



18-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos

TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,

vykusios 2015 m. gegužės 6 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 18th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'

TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 6 May 2015, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 18-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»

ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 6 мая 2015 г., Вильнюс, Литва

LENGVOJO AUTOMOBILIO AUKŠTO SLĖGIO DYZELINIO KURO SIURBLIO MATEMATINIS MODELIS

Karolis Daugintis¹, Marijonas Bogdevičius²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹karolisdaugintis@gmail.com; ²marijonas.bogdevicius@vgtu.lt

Santrauka. Sukurtas aukšto slėgio dyzelinio kuro siurblio matematinis modelis. Matematiname modelyje įvertinama trintis, susidaranti tarp kumštelio žiedo ir plunžerio dėl slenkančių vienas kito atžvilgiu paviršių. Nustatyta kontaktinė jėga tarp kumštelio ir plunžerio, bei pradinis plunžerio spyruoklės įveržimas. Įvertinamas dyzeline ištirpusių dujų kiekis ir jų poveikis aukšto slėgio siurblio darbui. Pateikti aukšto slėgio siurblio hidrodinaminių parametrų kitimai siurblio paleidimo metu. Įvertinamas sistemos nesandarumų poveikis hidrodinaminiam procesams. Pabaigoje pateikiamos išvados ir rezultatai.

Reikšminiai žodžiai: dyzelinis variklis, common-rail, aukšto slėgio siurblys, hidrodinaminiai procesai, modeliavimas, hidrauliniai nuostoliai.

Įvadas

Nagrinėjama „Common-rail“ toliau CR (bendra magistralė) aukšto slėgio dyzelinio kuro tiekimo sistema. Šią sistemą sudaro 3 pagrindiniai funkciniai blokai:

- žemo slėgio kontūras;
- aukšto slėgio kontūras.
- elektroninė valdymo sistema (EDC – Electronic Diesel Control).

Šios sistemos darbinis slėgis svyruoja nuo 30 iki 200 MPa priklausomai nuo variklio darbo režimo ir CR sistemos tipo (Ryu *et al.* 2011). Ši kuro tiekimo sistema naudojama visuose šiuolaikiniuose transporto priemonių dyzeliniuose varikliuose norint pagerinti variklio ekologinius ir ekonominius rodiklius kartu pagerinant variklio galios charakteristikas. Kuriant CR sistemą iškyla daug uždavinių, kuriuos būtina įvertinti ir išspręsti siekiant optimalaus sistemos darbo. Aukšto slėgio degalų sistemos modeliavimas yra vis labiau pasaulyje plintantis įrankis, kurio pagalba galima paaiškinti ir nuspėti sudėtingus procesus, vykstančius sistemoje, įtakančius variklio efektyvų darbą bei išmetamųjų dujų kiekį (Seykens *et al.* 2005). Seykens *et al.* (2005) darbe matematinis modelis sudaromas naudojant AMESim programą, o gauti rezultatai sulyginami su eksperimento rezultatais. Dongiovanni (2010) savo darbe sudarė CR sistemos degalų purkštuvų matematinį modelį, kurį sudaro hidraulinis, elektromagnetinis ir mechaninis modeliai. Matematinis modelis pradedamas

rašyti tik tada, kai kruopščiai išnagrinėjami sistemos geometriniai parametrai bei išsiaiškinamas ryšys, siejantis sistemos elementus (Dongiovanni 2010). Purkštuvų modelis sudaromas naudojant silikono liejinio technologiją, kurios pagalba galima tiksliai išmatuoti purkštuvė esančias kiaurymes taip pasiekiant didelį matematinio modelio tikslumą. Darbe taip pat skaičiuojamas „discharge coefficient“, kuris apibūdina maksimalų kuro pratekėjimą per siauras kiaurymes. Aceves *et al.* (2008) savo moksliniame darbe tyrė dyzelino čiurkšlės skverbimą į degimo kamerą, keisdamas purkštuvų antgalio skylių skersmenis, „discharge coefficient“, įpurškimo slėgį bei degalų tankį. Šių parametrų keitimas buvo fiksuojamas ir vertinamas optiniu prietaisu (greitaeigė kamera), iš kurios padarytais kadrtais buvo galima įvertinti čiurkšlės skverbimą, čiurkšlės plotį bei degalų fronto judėjimo greitį.

Aptarus parašytus kitų mokslininkų straipsnius, nuspręsta darbe iškelti problemą aukšto slėgio siurblyje (ASS) dėl dyzeliniame kure ištirpusių dujų, kurios krentant slėgiui gali išsiskirti ir turėti įtakos hidrodinaminės sistemos veikimui.

Dyzelinio kuro fizikinės ir mechaninės savybės

Sudarant ASS matematinį modelį, būtina išanalizuoti dyzelino fizikines ir mechanines savybes, kurios turi didelę įtaką hidrodinaminiam procesams. Šios savybės pateiktos žemiau esančioje 1 lentelėje.

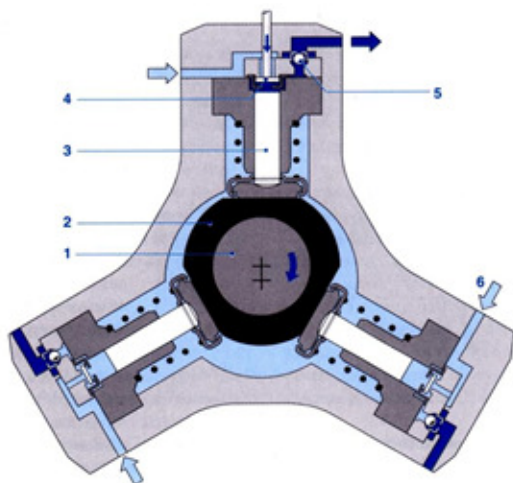
1 lentelė. dyzelino mechaninės ir fizinės savybės

Savybių rodikliai	Dyzeliniai degalai (Klasė C)
Cheminė formulė	C ₁₃ H ₂₄
Tankis esant 15 °C, kg/m ³	824
Klampa esant 40 °C, mm ² /s	2,94
Plyksnio temperatūra atvirame tiglyje (FP), °C	68
Garingumas, min 95 %, esant °C	360
Savainimis užsiliepsnojimas, °C	250
Šalto filtro užsikimšimo taškas (CFPP), °C	-5
Stingimo temp. (PP), °C	0
Cetaninis skaičius	51,6
Sieros kiekis, mg/kg	33
Jodo skaičius, (J ₂ g)/100 g	6
Rūgštingumas, (mg KOH)/g	0,06
Deguonies kiekis, max %	0,4
Anglies ir vandenilio masės santykis, kg/kg	6,9
Žemutinis šilumingumas, MJ/kg	42,55
Stechiometrinis oro ir degalų santykis, kg/kg	14,45
Bendras užterštumas, mg/kg	0,2
Suodžių kiekis, masės %	0,01
Vandens kiekis, mg/kg	28

Modeliuojant aukšto slėgio kuro siurblių svarbiausi parametrai yra klampa ir tankis.

Aukšto slėgio kuro siurblio aprašymas

Aukšto slėgio kuro siurblio pagrindinės dalys yra 3 plunžerinės poros išdėstytos 120° viena kitos atžvilgiu (1 pav.). Plunžeriams eigą suteikia plunžerių centre esantis ekscentrikas su išoriniu žiedu. Siurblys yra varomas nuo skirstymo diržo santykiu 1:2. CR siurblio varantysis diržas yra paprastas (nedantytas), nes jo pasisukimo kampas neturi reikšmės degalų tiekimo tikslumui.



1 pav. Aukšto slėgio siurblio skersinis pjūvis: 1 – ašis su escentriku, 2 – žiedas, 3 – plunžeris, 4 – plokštelinis vožtuvas, 5 – rutulinis vožtuvas, 6 – kuro tiekimas į plunžerį

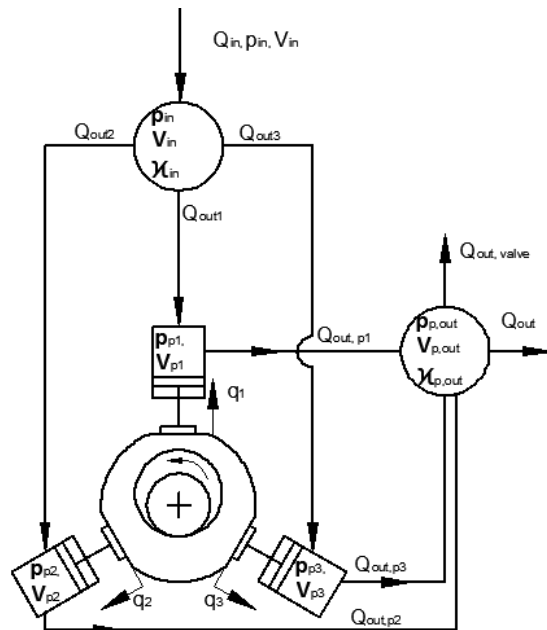
ASS matematinis modelis

Vidaus degimo variklis pakeičiamas elektros varikliu su reduktoriumi norint keisti siurblio sukimosi dažnį. Sudaromas siurblio hidrodinaminis modelis (2 pav.).

Užrašome variklio sukimo momento kitimo lygtį:

$$\dot{M}_R = C_V U_R (\omega_{VO} - U_R \omega_R) - d_V M_R, \quad (1)$$

čia: C_V – elektros variklio koeficientas; M_R – el. variklio sukimo momentas; ω_{VO} – el. variklio kampinis sukimosi greitis; ω_R – rotoriaus kampinis sukimosi greitis; d_V – el. variklio koeficientas; U_R – perdavimo skaičius.



2 pav. Aukšto slėgio kuro siurblio hidrodinaminis modelis

Įvertiname el. variklio inercijos momentą ir užrašome lygtį:

$$I_R \dot{\omega}_R = M_R - M_{T1} - M_{T2} - M_{T3} - C_R \omega_R, \quad (2)$$

čia: I_R – el. variklio masių inercijos momentas; $M_{T1, 2, 3}$ – pasipriešinimo sukimo momentas plunžeriuose.

Užrašoma bendra lygtis, tinkanti visiems 3 plunžeriams, kuri aprašo kontaktinę jėgą tarp plunžerio ir žiedo

$$F_{plk} = -K_{plk} |\delta_k|^n D(\dot{\delta}_k) H(\delta_k), \quad (3)$$

čia: K_{plk} – plunžerio ir žiedo kontakto standumo koeficientas; k – plunžerio eilės numeris; δ_k – žiedo skverbtis į plunžerį; $\dot{\delta}_k$ – skverbties kitimo greitis; n – laipsnio rodiklis; $D(\dot{\delta}_k)$ – funkcija įvertinanti kontaktinės jėgos histerizę; $H(\delta_k)$ – Hevisaido funkcija (Heaviside function).

Užrašomos trijų plunžerių judėjimo lygtys:

$$m_{pl1} \ddot{q}_{pl1} = -A_{pl1} p_{pl1} - K_{pl1} (\Delta_{pl1} + q_{pl1}) - C_{pl1} \dot{q}_{pl1} + F_{pl1}(q_{pl1}, \dot{q}_{pl1}, \omega_R), \quad (4)$$

$$m_{pl2} \ddot{q}_{pl2} = -A_{pl2} p_{pl2} - K_{pl2} (\Delta_{pl2} + q_{pl2}) - C_{pl2} \dot{q}_{pl2} + F_{pl2}(q_{pl2}, \dot{q}_{pl2}, \omega_R), \quad (5)$$

$$m_{pl3} \ddot{q}_{pl3} = -A_{pl3} p_{pl3} - K_{pl3} (\Delta_{pl3} + q_{pl3}) - C_{pl3} \dot{q}_{pl3} + F_{pl3}(q_{pl3}, \dot{q}_{pl3}, \omega_R), \quad (5)$$

čia: m_{pk} – k -jo plunžerio masė; A_{pk} – k -jo plunžerio skerspjūvio plotas; p_{pk} – k -jo plunžerio suslėgimo kameroje esantis slėgis; K_{pk} – k -jo plunžerio spyruoklės standumas; Δ_{pk} – k -jo plunžerio spyruoklės įveržimas; q_{pk} – k -jo plunžerio poslinkis; C_{pk} – k -jo plunžerio pasipriešinimo koeficientas; F_{pk} – kontaktinė jėga tarp k -jo plunžerio ir žiedo; k – plunžerio numeris, $k = 1, 2, 3$.

Slėgio kitimas įeinančių magistralių tūryje V_{in} aprašomas tokia lygtimi:

$$\dot{p}_{in} = \frac{K_{p,in}}{V_{in}} [Q_{in} - Q_{out1} - Q_{out2} - Q_{out3}], \quad (7)$$

čia: $K_{p,in}$ – tūrinis tamprumo modulis; Q_{in} – debitas įėjimo magistralėje; Q_{outk} – debitas išeinantis į k -jo plunžerio darbinę ertmę; k – plunžerio numeris, $k = 1, 2, 3$.

Slėgio kitimas k -jo plunžerio darbinėje ertmėje aprašomas tokia lygtimi:

$$\dot{p}_{pk} = \frac{K_{pk}}{V_{pko} - A_{pl}q_{lk}} [Q_{outk} H(p_{in} - p_{pk}) - Q_{pk,nuost.} - Q_{out,pl} H(p_{pk} - p_{pk,out}) + A_{pl}\dot{q}_{lk}], \quad (8)$$

čia: K_{pk} – dyzelino tūrinio tamprumo modulis; V_{pko} – pradinis darbinės ertmės tūris; p_{in} – slėgis įeinančioje magistralėje; p_{pk} – slėgis darbinėje ertmėje; $Q_{pl,nuost.}$ – debito nuostoliai; $Q_{out,pk}$ – debitas, ištekančias plunžerio darbinės ertmės; $p_{pk,out}$ – slėgis, išeinančioje magistralėje;

Slėgio kitimas ertmėje, į kurią įteka debitai iš trijų plunžerių darbinėse ertmėse:

$$\dot{p}_{p,out} = \frac{K_{p,out}}{V_{p,out}} [Q_{out,p1} + Q_{out,p2} + Q_{out,p3} - Q_{out} - Q_{out,valve}], \quad (9)$$

čia: $K_{p,out}$ – tūrinis tamprumo modulis; $V_{p,out}$ – ertmės darbinis tūris; Q_{out} – debitas, išeinantis į resiverį; $Q_{out,valve}$ – debitas, pratekantis pro valdomą vožtuvą.

Užrašomos 3 lygtys plunžeriams, kurios aprašo debito kitimo išeinančiose magistralėse.

Debitas ištekančias iš k -jo plunžerio darbinės ertmės į darbinį tūrį $V_{p,out}$ aprašomas tokia lygtimi:

$$\dot{Q}_{out,pk} = -\frac{Q_{out,pk}}{\rho_{out,pk}} \dot{\rho}_{out,pk} + \frac{1}{m_{out,pk}} [p_{pk} - p_{p,out} - \frac{1}{2} A_{out,pk} \zeta_{out,pk} \left(\frac{Q_{out,pk}}{A_{out,pk}} \right)^2 \text{sign}(Q_{out,pk})], \quad (10)$$

čia: $\rho_{out,pk}$, $\dot{\rho}_{out,pk}$ – dyzelino tankio ir jo laiko išvestinė; $A_{out,pk}$ – magistralės skerspjūvio plotas; $\zeta_{out,pk}$ – hidraulinis pasipriešinimo koeficientas; $\text{sign}(Q_{out,pk})$ – ženklų funkcija;

čia: $m_{out,pk} = \left(\frac{\rho_{out,pk} L_{out,pk}}{A_{out,pk}} \right)$ – akustinė varža; $L_{out,pk}$ – magistralės ilgis.

Ištirpusių dujų santykinis kiekis įeinančių magistralių tūryje aprašomas tokia lygtimi:

$$\dot{\alpha}_{in} = [a_{\varepsilon}(p_{in})H(-\dot{p}_{in}) - K_{cp}(T)H(\dot{p}_{in})]\dot{p}_{in}, \quad (11)$$

čia: α_{in} – santykinis dujų kiekis; $a_{\varepsilon}(p_{in})$ – koeficientas, nusakantis dujų išsiskyrimą mažėjant slėgiui; $K_{cp}(T)$ – Henrio dėsno koeficientas; T – dyzelino temperatūra.

Ištirpusių dujų santykinis kiekis k -jo plunžerio darbinėje ertmėje aprašomas tokia lygtimi:

$$\dot{\alpha}_k = [a_{\varepsilon}(p_{pk})H(-\dot{p}_{pk}) - K_{cp}(T)H(\dot{p}_{pk})]\dot{p}_{pk}. \quad (12)$$

Ištirpusių dujų santykinis kiekis darbiniam tūryje $V_{p,out}$ aprašomas tokia lygtimi:

$$\dot{\alpha}_{p,out} = [a_{\varepsilon}(p_{p,out})H(-\dot{p}_{p,out}) - K_{cp}(T)H(\dot{p}_{p,out})]\dot{p}_{p,out}. \quad (13)$$

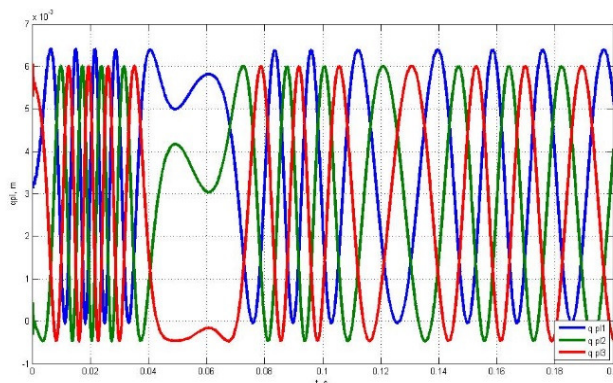
Aukšto slėgio dyzelinio kuro siurblio skaitinio modeliavimo rezultatai ir jų analizė

Sudarant ASS matematinį modelį reikalinga žinoti sistemos geometrinius parametrus, kurie pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Charakteringi ASS sistemos parametrai

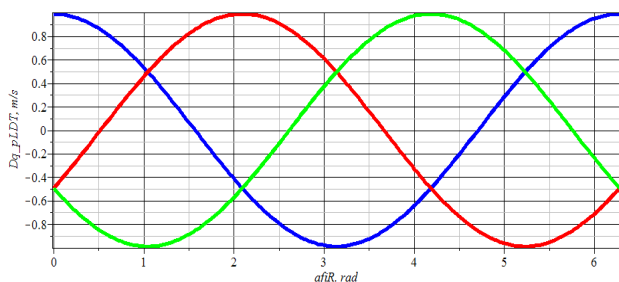
Žymuo	Pavadinimas	Dydis
$L_{1,2,3in}$	Magistralės ilgis nuo įėjimo į siurblij iki plunžerio (1, 2, 3)	0,1 m
$L_{1,2,3out}$	Magistralės ilgis nuo plunžerio iki išėjimo į magistralę (1, 2, 3)	0,15 m
$d_{pl1,2,3}$	Plunžerio skersmuo	6 mm
$m_{pl1,2,3}$	Plunžerio masė	0,05 kg
$K_{pl1,2,3}$	Plunžerio spyruoklės standumo koeficientas	5200 N/m
$\Delta_{pl1,2,3}$	Spyruoklės įveržimas	10 mm
e	Ekscentricitetas	3,3 mm

Pateikti grafikai, kai $\omega = 300$ rad/s, kurie parodo plunžerių poslinkius (3 pav.) bei judėjimo greičius pagal pasisukimo kampą (4 pav.).

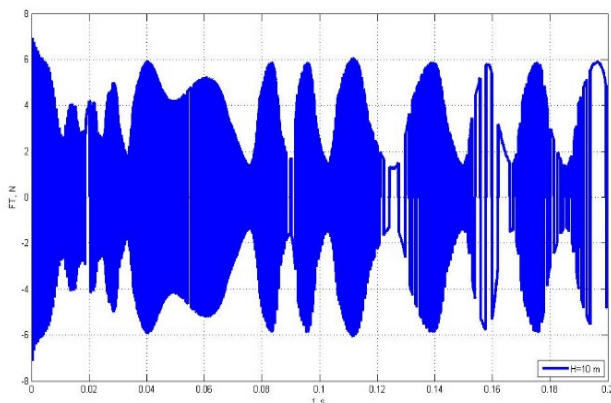


3 pav. Trijų plunžerių poslinkiai pagal kumščelio pasisukimo kampą: mėlyna – 1-as plunžeris, žalia – 2-as plunžeris, raudona – 3-as plunžeris, t – laikas, s; qpL – plunžerio eiga

Kitoje dalyje pateikti grafikai, kurie parodo pirmojo plunžerio tangentines (5 pav.) bei normalines jėgas (6 pav.). Pateiktas debitų kitimas išeinančiose magistralėse (7 pav.). Skaičiavimai atlikti kai $\omega = 50$ rad/s, o bandymo trukmė $t = 0,2$ s. Iš (5 pav.) matoma, kad tangentinės jėgos turi didelį svyravimų dažnį. Normalinė jėga (6 pav.) pirmąsias 10 milisekundžių stipriai svyruoja, o po to nusistovi.



4 pav. Trijų plunžerių greičiai pagal kumštelio pasisukimo kampą: mėlyna – 1-as plunžeris, raudona – 2-as plunžeris, žalia – 3-as plunžeris, $afiR$ – pasisukimo kampas, Dq_pLDT – plunžerio greitis

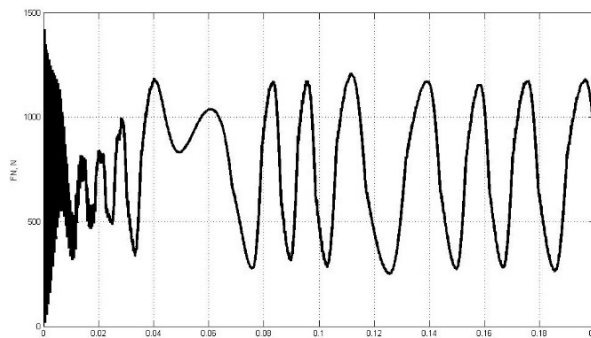


5 pav. Tangentinė jėga tarp pirmojo plunžerio ir žiedo: t – laikas, FT – tangentinė jėga

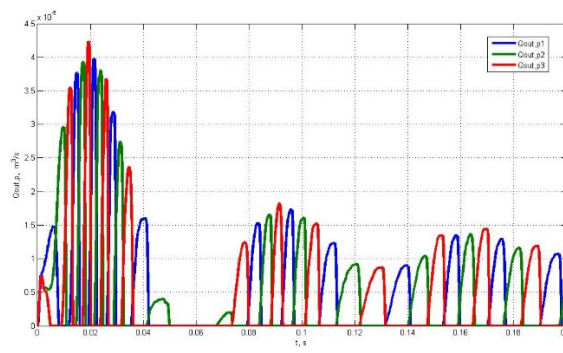
Debitai, išeinantys iš trijų plunžerių yra kintantys dėl į juos patenkančio kintančio debito, dėl jų išdėstymo apskritimu 120° laipsnių kampais bei dėl kintančio kumštelio kampinio sukimosi greičio.

Literatūra

- Aceves, S. M.; Martinez, S.; Sanchez-Cruz, F. A.; Riesco-Avila, J. M.; Gallegos-Munoz, A. 2012. Liquid penetration length in direct diesel fuel injection, *Applied Thermal Engineering* 28 (2008): 1756–1762.
- Catania, A. E.; Ferrari, A. 2012. Development and performance assessment of the new-generation CF fuel injection system for diesel passenger cars, *Applied Energy* 91(1): 483–495. doi:10.1016/j.apenergy.2011.08.047
- Dongiovanni, C. 2010. Accurate Modelling of an Injector for Common Rail Systems. Torino.
- Lino, P.; Maione, B.; Rizzo, A. 2007. Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines *Applied Mathematical Modelling* 31(9): 1770–1784. doi:10.1016/j.apm.2006.06.001
- Ryu, J.; Kim, H.; Lee, K. 2005 A study on the spray and evaporation characteristic of common rail type high pressure injector in homogeneous chargecompression ignition engine *Fuel* 84(14): 2341–2350. doi:10.1016/j.fuel.2005.03.032
- Seykens, X. L. J.; Somers, L. M. T.; Baert, R. S. G. 2005. Detailed Modeling of Common Rail Fuel Injection Process. Eindhoven.



6 pav. Normalinė jėga pirmajame plunžeryje: t – laikas, FN – normalinė jėga



7 pav. Debitai, išeinantys iš trijų plunžerių: mėlyna – 1-as plunžeris, žalia – 2-as plunžeris, raudona – 3-as plunžeris: t – laikas, $Q_{out,p}$ – debitas

Išvados

Sudarytas aukšto slėgio kuro siurblio matematinis modelis, kuris įvertina ištirpusių dujų kiekio priklausomybę nuo slėgio, kontaktinę jėgą tarp plunžerio ir žiedo bei ASS nasandarumų poveikį hidrodinaminiam procesams. Pateikti 5 grafikai, kurie parodo plunžerių judėjimo bei greičio kitimą, pirmojo plunžerio tangentines bei normalines jėgas ir išeinančius debitus iš trijų plunžerių. Plunžerių judėjimo ir greičio kitimo grafikai yra sinusoidės formos. Tangentinė jėga pirmame plunžeryje yra didelio dažnio periodiškai kintanti jėga. ASS paleidimo metu normainė jėga svyruoja iki $1 \cdot 10^3$ N.

Debitų kitimai ASS paleidimo metu yra sudėtingi procesai, kuriuos būtina gerai išanalizuoti.