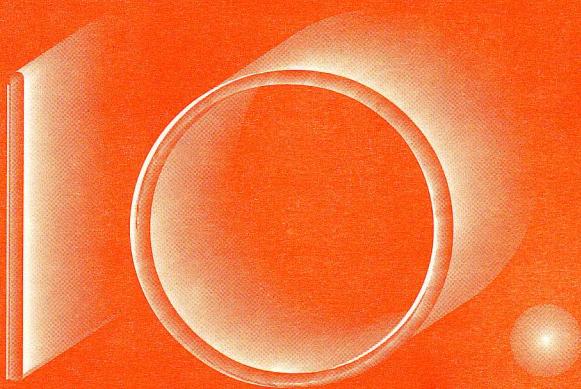


JK

Motorna vozila i motori Motor Vehicles and Engines



zbornik radova
proceedings



DESETI MEĐUNARODNI NAUČNI SIMPOZIJUM
THE TENTH INTERNATIONAL SCIENTIFIC SYMPOSIUM

5.-7. oktobar 1998, Kragujevac

PRIMENA TROHOIDNOG PROFILA NA ELEMENTIMA
ROTACIONIH MOTORA SUSAPPLICATION OF TROCHOIDAL PROFILE ON THE ELEMENTS OF
ROTATIONAL IC ENGINES*Mašinski fakultet, Kragujevac*

IZVOD U radu su razmotrene mogućnosti primene trohoidnog profila na elementima rotacionih motora SUS, kao i predlozi za konstrukcionalna poboljšanja koja bitno utiču na radne karakteristike motora. Dat je pregled konstrukcionih rešenja za različite vrste profila spregnutih elemenata (rotora i kućišta), a detaljnije su analizirane četiri varijante trohoidnih motora: (1) hipotrohoidni sa spoljašnjom obvojnicom, (2) hipotrohoidni sa unutrašnjom obvojnicom, (3) epitrohoidni sa spoljašnjom obvojnicom, i (4) epitrohoidni sa unutrašnjom obvojnicom. Kao ilustracija poslužile su izvedene konstrukcije Wankel motora i Renault dizel motora. Na osnovu jednačina za generisanje trohoidnih krivih razvijen je postupak za oblikovanje profila spoljašnjeg i unutrašnjeg dela radne grupe rotacionog motora. Sam postupak i dobijeni rezultati opisani su na kraju rada.

KLJUČNE REČI: rotacioni motor, trohoid, obvojica

ABSTRACT Possibilities of trochoidal profile application in the rotary IC engine, as well as, some constructive improvements which lead to significant increasing of exploitation properties of engine, are discussed in the paper. A short overview of development of IC engines with planet motion of the motion elements and design solutions for the elements in contact (rotor and housing) which have different profiles is initially presented. Four trochoidal variants are chosen for further detailed analysis: (1) hypotrochoidal with the external envelope, (2) hypotrochoidal with the internal envelope, (3) epytrocoidal with the external envelope, and (4) epytrocoidal with the internal envelope. As an illustration, design solutions of Wankel and Renault engines are described. Finally, a procedure for external and internal profiles of engines motion group forming based on equations for trochoidal curves generation is provided and obtained results are discussed.

KEY WORDS: rotational engine, trochoid, envelope

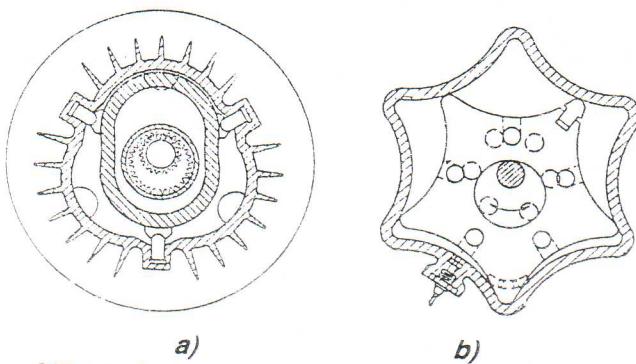
1. Uvod

Rotacioni motori razmatrani u ovom radu pripadaju grupi trohoidnih mašina, sa planetnim kretanjem radnih elemenata. Razvoj ovih motora nastao je iz težnje da se prevaziđe glavni nedostatak klasičnih klipnih motora, a to je translatorno kretanje klipa, koje je potrebno transformisati u rotaciono kretanje vratila. Zbog toga se pristupilo razvoju potpuno nove koncepcije motora prema kinematskoj šemi rotacionih mašina i pokazano je da rotacioni motori, u pogledu radnih karakteristika, imaju značajne prednosti u odnosu na klasične klipne motore.

Rotacioni motori (RM) imaju dve glavne komponente: rotor, sa spoljašnjim ozubljenjem i kućište, sa unutrašnjim ozubljenjem. U toku radnog procesa rotor izvodi planetno kretanje i zahvaljujući tome postiže se veliki kapacitet pri relativno malim dimenzijama motora. Osnovni uslovi za ostvarenje radnog procesa kod RM su sledeći: profili rotora i kućišta su u neprekidnom kontaktu (u određenom broju tačaka) i u toku njihovog relativnog kretanja potrebno je

da se menja veličina međuprostora. Ove osobine imaju krive iz familije trohoida i njihove obvojnice, tako da se trohoidni oblici mogu primeniti kod rotacionih motora. U slučaju kada se kao oblik kućišta izabere trohoida, rotor ima oblik unutrašnje obvojnice, a kada je rotor trohoidnog oblika, kućište dobija oblik spoljašnje obvojnice. Primena konjugovanih obvojница kod trohoidnih RM obezbeđuje maksimalni stepen kompresije, relativno male kontaktne napone i povoljnu geometriju u pogledu hermetičnosti.

Detaljnu studiju o trohoidama i njihovim obvojnicama dao je Wankel /1/. Razvoj RM i njihovu klasifikaciju opisali su i ruski naučnici na primeru brodskih motora /2/. Pri tome, konstruktivne šeme RM se ne razmatraju u strogom hronološkom redu, pošto su se konstrukcije, analogne po principu rada, pojavljivale u različito vreme, od kraja 19. veka do današnjih dana. Neke karakteristične šeme RM sa planetnim kretanjem radnih elemenata date su na slici 1, i to: a) motor F. Umpleby, epitrohoidni sa spoljašnjom obvojnicom; b) motor Wallinder i Skoog, epitrohoidni sa unutrašnjom obvojnicom.



Slika 1. Rotacioni motori sa planetnim kretanjem

Colbourne je definisao osam tipova konjugovanih obvojnica za svaku trohoide, pri čemu je broj grana obvojnica za jedan veći ili manji od broja grana trohoide [1]. Međutim, u literaturi se daju jednačine koje definisišu geometriju za samo dva tipa obvojnica. Pošto je pokazano da su ove jednačine značajne za analizu i konstrukciju planetnih rotacionih mašina, rad naučnika Shung-a i Penock-a [3] bio je usmeren na izvođenje parametarskih jednačina za devet tipova konjugovanih obvojnica i proučavanje geometrijskih karakteristika različitih tipova trohoida i njihovih obvojnica, kako bi se omogućio dalji razvoj trohoidnih mašina. Na osnovu svojih istraživanja oni su dali predlog za novi tip motora ili pumpe [3].

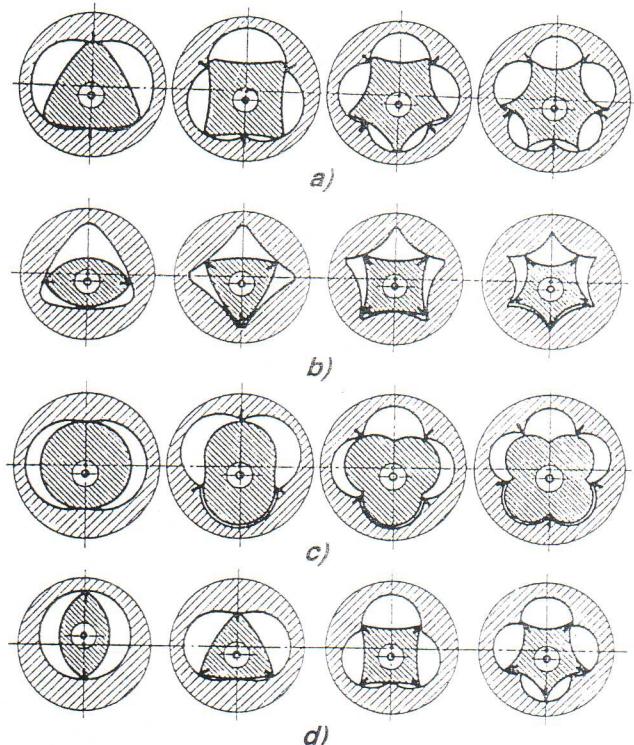
Primena RM je univerzalna, a njihove prednosti u odnosu na klasične motore su: kompaktna konstrukcija, mala težina i gabariti, velike brzine i mala inercija, malo trenje klizanja, velika pouzdanost i dugi vek. Koriste se za pogon pumpi, agregata i generatora različite snage i namene. Ugrađuju se na motociklima, automobilima, traktorima, čamcima, brodovima i dr. S obzirom na brojne prednosti trohoidnih oblika, da bi se ostvarila njihova šira primena potrebno je razraditi njihovu geometriju i konstrukciju. U tom smislu, jedan od ciljeva ovog rada je i doprinos boljem sagledavanju mogućnosti razvoja trohoidnog unutrašnjeg ozubljenja i njihove primene kod motora SUS.

U radu su najpre predstavljene različite varijante RM i njihove karakteristike. Zatim su opisani principi generisanja trohoide, zasnovani na teoremi o dvostrukoj realizaciji. Date su jednačine, na osnovu kojih je razvijen postupak za oblikovanje profila rotora i kućišta RM. Takođe su analizirane prednosti i nedostaci ovih motora u odnosu na druge vrste. Na kraju je dat završni komentar i izvedeni su zaključci.

2. Varijante rotacionih motora

Primena trohoidnih krivih za oblikovanje profila radnih elemenata RM omogućava da se variranjem geometrijskih parametara realizuje veliki broj različitih kombinacija parova rotora i kućišta. Neke karakteristične kombinacije trohoidnih profila kod

mašina sa planetnim kretanjem predstavljene su na slici 2.



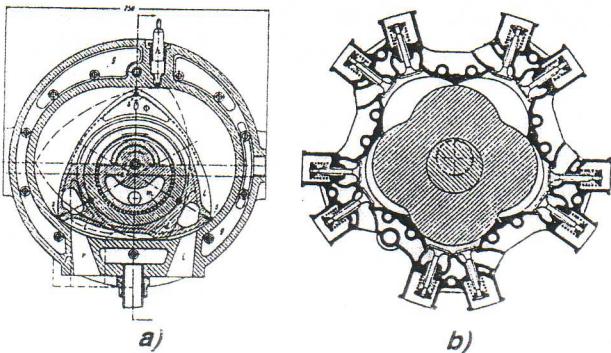
Slika 2. Kombinacije osnovnih profila trohoide

Postoje dve osnovne mogućnosti za realizaciju trohoidnih mašina: prva, kada je kućište sa profilom trohoide a rotor sa profilom unutrašnje obvojnice, i druga, kada je rotor sa profilom trohoide a kućište ima profil spoljašnje obvojnice. Prema tome, izvršena je klasifikacija trohoidnih mašina u četiri varijante [4]:

- (1) rotor sa profilom hipotrohoide (slika 2.a),
- (2) kućište sa profilom hipotrohoide (slika 2.b),
- (3) rotor sa profilom epitrohoide (slika 2.c), i
- (4) kućište sa profilom epitrohoide (slika 2.d).

Za analizu RM sa planetnim kretanjem uveden je faktor K , koji označava broj tačaka kontakta profila rotora i kućišta. Takođe, ovaj faktor karakteriše geometriju i kinematiku različitih varijanti trohoidnih motora [2], [4].

Trohoidni motori se principijelno mogu izvesti u tri varijante: sa obrtnim rotatom, sa obrtnim kućištem i sa obrtnim rotatom i kućištem (birotacioni). Najčešće se primenjuju motori sa nepokretnim epitrohoidnim kućištem i obrtnim rotatom u obliku unutrašnje obvojnice. Prednosti ovih motora u odnosu na ostale varijante su sledeće: jednostavnija konstrukcija, manji broj elemenata, veća relativna brzina rotora i vratila (njihovo obrtanje se odvija u istom smeru) i jednostavnije izvođenje zaptivanja. S obzirom na te prednosti i Wankel-ov motor je izведен prema navedenoj šemi (slika 3,a).



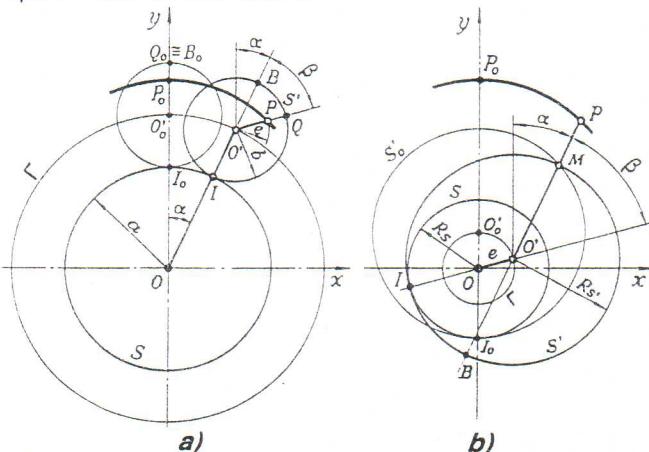
Slika 3. Presek Wankel-ovog (a) i Rambler-Renault-ovog dizel motora (b)

Jedan od načina da se usavrši rad RM bio je ostvarenje ciklusa sa samopaljenjem usled kompresije. S obzirom na to da kod RM postoje svi uslovi za realizaciju ovog procesa, mnoge poznate firme kao što su: Krupp, MAN, Daimler-Benz, Janmar Diesel, Rambler-Renault i dr., su razrađivale dizel varijantu RM. Međutim, primena visokog stepena kompresije, neophodnog za samopaljenje, dovodi do povećanja opterećenja na rotaciono-ekscentričnom mehanizmu i time potrebe za ojačanjem njegovih elemenata. Osim toga, potrebno je povećati i pouzdanost zaptivki, čime se dobija nešto složenija konstrukcija. Sve to principijelno ne menja konstrukciju postojeće benzinske varijante RM, što se može videti na slici 3,b.

3. Principi generisanja trohoidnog ozubljenja

Trohoida je kriva koja se dobija kao putanja tačke vezane za kružnicu, na određenom udaljenju od njenog središta, kada se ova kotrlja bez klizanja po nepokretnoj kružnici /4/. U zavisnosti od toga da li se kružnica kotrlja sa spoljašnje ili unutrašnje strane trohoida se dele na epitrohoide i hipotrohoide. Specijalni oblik trohoida je peritrohoida koju opisuje tačka vezana za kružnicu koja se kotrlja sa spoljašnje strane oko nepokretnе kružnice.

Na slici 4 je, kao primer, data konstrukcija epitrohoide na dva načina.



Slika 4. Generisanje epitrohoide (a) i peritrohoide (b)

Sve jednačine koje slede izvedene su za epitrohoide, a za hipotrohoide se mogu naći u literaturi /4/. Na osnovu prikazane konstrukcije na slici 4,a mogu da se izvedu jednačine trohoide u obliku:

$$x = (a + b) \sin \alpha + e \sin (\alpha + \beta) \\ y = (a + b) \cos \alpha + e \cos (\alpha + \beta) . \quad (1)$$

Veza između uglova α i β određena je faktorom K prema sledećoj relaciji:

$$\alpha + \beta = K \alpha . \quad (2)$$

Iz uslova kotrljanja bez klizanja dobija se i veza između poluprečnika kružnica, prema slici 4,a:

$$K = (a + b) / b . \quad (3)$$

U slučaju kada se epitrohoida posmatra kao peritrohoida (slika 4,b) poluprečnici kružnica se biraju tako da zadovolje sledeći odnos:

$$R_s / R_{s'} = (K - 1) / K . \quad (4)$$

Rastojanje između središta kružnica je ekscentritet e i jednak je udaljenju tačke koja opisuje epitrohoidu prema slici 4,a:

$$R_s - R_{s'} = e \quad (5)$$

tako da se prema (4) i (5) dobijaju veze:

$$R_s = (K - 1) e \\ R_{s'} = K e . \quad (6)$$

Ako se udaljenje $O\eta P$ tačke koja opisuje epitrohoidu prema slici 4,b označi sa R , dobijaju se jednačine :

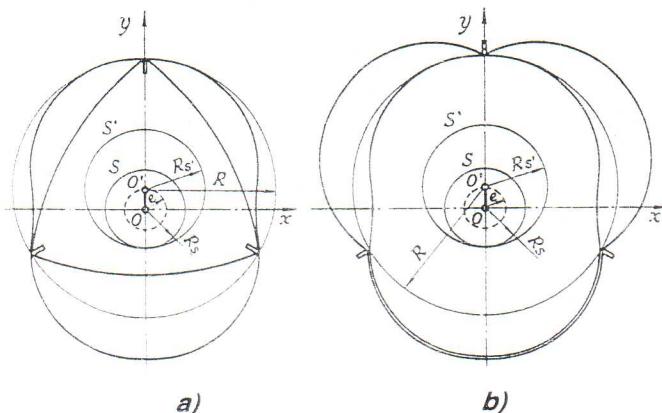
$$x = R \sin \alpha + e \sin K \alpha \\ y = R \cos \alpha + e \cos K \alpha . \quad (7)$$

Za analizu uticaja geometrijskih parametara na oblik i karakteristike trohoidnih profila uvodi se koeficijent trohoida u , koji se izražava kao odnos:

$$u = R / K e > 1 . \quad (8)$$

Kod trohoidnih mašina kinematska šema odgovara trohoidnom unutrašnjem ozubljenju, pri čemu su pokretna i nepokretna kružnica, uslovno uzeto, kinematske kružnice zupčanika. Trohoidni profil jednog od zupčanika je određen ako su poznate veličine e , R i K , a konjugovani profil je unutrašnja ili spoljašnja obvojnica. Za jedan isti trohoidni profil unutrašnja obvojnica se dobija kada se nepokretna kružnica veže

za stator a pokretna za rotor, a spoljašnja u obrnutom slučaju (Slika 5).



Slika 5. Profil unutrašnje (a) i spoljašnje obvojnice (b)

Uz pomoć dobijenih jednačina može dalje da se analizira teorijski profil, odredi potreban oblik i dimenzije rotora i izračunaju sve kinematske i dinamičke karakteristike RM.

4. Prednosti i nedostaci trohoidnih motora

Prednosti primene RM u odnosu na klasične klipne motore su sledeće: jednostavna konstrukcija i relativno niska cena, što se objašnjava malim brojem elemenata, kompaktna konstrukcija, mala težina i gabariti, bešumni rad i relativno velika snaga i brzina. Pored brojnih prednosti RM imaju i određene nedostatke /2/. Glavni nedostatak se odnosi na problem zaptivanja i to kako u pogledu efekta zaptivanja, tako i u pogledu pouzdanosti i trajnosti. Osim toga, ograničena je mogućnost povećanja brzine vrha rotora, a što je u vezi sa povećanjem habanja radikalnih zaptivki i površine kućišta. Rezultati ispitivanja su pokazali da ovo habanje praktično određuje radni vek RM. Smanjenje habanja se može postići izborom odgovarajućeg materijala, a takođe putem konstruktivnog usavršavanja zaptivki, kao i oblika profila rotora i kućišta.

Habanje radikalnih zaptivki nastaje kao posledica dinamičkih sila koje se javljaju na vrhovima rotora. Pri većim vrednostima brzine i ubrzanja vrha rotora dolazi do rasta inercione sile zaptivne pločice, iako je njena masa veoma mala. Pod dejstvom te sile pločica se pritiska uz površinu kućišta motora što dovodi do habanja i zaptivne pločice i površine kućišta. Pokazano je da su vrednosti brzine i ubrzanja vrha rotora veće pri većim vrednostima koeficijenta trohoide, pa se prema tome preporučuje izbor manjih vrednosti ovog koeficijenta.

Analiza sila na vrhu rotora ranije je vršena uz pretpostavku da se vratilo motora obrće konstantnom brzinom, a takođe nije uzimana u obzir radikalna komponenta ubrzanja vrha rotora. U praksi, međutim, ova pretpostavka ne važi pošto su kolebanja brzine

vratila uvek prisutna. U cilju dobijanja što boljih rezultata poslednjih godina se u teorijsku analizu sila na vrhu rotora uključuje efekat ciklične fluktuacije brzine vratila /5/, /6/. Tako se u radu /5/ analiza ubrzanja vrha rotora vrši kada se brzina radilice aproksimira opštom harmonijskom funkcijom, a u radu /6/ cikloidnom funkcijom. Buduća istraživanja bi mogla da se vrše uz izbor neke druge funkcije za aproksimaciju kolebanja brzine radilice i da se ispituje efekat različitih funkcija.

5. Zaključak

U radu su predstavljeni osnovni principi generisanja trohoidnih profila, kao i mogućnosti njihove primene na elementima RM. Analizom karakteristika različitih varijanti trohoidnih planetnih parova dolazi se do zaključka da je za motore, s obzirom na specifičnosti njihovog radnog procesa, najbolje izabrati nepokretno epitrohoidalno kućište sa obrtnim rotorom čiji je profil izведен u obliku unutrašnje obvojnice. Pri tome, da bi se očuvala jednostavnost konstrukcije preporučuju manje vrednosti faktora K. Stepen kompresije je veći vri većim vrednostima koeficijenta trohoide. Međutim, sa njegovim rastom rastu i brzina i ubrzanje vrha rotora, što dovodi do intenzivnog habanja zaptivki i površine kućišta. Ovo habanje se smatra glavnim nedostatkom RM tako da je od velikog značaja proučavanje dinamičkih ponašanja u njihovom radu.

6. Literatura

- /1/ Colbourne J. R. : The Geometry of Trochoid Envelopes and Their Application in Rotary Pumps, *Mechanism and Machine Theory*, 1974.
- /2/ Akatov E. I., Bologov V. S., Gorbatij V. K., Jačevski G. L.: Rotornie dvigateli, Sudostrojenie, Leningrad, 1967.
- /3/ Shung J. B., Pennock G. R. : Geometry for Trochoidal-type Machines with Conjugate Envelopes, *Mechanism and Machine Theory*, 1994.
- /4/ Giacosa D. : Motori endotermici, IGIS, Milano, 1972.
- /5/ Pennock G. R., Beard J. E. : A Dynamic Force Analysis of the Apex Seals in a Wankel Rotary Compressor Including the Influence of a Cyclic Fluctuations in the Crankshaft Speed, *Proc. 9th IFTOMM Congress*, Milan, Italy, Vol. 4, 1995.
- /6/ Pennock G. R., Beard J. E. : Force Analysis of the Apex Seals in the Wankel Rotary Compressor Including the Influence of Fluctuations in the Crankshaft Speed, *Mechanism and Machine Theory*, 1997.