

**RAZMATRANJE UTICAJA POČETKA UBRIZGAVANJA GORIVA PRI RAZLIČITIM REŽIMIMA RADA NA NORMALNU SILU KOD DIZEL MOTORA**
**CONSIDERATION OF THE INFLUENCE OF THE START OF FUEL INJECTION AT DIFFERENT OPERATING MODES ON THE NORMAL FORCE IN DIESEL ENGINES**

 Denis Stjepanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*
**Oblast – MAŠINSTVO**

**Kratka sadržaj** – U ovom radu prikazan je uticaj početka ubrizgavanja goriva pri različitim režimima rada na normalnu silu kod dizel motora. Kreirana su dva modela motora, od kojih jedan poseduje turbokompresor, na kojima su vršene potrebne simulacije. Rezultati simulacija su kasnije obrađeni, te su pomoću njih vršeni prorračuni čiji je glavni cilj bio dobijanje dijagrama normalne sile. Tako dobijeni dijagrami normalne sile su diskutovani i međusobno poređeni za slučaj oba modelovana motora.

**Ključne reči:** Početak ubrizgavanja goriva, normalna sila, turbokompresor, dizel motor

**Abstract** – This paper presents consideration of the influence of the start of fuel injection at different operating modes on the normal force in diesel engines. Two engine models, one of which has a turbocharger, were created. Later on, these engines were used for required simulations. Simulation results were later processed and used for calculations, whose main goal was obtaining diagrams of normal force. Obtained diagrams were discussed and mutually compared for the case of both modeled engines.

**Keywords:** Start of fuel injection, normal force, turbocharger, diesel engine

**1. UVOD**

Početak ubrizgavanja goriva definiše vremenski trenutak otvaranja brizgača izražen u stepenima obrtanja kolenastog vratila, pre ili posle spoljašnje mrtve tačke. U odnosu na ovaj parametar definiše se i početak procesa sagorevanja, te on tako utiče i na emisiju štetnih gasova, potrošnju goriva i buku pri procesu sagorevanja. S obzirom da vrednost ovog parametra varira u zavisnosti od opterećenja i broja obrtaja, cilj istraživanja je bio da se razmotri njegov uticaj na normalnu silu pri različitim režimima rada.

**2. KINEMATIKA I DINAMIKA MOTORNOG MEHANIZMA**

Kinematika i dinamika motornog mehanizma proučavaju zakonitosti kretanja i dejstvo sila koje se javljaju pri radu motora, kao i način prenošenja ovih sila preko elemenata mehanizma. Kako bi se proverilo mehaničko naprezanje elemenata motora, izvršilo njihovo dimenzionisanje, rešili dinamički problemi uravnoteženja i ravnomernosti rada,

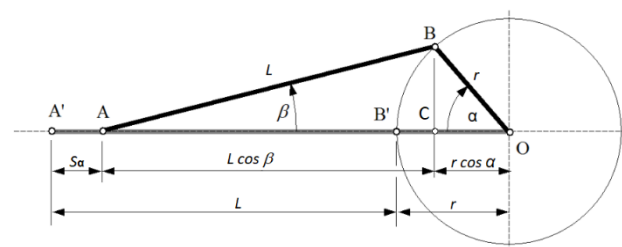
**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Nebojša Nikolić, vanr. prof.

te proverila opterećenja ležišta, neophodno je izvršiti analizu sila koje se javljaju u klipnom mehanizmu. To znači da se mora razjasniti suština njihovog nastanka, zakon promene u toku radnog ciklusa i način ispoljavanja njihovog dejstva u toku rada motora.

**2.1. Kinematika klipnog mehanizma**

Klipni motorni mehanizam pretvara pravolinijsko oscilatorno kretanje klipa unutar cilindra u obrtno kretanje kolenastog vratila posredstvom klipnjače, koja vrši balansirajuće kretanje. Kinematika klipnog mehanizma definiše put, brzinu i ubrzanje klipa motora u funkciji ugla obrtanja kolenastog vratila.



Slika 1. Izgled prostog aksijalnog klipnog mehanizma

Pri određenom stacionarnom brzinskom režimu rada motora, može se smatrati da je ugaona brzina kolenastog vratila konstantna, s obzirom da se ona putem zamajca održava u dosta uskim granicama promene. U tom slučaju, ugao kolenastog vratila, čiji je izraz prikazan ispod, je samo funkcija vremena, pa se sve kinematičke veličine mogu izraziti u funkciji ugla kolena kolenastog vratila, odnosno vremena  $t$  [1].

$$\alpha = \omega \cdot t = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot t = 6 \cdot n \cdot t \text{ [}^\circ\text{KV]} \quad (1)$$

Gde je:

$\alpha$  – ugao kolenastog vratila [°KV]

$\omega$  – ugaona brzina [rad/s]

$n$  – broj obrtaja [o/min]

Na slici 1 prikazan je izgled prostog aksijalnog mehanizma, a pomoću slike će se izvesti izrazi za put, brzinu i ubrzanje klipa.

**Put klipa  $s_\alpha$**  koji je on prešao od spoljašnje mrtve tačke određuje se pomoću sledećeg izraza :

$$s_\alpha = r \cdot (1 - \cos\alpha) + \frac{1}{4} \cdot r \cdot \lambda_k (1 - \cos 2\alpha) \text{ [m]} \quad (2)$$

**Brzina klipa  $v_\alpha$**  dobija se diferenciranjem izraza za put :

$$v_\alpha = r \cdot \omega \cdot \sin\alpha + \frac{r \cdot \omega \cdot \lambda_k}{2} \cdot \sin 2\alpha \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (3)$$

**Ubrzanje klipa  $a_\alpha$**  dobija se diferenciranjem izraza za brzinu ili dvostrukim diferenciranjem izraza za put :

$$a_\alpha = r \cdot \omega^2 \cdot \cos\alpha + r \cdot \omega^2 \cdot \lambda_k \cdot \cos 2\alpha \left[ \frac{m}{s^2} \right] \quad (4)$$

Gde je:

$r$  – poluprečnik kolena

$L$  – dužina klipnjače

$\lambda_k$  – glavna kinematička karakteristika motora, koja se kreće u granicama  $0,22 \div 0,33$  [2]

## 2.2. Dinamika klipnog mehanizma

Prema suštini nastanka, na klipni mehanizam deluje pet vrsta sila :

- sile pritiska gasova,
- inercijalne sile,
- sile trenja,
- sile teže i
- sila korisnog otpora koji mehanizam savlađuje.

Kod brzohodnih motora se razmatraju samo inercijalne sile i sile pritiska gasova, s obzirom da ostale sile imaju zanemarljive vrednosti u poređenju sa pomenute dve.

### 2.2.1. Sile pritiska gasova

Sile pritiska gasova potiču od dejstva pritiska u radnom prostoru motora. Pritisak u cilindru deluje ravnomerno po celoj površini radnog prostora, što je i prikazano na slici 2. Delujući na zidove cilindra, pritisak stvara radijalne sile, koje opterećuju cilindar u radijalnom pravcu, delujući na cilindarsku glavu, stvara aksijalnu silu koja teži da odvoji glavu od cilindra i delujući na čelo klipa stvara silu koja realizuje mehanički rad [2]. Ovde će od interesa biti sila koja deluje na čelo klipa, a njena vrednost se računa pomoću sledećeg izraza :

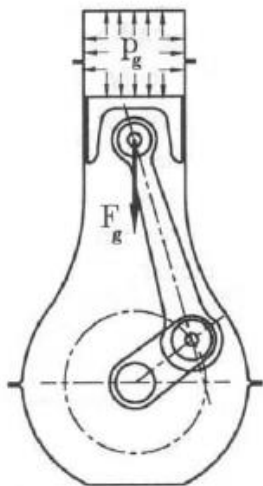
$$F_{g\alpha} = A_k \cdot (p_g - p_k) \quad (5)$$

Gde je :

$A_k$  – površina čela klipa

$p_g$  – pritisak gasa u cilindru

$p_k = p_0$  – pritisak u kućištu motora, odnosno pritisak okoline

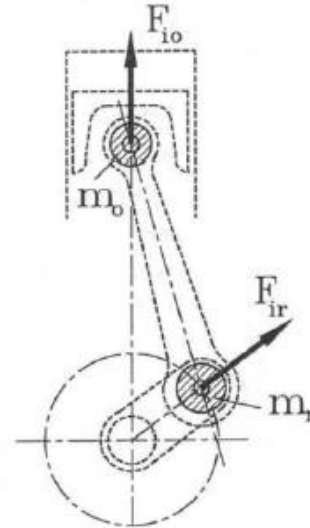


Slika 2. Napadna tačka i pravac dejstva sile pritiska gasova [2]

Sila pritiska gasova je promenljiva i po veličini i smeru dejstva, njena napadna linija je osa cilindra. Po konvenciji ova sila je pozitivna ako je usmerena prema kolenastom vratilu, kao što je to prikazano na slici 2.

### 2.2.2. Sile inercije pokretnih masa

Inercijalne sile nastaju usled promenljivog kretanja masa klipnog mehanizma. Inercijalna sila je jednaka proizvodu mase i ubrzanja, što znači da je za njen proračun, pored ubrzanja, koje je već definisano u kinematici mehanizma, potrebno poznavati i mase pokretnih delova. S obzirom da pojedini delovi klipnog mehanizma vrše različite vrste kretanja pri radu, tako se i inercijalne sile dele na: inercijalne sile pravolinijski oscilatornih masa i inercijalne sile rotacionih masa.



Slika 3. Redukcija pokretnih masa klipnog mehanizma i dejstvo inercijalnih sila [2]

Mase koje vrše pravolinijski oscilatorno kretanje  $m_o$  redukuju se na osu osovinice, a mase koje vrše rotaciono kretanje  $m_r$  na osu velike pesnice, kao što je i prikazano na slici 3.

Masa koja vrši pravolinijski oscilatorno kretanje  $m_o$  sastoji se od mase klipa  $m_k$ , mase klipne grupe  $m_{kg}$ , mase osovinice klipa  $m_{os}$ , mase klipnih prstenova  $m_{kp}$  i mase osigurača osovinice klipa  $m_{osig}$  [3].

Sila inercije pravolinijski oscilatornih masa, čiji su smer i napadna tačka prikazani na slici 3, dobija se iz sledećeg izraza :

$$F_{io\alpha} = -m_o \cdot a_\alpha = -m_o \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos\alpha - m_o \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda_k \cdot \cos 2\alpha \quad (6)$$

S obzirom da se pravac dejstva sile inercije pravolinijski oscilatornih masa poklapa sa pravcem sile pritiska gasova, njihove vektore moguće je algebarski sabrati kako bi se dobila rezultujuća sila koja deluje na klip u toku rada motora :

$$F_{R\alpha} = F_{g\alpha} + F_{io\alpha} \quad (7)$$

Sila inercije rotacionih masa, čiji su smer i tačka dejstva prikazani na slici 3, određuje se izrazom :

$$F_{ir} = -m_r \cdot a_r = -m_r \cdot r \cdot \omega^2 \quad (8)$$

Gde je :

$m_r = m_{kol} + m_{knjR}$  – mase koje vrše rotaciono kretanje

$m_{kol}$  – mase neuravnoteženog dela kolena

### 2.2.3. Razlaganje sila klipnog mehanizma

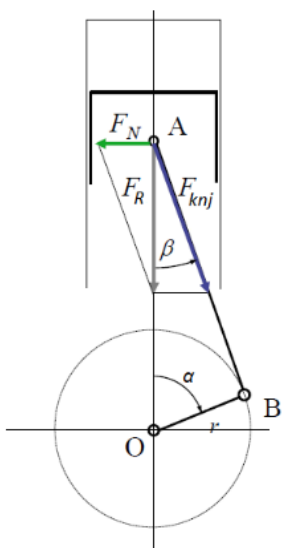
Rezultujuća sila će dalje da se prenosi klipnim mehanizmom kao što je to prikazano na slici 4. Ona se razlaže u osovinici klipa i to na dva moguća pravca dejstva, te tako nastaju njene dve komponente. U pravcu

normalnom na cilindar, nastaje normalna sila  $F_N$ , a u pravcu klipnjače nastaje sila klipnjače  $F_{knj}$ . To znači da se sada rezultujuća sila predstavlja vektorskim sabiranjem pomenutih sila :

$$\vec{F}_{R\alpha} = \vec{F}_{N\alpha} + \vec{F}_{knj\alpha} \quad (9)$$

Normalna sila je promenljivog intenziteta i smera dejstva. Ona pritiska klip uz zidove cilindra, te tako direktno utiče na povećano habanje u pravcu svog dejstva. Usled ovog habanja cilindar postaje ovalan, pa se efekat zaptivanja klipnih prstenova smanjuje. Pri većem trošenju ovih površina, koje su posredstvom normalne sile u međusobnom kontaktu, može da dođe do bučnijeg rada motora. Normalna sila može da se smanji smanjenjem ugla  $\beta$  putem povećanja dužine klipnjače, te smanjenja glavne kinematske karakteristike motora  $\lambda_k$ . Ova sila predstavlja se sledećim izrazom :

$$F_{N\alpha} = F_{R\alpha} \cdot \operatorname{tg}\beta \quad (10)$$



Slika 4. Razlaganje sila klipnog mehanizma u osovinici klipa

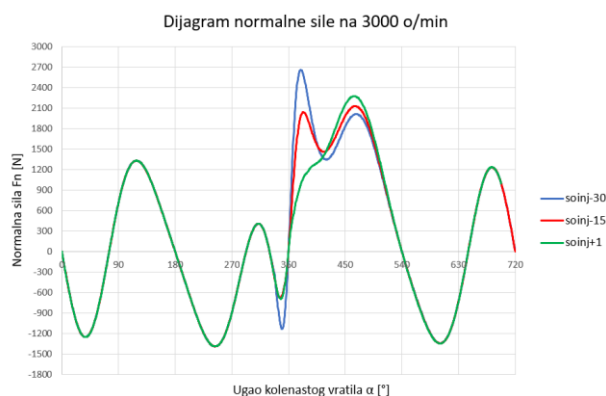
Sila klipnjače i sile koje se kasnije razlažu na rukavcu kolenastog vratila nisu od interesa u ovom radu, s obzirom da je akcenat samog rada postavljen na normalnu silu, tako da o njima neće biti reči u okviru ovog rada.

### 3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

#### 3.1. Uticaj početka ubrzigavanja na normalnu silu pri konstantnom broju obrtaja za slučaj motora bez turbokompresora

U ovom poglavlju, kao što i sam naslov kaže, posmatraće se slučaj promene početka ubrzigavanja pri konstantnom broju obrtaja. To znači da će se svi parametri simulacije na zadatom broju obrtaja držati konstantnim, a variraće se samo početak ubrzigavanja.

Na slici 5 prikazan je dijagram normalne sile na 3000 o/min za tri različite vrednosti početka ubrzigavanja. Početak ubrzigavanja je na dijagramima označen kao *soinj* od eng. *start of injection*.



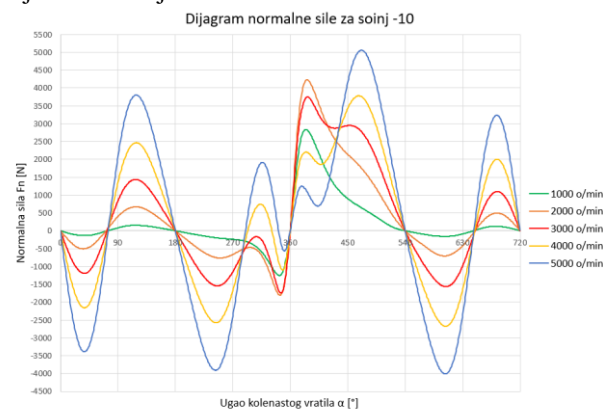
Slika 5. Dijagram normalne sile za različite početke ubrzigavanja na 3000 o/min

Sa slike 5 se može primetiti velika razlika u vrednostima normalne sile malo posle 360 °KV. Ova razlika je posebno primetna za slučajeve *soinj* -30 i *soinj* +1, gde ona iznosi oko 1500 N. Pomenuta razlika u vrednostima normalne sile, nastaje zbog toga što je pritisak u cilindru za početak ubrzigavanja od 30 stepeni pre SMT mnogo veći nego što je to slučaj za početak ubrzigavanja od 1 stepena nakon SMT.

#### 3.2. Uticaj broja obrtaja za nepromenjen početak ubrzigavanja na normalnu silu kod motora sa turbokompresorom

U ovom poglavlju će se prikazati uticaj promene broja obrtaja na normalnu silu pri nepromenjenom početku ubrzigavanja.

Na slici 6 prikazan je dijagram normalne sile za početak ubrzigavanja od 10 stepeni pre SMT pri različitim brojevima obrtaja.



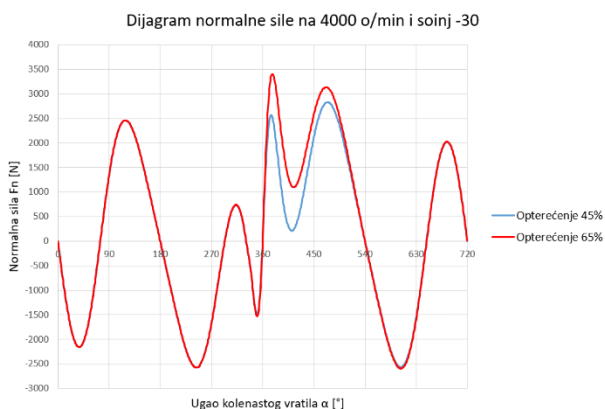
Slika 6. Dijagram normalne sile za soinj -10 pri različitim brojevima obrtaja

Sa dijagrama na slici 6 se vidi da normalna sila ima najviše maksimalne vrednosti za brojeve obrtaja iz gornjeg dela opsega, gde se pogotovo ističe kriva na 5000 o/min. Treba primetiti da normalna sila na nižim brojevima obrtaja svoj maksimum dostiže malo posle 360 stepeni, a na višim posle 450 stepeni. Iz toga i proizlazi činjenica da, ubrzo nakon 360 stepeni, kriva na 1000 o/min ima najvišu vrednost normalne sile.

### 3.3. Uticaj opterećenja pri nepromenjenom početku ubrizgavanja i konstantnom broju obrtaja na normalnu silu kod motora sa turbokompresorom

U ovom poglavlju prikazaće se uticaj opterećenja na normalnu silu klipa pri nepromenjenom početku ubrizgavanja i konstantnom broju obrtaja.

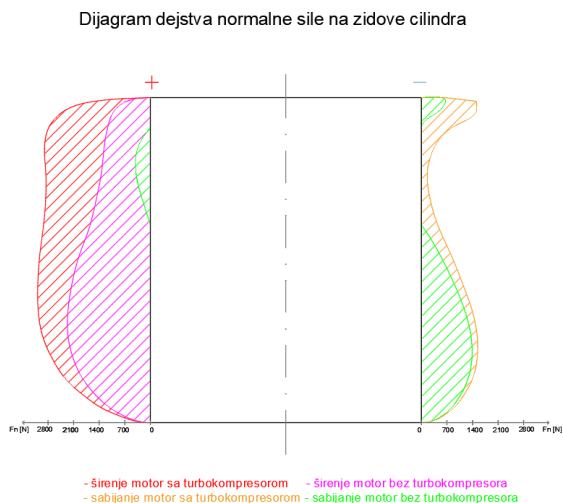
Na slici 7 prikazan je dijagram normalne sile na 4000 o/min i soinj -30 pri opterećenju od 65 % i 45 %. Na slici se vidi da se sa povećanjem opterećenja povećava i normalna sila u taktu širenja, odnosno u području od 360 do 540 °KV.



Slika 7. Dijagram normalne sile na 4000 o/min i soinj -30 za različita opterećenja, motor sa turbokompresorom

### 3.4. Poređenje dijagrama dejstva normalne sile na zidove cilindra kod oba motora

Kako bi se još detaljnije uporedio uticaj normalne sile u motorima sa i bez turbokompresora, na slici 8 prikazan je dijagram dejstva normalne sile na zidove cilindra za taktove širenja i sabijanja kod oba motora.



Slika 8. Dijagram dejstva normalne sile na zidove cilindra za slučaj motora bez turbokompresora na 3000 o/min i soinj +1

Na dijagramu sa slike 8 se na prvi pogled primeti velika razlika u vrednosti normalne sile u taktu širenja između motora sa i bez turbokompresora. Očekivano da je njeno dejstvo najveće u taktu širenja, gde normalna sila, konstantno deluje u pozitivnom smeru. U tom delu su sile pritiska gasova toliko visoke da, uprkos negativnom predznaku sila inercije pravolinijskih oscilatornih masa

tokom celog takta širenja, uspevaju da ih nadvladaju. Takođe, kod motora sa turbokompresorom normalna sila ostaje negativna tokom celog takta sabijanja, dok kod motora bez turbokompresora to nije slučaj.

### 4. ZAKLJUČAK

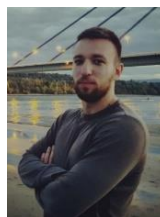
Na samom kraju, iz svega do sada rečenog, moglo bi se izvući nekoliko zaključaka o uticaju početka ubrizgavanja na normalnu silu klipa. Prvo se videlo da, pri konstantnom broju obrtaja, normalna sila ima više vrednosti za početke ubrizgavanja koji su udaljeniji od SMT.

Treba napomenuti da ovo važi i za slučaj motora bez turbokompresora i motora sa njim. Za nepromenjen početak ubrizgavanja kod motora bez turbokompresora, daleko najveće vrednosti normalne sile javljaju se u oblastima najviših brojeva obrtaja, dok je kod motora sa turbokompresorom ta razlika manje izražena. Sledeće, za oba motora vredi činjenica da se, pri nepromenjenom početku ubrizgavanja na konstantnom broju obrtaja, vrednost normalne sile povećava sa povećanjem opterećenja. I na kraju treba reći da je dejstvo normalne sile na zidove cilindra izraženije kod motora sa turbokompresorom, a posebno tokom takta širenja.

### 5. LITERATURA

- [1] Živković M. : Motori sa unutrašnjim sagorevanjem, Drugi deo, Mašinski Fakultet, Beograd, 1990.
- [2] Tomić M. i Petrović S. : Motori sa unutrašnjim sagorevanjem, Četvrto izdanje, Mašinski Fakultet, Beograd, 2008.h
- [3] Mahalec I., Lulić Z., Kozarac D. : Motori s unutrašnjim izgaranjem, FSB Zagreb, 2010.

### Kratka biografija:



**Denis Stjepanović** rođen je u Doboju 1996. god. Osnovne studije iz oblasti Mašinstva završio je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu 2020. godine, a iste godine upisuje i master studije, smer Automobilsko inženjerstvo.  
kontakt: [denisstjep123@gmail.com](mailto:denisstjep123@gmail.com)