

MATEMATINĖS STATISTIKOS METODŲ TAIKYMAS ANALIZUOJANT VARIKLIŲ
TECHNINES CHARAKTERISTIKASAivaras Jasilionis¹, Saulius Nagurnas², Mindaugas Melaika³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹aivarasjas@gmail.com; ²saulius.nagurnas@vgtu.lt; ³mindaugas.melaika@gmail.com

Santrauka. Automobilių gamintojai sukurtas degimo variklių valdymo programas pritaiko visiems automobilio judėjimo režimams ir tarp jų siekia optimalaus balanso. Tačiau tuomet automobilis nė vienu režimu nerealizuoja tinkamiausių būtent tam režimui parametru, todėl labai populiarėja valdymo programos perprogramavimas. Straipsnyje trumpai apžvelgiamos kryptys, kuriomis tobulinami valdymo programų kūrimo metodai. Taip pat pagal eksperimentinių tyrimų metu surinktus duomenis pateikti sudaryti variklio išvystomos galios ir sukimo momento padidėjimo matematinės statistikos modeliai. Sudarant šiuos modelius, nustatytos minimalios ir maksimalios galios ir sukimo momento padidėjimo reikšmės, apskaičiuotos vidutinės reikšmės bei vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai, parinkti teoriniai nagrinėjamų duomenų pasiskirstymo dėsniai. Sudaryti matematinės statistikos modeliai leidžia prognozuoti galios ir sukimo momento padidėjimo reikšmės patekimo į tam tikrą intervalą tikimybes.

Reikšminiai žodžiai: elektroninis valdymo blokas, galia, matematinės statistikos modelis, programavimas, sukimo momentas, valdymo programa, vidaus degimo variklis.

Įvadas

Automobilių gamintojai investuoja dideles sumas į variklio valdymo programų kūrimą ir tobulinimą. Gamintojai programos pritaiko visiems automobilio judėjimo režimams ir siekia tarp jų optimalaus balanso, todėl šiuo atveju jokių režimų nepasiekiamas tinkamiausių automobilio charakteristikų. Todėl vis populiarėja gamyklinių valdymo programų modifikavimas siekiant pagerinti kurias nors konkrečias variklio charakteristikas. Dažniausiai siekiama padidinti variklio sukuriamą sukimo momentą ir išvystomą galią, rečiau – sumažinti kuro sąnaudas.

Įvairių šalių mokslininkai atlieka daug bandymų, tyrimų ir skaičiavimų siekdami patobulinti senus ir atrasti naujų būdų, kaip padidinti vidaus degimo variklių galią, tuo pat metu kaip įmanoma mažiau pabloginant automobilio ekonomiškumą ir ekologiškumą. Vidaus degimo variklių charakteristikų gerinimas tobulinant valdymo programas, lyginant su kitomis sritimis, neapsiriboja vien tik galios didinimu ir reikalauja mažesnių materialinių išlaidų (Al-Hinti *et al.* 2009).

Automobilių varikliai yra valdomi elektroninio valdymo bloko. Jame užprogramuoti variklio procesų valdymo parametrai turi didžiulę įtaką tokioms variklio charakteristikoms, kaip variklio išvystoma galia, sukuriamas sukimo momentas, sunaudojamo kuro kiekis ir išmetamųjų dujų sudėtis (Gonzalez *et al.* 2008). Būtent dėl šios priežasties

naujų vidaus degimo variklių kūrimo procese skiriama labai daug dėmesio variklio valdymo programoms tobulinti ir parametrams optimizuoti.

Variklio elektroninio valdymo bloko programavimas yra sudėtingas procesas, kadangi valdymo programos yra skirtingos kiekvienam varikliui atskirai. Todėl atlikus net nedidelius variklio mechaninius patobulinimus reikia pagal juos suderinti valdymo bloke užprogramuotus parametrus. Kadangi šis procesas užima labai daug laiko, naujai sukurtų variklių valdymo programoms kurti gali prireikti netgi kelerių metų, siekiant išgauti optimalias jų charakteristikas. Dažniausiai valdymo programos kuriamos ir tobulinamos bandymų ir klaidų metodu – keičiami parametrai ir variklio charakteristikų pokyčiai tikrinami atliekant variklio bandymus specialiais stendais. Toks tobulinimo būdas reikalauja daug laiko ir materialinių sąnaudų. Siekiant to išvengti, kuriamos kompiuterinės programos ir būdai, leidžiantys apytiksliai įvertinti atliktų pakeitimų įtaką variklio charakteristikoms atliekant kompiuterinį modeliavimą (Chi-Man, Pak-Kin 2010).

Vienas iš tokių metodų yra pagrįstas mažiausiųjų kvadratų paramos vektorių mašinų (angl. *least squares support vector machines* – LS-SVM) taikymu (Chi-Man *et al.* 2006). Taikant šį metodą apskaičiuojamos apytikslios sukimo momento ir galios reikšmės ir nubraižomi jų grafi-

kai. Nors modeliavimas ir nesuteikia tiek daug informacijos kaip praktinis eksperimentas, tačiau leidžia inžinieriams pamatyti dėsningumus pakeitus valdymo programą.

Nuolat kuriamos vis tobulesnės kompiuterinės programos, skirtos kompiuteriniam pakeistų valdymo programų modeliavimui atlikti. Šie modeliai tampa vis tikslesni, todėl pakeitus parametrus galima įsitikinti, ar atlikti pakeitimai pagerino norimas variklio charakteristikas. Taip pat mokslininkai kuria naujus variklio valdymo programų kūrimo ir tobulinimo metodus, kurie palengvina ir leidžia greičiau sukurti valdymo programas naujiems varikliams.

Yra keletas skirtingų valdymo parametrų pakeitimo būdų, tačiau imliausias yra individualus programavimas. Šiuo metodu modifikuojant variklio valdymo programą pasiekiami pačių geriausių rezultatų. Kiekvieno perprogramuojamo automobilio gamylinė valdymo programa yra išanalizuojama, taip pat traukos stendu ištiriamas automobilis ir atliekama jo techninės būklės diagnostika. Tai programuotojui suteikia reikiamos informacijos, pagal kurią nustatoma, kiek ir kokius parametrus reikia keisti, kad būtų pasiektas norimas rezultatas.

Todėl šio tyrimo tikslas – taikant matematinės statistikos metodus išnagrinėti, kokias vidutiniškai variklių galios ir sukimo momento reikšmes galima pasiekti atliekant individualų variklių valdymo blokų programavimą.

Eksperimentiniai duomenys

Bendradarbiaujant su įmone „Vimota Chip Tuning“ surinkta automobilių, varomų turbodieselinais vidaus degimo varikliais, 103 eksperimentiniai duomenys. Automobiliai su turbodieselinais varikliais buvo pasirinkti todėl, kad šiems varikliams valdymo programos modifikavimas, siekiant padidinti variklio galią ir sukimo momentą, turi didžiausią įtaką. Kiekvienas automobilis buvo ištirtas traukos stendu (1 pav.) prieš ir po valdymo programos pakeitimo. Iš šių charakteristikų buvo nustatytos kiekvieno automobilio maksimalios galios ir sukimo momento reikšmės prieš ir po variklių valdymo programos pakeitimo ir variklio sūkių, kuriems esant šios reikšmės buvo pasiektos. Rengiant eksperimentinius analizės duomenis buvo apskaičiuotas kiekvieno automobilio maksimalios galios ir sukimo momento padidėjimas.

Galios padidėjimo matematinės statistikos modelis

Naudojant susistemintus eksperimentinius duomenis buvo sudarytas galios padidėjimo matematinės statistikos modelis (Jonaitis, Žeromskas 1988; Slivinskas *et al.* 2005).



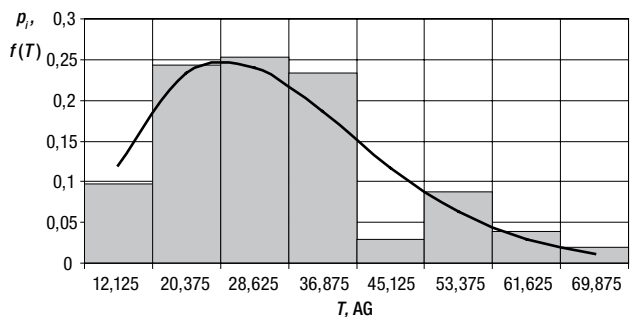
1 pav. Automobilio bandymas traukos stendu
Fig. 1. Car testing using a dynamometer

Sudarant šį modelį buvo nustatyta, kad mažiausias galios padidėjimas buvo užfiksuotas automobiliui „Ford Focus 1.8 TDCI“, kuris lygus 10 AG (7,35 kW) (nuo 93 AG (68,4 kW) esant 4012 min⁻¹ prieš programavimą iki 103 AG (75,76 kW) esant 4012 min⁻¹ po programavimo). Didžiausias variklio galios padidėjimas užfiksuotas automobiliui „Audi A4 2.5 TDI“, kuris lygus 73 AG (53,69 kW) (prieš programavimą – 98 AG (72,08 kW), esant 3768 min⁻¹ variklio sūkiams, po programavimo – 171 AG (125,77 kW), esant 4053 min⁻¹), o tai yra net 74,5 proc. padidėjimas.

Pirmausia buvo apskaičiuotos statistinės tikimybės p_i ir diferencialinės funkcijos $f(t)$ reikšmės, nubraižyta histograma ir diferencialinė funkcija (2 pav.). Statistinė tikimybė apskaičiuojama pagal formulę:

$$p_i = \frac{m_i}{N}, \quad (1)$$

čia: m_i – dažnis; N – bandymų skaičius.



2 pav. Automobilių galios padidėjimo pasiskirstymo histograma ir diferencialinė funkcija $f(T)$

Fig. 2. Histogram of the distribution of growth in car engine power and differential function $f(T)$

Diferencialinės funkcijos reikšmės apskaičiuojamos taikant formulę:

$$f(T) = \frac{b}{a} \left(\frac{T}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{T}{a}\right)^b}, \quad (2)$$

čia: b ir a – pasiskirstymo parametrai, nustatomi pagal variacijos koeficientą iš matematinės statistikos lentelių.

Analizuojant nubraižytą histogramą ir diferencialinės funkcijos grafiką matyti, kad didžiausia dalis – 75 iš 103 galios padidėjimo reikšmių patenka į 2–4 skaičiuojamuosius intervalus, t. y. nuo 16,25 AG (11,95 kW) iki 41 AG (30,16 kW) galios padidėjimo.

Galios padidėjimo apskaičiuota vidutinė reikšmė yra $T_{vid,g} = 31,67$ AG (23,29 kW). Skaičiavimai atliekami pagal formulę:

$$\bar{T}_{vid,g} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n T_{vi} \cdot m_i, \quad (3)$$

čia: n – statistinės eilutės intervalų skaičius; T_{vi} – reikšmė, atitinkanti i -ojo intervalo vidurį, AG.

Galios padidėjimo išsisklaidymo laipsnis vidurkio atžvilgiu nusakomas vidutiniu kvadratinu nuokrypiu. Apskaičiuota šio dydžio reikšmė $\sigma_g = 13,65$ AG (10,04 kW). Šie skaičiavimai atliekami pagal formulę:

$$\sigma_g = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{vi} - \bar{T}_{vid})^2 \cdot \frac{m_i}{N}}. \quad (4)$$

Atsitiktinio dydžio išsisklaidymas apibūdinamas santykinio dydžio – variacijos koeficientu, kuris šiuo atveju $v_g = 0,577$, o apskaičiuojamas pagal formulę:

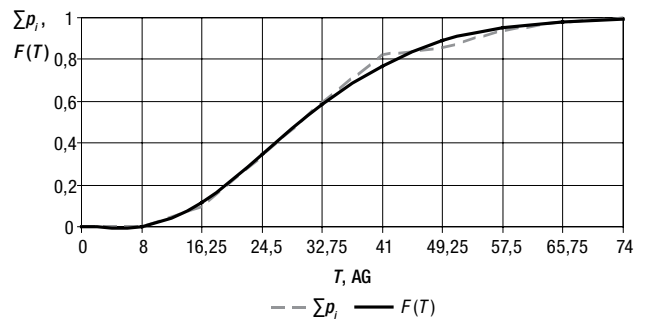
$$v_g = \frac{\sigma}{\bar{T}_{vid} - T_p}, \quad (5)$$

čia: T_p – pradinis informacijos pasislinkimas, laikomas lygiu pirmojo intervalo pradžiai, AG.

Pagal apskaičiuotą variacijos koeficiento reikšmę parenkamas teorinis pasiskirstymo dėsnis, aprašantis nagrinėjamus duomenis. Šiuo atveju parinktas Veibulo pasiskirstymo dėsnis. Parinkus pasiskirstymo dėsnį apskaičiuotos teorinių pasiskirstymo funkcijų reikšmės ir pagal jas nubraižyti grafikai. Integralinės statistinės tikimybės Σp_i ir teorinės integralinės funkcijos $F(T)$ grafikai pateikti 3 paveiksle.

Integralinė statistinė tikimybė lygi statistinių tikimybių intervalų sumai. Teorinė integralinė funkcija taikant Veibulo teorinį pasiskirstymo dėsnį apskaičiuojama pagal formulę:

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{a}\right)^b}. \quad (6)$$



3 pav. Automobilių galios padidėjimo integralinės statistinės tikimybės Σp_i ir teorinės integralinės funkcijos $F(T)$ grafikai

Fig. 3. Integral statistical probability Σp_i of growth in car engine power and theoretical integral function $F(T)$

Integralinė statistinė tikimybė ir teorinė integralinė funkcija išreiškia tą patį parametą, o jų nesutapimas grafikuose priklauso nuo eksperimentinių duomenų kiekio (kuo daugiau duomenų nagrinėjama, tuo didesnis šių kreivių sutapimas).

Šie grafikai suteikia galimybę prognozuoti automobilio galios padidėjimo reikšmės patekimo į tam tikrą intervalą tikimybę.

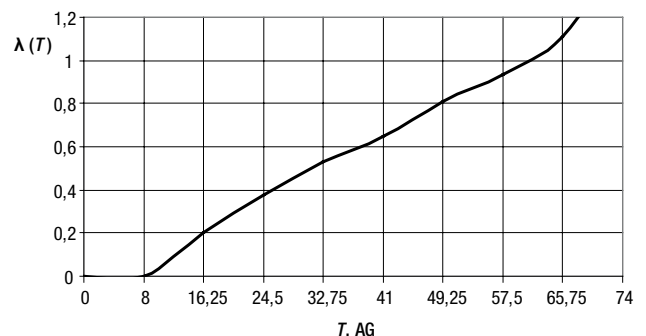
Pagal eksperimentinius duomenis buvo apskaičiuotos galios padidėjimo intensyvumo reikšmės ir pagal jas nubraižytas atitinkamas grafikas (4 pav.).

Skaičiavimai atliekami pagal formulę:

$$\lambda(T) = \frac{f(T)}{P(T)}, \quad (7)$$

čia: $P(T)$ – teorinės funkcijos reikšmė skaičiuojamame intervale.

Šis grafikas parodo nagrinėjamo dydžio reikšmių pasiskirstymo tolygumą visame diapazone. Kaip matyti iš galios padidėjimo intensyvumo grafiko, kreivė kinta pakankamai tolygiai, be didelių šuolių, priklausomybė arti tiesinės, taigi galios padidėjimo reikšmės šiame modelyje pasiskirsto tolygiai visame diapazone.



4 pav. Automobilių galios padidėjimo intensyvumo grafikas

Fig. 4. The intensity of growth in car engine power

Sukimo momento padidėjimo matematinės statistikos modelis

Pagal surinktus ir susistemintus eksperimentinius duomenis taip pat sudarytas sukimo momento padidėjimo matematinės statistikos modelis (Jonaitis *et al.* 1988; Slivinskas, Višniakas 2005).

Atliekant modelio sudarymo skaičiavimus nustatyta, kad mažiausias sukimo momento padidėjimas užfiksuotas „Ford Focus 1.8 TDCI“ automobiliui. Šio automobilio sukimo momentas padidėjo 19 Nm (nuo 206 Nm esant 2296 min⁻¹ prieš programavimą iki 225 Nm esant 2047 min⁻¹ po programavimo). Didžiausias sukimo momento padidėjimas buvo nustatytas „Audi A3 1.9 TDI“ automobiliui – jis lygus 150 Nm (prieš programavimą – 170 Nm esant 2602 min⁻¹ variklio sūkiams, po programavimo – 320 Nm esant 2168 min⁻¹ variklio sūkiams, t. y. šio automobilio išvystomas sukimo momentas padidėjo net 88,23 proc.

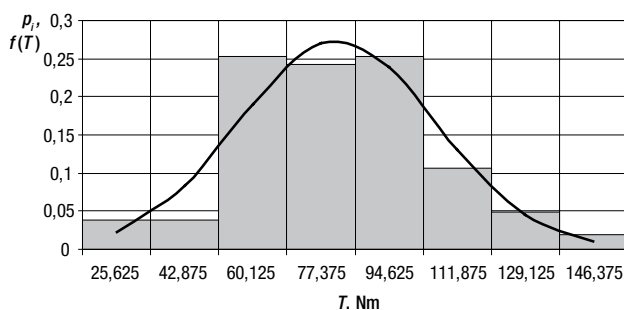
Sudarant matematinės statistikos modelį apskaičiuotos statistinės tikimybės p_i ir diferencialinės funkcijos $f(t)$ reikšmės. Statistinė tikimybė apskaičiuojama pagal (1) formulę, o diferencialinės funkcijos reikšmės apskaičiuojamos pagal formulę:

$$f(T) = \frac{A}{\sigma} \varphi_0 \left(\frac{T_{Vi} - \bar{T}_{vid}}{\sigma} \right), \quad (8)$$

čia: A – intervalo dydis; T_{Vi} – skaičiuojamo intervalo A vidurio reikšmė; $\varphi_0(T)$ – funkcijos reikšmė iš matematinės statistikos lentelių.

Pagal skaičiavimų rezultatus nubraižyta histograma ir diferencialinė funkcija (5 pav.).

Analizuojant nubraižytą sukimo momento padidėjimo histogramą ir diferencialinės funkcijos grafiką matyti, kad daugiausia reikšmių – 77 iš 103 patenka į 3–5 skaičiuojamuosius intervalus, kurie atitinka 51,5–103,25 Nm sukimo momento padidėjimą.

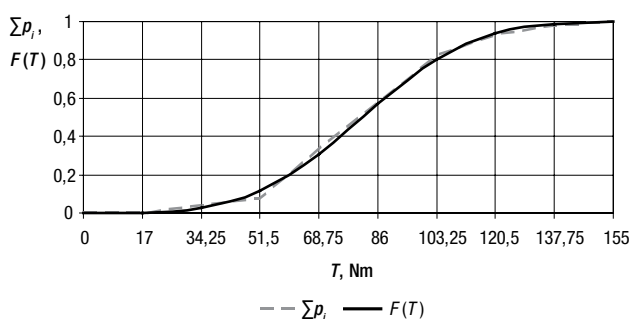


5 pav. Automobilių sukimo momento padidėjimo pasiskirstymo histograma ir diferencialinė funkcija $f(T)$

Fig. 5. Histogram of the distribution of growth in car engine torque and differential function $f(T)$

Tirtų automobilių apskaičiuota vidutinė sukimo momento padidėjimo reikšmė po individualaus programavimo lygi $T_{vid.sm} = 81,56$ Nm, vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma_{sm} = 25,15$ Nm. Variacijos koeficientas, kuris apibūdina tiriamo atsitiktinio dydžio išsisklaidymą, lygus $v_{sm} = 0,39$. Šie dydžiai apskaičiuojami atitinkamai pagal (3), (4) ir (5) formules.

Šiuo atveju pagal variacijos koeficiento reikšmę parinktas Gauso (normalusis) pasiskirstymo dėsnis nagrinėjamiems duomenims aprašyti. Pagal parinktą pasiskirstymo dėsnį apskaičiuotos teorinių pasiskirstymo funkcijų reikšmės ir pagal jas nubraižyti atitinkami grafikai. Integralinės statistinės tikimybės Σp_i ir teorinės integralinės funkcijos $F(T)$ grafikai pateikti 6 paveiksle.



6 pav. Automobilių sukimo momento padidėjimo integralinės statistinės tikimybės Σp_i ir teorinės integralinės funkcijos $F(T)$ grafikai

Fig. 6. Growth in the integral statistical probability Σp_i of car engine torque and theoretical integral function $F(T)$

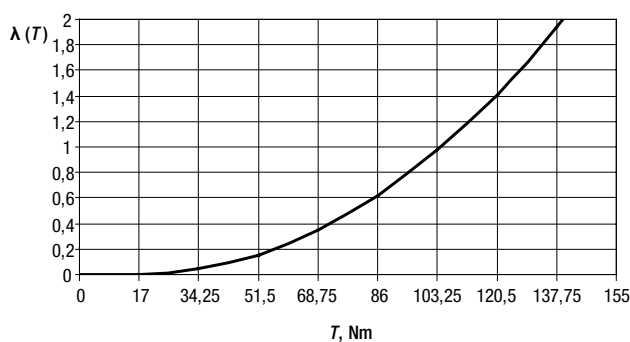
Integralinė statistinė tikimybė lygi statistinių tikimybių intervalų sumai. Teorinė integralinė funkcija Gauso teorinio pasiskirstymo dėsnio atveju apskaičiuojama pagal formulę:

$$F(T_g) = F_0 \left(\frac{T_g - \bar{T}_{vid}}{\sigma} \right), \quad (9)$$

čia: F_0 – funkcijos reikšmė randama matematinės statistikos lentelėse; T_g – statistinės eilutės intervalo pabaigos reikšmė.

Integralinės statistinės tikimybės Σp_i ir teorinės integralinės funkcijos $F(T)$ grafikai suteikia galimybę nustatyti tikimybę, kad sukimo momento padidėjimo reikšmė pateks į tam tikrą pasirinktą intervalą.

Naudojantis surinktais eksperimentiniais duomenimis, buvo apskaičiuotos sukimo momento padidėjimo intensyvumo reikšmės ir nubraižytas grafikas (7 pav.).



7 pav. Automobilių sukimo momento padidėjimo intensyvumo grafikas

Fig. 7. The intensity of growth in car engine torque

Šis grafikas parodo sukimo momento padidėjimo reikšmių pasiskirstymo tolygumą visame diapazone. Šios funkcijos grafikas yra tipinis Gauso (normaliojo) teorinio pasiskirstymo dėsnio atveju – iš jo galima spręsti, kad tiriamojo dydžio reikšmės diapazone pasiskirsčiusios gana tolygiai.

Išvados

Susisteminius automobilių eksperimentinių bandymų traukos stendu informaciją ir pagal gautus duomenis sudarius matematinės statistikos modelius, formuluojamos tokios išvados:

1. Sudarytuose matematinės statistikos modeliuose galios padidėjimo reikšmės pasiskirsto pagal Veibulo, o sukimo momento padidėjimo – pagal Gauso (normalųjį) teorinį pasiskirstymo dėsnį.
2. Minimalus nustatytas galios padidėjimas – 10 AG (7,35 kW), maksimalus – 73 AG (53,69 kW).
3. Vidutinė galios padidėjimo reikšmė $T_{vid,g} = 31,67$ AG (23,29 kW), vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma_g = 13,65$ AG (10,04 kW).
4. Minimalus užfiksuotas sukimo momento padidėjimas – 19 Nm, maksimalus – 150 Nm.
5. Vidutinė sukimo momento padidėjimo reikšmė $T_{vid,sm} = 81,56$ Nm, vidutinis kvadratinis nuokrypis $\sigma_{sm} = 25,15$ Nm.
6. Sudaryti matematinės statistikos modeliai leidžia prognozuoti galios ir sukimo momento padidėjimo reikšmių patekimo į tam tikrą intervalą tikimybes. Todėl šie modeliai gali būti taikomi prognozuojant galimą galios ir sukimo momento padidėjimą atliekant individualų variklio valdymo bloko programavimą.

Literatūra

- Al-Hinti, I.; Samhour, M.; Al-Ghandoor, A.; Sakhrieh, A. 2009. The effect of boost pressure on the performance characteristics of a diesel engine: a neuro-fuzzy approach, *Applied Energy* 86: 113–121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.015>
- Chi-Man, V.; Pak-Kin, W. 2010. Case-based adaptation for automotive engine electronic control unit calibration, *Expert Systems with Applications* 37: 3184–3194. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.09.063>
- Chi-Man, V.; Pak-Kin, W.; Yi-Ping, L. 2006. Prediction of automotive engine power and torque using least squares support vector machines and Bayesian inference, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 19: 277–287. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2005.09.001>
- Gonzalez, E. G.; Florez, J. A.; Arab, S. 2008. Development of the management strategies of the ECU for an internal combustion engine. Computer simulation, *Mechanical Systems and Signal Processing* 22: 1356–1373. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2007.11.030>
- Jonaitis, L.; Žeromskas, R. 1988. *Mašinų patikimumas*. Vilnius: Mokslas. 157 p.
- Slivinskas, K.; Višniakas, I. 2005. *Patikimumo teorija*. Vilnius: Technika. 91 p. <http://dx.doi.org/10.3846/748-S>

USE OF MATHEMATICAL METHODS OF STATISTICS FOR ANALYZING ENGINE CHARACTERISTICS

A. Jasilionis, S. Nagurnas, M. Melaika

Abstract

For the development of new models, automobile manufacturers are trying to come up with optimal software for engine control in all movement modes. However, in this case, a vehicle cannot reach outstanding characteristics in none of them. This is the main reason why modifications in engine control software used for adapting the vehicle for driver's needs are becoming more and more popular. The article presents a short analysis of development trends towards engine control software. Also, models of mathematical statistics for engine power and torque growth are created. The introduced models give an opportunity to predict the probabilities of engine power or torque growth after individual reprogramming of engine control software.

Keywords: engine control software, engine control unit, growth, model of mathematical statistics, power, programming, torque.