

Luko Milić *

Vedran Batoš **

ISSN 0469 - 6255
(99 - 109)

JEDAN PRISTUP ANALIZI SILA KOJE DJELUJU NA STAPNI MEHANIZAM DIZELSKIH MOTORA

UDK 621.436-242:531.22

Izvorni znanstveni rad

Original scientific paper

Sažetak

Analiza sila stapnog mehanizma pri konstrukciji dizelskih motora svakako je od prvorazrednog značenja za uspješno rješavanje cijelog niza elemenata i za kvalitetan rad, kako motora tako i stroja koji motor pogoni.

Uradu se analiziraju sile koje djeluju na stapni mehanizam s posebnom pozornošću na sile od tlaka plinova i sile inercije. Uporabom kompjutera u analizi moguće je uzeti u obzir utjecaj velikog broja parametara i izbor njihovih optimalnih vrijednosti, što rezultira pouzdanom konstrukcijom, mirnim i dugotrajnim radom motora.

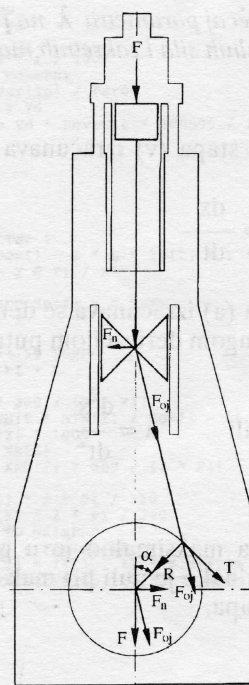
Ključne riječi: stapni mehanizam, sile, analiza, kompjutor

Kinematika stapnog mehanizma

Osnovni parametar gibanja stapnog mehanizma je kut α koji formira os trenutačnog položaja koljena koljenaste osovine i os cilindra. Svi kinematički i dinamički parametri analiziraju se u odnosu prema promjeni tog kuta.

Važan parametar u analizi kinematike i dinamike stapnog mehanizma je parametar λ . Taj je parametar jednak omjeru polumjera koljena koljenaste osovine (r) i dužine ojnice (L). Utjecaj raznih vrijednosti parametra λ prikazan je dijagramima na slici 2. Dijagrami prikazuju promjenu tangencijalnih sila uzrokovanih tlakom plinova pri $p = \text{konst.}$, ovisno o promjeni vrijednosti λ , i to kako slijedi: 0,2; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 i 0,99.

Iz dijagrama na slici 2. vidi se kakav je utjecaj parametra λ : pri malim vrijednostima od 0,2 do 0,5 promjena tangencijalnih sila relativno je pravilna, ali pri većim vrijednostima nepravilnost je sve više izražena. Pri ma-



Slika 1. Stapni mehanizam

njim vrijednostima λ , manja je komponenta F_n okomita na kliznu površinu klipa ili klizne stope. Dakle, može se zaključiti, vrijednosti parametra λ ne smiju biti veće od 0,5, a preporučuju se granice od 0,2 do 0,3.

Položaj stapa u cilindru motora određen je formulom:

$$x = r(1 - \cos \alpha) + L(1 - \cos \beta) \quad (1.)$$

Veza između kutova α i β određena je relacijom:

$$\sin \beta = \lambda \sin \alpha$$

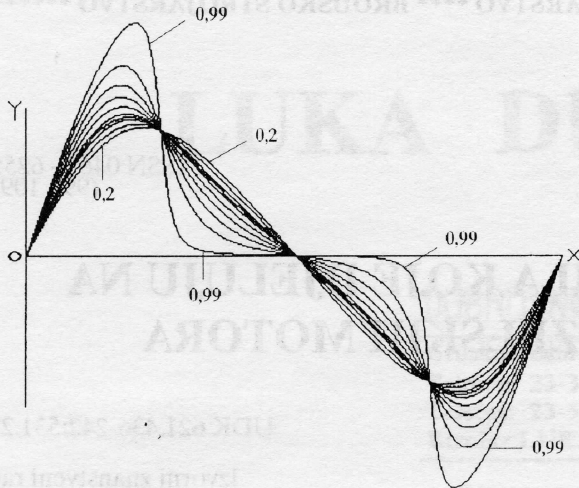
ili:

$$\beta = \arcsin(\lambda \sin \alpha) \quad (2.)$$

$$\lambda = r/L$$

* Mr. Luko Milić
Pomorski fakultet Dubrovnik

** Mr. Vedran Batoš
Pomorski fakultet Dubrovnik
Dubrovnik



Slika 2. Utjecaj parametra λ na promjene tangencijalnih sila i zakretnih momenata

Brzina gibanja stapa (v) izračunava se derivacijom puta po vremenu:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3.)$$

Ubrzanje stapa (a) izračunava se derivacijom brzine po vremenu ili drugom derivacijom puta po vremenu:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad \text{ili} \quad a = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (4.)$$

Ubrzanje stapa maksimalno je u gornjoj i donjoj mrtvoj točki, a jednako je nuli pri maksimalnim vrijednostima brzine stapa.

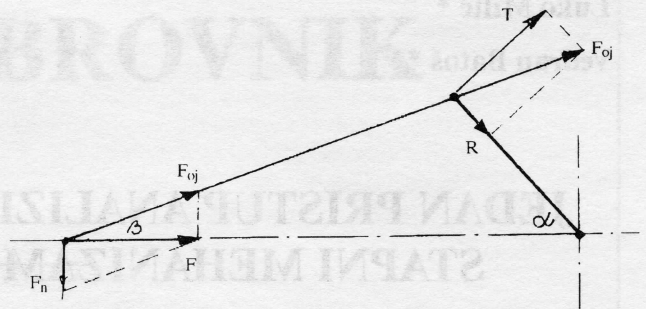
Sile i momenti koji djeluju na stapni mehanizam

Na stapni mehanizam dizelskih motora djeluju ove sile: tlak plinova na stap F_p , inercija pokretnih dijelova F_i , gravitacija F_g , trenje F_t i otpor atmosfere u kojoj se giba stap F_o .

Sila trenja obuhvaća se mehaničkim stupnjem iskoristivosti η_m . Sila tlaka plinova na stap i sila inercije mijenjaju se tijekom radnog procesa a sile okružujuće atmosfere i gravitacija uzimaju se kao nepromjenjene veličine.

Rezultanta tih sila koje djeluju na stapni mehanizam je:

$$F_R = F_p \pm F_i + F_g - F_o \quad (5.)$$



Slika 3. Sile stapnog mehanizma

Rezultanta sila djeluje u osi cilindra, a mijenja se za vrijeme radnog procesa ovisno o promjeni sila tlaka plinova na stap i sile tromosti pokretnih msasa.

Ta sila rastavlja se na komponente u pravcu osi ojnice (F_{oj}) i okomitu komponentu (F_n) na kliznu površinu.

Okomita sila je $F_n = F_R \tan \beta$, a sila u pravcu trenutnog položaja ojnice je $F_{oj} = F_R / \cos \beta$.

Sila u ojnici (F_{oj}) rastavlja se na tangencijalnu (T) i radijalnu (R) komponentu.

$$R = F_R \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad (6.)$$

$$T = F_R \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad (7.)$$

Tangencijalna sila djeluje tangencijalno na kružnicu po kojoj se okreće osnac koljnaste osovine i formira zakretni moment motora:

$$M = T r$$

Sila (T) i zakretni moment (M) mijenjaju se po istom zakonu koji je definiran trigonometrijskim izrazom:

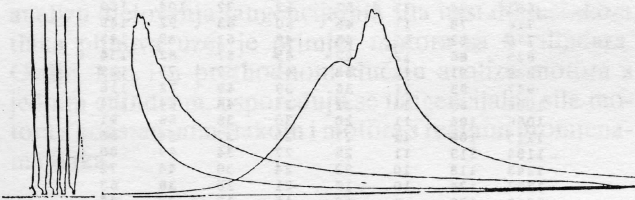
$$\frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad (8.)$$

Okomita sila (N) formira moment prevrtanja $M_p = -T r$. Taj je moment reakcija na zakretni moment (M), ima jednaku veličinu kao i zakretni moment, ali suprotan smjer djelovanja. Moment prevrtanja nastoji prevrnuti motor.

Sila tlaka plinova na stap

Indikatorski dijagram stvarnog procesa na slici 4. predočava grafički zakon promjene tlaka plinova u cilindru motora. Sila tlaka plinova na stap (F_p) određena je površinom stapa i tlakom plinova:

$$F_p = \frac{D^2 \pi}{4} \rho_i \quad (9.)$$



Slika 4. Indikatorski dijagram snimljen na brodu

Tablica 1. Vrijednosti sila uzrokovanih tlakom plinova

Xp... (mm)		Xk... (stup.)		Xkb... (stup.)		F... (kN)				
Xp	Xk	Xkb	Fp1	Fp2	Fp3	Fp4	Fp5			
0	0	0	329	355	449	650	1055			
20	12	2	430	464	586	849	1378			
40	17	3	448	484	611	885	1437			
59	20	4	421	454	574	831	1349			
118	29	6	293	316	399	578	938			
178	36	7	210	227	287	415	674			
237	42	8	164	177	224	325	527			
296	47	8	137	148	187	271	439			
355	52	9	119	128	162	234	381			
414	57	10	91	98	124	180	293			
474	61	10	82	88	112	162	263			
533	65	10	73	79	99	144	234			
592	70	11	64	69	87	126	205			
651	74	11	54	59	74	108	175			
710	78	11	47	51	64	93	152			
770	82	11	45	49	62	90	146			
829	86	12	42	45	57	83	134			
888	91	12	38	41	52	75	123			
947	95	11	36	39	49	72	117			
1006	99	11	32	35	44	65	105			
1066	104	11	29	31	39	57	93			
1125	108	11	29	31	39	57	93			
1184	113	11	27	29	37	54	87			
1243	118	10	25	27	34	50	82			
1302	124	10	23	25	32	46	76			
1362	130	9	18	19	24	36	58			
1421	137	8	18	19	24	36	58			
1480	145	7	14	15	19	28	46			
1539	155	5	9	9	12	18	29			
1600	180	0	0	0	0	0	0			
1539	205	-5	0	0	1	1	2			
1480	215	-7	0	0	1	1	2			
1421	223	-8	0	0	1	1	2			
1362	230	-9	1	1	2	3	5			
1302	236	-10	1	1	2	3	5			
1243	242	-10	3	3	4	7	11			
1184	247	-11	3	3	4	7	11			
1125	252	-11	5	5	7	10	17			
1066	256	-11	5	5	7	10	17			
1006	261	-11	5	5	7	10	17			
947	265	-11	7	7	9	14	23			
888	269	-12	7	7	9	14	23			
829	274	-12	9	9	12	18	29			
770	278	-11	9	9	12	18	29			
710	282	-11	10	11	14	21	35			
651	286	-11	12	13	17	25	41			
592	290	-10	18	19	24	36	58			
533	295	-10	21	23	29	43	70			
474	299	-10	25	27	34	50	82			
414	303	-10	27	29	37	54	87			
355	308	-9	36	39	49	72	117			
296	313	-8	45	49	62	90	146			
237	318	-8	54	59	74	108	175			
178	324	-7	73	79	99	144	234			
118	331	-6	109	118	149	216	351			
59	340	-4	183	197	249	361	586			
39	344	-3	229	247	312	451	733			
19	349	-2	265	286	362	524	850			
0	360	-0	329	355	449	650	1055			

Prema tome, ta se sila mijenja po zakonu mijenjanja tlaka plinova u cilindru motora, koji se mijenja periodički kroz 360° okretaja koljenaste osovine, pri dvotaktnim motorima, a kroz 720° okretanja pri četverotaktnim motorima.

Za analizu mijenjanja sila uzrokovanih tlakom plinova uzete su diskretne numeričke vrijednosti tlaka plinova u funkciji kuta zakreta koljenaste osovine α , odnosno položaja stapa x . Diskretne vrijednosti tlaka plinova za proračun sila i njihov grafički prikaz u dijagramima na slici 5. odgovaraju prosječnim vrijednostima tlaka: 10,64 bar, 12,3 bar, 14,35 bar, 16,95 bar i 18,6 bar, zatim promjeru stapa od 500 mm i hodu stapa od 1 600 mm.

Algoritam za proračun pomaka stapa i sila tlaka plinova u funkciji kuta α

```

READ Xd, Yd
DO WHILE Xd <> 999 AND Yd <> 999
  Xul(I) = Xd
  IF Xd > 50 THEN
    Xd = 100 - Xd
  END IF
  Xp(I) = Xd * 4 * r / 100
  FOR Ip = 1 TO NdimPsr
    Yd = Yd * Psr(Ip) / Psr0
    Yul(Ip, I) = Yd
    Fp(Ip, I) = Yd * Povrcil * 100000 / 1000
  NEXT

  READ Xd, Yd
  I = I + 1
LOOP
IK = I - 1
FOR I = 0 TO IK STEP 1
  X = (-1 + SQR(1 - 2 * L * Xp(I) / r + 2 * L + L ^ 2)) / L
  X = SQR(1 - X ^ 2) / X
  X = ATN(X)
  IF X <= 0 AND Xp(I) > 0 THEN
    X = PI + X
  END IF
  IF Xul(I) >= 50 THEN
    X = 2 * PI - X
  END IF
  Xk(I) = X * 360 / (2 * PI)
  Xkb(I) = ATN(L * SIN(X) / SQR(1 - (L * SIN(X) ^ 2)))
  Xp(I) = Xp(I) * 1000
  Xt(1, I) = Xk(I)
  Xt(2, I) = Xkb(I) * 360 / (2 * PI)

  Apom = Xk(I) * 2 * PI / 360
  Bpom = Xkb(I) * 2 * PI / 360
  FOR Ip = 1 TO NdimPsr
    Yt(Ip, I) = Fp(Ip, I)
    Ytt(Ip, I) = Yt(Ip, I) * SIN(Apom + Bpom) / COS(Bpom)
    Ytr(Ip, I) = Yt(Ip, I) * COS(Apom + Bpom) / COS(Bpom)
  NEXT
NEXT

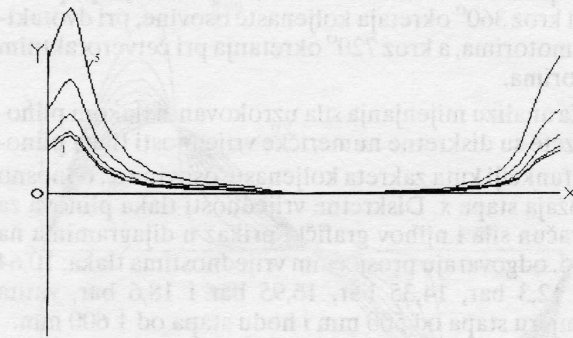
```

Program je napravljen u QBASIC-u tako da omogućuje uzimanje različitog broja diskretnih vrijednosti iz indikatorskog dijagrama, što je posebno pogodno za obavljanje komparacije između sila raznih cilindara ili u jednom te istom cilindru, ali u raznim vremenima. Ovaj je pristup također pogodan za dobivanje potpunijeg uvida u pojedine dijelove radnog procesa, kao što je uštrcavanje i izgaranje goriva. Naime, proces izgaranja događa se u položaju stapa blizu GMT, što znači da stap prelazi vrlo male putove, a u isto doba događaju se najvažniji dijelovi radnog procesa. Uzimanje više diskretnih vrijednosti iz dijagrama omogućuje potpuniji uvid u taj dio radnog procesa.

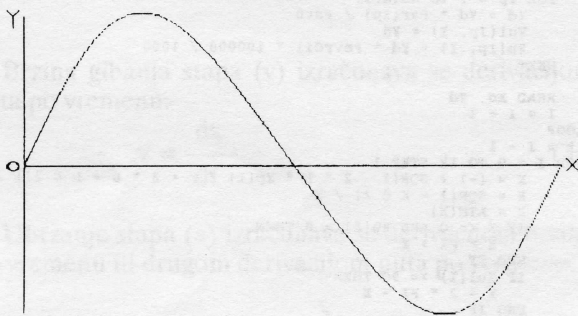
Stupac F_{p1} daje diskretne vrijednosti sila u motoru s prosječnim tlakom plinova od 10,64 bara, F_{p2} s prosječnim tlakom od 12,3 bara, F_{p3} s prosječnim tlakom od 14,4 bara, F_{p4} s prosječnim tlakom od 16,5 i F_{p5} s prosječnim tlakom od 18,5 bara.

Tablica 2. Vrijednosti tangencijalnih sila nastalih zbog tlaka plinova

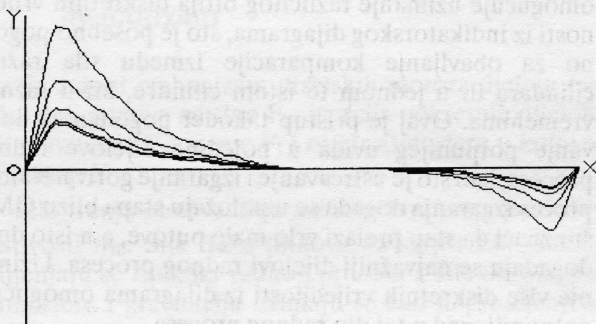
Xp... (mm)	Xk... (stup.)	Xkb... (stup.)	Fp1T	Fp2T	Fp3T	Fp4T	Fp5T
0	0	0	0	0	0	0	0
20	12	2	88	95	120	173	282
40	17	3	129	139	176	255	414
59	20	4	146	158	199	289	469
118	29	6	142	153	193	280	455
178	36	7	123	133	168	243	394
237	42	8	109	118	149	216	351
296	47	8	100	108	137	198	322
355	52	9	93	101	127	185	300
414	57	10	76	82	104	151	245
474	61	10	72	77	98	142	231
533	65	10	66	72	90	131	213
592	70	11	60	64	82	118	192
651	74	11	52	57	72	104	169
710	78	11	46	50	63	92	149
770	82	11	45	48	61	89	145
829	86	12	42	45	57	82	134
888	91	12	38	41	52	75	123
947	95	11	36	39	49	72	116
1006	99	11	32	35	44	64	104
1066	104	11	28	30	38	56	91
1125	108	11	27	29	37	54	88
1184	113	11	25	27	34	49	80
1243	118	10	22	24	30	44	72
1302	124	10	19	21	26	38	63
1362	130	9	13	15	19	27	44
1421	137	8	12	13	17	24	40
1480	145	7	8	9	11	16	27
1539	155	5	3	4	5	7	12
1600	180	0	0	0	0	0	0
1539	205	-5	-1	-1	-1	-1	-2
1480	215	-7	-1	-1	-1	-2	-2
1421	223	-8	-1	-1	-1	-2	-3
1362	230	-9	-2	-2	-2	-3	-5
1302	236	-10	-2	-2	-3	-3	-5
1243	242	-10	-4	-4	-5	-7	-11
1184	247	-11	-4	-4	-5	-7	-11
1125	252	-11	-6	-6	-8	-11	-17
1066	256	-11	-6	-6	-8	-11	-18
1006	261	-11	-6	-6	-8	-11	-18
947	265	-11	-8	-8	-10	-15	-24
888	269	-12	-8	-8	-10	-15	-24
829	274	-12	-10	-10	-13	-19	-30
770	278	-11	-10	-10	-13	-18	-30
710	282	-11	-11	-12	-15	-22	-35
651	286	-11	-13	-14	-17	-25	-40
592	290	-11	-18	-19	-24	-34	-56
533	295	-10	-21	-22	-28	-40	-65
474	299	-10	-23	-25	-31	-45	-72
414	303	-10	-23	-25	-32	-46	-74
355	308	-9	-29	-32	-40	-57	-93
296	313	-8	-34	-37	-46	-67	-108
237	318	-8	-37	-40	-50	-73	-118
178	324	-7	-43	-47	-59	-85	-138
118	331	-6	-54	-58	-73	-106	-171
59	340	-4	-64	-69	-87	-126	-205
39	344	-3	-66	-71	-89	-129	-209
19	349	-2	-53	-57	-72	-104	-169
0	360	-0	-1	-1	-1	-1	-1



Slika 5. Dijagrami promjene sila uzrokovanih tlakom plinova koji djeluju na stapni mehanizam



Slika 6. Dijagram promjene tangencijalnih sila motora s jednim cilindrom, $\lambda = 0,2$ i $F_p = konst.$



Slika 7. Dijagram promjene tangencijalnih sila motora s jednim cilindrom, $\lambda = 0,2$ i stvarnom promjenom sila F_p u cilindru motora

Dijagrami na slici 5. snimljeni su prema diskretnim vrijednostima uzetim iz snimljenog indikatorskog dijagrama dvotaktnog dizelskog motora.

Tangencijalna sila na koljenastoj osovini T_1 uzrokovana tlakom plinova izračunava se prema formuli:

$$T_1 = F_p \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad (10.)$$

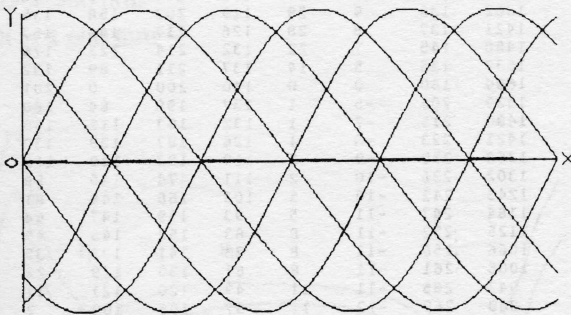
Za usporedbu na slici 6. dan je dijagram promjene tangencijalnih sila pri jednocilindričnom motoru za koji je uzeta vrijednost $\lambda = 0,2$ i F_p s konstantnom vrijednošću, i na slici 7. $\lambda = 0,2$, a sila F_p se mijenja kako je prikazano na slici 5. (krivulja od 1 do 5).

Dijagram na slici 6. predložava zakonitost mijenjanja tangencijalnih sila i zakretnog momenta u jednocilindričnom motoru zbog djelovanja tlaka plinova kad bi u cilindru za vrijeme radnog procesa tlak plinova bio konstantan. U tom slučaju, pri pravilnom izboru pa-

rametra λ , sile i zakretni momenti mijenjali bi se približno prema zakonu sinusoide. Međutim, kako se vidi iz dijagrama na slici 7., stvarna promjena tangencijalnih sila, a prema tome i zakretnih momenata pri realnim procesima u dizelskom motoru, pri kojima se tlak plinova stalno mijenja u ovisnosti o kutu λ , odnosno o promjeni radnog procesa, nije ni približno pravilna. Dapače, ta nepravilnost je prisutna bez obzira na vrijednosti prosječnog tlaka.

Tablica 2. daje brojčane vrijednosti tangencijalnih sila uzrokovanih tlakom plinova za pet motora s raznim vrijednostima prosječnog tlaka plinova, i to: 10,64; 12,3; 14,4; 16,5 i 18,5 bara.

S obzirom na to da se motori grade s više cilindara za analizu djelovanja tangencijalnih sila nastalih učinkom tlaka plinova uzet je primjer motora sa 6 cilindara. Ovdje, kao i u prethodnom slučaju analize motora s jednim cilindrom, uspoređuju se tangencijalne sile motora s konstantnim tlakom i motora s realnim promjenama tlaka.

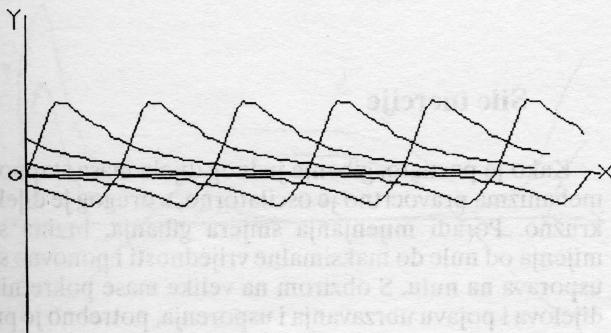


Slika 8. Dijagram promjene tangencijalnih sila i njihova rezultanta u motoru sa 6 cilindara

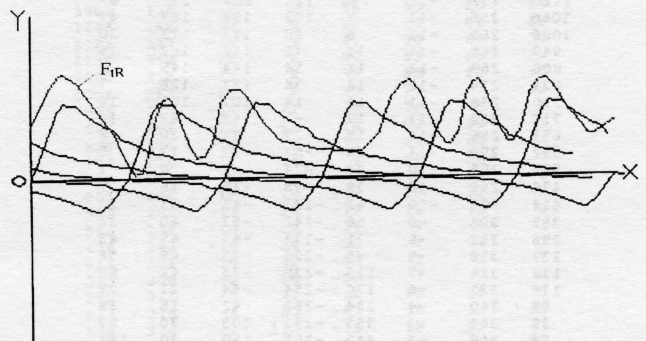
Tablica 3. Vrijednost tangencijalnih sila i njihova rezultanta sastala djelovanjem od tlaka plinova u šestocilindarskom motoru

Xp... (mm) , Xk... (stup.) , Xkb... (stup.) , F... (kN)										
Xp	Xk	Xkb	T1	T2	T3	T4	T5	T6	Tr	
0	0	0	0	118	56	13	-6	-20	164	
20	12	2	136	112	50	5	-9	-27	270	
40	17	3	200	103	44	0	-9	-32	308	
59	20	4	227	93	43	-1	-9	-35	319	
118	29	6	220	81	39	-1	-12	-36	293	
178	36	7	191	72	34	-1	-12	-45	241	
237	42	8	170	70	30	-3	-15	-53	202	
296	47	8	155	65	21	-3	-15	-57	169	
355	52	9	145	59	19	-5	-17	-67	136	
414	57	10	118	56	13	-6	-20	-83	81	
474	61	10	112	50	5	-9	-27	-99	34	
533	65	10	103	44	0	-9	-32	-101	7	
592	70	11	93	43	-1	-9	-35	-82	10	
651	74	11	81	39	-1	-12	-36	-1	73	
710	78	11	72	34	-1	-12	-45	136	186	
770	82	11	70	30	-3	-15	-53	200	233	
829	86	12	65	21	-3	-15	-57	277	241	
888	91	12	59	19	-5	-17	-67	220	211	
947	95	11	56	13	-6	-20	-83	191	153	
1006	99	11	50	5	-9	-27	-99	170	93	
1066	104	11	44	0	-9	-32	-101	155	59	
1125	108	11	43	-1	-9	-35	-82	145	63	
1184	113	11	39	-1	-12	-36	-1	118	109	
1243	118	10	34	-1	-12	-45	136	112	226	
1302	124	10	30	-3	-15	-53	200	103	266	
1362	130	9	21	-3	-15	-57	227	93	269	
1421	137	8	19	-5	-17	-67	220	81	233	
1480	145	7	13	-6	-20	-83	191	72	169	
1539	155	5	5	-9	-27	-99	170	70	112	
1600	180	0	0	-9	-32	-101	155	65	81	
1539	205	-5	-1	-9	-35	-82	145	59	79	
1480	215	-7	-1	-12	-36	-1	118	56	127	
1421	223	-8	-1	-12	-45	136	112	50	242	
1362	230	-9	-3	-15	-53	200	103	44	279	
1302	236	-10	-3	-15	-57	227	93	43	290	
1243	242	-10	-5	-17	-67	220	81	39	253	
1184	247	-11	-6	-20	-83	191	72	34	191	
1125	252	-11	-9	-27	-99	170	70	30	137	
1066	256	-11	-9	-32	-101	155	65	21	102	
1006	261	-11	-9	-35	-82	145	59	19	99	
947	265	-11	-12	-36	-1	118	56	13	141	
888	269	-12	-12	-45	136	112	50	5	249	
829	274	-12	-15	-53	200	103	44	0	282	
770	278	-11	-15	-57	227	93	43	-1	292	
710	282	-11	-17	-67	220	81	39	-1	257	
651	286	-11	-20	-83	191	72	34	-1	195	
592	290	-11	-27	-99	170	70	30	-3	143	
533	295	-10	-32	-101	155	65	21	-3	108	
474	299	-10	-35	-82	145	59	19	-5	103	
414	303	-10	-36	-1	118	56	13	-6	147	
355	308	-9	-45	136	112	50	5	-9	252	
296	313	-8	-53	200	103	44	0	-9	288	
237	318	-8	-57	227	93	43	-1	-9	297	
178	324	-7	-67	220	81	39	-1	-12	262	
118	331	-6	-83	191	72	34	-1	-12	203	
59	340	-4	-99	170	70	30	-3	-15	155	
39	344	-3	-101	155	65	21	-3	-15	125	
19	349	-2	-82	145	59	19	-5	-17	121	
0	360	-0	-1	118	56	13	-6	-20	164	

Slika 8. prikazuje dijagram promjene tangencijalnih sila motora sa 6 cilindara, i to s konstantnim tlakom u cilindru. S obzirom na to da se analizira rad dvotaktnih motora, pomak po fazi, između krivulja pojedinačnih cilindara prema redosljedu paljenja, jest 60°. Tangencijalne sile tog motora bile bi potpuno uravnotežive.



Slika 9. Dijagram promjene tangencijalnih sila uzrokovanih tlakom plinova u motoru sa 6 cilindara



Slika 10. Tangencijalne sile motora sa 6 cilindara i njihova rezultanta F_{1R}

Medutim, promjene tangencijalnih sila nastalih djelovanjem tlaka plinova u stvarnih motora događaju se prema krivuljama prikazanim na slici 9. Dijagrami na slici 9. i vrijednosti u tablici 3. proračunate su za motor sa 6 cilindara, s pomakom kuta od 60° po fazi, $\lambda = 0,2$, kod stapa 1,6 m i prosječni tlak 16,5 bara. Iz tog dijagrama i tablice 3. može se uočiti znatna neuravnoteženost tangencijalnih sila koje nastaju djelovanjem tlaka plinova.

Gornja tvrdnja prikazana je na slici 10. krivuljom F_{tR} , koja grafički predočava promjenu rezultante tangencijalnih sila u motoru sa 6 cilindara, za razliku od rezultante na slici 8., koja se poklapa s osi x i koja je u svakom času potpuno uravnotežena.

Tablica 4.a Utjecaj mase na rezultantu i njezine komponente

r/l = .2							
m = 6000 (kg)							
Psr = 16.5 (bar)							
Fg = 58.8600 (kN)							
Fo = 19.6344 (kN)							
Xp...(mm) , Xk...(stup.) , Xkb...(stup.) , F...(kN)							
Xp	Xk	Xkb	Fp	Fi	Fr	FrT	FrR

0	0	0	511	-310	241	0	241
20	12	2	667	-300	407	83	398
40	17	3	696	-291	445	128	426
59	20	4	653	-282	411	143	386
118	29	6	454	-254	240	116	210
178	36	7	326	-226	140	82	113
237	42	8	255	-200	95	63	71
296	47	8	213	-173	79	58	54
355	52	9	184	-148	76	60	47
414	57	10	142	-123	59	49	32
474	61	10	127	-98	69	60	33
533	65	10	113	-74	79	72	32
592	70	11	99	-51	88	82	30
651	74	11	85	-29	96	92	26
710	78	11	73	-7	106	104	21
770	82	11	71	14	164	162	21
829	86	12	65	34	178	178	10
888	91	12	59	54	192	192	3
947	95	11	56	72	207	207	19
1006	99	11	51	90	219	216	37
1066	104	11	45	107	230	224	56
1125	108	11	45	122	246	233	79
1184	113	11	42	137	258	237	104
1243	118	10	39	151	269	236	130
1302	124	10	36	163	278	230	157
1362	130	9	28	174	281	215	182
1421	137	8	28	184	291	199	214
1480	145	7	22	193	294	169	241
1539	155	5	14	200	293	123	266
1600	180	0	0	206	284	0	285
1539	205	-5	1	200	280	119	255
1480	215	-7	1	193	273	158	224
1421	223	-8	1	184	264	181	194
1362	230	-9	2	174	256	196	166
1302	236	-10	2	163	244	203	138
1243	242	-10	5	151	235	207	113
1184	247	-11	5	137	221	204	89
1125	252	-11	8	122	209	199	67
1066	256	-11	8	107	194	189	47
1006	261	-11	8	90	177	175	30
947	265	-11	11	72	162	162	15
888	269	-12	11	54	144	145	2
829	274	-12	14	34	127	128	7
770	278	-11	14	14	107	107	14
710	282	-11	17	-7	49	49	10
651	286	-11	19	-29	31	30	8
592	290	-11	28	-51	17	17	5
533	295	-10	34	-74	-1	0	1
474	299	-10	39	-98	-19	16	9
414	303	-10	42	-123	-41	33	23
355	308	-9	56	-148	-52	40	32
296	313	-8	71	-173	-63	45	43
237	318	-8	85	-200	-75	49	56
178	324	-7	113	-226	-73	42	60
118	331	-6	170	-254	-44	21	39
59	340	-4	284	-282	42	15	39
39	344	-3	355	-291	103	30	99
19	349	-2	412	-301	150	30	147
0	360	-0	511	-310	241	1	241

Tablica 4.b Utjecaj mase na rezultantu i njezine komponente

r/l = .2							
m = 4100 (kg)							
Psr = 16.5 (bar)							
Fg = 40.2210 (kN)							
Fo = 19.6344 (kN)							
Xp...(mm) , Xk...(stup.) , Xkb...(stup.) , F...(kN)							
Xp	Xk	Xkb	Fp	Fi	Fr	FrT	FrR

0	0	0	511	-212	320	0	320
20	12	2	667	-205	483	99	473
40	17	3	696	-199	518	149	496
59	20	4	653	-193	482	167	452
118	29	6	454	-174	302	146	264
178	36	7	326	-155	193	112	156
237	42	8	255	-137	140	93	104
296	47	8	213	-119	115	84	78
355	52	9	184	-101	104	82	64
414	57	10	142	-84	79	66	43
474	61	10	127	-67	81	71	39
533	65	10	113	-51	83	76	34
592	70	11	99	-35	85	80	29
651	74	11	85	-20	86	83	23
710	78	11	73	-5	90	88	18
770	82	11	71	9	140	139	18
829	86	12	65	23	148	148	8
888	91	12	59	36	156	156	3
947	95	11	56	49	166	165	15
1006	99	11	51	61	172	170	29
1066	104	11	45	73	178	173	43
1125	108	11	45	83	189	179	61
1184	113	11	42	93	196	180	79
1243	118	10	39	103	202	178	98
1302	124	10	36	111	208	172	118
1362	130	9	28	119	207	158	135
1421	137	8	28	126	214	146	157
1480	145	7	22	132	214	123	176
1539	155	5	14	137	211	89	192
1600	180	0	0	140	200	0	201
1539	205	-5	1	137	198	84	180
1480	215	-7	1	132	193	112	159
1421	223	-8	1	126	187	129	138
1362	230	-9	2	119	182	140	118
1302	236	-10	2	111	174	145	99
1243	242	-10	5	103	160	149	81
1184	247	-11	5	93	159	147	64
1125	252	-11	8	83	152	145	49
1066	256	-11	8	73	141	138	35
1006	261	-11	8	61	130	129	22
947	265	-11	11	49	120	121	11
888	269	-12	11	37	108	109	2
829	274	-12	14	23	97	98	5
770	278	-11	14	9	84	84	11
710	282	-11	17	-5	33	33	6
651	286	-11	19	-20	21	21	5
592	290	-11	28	-35	14	14	4
533	295	-10	34	-51	4	4	1
474	299	-10	39	-67	-7	5	4
414	303	-10	42	-84	-21	16	12
355	308	-9	56	-101	-24	18	15
296	313	-8	71	-119	-27	19	19
237	318	-8	85	-137	-31	20	23
178	324	-7	113	-155	-21	11	17
118	331	-6	170	-174	18	9	15
59	340	-4	284	-193	112	40	105
39	344	-3	355	-199	177	51	169
19	349	-2	412	-206	227	46	222
0	360	-0	511	-212	320	1	320

Sile inercije

Kako je poznato, gibanje jednog dijela masa stapnog mehanizma pravocrtno je oscilatorno, a drugog je dijela kružno. Poradi mijenjanja smjera gibanja, brzina se usporava od nule do maksimalne vrijednosti i ponovno se usporava na nulu. S obzirom na velike mase pokretnih dijelova i pojavu ubrzavanja i usporenja, potrebno je pri proračunu stapnog mehanizma voditi računa o silama inercije.

Smjer sila inercije suprotan je smjeru gibanja tijela pri ubrzavanju, dok pri usporenju sila djeluje u smjeru gibanja tijela, odnosno pri gibanju stapnog mehanizma

sila inercije od mrtvih točaka do srednjeg položaja (ubrzanje) usporava gibanje, a od srednjeg položaja (usporenje) ubrzava gibanje.

Opći izraz za silu inercije (F_i) je:

$$F_i = - m a \tag{11.}$$

m - masa koja se giba pravocrtno

a - ubrzanje

Uporabom formula (1.), (4.) i (11.) dobiva se formula:

$$F_i = - m r \omega^2 (\cos \alpha + \alpha \lambda \cos 2 \alpha) \tag{12.}$$

r - polumjer koljena koljenaste osovine

ω - kutna brzina koljenaste osovine

Za ilustraciju mijenjanja sila inercije (F_i) i utjecaja mase na spomenutu silu izvršen je proračun diskretnih vrijednosti tih sila za dvotaktni motor sa sljedećim vrijednostima:

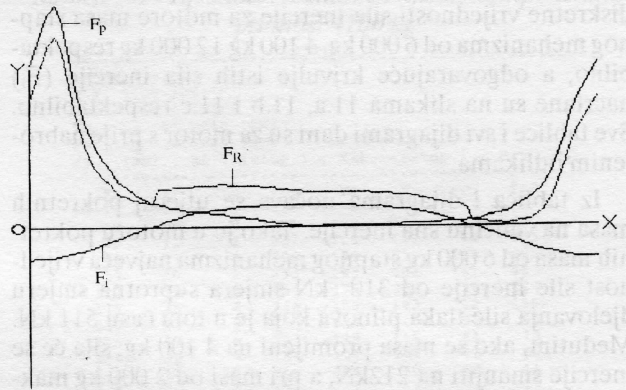
$n = 120 \text{ }^\circ/\text{min}$

$p_{sr} = 16,5 \text{ bara}$

$\lambda = 0,2$

$D = 500 \text{ mm}$

$h = 1 \text{ 600 mm}$

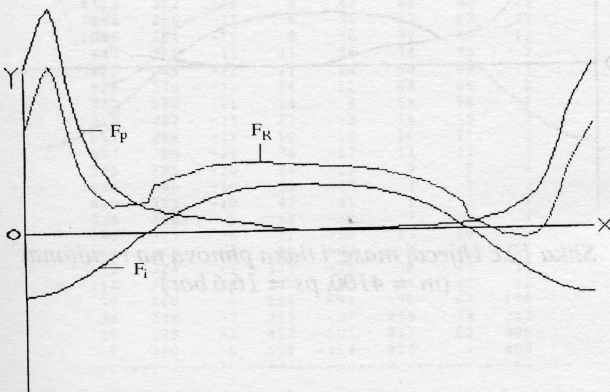


Slika 11.c Utjecaj mase stapnog mehanizma na rezultantu ($m = 2 \text{ 000 kg}$)

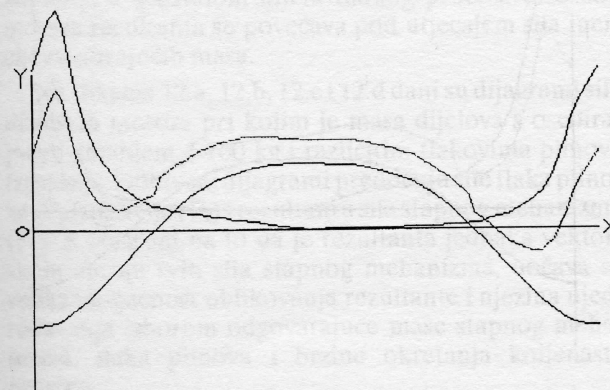
Tablica 4.c Utjecaj mase na rezultantu i njezine komponente

$r/l = .2$
 $m = 2000 \text{ (kg)}$
 $p_{sr} = 16.5 \text{ (bar)}$
 $F_g = 19.6200 \text{ (kN)}$
 $F_o = 19.6344 \text{ (kN)}$
 $X_p \dots (\text{mm}), X_k \dots (\text{stup.}), X_{kb} \dots (\text{stup.}), F \dots (\text{kN})$

X_p	X_k	X_{kb}	F_p	F_i	F_r	F_rT	F_rR
0	0	0	511	-104	408	0	408
20	12	2	667	-100	567	116	555
40	17	3	696	-97	599	172	574
59	20	4	653	-94	559	194	524
118	29	6	454	-85	370	179	323
178	36	7	326	-76	251	147	203
237	42	8	255	-67	189	126	141
296	47	8	213	-58	155	113	105
355	52	9	184	-50	135	106	83
414	57	10	142	-41	101	84	55
474	61	10	127	-33	95	83	45
533	65	10	113	-25	89	81	36
592	70	11	99	-17	82	77	28
651	74	11	85	-10	75	72	20
710	78	11	73	-3	71	70	14
770	82	11	71	4	115	114	15
829	86	12	65	11	116	115	6
888	91	12	59	18	116	116	2
947	95	11	56	24	120	119	11
1006	99	11	51	30	120	118	20
1066	104	11	45	35	120	116	30
1125	108	11	45	40	125	119	41
1184	113	11	42	45	127	117	51
1243	118	10	39	50	129	113	63
1302	124	10	36	54	130	108	74
1362	130	9	28	58	125	96	82
1421	137	8	28	61	129	88	95
1480	145	7	22	64	126	72	104
1539	155	5	14	66	120	50	110
1600	180	0	0	68	108	0	109
1539	205	-5	1	66	107	46	98
1480	215	-7	1	64	105	61	87
1421	223	-8	1	61	102	70	75
1362	230	-9	2	58	100	77	65
1302	236	-10	2	54	96	80	55
1243	242	-10	5	50	95	84	46
1184	247	-11	5	45	90	84	37
1125	252	-11	8	40	88	85	29
1066	256	-11	8	35	83	82	21
1006	261	-11	8	30	77	77	13
947	265	-11	11	24	74	75	7
888	269	-12	11	18	68	69	1
829	274	-12	14	11	65	65	3
770	278	-11	14	4	58	58	7
710	282	-11	17	-3	14	15	3
651	286	-11	19	-10	10	11	2
592	290	-11	28	-17	11	11	3
533	295	-10	34	-25	9	9	3
474	299	-10	39	-33	7	7	3
414	303	-10	42	-41	1	2	1
355	308	-9	56	-50	7	7	4
296	313	-8	71	-58	13	10	9
237	318	-8	85	-67	18	13	14
178	324	-7	113	-76	38	23	31
118	331	-6	170	-85	86	42	75
59	340	-4	284	-94	190	67	178
39	344	-3	355	-97	258	74	247
19	349	-2	412	-101	311	62	305
0	360	-0	511	-104	408	1	408



Slika 11.a Utjecaj mase stapnog mehanizma na rezultantu ($m = 6 \text{ 000 kg}$)



Slika 11.b Utjecaj mase stapnog mehanizma na rezultantu ($m = 4 \text{ 100 kg}$)

U tablicama 4.a, 4.b i 4.c u stupcima pod F_i dane su diskretne vrijednosti sila inercije za motore masa stapnog mehanizma od 6 000 kg, 4 100 kg i 2 000 kg respektabilno, a odgovarajuće krivulje istih sila inercije (F_i) nacrtane su na slikama 11.a, 11.b i 11.c respektabilno. Sve tablice i svi dijagrami dani su za motor s prije nabrojenim odlikama.

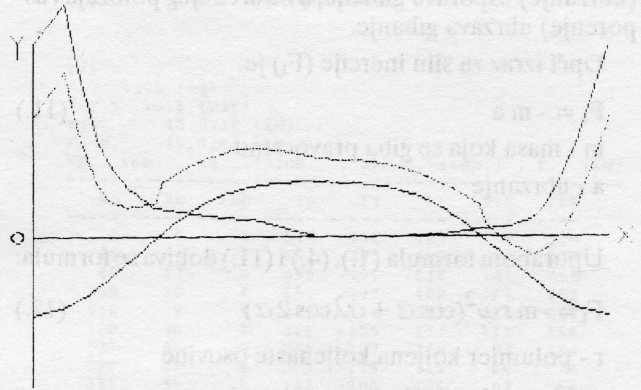
Iz tablica i dijagrama uočava se utjecaj pokretnih masa na veličinu sila inercije. Tako je u motoru pokretnih masa od 6 000 kg stapnog mehanizma najveća vrijednost sile inercije od 310 kN smjera suprotna smjeru djelovanja sile tlaka plinova koja je u tom času 511 kN. Međutim, ako se masa promijeni na 4 100 kg, sila će se inercije smanjiti na 212kN, a pri masi od 2 000 kg maksimalna sila inercije je 104 kN.

Ti primjeri upućuju na potrebu i mogućnost traženja optimalnog odnosa između sila inercije i sila uzrokovanih tlakom plinova, vodeći računa o svim ostalim relevantnim parametrima koji utječu na konstrukciju motora.

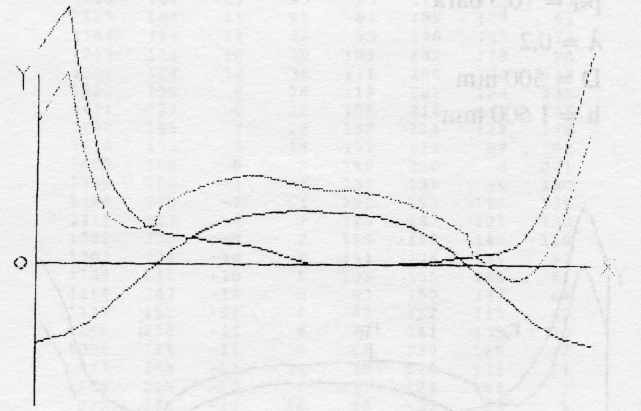
Rezultanta sila stapnog mehanizma

Iz iznesenoga, uočava se da je rezultanta sastavljena od sila: tlaka plinova, inercije, trenja, djelovanja gravitacije i otpora sredine u kojoj se stap giba. Također, objašnjeno je kako se pojedine sile mijenjaju, a u ovom dijelu obrađen je utjecaj pojedinih parametara na rezultantu. Pri obradi pojedinih utjecaja rabljena je ista metodologija kao i pri analizi sila uzrokovanih tlakom plinova i inercije, tj. izrađen je program u QBASIC-u za izračunavanje diskretnim vrijednosti i njihov grafički prikaz. U grafičkom prikazu sila nije crtana sila gravitacije i otpora sredine u kojoj se stap giba, ali je, njihov utjecaj na rezultantu uzet u obzir i u proračunu i pri grafičkom u kazu rezultante.

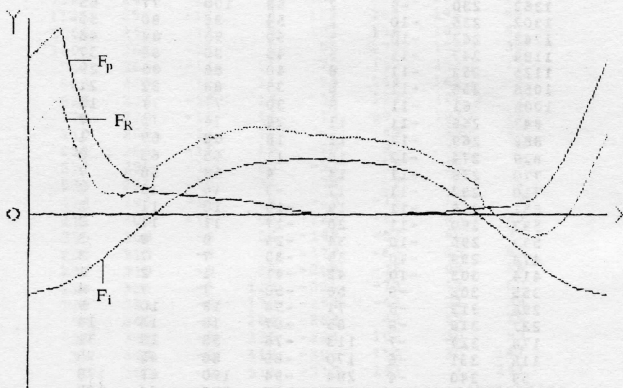
Kako je u prethodnom dijelu naglašeno, dijagrami na slikama 11.a, 11.b i 11.c dobiveni su za motor u kojem se vrijednost talak plinova zadržala nepromijenjenom, a mijenjala se masa stapnog mehanizma. Na taj način dobijen je uvid kakav je utjecaj mase na rezultantu sila. Iz dobivenih numeričkih vrijednosti kao i iz dijagrama (slike 11.a, 11.b i 11.c) uočava se utjecaj sila inercije



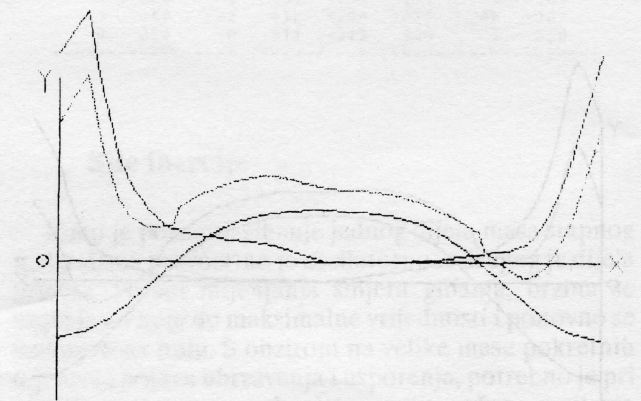
Slika 12.b Utjecaj mase i tlaka plinova na rezultantu ($m = 4\ 100\ \text{kg}$, $p_s = 11,4\ \text{bar}$)



Slika 12.c Utjecaj mase i tlaka plinova na rezultantu ($m = 4100$, $p_s = 16,6\ \text{bar}$)



Slika 12.a Utjecaj mase i tlaka plinova na rezultantu ($m = 4\ 100\ \text{kg}$, $p_s = 11,4\ \text{bar}$)



Slika 12.d Utjecaj masa i tlaka plinova na rezultantu ($m = 4100$, $p_s = 18,5$)

Tablica 5.a Vrijednost rezultanti i njenih komponentata pri masi 2000 kg

l/l = .2
m = 2000 (kg)
Psr = 16.5 (bar)
Fg = 19.6200 (kN)
Fo = 19.6344 (kN)
Xp...(mm), Xk...(stup.), Xkb...(stup.), F...(kN)

Xp	Xk	Xkb	Fp	Fi	Fr	FRT	FR
0	0	0	511	-104	408	0	408
20	12	2	667	-100	567	116	555
40	17	3	696	-97	599	172	574
59	20	4	653	-94	559	194	524
118	29	6	454	-85	370	179	323
178	36	7	326	-76	251	147	203
237	42	8	255	-67	189	126	141
296	47	8	213	-58	155	113	105
355	52	9	184	-50	135	106	83
414	57	10	142	-41	101	84	55
474	61	10	127	-33	95	83	45
533	65	10	113	-25	89	81	36
592	70	11	99	-17	82	77	28
651	74	11	85	-10	75	72	20
710	78	11	73	-3	71	70	14
770	82	11	71	4	115	114	15
829	86	12	65	11	116	115	6
888	91	12	59	18	116	116	2
947	95	11	56	24	120	119	11
1006	99	11	51	30	120	118	20
1066	104	11	45	35	120	116	30
1125	108	11	45	40	125	119	41
1184	113	11	42	45	127	117	51
1243	118	10	39	50	129	113	63
1302	124	10	36	54	130	108	74
1362	130	9	28	58	125	96	82
1421	137	8	28	61	129	88	95
1480	145	7	22	64	126	72	104
1539	155	5	14	66	120	50	110
1600	180	0	0	68	108	0	109
1539	205	-5	1	66	107	46	98
1480	215	-7	1	64	105	61	87
1421	223	-8	1	61	102	70	75
1362	230	-9	2	58	100	77	65
1302	236	-10	2	54	96	80	55
1243	242	-10	5	50	95	84	46
1184	247	-11	5	45	90	84	37
1125	252	-11	8	40	88	85	29
1066	256	-11	8	35	83	82	21
1006	261	-11	8	30	77	77	13
947	265	-11	11	24	74	75	7
888	269	-12	11	18	68	69	1
829	274	-12	14	11	65	65	3
770	278	-11	14	4	58	58	7
710	282	-11	17	-3	14	15	3
651	286	-11	19	-10	10	11	2
592	290	-11	28	-17	11	11	3
533	295	-10	34	-25	9	9	3
474	299	-10	39	-33	7	7	3
414	303	-10	42	-41	1	2	1
355	308	-9	56	-50	7	7	4
296	313	-8	71	-58	13	10	9
237	318	-8	85	-67	18	13	14
178	324	-7	113	-76	38	23	31
118	331	-6	170	-85	86	42	75
59	340	-4	284	-94	190	67	178
39	344	-3	355	-97	258	74	247
19	349	-2	412	-101	311	62	305
0	360	-0	511	-104	408	1	408

Tablica 5.b Vrijednost rezultante i njenih komponentata pri masi 4100 kg

r/l = .2
m = 4100 (kg)
Psr = 16.5 (bar)
Fg = 40.2210 (kN)
Fo = 19.6344 (kN)
Xp...(mm), Xk...(stup.), Xkb...(stup.), F...(kN)

Xp	Xk	Xkb	Fp	Fi	Fr	FRT	FR
0	0	0	511	-212	320	0	320
20	12	2	667	-205	483	99	473
40	17	3	696	-199	510	149	496
59	20	4	653	-193	482	167	452
118	29	6	454	-174	302	146	281
178	36	7	326	-155	193	112	156
237	42	8	255	-137	140	93	104
296	47	8	213	-119	115	84	78
355	52	9	184	-101	104	82	64
414	57	10	142	-84	79	86	43
474	61	10	127	-67	81	71	35
533	65	10	113	-51	83	75	34
592	70	11	99	-35	96	80	29
651	74	11	85	-20	86	83	23
710	78	11	73	-5	90	88	18
770	82	11	71	9	140	139	18
829	86	12	65	23	148	148	8
888	91	12	59	35	155	156	-3
947	95	11	56	49	166	165	-15
1006	99	11	51	61	172	170	-29
1066	104	11	45	73	178	172	-43
1125	108	11	45	83	188	179	-61
1184	113	11	42	93	196	180	-79
1243	118	10	39	103	202	178	-98
1302	124	10	36	111	208	172	-118
1362	130	9	28	119	207	158	-135
1421	137	8	28	126	214	146	-157
1480	145	7	22	132	214	123	-176
1539	155	5	14	137	211	89	-192
1600	180	0	0	140	200	0	-201
1539	205	-5	1	137	198	-84	-180
1480	215	-7	1	132	193	-112	-159
1421	223	-8	1	126	187	-129	-138
1362	230	-9	2	119	182	-140	-118
1302	236	-10	2	111	174	-145	-99
1243	242	-10	5	103	168	-149	-81
1184	247	-11	5	93	159	-147	-64
1125	252	-11	8	83	152	-145	-49
1066	256	-11	8	73	141	-138	-35
1006	261	-11	8	61	130	-129	-22
947	265	-11	11	49	120	-121	-11
888	269	-12	11	37	108	-109	-2
829	274	-12	14	23	97	-98	5
770	278	-11	14	9	84	-84	11
710	282	-11	17	-5	33	-33	6
651	286	-11	19	-20	21	-21	5
592	290	-11	28	-35	14	-14	4
533	295	-10	34	-51	4	-4	1
474	299	-10	39	-67	-7	5	-4
414	303	-10	42	-84	-21	16	-12
355	308	-9	56	-101	-24	18	-15
296	313	-8	71	-119	-27	19	-19
237	318	-8	85	-136	-31	20	-23
178	324	-7	113	-155	-31	11	-17
118	331	-6	170	-174	-31	18	-9
59	340	-4	284	-193	112	-40	105
39	344	-3	355	-199	177	-51	169
19	349	-2	412	-206	227	-46	222
0	360	-0	511	-212	320	-1	320

oscilirajućih masa na rezultantu. Taj se utjecaj povećava s povećanjem masa koje imaju oscilirajuće gibanje, i to tako da su u dijelu radnog procesa u kojem se događa kompresija, uštrcavanje goriva i izgaranje, smanjuje rezultanta; a u ostalom dijelu radnog procesa dizelskih motora rezultanta se povećava pod utjecajem sila inercije oscilirajućih masa.

Na slikama 12.a, 12.b, 12.c i 12.d dani su dijagrami sila dizelskih motora pri kojim je masa dijelova s oscilirajućim gibanjem 4 100 kg i različitim tlakovima plinova izgaranja. Dobiveni dijagrami predočuju sile tlaka plinova (Fp), inercije (Fi) i rezultantu sila stapnog mehanizma (Fr). S obzirom na to da je rezultanta jednaka vektorskom zbroju svih sila stapnog mehanizma, uočava se velika mogućnost oblikovanja rezultante i njezina ujednačavanja izborom odgovarajuće mase stapnog mehanizma, tlaka plinova i brzine okretanja koljenaste osovine.

U tablicama 5.a, 5.b i 5.c dane su diskretne vrijednosti spomenutih sila za određene položaje stapa (Xp), kuta zakreta koljenaste osovine (Xk) i kut ojnice (Xkb) kako

bi se pri analizi sila mogla pratiti promjena pojedinih parametara i na taj način lako pratiti njihov međusobni utjecaj. Osim tih sila u tablicama su dane i vrijednosti tangencijalne (FRT) i radijalne (FR) komponente rezultirajuće sile (Fr). Kako je poznato, radijalna komponenta (vidi slike 1. i 3.) djeluje radijalno u koljenu koljenaste osovine u smjeru osi osnovnog ležaja, a tangencijalna sila formira zakretni moment koji prisiljava osovinu na okretanje. Prema tome, od posebnog značenja su vrijednosti tangencijalne komponente. Kako se može vidjeti iz dijagrama na slici 8., uravnoteženje tih sila bilo bi vrlo jednostavno u motoru sa 6 cilindara ako bi tlak plinova bio konstantan i bez utjecaja sila inercije. Međutim, s obzirom na to da se tlak plinova neprestano mijenja za vrijeme događanja radnog procesa u cilindru motora, problem je mnogo zamršeniji. Na slici 10. prikazani su dijagrami tangencijalnih sila i njihova rezultanta za motor sa 6 cilindara, a u proračunu nije uzet u obzir utjecaj sila inercije.

Iz tog dijagrama i iz tablice 3. u stupcu (Tr) uočavaju se velike razlike u vrijednostima rezultante tangencijal-

Tablica 5.c Vrijednost rezultante i njenih komponentata pri masi 6000 kg

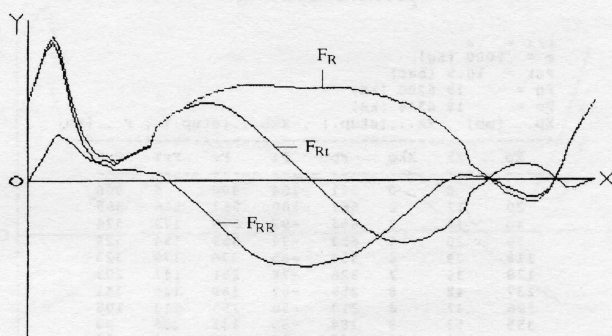
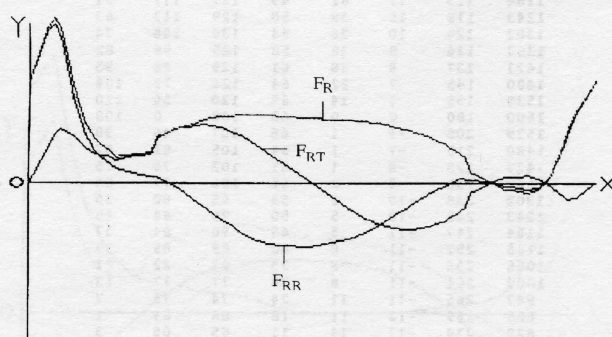
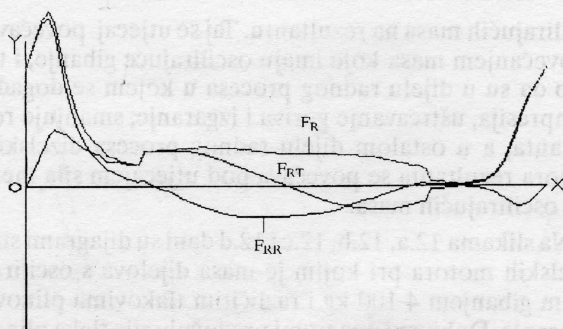
$r/l = .2$
 $m = 6000$ (kg)
 $Psr = 16.5$ (bar)
 $Fg = 52.8600$ (kN)
 $Fo = 19.6344$ (kN)
 $Xp...$ (mm), $Xk...$ (stup.), $Xkb...$ (stup.), $F...$ (kN)

X_p	X_k	X_{kb}	F_p	F_i	F_r	F_{rT}	F_{rR}
0	0	0	511	-310	241	0	241
20	12	2	667	-300	407	83	398
40	17	3	696	-291	445	128	426
59	20	4	653	-282	411	143	386
118	29	6	454	-254	240	116	210
178	36	7	326	-226	140	82	113
237	42	8	255	-200	95	63	71
296	47	9	213	-173	79	58	54
355	52	9	184	-148	76	60	47
414	57	10	142	-123	59	49	32
474	61	10	127	-98	69	60	33
533	65	10	113	-74	79	72	32
592	70	11	99	-51	88	82	30
651	74	11	85	-29	96	92	26
710	78	11	73	-7	106	104	21
770	82	11	71	14	164	162	21
829	86	12	65	34	178	178	10
888	91	12	59	54	192	192	-3
947	95	11	56	72	207	207	-19
1006	99	11	51	90	219	216	-37
1066	104	11	45	107	230	224	-56
1125	108	11	45	122	246	233	-79
1184	113	11	42	137	258	237	-104
1243	118	10	39	151	269	236	-130
1302	124	10	36	163	278	230	-157
1362	130	9	28	174	281	215	-182
1421	137	8	28	184	291	199	-214
1480	145	7	22	193	294	169	-241
1539	155	5	14	200	293	123	-266
1600	180	0	0	206	284	0	-285
1539	205	-5	1	200	280	-119	-255
1480	215	-7	1	193	273	-158	-224
1421	223	-8	1	184	264	-181	-194
1362	236	-9	2	174	256	-196	-166
1302	236	-10	2	163	244	-203	-138
1243	242	-10	5	151	235	-207	-113
1184	247	-11	5	137	221	-204	-89
1125	252	-11	8	122	209	-199	-67
1066	256	-11	8	107	194	-189	-47
1006	261	-11	8	90	177	-175	-30
947	265	-11	11	72	162	-162	-15
888	269	-12	11	54	144	-145	-2
829	274	-12	14	34	127	-128	7
770	278	-11	14	14	107	-107	14
710	282	-11	17	-7	49	-49	10
651	286	-11	19	-29	31	-30	8
592	290	-11	28	-51	17	-17	5
533	295	-10	34	-74	-1	0	-1
474	298	-10	39	-98	-19	16	-8
414	303	-10	42	-123	-41	33	-23
355	308	-9	56	-148	-52	40	-31
296	313	-8	71	-173	-63	45	-43
237	318	-8	85	-200	-75	49	-56
178	324	-7	113	-226	-73	42	-68
118	331	-6	170	-254	-44	21	-39
59	340	-4	284	-282	42	-15	39
39	344	-3	355	-291	103	-30	39
19	349	-2	412	-301	150	-30	147
0	360	-0	511	-310	241	-1	241

nih sila, što znači da bi pri takvu motoru i vrijednost zakretnog momenta oscilirala u širokim granicama, što svakako nije povoljno za motor i za stroj koji on pogoni.

U daljnjoj analizi sila stapnog mehanizma uzet je u obzir i utjecaj masa stapnog mehanizma, odnosno utjecaj sila inercije pokretnih masa s pravocrtним gibanjem na rezultantu i na njezine komponente. Slike 13.a, 13.b i 13.c ilustriraju mijenjanje rezultante (F_r), tangencijalne komponente (F_{rT}) i radijalne komponente (F_{rR}) u funkciji kuta koljenaste osovine (X_k), odnosno položaja stapa u cilindru motora (X_p) i izabranih masa pri jednakim promjenama tlaka plinova u cilindrima motora.

Uspoređujući dobivene vrijednosti tangencijalnih komponenta zapaža se mogućnost postizanja velikih razlika između pojedinih vrijednosti ove sile pri jednakim vrijednostima sila uzrokovanih tlakom plinova, npr. pri kutu $X_k = 47^\circ$ sila $F_{rT} = 113$ kN a ako je $m = 2000$ kg, $F_{rT} = 84$ kN, ako je $m = 4100$ kg, i $F_{rT} = 58$ kN ako je $m = 6000$ kg, međutim, za $X_k = 113^\circ$ $F_{rT} = 117$ kN

Slika 13.a Dijagram rezultante i njenih komponentata ovisno o masi ($m = 6000$ kg)Slika 13.b. Dijagram rezultante i njenih komponentata ovisno o masi ($m = 4100$ kg)Slika 13.c. Dijagram rezultante i njenih komponentata ovisno o masi ($m = 2000$ kg)

za $m = 2000$ kg, $F_{rT} = 180$ kN za $m = 4100$ kg i $F_{rT} = 237$ kN za $m = 6000$ kg. Iz tih podataka i iz predočenih dijagrama na slikama 13. a, b i c vidi se mogućnost utjecaja masa stapnog mehanizma na veličinu tangencijalne komponente, a preko tangencijalne komponente i

na zakretni moment motora, odnosno na ravnomjernost okretanja koljenaste osovine. Ovdje je potrebno napomenuti da se može postići, praktički, potpuna ravnomjernost dijelova tangencijalnih sila u motora s više cilindara i kombinacijom više različitih masa stapnog mehanizma vodeći računa o hodu stapa i brojevima okretaja osovine motora.

Kako je poznato, radijalna komponenta (F_{rR}) djeluje u pravcu trenutačnog položaja osi koljena koljenaste osovine i uzrokuje opterećenje osnovnih ležaja. Kako se može uočiti, ta komponenta uvelike ovisi o masi stapnog mehanizma. Za ilustraciju te tvrdnje istaknut će se ovdje samo maksimalne vrijednosti ove komponente iz tablice 5. za motore u kojima su tlakovi plinova jednaki: ako je $m = 2\ 000\text{ kg}$ $F_{rR} = 574\text{ kN}$, $m = 4\ 100\text{ kg}$ $F_{rR} = 452\text{ kN}$, $m = 6\ 000\text{ kg}$ $F_{rR} = 426\text{ kN}$. Ti podaci zorno pokazuju ovisnost između radijalne komponente, odnosno opterećenja osnovnih ležaja i mase stapnog mehanizma, i to tako da je F_{rR} za 14,8 kN manje u motora kojima je $m = 6\ 000\text{ kg}$ od motora s $m = 2\ 000\text{ kg}$.

Iz danih tablica (5.a, 5.b i 5.c) i dijagrama na slikama 13.a, 13.b i 13.c može se zaključiti da je odnos između masa stapnog mehanizma, tlaka plinova u cilindru motora, sila inercije, sila otpora sredine u kojoj se stap giba i rezultante sila stapnog mehanizma F_r , odnosno njezinih komponenta F_{rT} i F_{rR} , vrlo složen, pa zahtijeva temeljitu analizu s pomoću softvera ili sličnih postupaka pri rješavanju određenih konstrukcija motora.

AN APPROACH TO THE ANALYSIS OF THE FORCES ACTING UPON THE PISTON MECHANISM OF THE DIESEL ENGINES

Summary

The analysis of the piston mechanism forces when designing diesel engines is by no means of the utmost importance for successful solution of a number of elements. It is also important for the appropriate engine operation and for the suitable operation of all components driven by the engine as well.

The paper analyses the forces and inertial forces. When applying computers in the analysis, it is possible to take into consideration the influence of a great number of parameters and the choice of their optimal values, all of which results in a reliable design and smooth and lasting engine operation.

Key words: piston mechanism, forces analysis, computers

LITERATURA

L. Milić i V. Batoš, (1994.): Kompjutori u nastavi brodskih dizelskih motora, Naše more, Dubrovnik, 41(1-2), 81.-86.

Rukopis primljen: 17. 10. 1994.



DUBROVAČKA BANKA
dioničko društvo Dubrovnik

DUBROVAČKA BANKA - VAŠA BANKA

50000 Dubrovnik Put Republike 9; Telefon: 050/431-366, Telefax: 050/411-035, 412-814