tlakom i motor na kraju pokreće istosmjerni generator te se na izlazu dobije istosmjerni napon. Za potrebe ovog mjerenja na stezaljke generatora priključeno je trošilo (otpornik  $50 \Omega$ ) te je pomoću digitalnih instrumenata poput voltmetra i ampermetra promatrana promjena napona i struje.

Tijekom mjerenja promatrane su promjene četiri veličine, a one su tlak, brzina vrtnje, izlazna struja i izlazni napon. Prije mjerenja navedenih veličina temperatura spremnika se izmjerila *Fluke IR* termometrom koja je poslije poslužila u izračunima volumnog protoka preko opće plinske

jednadžbe. Promjena tlaka vidljiva je svakog trenutka na tlakomjeru postavljenom kod glavnog ventila (Slika 4.2.).



Slika 4.2.: Tlakomjer.

Brzina vrtnje mjerila se digitalnim tahometrom *Peak Tech 2795*. Mjerenje se obavljalo na osovini generatora kako bi se mogla dobiti ovisnost brzine vrtnje u vremenu i o promjeni tlaka u spremniku. U tablici u prilogu 1 se može vidjeti promjena mjerenih parametara.

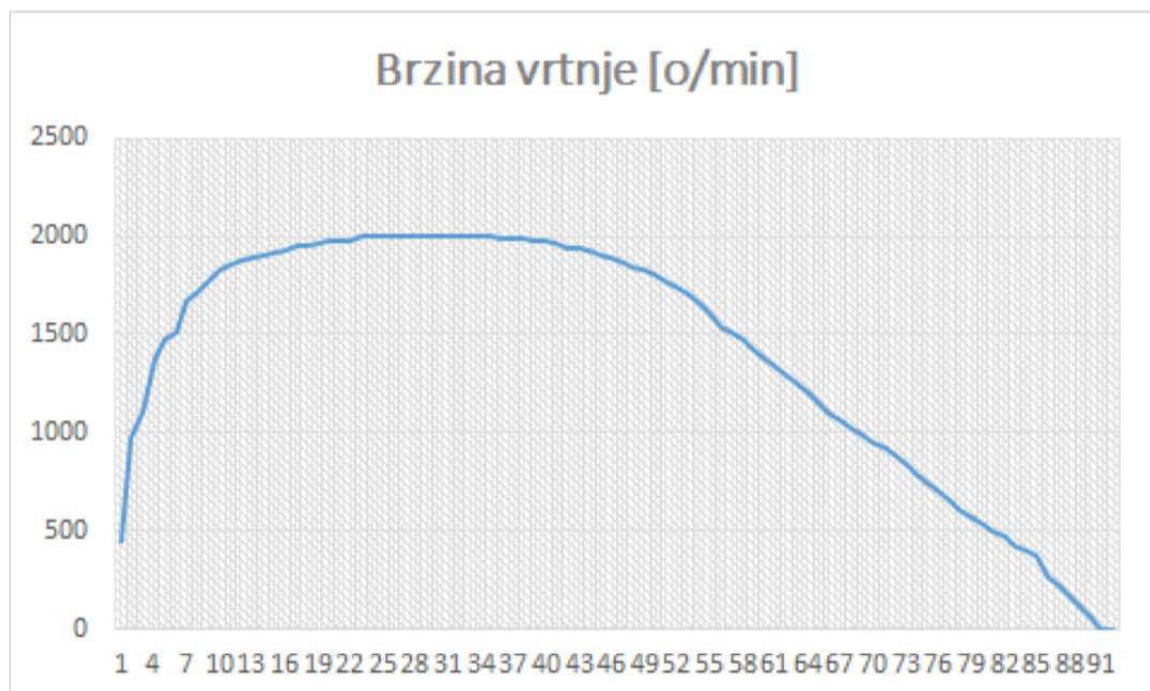


Slika 4.3.: Digitalni tahometar *Peak Tech 2795*.

Mjerenje brzine vrtnje nije bilo moguće raditi laserski budući da je osovina generatora spojena preko remenice na zračni motor pa se stoga koristio mehanički nastavak koji je prilagođen točno ovim slučajevima. Izlazni napon i struja izmjereni su na izlazu istosmjernog generatora multimetrom UNIT UT-151.

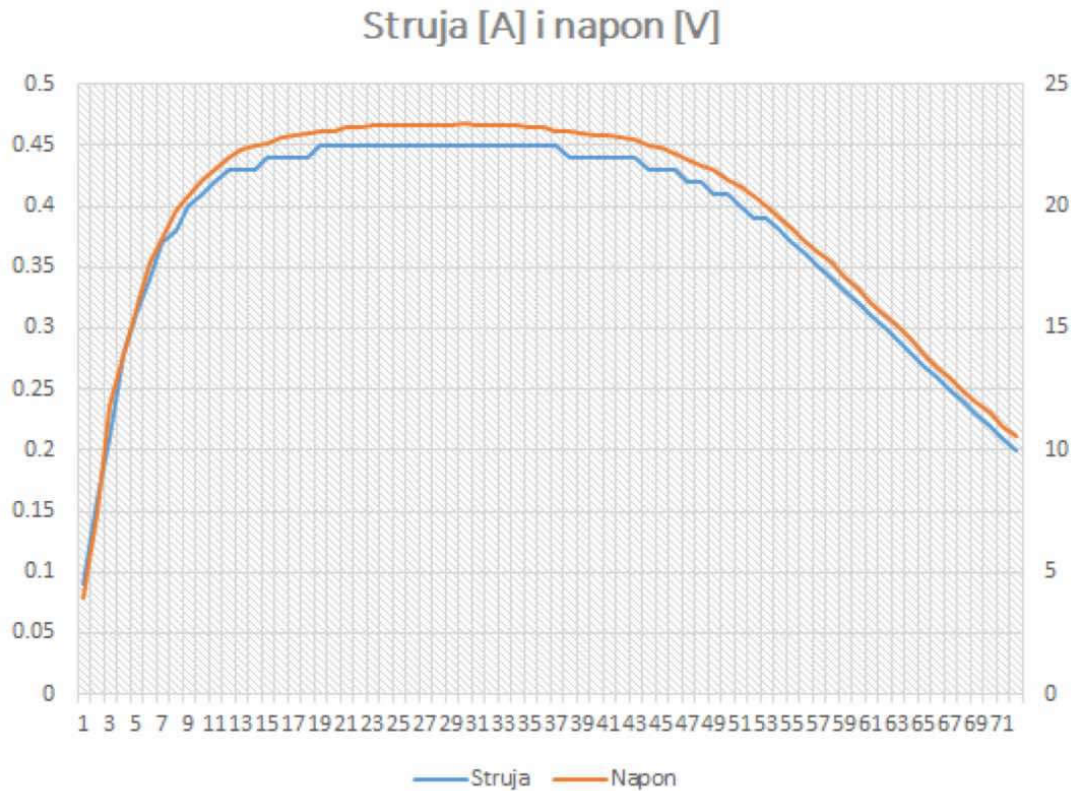
Jednom kada se glavni ventil na spremniku otvori, zrak počinje strujati te samim time tlak u spremniku počinje opadati, a brzina vrtnje generatora počinje rasti, te nakon 22 sekunde postigne konstantnu vrijednost zbog inercije rotora. Kada se postigne konstantna vrijednost, tlak u spremniku i dalje opada ali regulator tlaka osigurava konstantan protok zraka pa iz tog razloga imamo sve konstante vrijednosti na izlazu. Tek kada vrijednost tlaka padne ispod podešene vrijednosti na regulatoru, tada se počinje smanjivati protok a samim time i brzina vrtnje generatora te u konačnici izlazni napon i struja. (Slika 4.5.)

Slika 4.4., slika 4.5. i slika 4.6. su grafovi koji pokazuju vremensku ovisnost veličina brzine vrtnje, struje i napona te tlaka prema podacima iz tablice u prilogu 1.

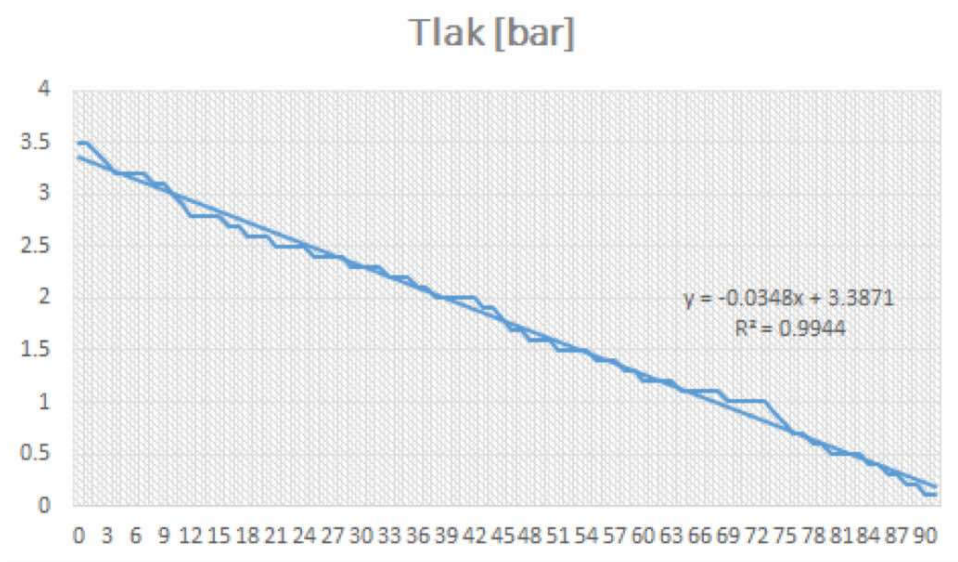


**Slika 4.4.:** Ovisnost brzine vrtnje rotora generatora o vremenu.

Slika 4.4. prikazuje brzinu vrtnje rotora generatora nakon što se glavni ventil spremnika otvori i tlak u njemu počinje padati što je vidljivo na slici 4.6.. Prije svega toga spremnik se napunio zračnim kompresorom kojeg je pogonio jednofazni asinkroni motor.

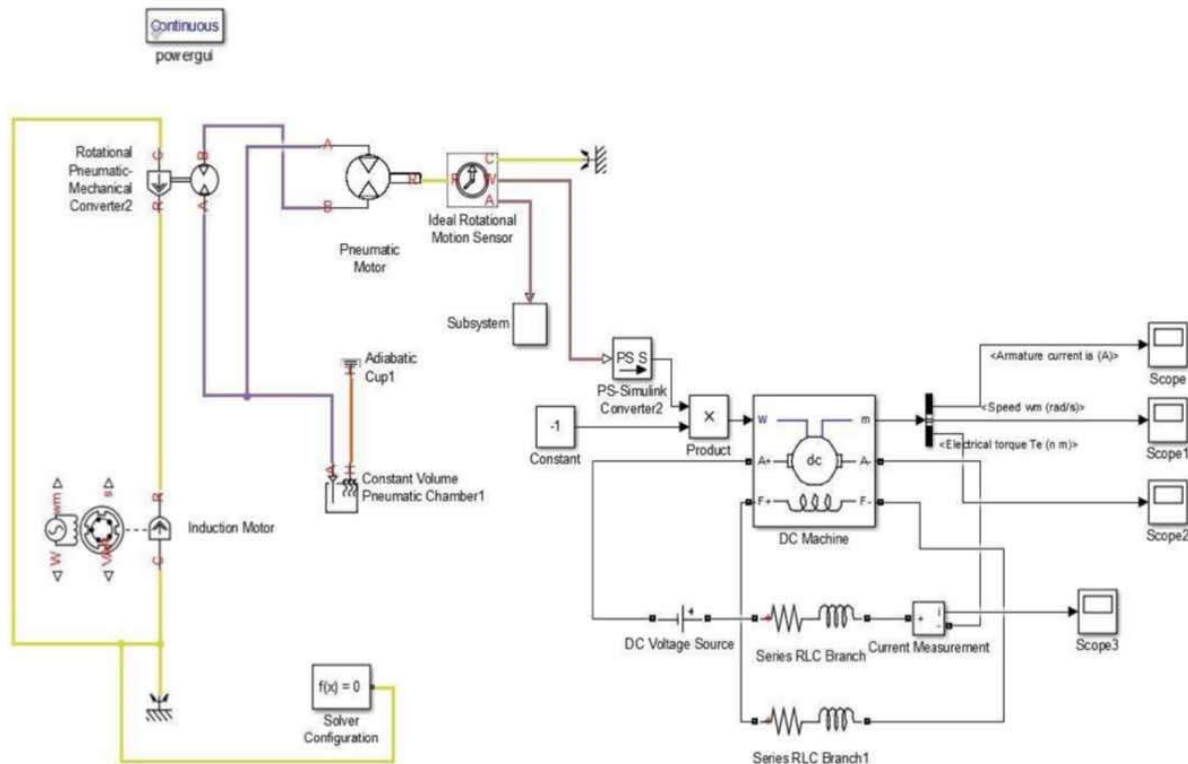


Slika 4.5.: Ovisnost izlaznog napona i struje o vremenu.



Slika 4.6.: Ovisnost tlaka o vremenu.

Nakon što su provedena mjernja i obrađivanje rezultata, izradio se model sustava u programu MATLAB Simulink. Model ne može biti kompletan jer se stabilno stanje nije uspjelo konvergirati sa zadanim parametrima.



Slika 4.7.: Simulink model sustava.

Najbitniji blokovi korišteni u ovom modelu su: *Induction motor*, *Rotational Pneumatic-Mechanical Converter*, *Constant Volume Pneumatic Chamber*, *Adiabatic Cup*, *Pneumatic Motor*, *Ideal Rotational Motion Sensor*, *PS-Simulink Converter* te *DC Machine*.

Blok *Induction Motor* sadrži izmjerene parametre i nije potreban naponski izvor kao blok da bi radilo. Sve točke su izlazi, no izlazna djelatna i jalova snaga te klizanje i brzina vrtnje nisu ovdje spojeni budući da su dobiveni u mjerenju. Dovoljno ih je spojiti na blok Scope ako se želi vidjeti njihova vrijednost kroz simulaciju. Blokom *Pneumatic Motor* modeliran je kompresor. Parametri bloka su brzina vrtnje (eng. *Vector of rotational speed*), moment (eng. *Vector of torque values*), protok (eng. *Vector of volumetric flow*) i promjena tlaka, tj.  $\Delta p$  (eng. *Pressure differential at which torque and flow data is measured*). Problem je parametranje tog bloka pri čemu se javljaju greške zbog nemogućnosti dostizanja stabilnog stanja simulacije ili problem sa dimenzijama vektora. Blokom *Ideal Rotational Motion Sensor* očitava se brzina vrtnje iz bloka *Pneumatic Motor*. Taj signal se preko bloka *PS-Simulink Converter* pretvara iz rotacijske domene

u standardni Simulink signal koji se može spojiti na ulaz generatora. Ta vrijednost se množi sa konstantom  $k=-1$  kako bi blok *DC Machine* radio kao generator, a ne motor. Ostali izlazi bloka *Ideal Rotational Motion Sensor* su spojeni na blok *Mechanical Rotational Reference* (analogno električnom uzemljenju kod spajanja električnih krugova u Simulinku) i *Terminator* blok u podsustavu na slici (budući da signal nije potreban u simulaciji i da Simulink ne vraća upozorenje nakon simulacije). Blokovi *Constant Volume Pneumatic Chamber* i *Adiabatic Cup* predstavljaju spremnik zraka. Budući da je izmjena topline kroz stjenke spremnika zanemariva, izabran je blok *Adiabatic Cup* kojim se modelira takav proces. Na kraju je tu blok *DC Machine* koji je parametriran tako da predstavlja istosmjerni generator, vrijednosti ponuđenih u već parametriranom (eng. *preset*) modelu u Simulinku (5HP, 240V, 1750RPM, Field:150V) zato što na generatoru korištenom u mjerenju ti parametri nisu bili poznati. Izlazi su spojene na blokove *Scope* kako bi se nakon uspješne simulacije mogle vidjeti izlazne vrijednosti (brzina vrtnje, struja armature i električni moment istosmjernog generatora). Kako bi se svi blokovi mogli pravilno parametrirati, sljedeći proračun je korišten kako bi se odredile vrijednosti, kao i tablica u prilogu.

Da bi bilo moguće dobiti volumni protok zraka kroz cijev treba krenuti od jednadžbe za stanje plina:

$$p V = n R T \quad (4-1)$$

gdje je  $p$  tlak,  $V$  volumen spremnika,  $n$  množina medija u spremniku (zrak),  $R$  opća plinska konstanta i  $T$  temperatura spremnika u Kelvinima.

Množina tvari poznata je po formuli:

$$n = \frac{m}{M} \quad (4-2)$$

Kada se uvrsti izraz (4-2) u izraz (4-1) dobije se:

$$p V = \frac{m}{M} R T = \frac{R}{M} m T \quad (4-3)$$

gdje razlomak  $\frac{R}{M}$  predstavlja specifičnu plinsku konstantu zraka koja iznosi  $R_Z = 286,9 \text{ J/kgK}$ .

Pošto je potrebno promatrati tok kroz cijev, to znači da je potrebno izračunati vremensku promjenu mase zraka u spremniku. Jedina veličina koja utječe na tu promjenu mase je tlak.

Vremensku promjenu tlaka je moguće dobiti iz pravca sa slike 4.6.



Jednadžba pravca je  $y = - 0,0348x + 3,3871$

Koeficijent uz  $x$  predstavlja vremensku promjenu tlaka  $\Delta p$  koja iznosi 0,0348 Mpa/s. Temperatura spremnika iznosi 32°, a pretvoreno u Kelvine iznosi 305,15 K. Volumen spremnika iznosi 50 L, odnosno 0,05 m<sup>3</sup>. Uvrštavanjem svih poznatih veličina u izraz (4-3) dobije se vremenska promjena mase:

$$\Delta m = \frac{V}{T} \frac{\Delta p}{R_z}$$

$$\Delta m = \frac{0,05}{305,15} \frac{3480}{286,9}$$

$$\Delta m = 1,987 * 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Vremensku promjenu mase moguće je iskoristiti za izračunavanje volumnog protoka uz poznavanje gustoće zraka  $\rho_z = 1,2754 \text{ kg/m}^3$  :

$$q = \Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_z}$$

$$q = \frac{1,987 * 10^{-3}}{1,2754}$$

$$q = 1,558 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu prikazale su se osnove motora s komprimiranim zrakom, njegove prve upotrebe i pokušaji integracije u današnja vozila. Pokazana je najčešća verzija korištenja skladištenja energije komprimiranim zrakom u vozilima što su hibridi s komprimiranim zrakom i motorima s unutarnjim izgaranjem. Detaljno su opisano načini rada tj. režimi rada hibridnih motora i najbolji način korištenja skladištenja komprimiranim zrakom što je regenerativno kočenje. Zaključeno je da su hibridi s komprimiranim zrakom u prednosti pred električnim hibridima zbog toga što im nije potrebna velika baterija pa su jeftiniji. Zatim je prikazano modeliranje dvotaktnog i četverotaktnog hibridnog motora te kako se može optimizirati njihov rad pokretanjem varijabilnih ventila.

Osnovno načelo komprimiranja zraka nije moguće unaprijediti, razvoj spremnika i generatora mogao bi smanjiti njihove cijene, što bi smanjilo ukupne troškove i učinilo ovu tehnologiju dostupnijom. Stoga je izvršeno mjerenje na modelu spremnika u laboratoriju na FERITu u Osijeku.

Nakon što su provedena mjerenja i obrađivanje rezultata, izradio se model sustava u programu MATLAB Simulink. Rezultati simulacije nalaze se u tablici u prilogu 1. Izračun je volumni protok zraka za taj sustav.

## 6. LITERATURA

- [1] J. Adder, Assessment of Future Vehicle Transportation Options and Their Impact on the Electric Grid; DOE/NETL-2010/1466; National Energy Technology Laboratory: Morgantown, WV, USA, 2011.
- [2] J.F. Gairns, Industrial locomotives for mining, factory and allied uses, part II.- compressed air and internal combustion locomotives, Cassirer's Magazine, 16, 1904.
- [3] Y. Qihui, C. Maolin, S. Yan, X. Qiyue, Optimization Study on a Single-cylinder Compressed Air Engine, Chinese Journal of Mechanical Engineering, No. 6, Vol. 28, pp. 1285-1292, 2015.
- [4] C. Maolin, K. Kawashima, T. Kagawa, Power assessment of flowing compressed air, Transactions of the ASME, 128, pp. 402-405, 2006.
- [5] S. Robertson, A Brief History of Air Cars, 2015.
- [6] S. Thipse, Compressed Air Car. Special Feature: Air Pollution Control Technologies, 2008.
- [7] H. Liu, Y. Chen, G.L. Tao, G.Z. Jia, W.H. Ding, Research on the displacement and stroke-bore ratio of the air-powered engine, in: Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control, pp. 381-384, 2005.
- [8] Y. Chen, H. Liu, G.L. Tao, Simulation on the port timing of an air-powered engine, Int. J. Vehicle Des. 38, pp. 259-273, 2005.
- [9] G. Jia, X. Wang, G. Wu, Study on ultrahigh pressure and large flow rate pneumatic on-off valve, Jixie Gongcheng Xuebao/Chin. J. Mech. Eng. 40, pp. 77-81, 2004.
- [10] Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi, C. Yuan, Dimensionless study on efficiency and speed characteristics of a compressed air engine, J. Energy Resour. ASME 137, 2015.
- [11] Q.H. Yu, M.L. Cai, Y. Shi, Q.Y. Xu, Optimization study on a single-cylinder compressed air engine, Chin. J. Mech. Eng.-En. 28, pp. 1285-1292, 2015.
- [12] P.L. Chen, X.L. Yu, L. Liu, Simulation and experimental study of electropneumatic valve used in air-powered engine, J. Zhejiang Univ. - Sci. A 10, 2009.
- [13] A. Jayachandran, Tata Nano could spawn electric, hybrid, air-powered variants- Reports, IndianAutoBlog, 2017., dostupno na: <https://indianautosblog.com/tata-nano-could-spawn-electric-hybrid-air-variants-p256298>

- [14] K. Subramani, Nano was to run on air, battery but Ratan Tata couldn't implement plans, Hindustan Times, New Delhi, 2016., dostupno na: <https://www.hindustantimes.com/business-news/ratan-tata-s-plan-to-turn-nano-around-wanted-car-to-run-on-air-battery/story-q7LIMmTS5eHCORFTvNhE1L.html>
- [15] dostupno na: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Di\\_Pietro\\_Engine\\_Drawing\\_Colored.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Di_Pietro_Engine_Drawing_Colored.svg)
- [16] Y. Fang, Y. Lu, A.P. Roskilly, X. Yu, A review of compressed air energy systems in vehicle transport, *Energy Strategy Reviews*, Vol. 33, January 2021., 100583
- [17] Are electric cars threatening a better way?, Algar Air Compressed Air Engineers, UK, 2017, dostupno na: <https://algarair.co.uk/are-electric-cars-threatening-a-better-way/>
- [18] M.M. Schechter, Operating a Vehicle with Braking Energy Recovery, United States Patents, 2007.
- [19] S. Trajkovic, P. Tunestål, B. Johansson, Investigation of different valve geometries and valve timing strategies and their effect on regenerative efficiency for a pneumatic hybrid with variable valve actuation, *Sae Int. J. Fuels Lubricants* 1, 2008.
- [20] Y. Fang, Y. Lu, A.P. Roskilly, X. Yu, Experimental study of a pneumatic engine with heat supply to improve the overall performance, *Appl. Therm. Eng.* 134, 78-85, 2018.
- [21] K.D. Huang, S.C. Tzeng, W.P. Ma, W.C. Chang, Hybrid pneumatic-power system which recycles exhaust gas of an internal-combustion engine, *Appl. Energy* 82, 2005.
- [22] Z. Hairong, Z. Weizheng, Y. Yanpeng, Z. Ti'en, Comparison of turbulence models for multiphase-flow oscillating heat transfer enhancement, *Numer. Heat Tran. Part B Fundamentals* 66, 268–280., 2014.
- [23] D.A. Carbot-Rojas, R.F. Escobar-Jiménez, J.F. Gomez-Aguilar, A.C. T'ellezAnguiano, A survey on modeling, biofuels, control and supervision systems applied in internal combustion engines, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73,1070–1085., 2017.
- [24] C. Donitz, I. Vasile, C.H. Onder, L. Guzzella, Modelling and optimizing two- and four-stroke hybrid pneumatic engines, Department of Mechanical and Process Engineering ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 2008.

## 7. SAŽETAK

U ovom diplomskom radu prikazane su osnove rada motora s komprimiranim zrakom te neke od njihovih prvih primjena do pokušaja integracije u današnja vozila. Opisan je hibridni pogon s komprimiranim zrakom i motorom s unutarnjim izgaranjem te njegovi načini rada. Napravljeno je mjerenje na postojećem modelu sustava sa spremnikom energije na komprimirani zrak na FERITu u Osijeku. Naposljetku izrađen je blokovski dijagram u programu Matlab/Simulink te su prikazani rezultati simulacije za najvažnije veličine u obliku tablice u prilogu i vremenskih grafova.

Ključne riječi: motor s komprimiranim zrakom, hibridni pogon s komprimiranim zrakom, regenerativno kočenje, skladištenja energije komprimiranim zrakom

## **8. ABSTRACT**

In this master's thesis, the basics of compressed air engines are shown alongside some of their first applications up to attempts at integration into today's vehicles. A hybrid compressed air powertrain with an internal combustion engine is described with its operation modes. The measurement was made on the existing model of the system with a compressed air tank at FERIT in Osijek. Finally, a block diagram was created in the Matlab/Simulink program, and the simulation results for the most important variables were presented in the form of a table in the attachment and time graphs.

Key words: compressed air engine, hybrid compressed air powertrain, regenerative breaking, compressed air energy storage

## 9. ŽIVOTOPIS

Autor ovog rada, Josip Jurkić, rođen je 31. svibnja 2000. u Osijeku, Republika Hrvatska. U Čepinu završava osnovnu školu Vladimira Nazora te upisuje II. gimnaziju u Osijeku. Nakon završetka srednje škole upisuje sveučilišni preddiplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija, smjer Elektrotehnika, izborni blok Elektroenergetika na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Završava preddiplomski studij završnim radom Pokretanje istosmjernog motora bez četkica i stječe akademski naziv sveučilišni prvostupnik inženjer elektrotehnike i informacijske tehnologije (univ. bacc. ing. el. techn. inf.). Nakon toga upisuje sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika, izborni blok Održiva elektroenergetika.

---

Potpis autora

## 10. PRILOZI

Prilog 1. Promjena mjerenih veličina tlaka, broja okretaja u minuti, izlazne struje i izlaznog napona u ovisnosti o vremenu, modela sustava sa spremnikom za skladištenje energije komprimiranim zrakom, jednofaznim asinkronim motorom i istosmjernim generatorom.

| Vrijeme [s] | Tlak [bar] | Broj okretaja u minuti [o/min] | Izlazna struja [A] | Izlazni napon [V] |
|-------------|------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|
| 0           | 3,5        | 441,6                          | 0,09               | 3,9               |
| 1           | 3,5        | 971,1                          | 0,16               | 7,4               |
| 2           | 3,4        | 1104,1                         | 0,21               | 11,8              |
| 3           | 3,3        | 1371,8                         | 0,28               | 14                |
| 4           | 3,2        | 1472,5                         | 0,31               | 15,7              |
| 5           | 3,2        | 1514,3                         | 0,34               | 17,7              |
| 6           | 3,2        | 1673,8                         | 0,37               | 18,7              |
| 7           | 3,2        | 1722,2                         | 0,38               | 19,8              |
| 8           | 3,1        | 1773,4                         | 0,4                | 20,4              |
| 9           | 3,1        | 1825,4                         | 0,41               | 21,1              |
| 10          | 3          | 1851,9                         | 0,42               | 21,5              |
| 11          | 2,9        | 1880,9                         | 0,43               | 22                |
| 12          | 2,8        | 1895,1                         | 0,43               | 22,3              |
| 13          | 2,8        | 1902,1                         | 0,43               | 22,5              |
| 14          | 2,8        | 1911,6                         | 0,44               | 22,6              |
| 15          | 2,8        | 1929,5                         | 0,44               | 22,8              |
| 16          | 2,7        | 1949,2                         | 0,44               | 22,9              |
| 17          | 2,7        | 1953,8                         | 0,44               | 23                |
| 18          | 2,6        | 1963,3                         | 0,45               | 23,1              |
| 19          | 2,6        | 1975,4                         | 0,45               | 23,1              |
| 20          | 2,6        | 1976,5                         | 0,45               | 23,2              |
| 21          | 2,5        | 1972,2                         | 0,45               | 23,2              |



|    |     |        |      |      |
|----|-----|--------|------|------|
| 22 | 2,5 | 1997,7 | 0,45 | 23,3 |
| 23 | 2,5 | 1998,8 | 0,45 | 23,3 |
| 24 | 2,5 | 1999,3 | 0,45 | 23,3 |
| 25 | 2,4 | 1999,6 | 0,45 | 23,3 |
| 26 | 2,4 | 1999,1 | 0,45 | 23,3 |
| 27 | 2,4 | 1999,2 | 0,45 | 23,3 |
| 28 | 2,4 | 1999,7 | 0,45 | 23,3 |
| 29 | 2,3 | 1999,6 | 0,45 | 23,4 |
| 30 | 2,3 | 1999,7 | 0,45 | 23,3 |
| 31 | 2,3 | 1999,9 | 0,45 | 23,3 |
| 32 | 2,3 | 2000   | 0,45 | 23,3 |
| 33 | 2,2 | 2001,1 | 0,45 | 23,3 |
| 34 | 2,2 | 1999,8 | 0,45 | 23,2 |
| 35 | 2,2 | 1993   | 0,45 | 23,2 |
| 36 | 2,1 | 1990   | 0,45 | 23,1 |
| 37 | 2,1 | 1984,7 | 0,44 | 23,1 |
| 38 | 2   | 1971,5 | 0,44 | 23   |

|    |     |        |      |      |
|----|-----|--------|------|------|
| 39 | 2   | 1970,8 | 0,44 | 22,9 |
| 40 | 2   | 1958,9 | 0,44 | 22,9 |
| 41 | 2   | 1940   | 0,44 | 22,8 |
| 42 | 2   | 1935,1 | 0,44 | 22,7 |
| 43 | 1,9 | 1925,5 | 0,43 | 22,5 |
| 44 | 1,9 | 1908,8 | 0,43 | 22,4 |
| 45 | 1,8 | 1891,4 | 0,43 | 22,2 |
| 46 | 1,7 | 1866,9 | 0,42 | 21,9 |
| 47 | 1,7 | 1842,6 | 0,42 | 21,7 |
| 48 | 1,6 | 1824,6 | 0,41 | 21,5 |
| 49 | 1,6 | 1799,6 | 0,41 | 21,1 |

|    |     |        |      |      |
|----|-----|--------|------|------|
| 50 | 1,6 | 1769,4 | 0,4  | 20,8 |
| 51 | 1,5 | 1738,1 | 0,39 | 20,4 |
| 52 | 1,5 | 1703,4 | 0,39 | 20   |
| 53 | 1,5 | 1655,7 | 0,38 | 19,5 |
| 54 | 1,5 | 1610,2 | 0,37 | 19,1 |
| 55 | 1,4 | 1536,6 | 0,36 | 18,5 |
| 56 | 1,4 | 1510   | 0,35 | 18,1 |
| 57 | 1,4 | 1471,9 | 0,34 | 17,7 |
| 58 | 1,3 | 1428,9 | 0,33 | 17,1 |
| 59 | 1,3 | 1382,2 | 0,32 | 16,6 |
| 60 | 1,2 | 1335,7 | 0,31 | 16   |
| 61 | 1,2 | 1290   | 0,3  | 15,5 |
| 62 | 1,2 | 1255,5 | 0,29 | 15,1 |
| 63 | 1,2 | 1205,3 | 0,28 | 14,5 |
| 64 | 1,1 | 1160   | 0,27 | 14   |
| 65 | 1,1 | 1099,9 | 0,26 | 13,4 |
| 66 | 1,1 | 1061,7 | 0,25 | 13   |
| 67 | 1,1 | 1018,7 | 0,24 | 12,4 |
| 68 | 1,1 | 985,09 | 0,23 | 12   |
| 69 | 1   | 945,47 | 0,22 | 11,6 |
| 70 | 1   | 921,47 | 0,21 | 11   |
| 71 | 1   | 883,39 | 0,2  | 10,6 |
| 72 | 1   | 839,2  | 0,2  |      |
| 73 | 1   | 792,6  | 0,19 |      |
| 74 | 0,9 | 738,6  | 0,18 |      |
| 75 | 0,8 | 700    | 0,16 |      |
| 76 | 0,7 | 655,4  | 0,15 |      |
| 77 | 0,7 | 606,8  | 0,14 |      |
| 78 | 0,6 | 568,4  | 0,13 |      |

|    |     |       |      |  |
|----|-----|-------|------|--|
| 79 | 0,6 | 532,2 | 0,12 |  |
| 80 | 0,5 | 493,4 | 0,11 |  |
| 81 | 0,5 | 469,9 | 0,1  |  |
| 82 | 0,5 | 427,2 |      |  |
| 83 | 0,5 | 393,7 |      |  |
| 84 | 0,4 | 376,2 |      |  |
| 85 | 0,4 | 269,7 |      |  |
| 86 | 0,3 | 229,1 |      |  |
| 87 | 0,3 | 162,4 |      |  |
| 88 | 0,2 | 115,5 |      |  |
| 89 | 0,2 | 52,9  |      |  |
| 90 | 0,1 | 0     |      |  |
| 91 | 0,1 | 0     |      |  |