

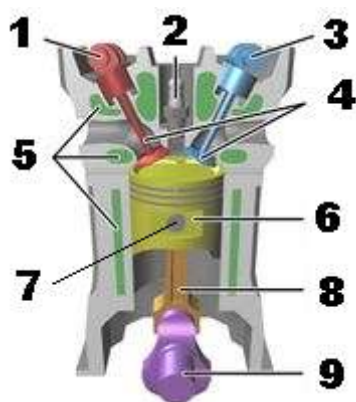
270 km/h

Petar Žugec

PMF – Fizički odsjek; Bijenička 32

Stotinu eksplozija u sekundi. Inercijalne sile su nezamislive, naprezanja takva da se pojačani čelici svijaju, a trenje toliko da se guma topi. U biti nije riječ ni o čemu neobičnom. Radi se tek o vožnji motocikla na 270 km/h. No što se sve odvija u srcu te naprave dok prelazi 75 metara u sekundi? Kakva fizika stoji iza toga? To je tema kojom ćemo se baviti.

Nisu svi motocikli sposobni postići brzine od oko 300 km/h niti razviti snagu od gotovo 200 konjskih snaga. Prvaci među onima koji jesu su, naravno, motocikli s najprestižnijeg svjetskog natjecanja – Moto Grand Prix-a – no oni ne smiju imati zajedničkih obilježja s motociklima iz serijske proizvodnje. Stoga ćemo u ovome opisu prvenstveno imati na umu četiri najpoznatija serijska natjecateljska modela: Kawasaki ZX-10 R Ninja, Suzuki GSX-R 1000, Yamaha YZF-R1 i Honda CBR 1000 RR.



Slika 1 – Dijelovi cilindra četverotaktnog agregata

1 – bregasta osovina ispušnog ventila; 2 – svjećica; 3 – bregasta osovina usisnog ventila; 4 – ispušni i usisni ventili; 5 – vodeno hlađenje; 6 – klip; 7 – osovina klipa; 8 – klipnjača; 9 – radilica

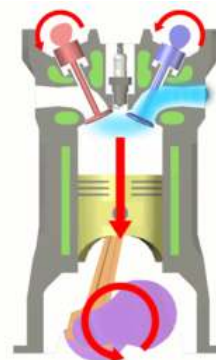
agregata ukupne zapremnine jedne litre ulazi četvrtina litre zraka. To znači da kroz čitav agregat u sekundi prođe 100 litara zraka, a da bi to uopće bilo moguće, zrak se kreće nadzvučnom brzinom. Za jedno odvijanje tog procesa samo su 3 tisućinke sekunde na raspolaganju. U početku razvoja motocikala usis zraka je u potpunosti bio kontroliran gibanjem klipa koji je pri spuštanju stvarao parcijalni vakuum tako da je zbog većeg vanjskog (atmosferskog) tlaka zrak ulazio u cilindar. No, ubrzo je otkriveno da su pri 100 i više okretaja u minuti plinovi pretromi da bi sâm klip učinkovito održavao taj proces. Da bi se riješio taj problem kod visokih obrtajnih brzina, kad je klip u gornjoj mrtvoj točki (najvišoj točki svoje putanje), istovremeno se otvaraju ventili za

Srca ovih monstura su četverotaktni četverocilindrični agregati od oko 1000 kubičnih centimetara koji pri 270 km/h rade na 12000 okretaja u minuti, dakle 200 okretaja u sekundi. To je poprilično zastrašujuća brojka uzme li se u obzir, npr., da je frekvencija ovog procesa četiri puta veća od frekvencije oscilacija struje gradske mreže. A pri tome, unutar svake dvjestotinke sekunde se nepogrešivo mora odvit niz različitih preciznih radnji koje čine ukupnost pogona motocikla. Te radnje ćemo objasniti u sklopu pojašnjenja rada četverotaktnog agregata.

Jedan ciklus rada takvog agregata sastoji se od četiri poteza klipa ("gore" i "dolje") tijekom kojih se odvijaju osnovne radnje:

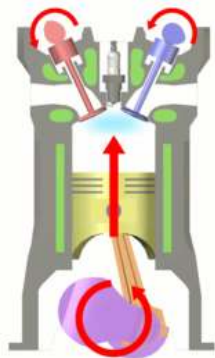
- 1) usis gorive smjese ("dolje")
- 2) kompresija smjese ("gore")
- 3) sagorijevanje smjese ("dolje")
- 4) ispuh izgaranih plinova ("gore")

Budući da u jedan ciklus ulaze dva okretaja, proizlazi da se svaka faza odvije 100 puta u sekundi. Tijekom prve faze, u svaki od četiri cilindra



Slika 2 – Prva faza ciklusa – usis gorive smjese

usis i ispuh zraka¹. Pri tome ispušni plinovi svojom inercijom povlače za sobom zrak kroz usisni ventil. Naravno, ispušni ventil se mora brzo zatvoriti da se usisana smjesa ne bi odmah preusmjerila kroz njega.



Slika 3 – Druga faza ciklusa – kompresija gorive smjese

Kad klip dosegne donju mrtvu točku (najnižu točku svoje putanje), cilindar je napunjen gorivom smjesom te se usisni ventili zatvaraju. Pokretan golemom inercijom kružnog gibanja sačuvanom u zamašnjaku, a prenesenom preko radilice, klip mijenja smjer gibanja te se počinje uzdizati komprimirajući pri tome usisanu smjesu. U prosjeku, smjesa se komprimira na 1/12 početnog volumena, a za taj proces su dostupne tek 2.5 tisućinke sekunde. Prema jednažbi stanja plina:

$$pV = nRT \quad (1)$$

slijedi da tlak poraste na (barem) 12 bara, no zbog brzine procesa, promjena je adijabatska. Takva promjena opisana je jednažbom:

$$pV^\gamma = \text{const.} \quad (2)$$

gdje je γ adijabatski koeficijent veći od 1. Prema tome, tlak sabijene smjese je još i veći. Njena temperatura je sada 500°C, a to je uzrokovano porastom zbog sabijanja te okolnom temperaturom dijelova cilindra.

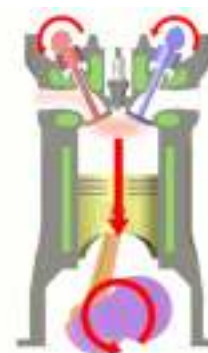
Tek prije nego klip dosegne gornju mrtvu točku, svjećica (ako je ispravna) zaiskri te smjesa² eksplodira. Temperatura u izgaranom prostoru gotovo trenutačno poraste na 3000°C, a tlak smjese na 90 bara. Uzme li se u obzir promjer klipa od 73 mm, proizlazi da na klip, a preko njega na klipnjaču i radilicu, djeluje sila viša od 37000 N, što je na Zemlji ekvivalentno pritisku od 3.7 t. Toliki pritisak je dovoljan da se osovinica klipa svine za 25 tisućinki milimetra. Taj pomak osovinice opisan je jednažbom:

$$\Delta h = \frac{FL^3}{48YI} \quad (3)$$

gdje je L duljina osovinice (koja se podudara s promjerom klipa), Y njen Youngov modul elastičnosti, a I veličina koja za osovinicu kružnog presjeka iznosi:

$$I = \frac{R^4\pi}{8} \quad (4)$$

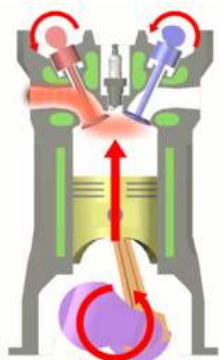
pri čemu je R polumjer njenog presjeka (oko 12 mm). Također, budući da je klipnjača uvijek postavljena pod nekim kutem (različitim od nule, osim u mrtvim točkama) u odnosu na klip, prisutna je i bočna komponenta sile na cilindar od oko 2000 N, ekvivalentna pritisku od 200 kg. Tolika bočna sila prisutna je jedino tijekom ovog takta (ekspanzije).



Slika 4 – Treća faza ciklusa – sagorijavanje gorive smjese (ekspanzija)

¹ Otvaranje i zatvaranje ventila svojim okretanjem kontroliraju tzv. bregaste osovine – to su osovine koje su u presjeku kružne s izbočinom / izbočinama. Kako se osovina vrti oko svoje osi, izbočina nalijeće na polugu ventila te je pritišće, čime se ventil otvara. Dimenzije izbočine (tj. geometrija presjeka osovine) određuju koliko će dugo ventil biti otvoren, a precizno postavljen položaj izbočine određuje trenutak otvaranja ventila.

² Pri idealnim uvjetima, maseni omjer zraka i goriva u gorivoj smjesi iznosi 14.64:1 za benzin. Ako je taj omjer postignut, sav ugljik i vodik iz benzina može ući u kemijsku reakciju sa svim kisikom iz zraka, pri čemu nema štetnih ostataka. No, u netipičnim radnim uvjetima, odstupanja od ovog omjera su nužna (npr. veliko opterećenje motocikla, hladno paljenje), a mogu se kretati između 10:1 i 18:1. Također, idealni stehiometrijski omjer je funkcija korištenog goriva, a zadaća reguliranja tog omjera leži na rasplinjaču / karburatoru ili sustavu elektronskog ubrizgavanja.



Slika 5 – Četvrta faza ciklusa – ispuh izgaranih plinova

Što je klip bliže donjoj mrtvoj točki, sagorijevanje gorive smjese je slabije. I prije nego što klip stigne u tu točku, ispušni ventili se otvaraju. Na taj način užareni plinovi počinju izlaziti kroz ispušnu granu, čime se osigurava da već imaju inercijom utvrđen smjer kad se klip počne dizati te ih izgurivati van cilindra. Iako se dio snage izgubi zbog pada tlaka prije nego što klip završi svoje spuštanje, klip puno lakše istiskuje ostatak plinova čime gubi puno manje dobivene količine gibanja, stoga je na kraju učinkovitost veća. U ovoj posljednjoj fazi najveća naprezanja prolaze ispušni ventili. Užarenim plinovima ugrižani do usijanja pri više od 800°C udaraju u svoja sjedišta. Stoga su ventili građeni od visokokvalitetnih krom-nikal čelika koji su još i dodatno pojačani u sjedištima, a koji su jedini dovoljno čvrsti da ne dožive deformacije. Da se toplina³ ne bi zadržala u agregatu te prouzročila taljenje dijelova, svake sekunde kroz cilindar i glavu prođu 2 litre vode⁴.

Posljednji korak u završavanju ovog četverotaktnog ciklusa jest ponovno stizanje klipa u gornju mrtvu točku, nakon čega će čitav ciklus krenuti ispočetka. Pri tome na putu od svega 25 mm klip mora usporiti od 134 km/h (37.2 m/s) sve do potpunog zaustavljanja, da bi ga klipnjača ponovno ubrzala na istu brzinu u sklopu usisne faze. Proizlazi da je srednje ubrzanje na tome putu jednako:

$$\bar{a} = \frac{v_{MAX}}{2s} \quad (5)$$

što iznosi 27710 m/s². S obzirom na to da se to kružno gibanje radilice prenosi na klip preko klipnjače koja je postavljena pod različitim kutem u odnosu na njega u različitim točkama putanje, gibanje klipa nije apsolutno (ko)sinusoidalno. Ono je, stoga, superpozicija projekcije kružnog gibanja radilice te gibanja zbog promjene kuta klipnjače. Opišimo precizno matematički gibanje klipa. Sa Slike (6) se jasno očitavaju koordinate x i y točke A (spojišta klipnjače i radilice):

$$x = R \sin \theta \quad (6)$$

$$y = R \cos \theta \quad (7)$$

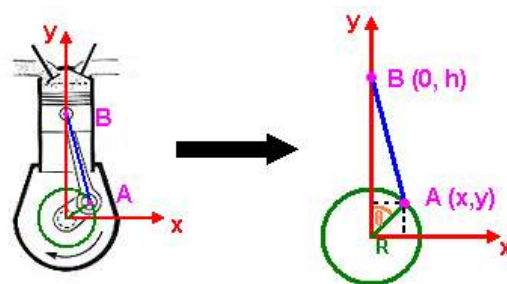
Također, lako se očitava koordinata h točke B (spojišta klipnjače i klipa):

$$h = \sqrt{L^2 - x^2} + y = \sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \theta} + R \cos \theta \quad (8)$$

pri čemu je L duljina dijela klipnjače između spojišta s klipom i radilicom, dok je R radijus kružne putanje spojišta klipnjače i radilice.

Funkcijom h je određen i put unutar kojega se klip može kretati – taj put se naziva hod klipa⁵. Ogromna inercija zamašnjaka ne dozvoljava nagle značajne promjene kruženja radilice, stoga kut θ možemo opisati lineranom funkcijom vremena:

$$\theta = \omega t \quad (9)$$



Slika 6 – Položaj klipa, klipnjače i radilice u danome trenutku

³ kolokvijalna upotreba termina, u smislu unutarnje energije

⁴ Alternativni načini hlađenja su zračno i uljno.

⁵ Dvije veličine koje, među ostalima, opisuju agregat su provrt i hod. Hod je, dakle, duljina puta unutar kojega se klip može kretati, dok provrt zapravo nije ništa drugo nego promjer cilindra. Pri tome je za agregat bitan međusoban odnos tih veličina. Ako je provrt veći od hoda, moći će se postići veći broj okretaja u minuti, a ako je manji, pri manjim okretajima će se razviti veći zakretni moment. Također, bitan je omjer duljine klipnjače i hoda. Povećanjem tog omjera (klipnjača / hod) smanjuje se ukupna brzina klipa, i suprotno – ta činjenica se odražava u jednadžbi (10). No, što je klipnjača duža, više se snage može osloboditi jer se tada na radilicu prenosi više sile tangencijalno na njenu vrtnju, čime se ponovno razvija veći zakretni moment.

Pri tome ω predstavlja kutnu brzinu radilice, a ona nam je poznata jer opisujemo agregat pri radu na 12000 okretaja u minuti. S obzirom da imamo zadan položaj klipa kao funkciju vremena, jednostavno je naći njegovu brzinu:

$$v = \frac{dh}{dt} = -R\omega \sin \theta - \frac{R^2 \omega \sin 2\theta}{2\sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \theta}} \quad (10)$$

Također, možemo izračunati i akceleraciju:

$$a = \frac{dv}{dt} = -R\omega^2 \cos \theta - \frac{R^2 \omega^2 \cos 2\theta}{\sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \theta}} - \frac{R^4 \omega^2 \sin^2 2\theta}{4\sqrt{(L^2 - R^2 \sin^2 \theta)^3}} \quad (11)$$

Uočavamo da prvi član u prethodnome izrazu dolazi kao projekcija kružnog gibanja radilice, dok preostala dva predstavljaju doprinos zbog položaja klipnjače.

Iz svih podataka koje smo dosad naveli možemo izračunati vrijednost R . Nađimo prvo srednju vrijednost iznosa funkcije akceleracije $a(t)$ dane izrazom (11) unutar četvrtine perioda kruženja radilice⁶. Za taj period koji je dan izrazom:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (12)$$

srednja vrijednost vrijednosti akceleracije dana je s:

$$\bar{a} = \frac{4}{T} \left| \int_0^{T/4} a(t) dt \right| = \frac{4}{T} \left| v(t) \right|_0^{T/4} = \frac{2\omega}{\pi} \left| v(\theta) \right|_0^{\pi/2} = \frac{2}{\pi} R\omega^2 \quad (13)$$

Kako nam je na raspolaganju već izračunata vrijednost $\bar{a}$, lako se dobije da R iznosi 27.5 mm. Uz ovakav R , za pripadne vrijednosti L od oko 13 cm akceleracija klipa dana izrazom (11) postiže maksimalnu vrijednost od nevjerojatnih 55450 m/s²! To znači da na klip mase 220 g djeluje inercijalna sila do 12200 N, ekvivalentna pritisku od 1.2 tone! Stoga klipovi moraju biti ekstremno izdržljivi – a to svakako jesu! Do te mjere da nakon što prosječnom brzinom od 80 km/h na svakih 10000 km prijeđenog puta motocikla prođu 2800 km unutar cilindra, na njima nisu uočljiva nikakva oštećenja, trošenja ili deformacije.



**Slika 7 – Četverocilindrični
četverotaktni agregat (1000 ccm)
natjecateljskog motocikla**

Pri prijenosu gibanja klipa na okretanje radilice nastaje 100 Nm zakretnog momenta. Prema jednadžbi za snagu:

$$P = M \omega$$

gdje M predstavlja vrijednost momenta sile, ispada da razvijena snaga iznosi 125.7 kW, tj. čitavih 170 konjskih snaga! Tih 170 "konja" izaziva savijanja čeličnih legura i u dijelovima motocikla daleko od agregata, a kao dodatan nusprodukt nastaju snažne vibracije čitave konstrukcije. Slijedeće na red dolazi primarni prijenos kojim snaga prelazi na kvačilo, no tu završava priča o sâmom agregatu.

Količina snage koju četverotaktni agregat može proizvesti je u krajnoj granici ograničena brzinom koju klip unutar cilindra može postići. Iako je čvrstoća njegovog materijala među rekordnima, ipak postoji granica opterećenja koje on može podnijeti, a sile koje djeluju na njega tijekom rada motora upravo iskušavaju te granice.

⁶ Računamo srednju vrijednost unutar jedne četvrtine perioda jer se prosječno ubrzanje koje smo već izračunali, a dano je izrazom (5), upravo odnosi na četvrtinu perioda kružnog gibanja radilice. Naime, jedno čitavo spuštanje ili dizanje klipa odvije se u pola tog perioda, a u prvoj polovici tog vremena klip mora prvo ubrzati do maksimalne brzine, tako da mu je dostupna samo četvrtina perioda za čisto ubrzavanje / usporavanje.

Među ostalim, opisali smo relativno netrivialnim računom gibanje klipa unutar četverotaktnog agregata motocikla. Ukazali smo na još poneke fizikalne procese koje čine dio njegovog rada te svojstva koja su dijelom njegove konstrukcije. A navedenim jednadžbama smo tek zastrugali po površini čitave kompleksnosti tih pojava. Kako pri izgradnji agregata treba savršeno proračunati dinamiku njegovih pokretnih dijelova, naprezanja njegove konstrukcije te sve ostale fizikalne i kemijske pojave koje se odvijaju u njemu, tako je potrebno pristupiti i konstrukciji cjelokupnog motocikla. Samo neki od problema koji se javljaju te ih treba uzeti u obzir su:

- gubici snage i maksimizacija korisnosti
- aerodinamička svojstva oblika motocikla
- otpornost svih dijelova motocikla na naprezanja (npr. torzijska čvrstoća vilice)
- način i odnos prijenosa snage / energije s jednog kraja motocikla na drugi
- prigušenje naglih trzaja proizvedenih vožnjom po neravnom terenu
- položaj centra mase, što je ključno u dinamici upravljanja motociklom
- ...

Ovime tek dajemo naslutiti proizvod kolike fizike i matematike jedan motocikl zapravo jest i koliko je on visokotehnološki stroj.



Slika 8 – Najpoznatiji superbike motocikli: Kawasaki ZX-10 R Ninja (gore lijevo), Suzuki GSX-R 1000 (gore desno), Yamaha YZF-R1 (dolje lijevo) i Honda CBR 1000 RR (dolje desno)

Literatura:

- [1] <http://www.motori.hr/cgi-bin/cl.rr?id=127> (Tomislav Duić; Opterećenja na 270 km/h)
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Four_stroke