

Zagon in preliminarno preizkušanje vodenja 2x3-faznega pogona

Andraž Rihar¹, Mitja Nemec¹, Klemen Drobnič¹, Danjel Vončina¹

¹Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: andraz.rihar@fe.uni-lj.si

Start and preliminary testing of control algorithms on a 2 x 3 – phase drive

Abstract. *Electrification of vehicles is on the rise. Besides ordinary three-phase drivetrains, multiphase electric drives with more than 3 phases are attractive alternatives due to their numerous advantages, such as lower torque ripple, power sharing, etc. However, application details of multiphase electric drives for low to moderate voltages and moderate power are still relatively rare in contemporary literature. This paper describes a 2x3-phase electric drive, as well as summarizes its preliminary testing procedure. Results are provided for analysis of overvoltage on MOSFETs during turn-off, advantages of the implemented MTPA algorithm, evaluation of effects of the introduced phase delay of modulation signals, and the system's response to protection mechanisms. Results confirm suitability of the implemented algorithms and demonstrate the large potential of the designed electric drive platform for further analysis.*

1 Uvod

Elektrifikacija glavnih in pomožnih pogonov osebnih vozil je že danes v porastu [1], od leta 2025 naprej pa je predvideno izrazito povečanje števila električnih vozil [2], ki naj bi v Evropi po optimističnih napovedih doseglo celo do 70 % tržnega deleža. Poleg običajnih trifaznih motorjev se vse pogosteje omenja možnost vgradnje večfaznih pogonov: pet [3, 4], šest [5] in devet [6]. Taki motorji imajo lahko specifične prednosti, kot so manjša valovitost navora, boljša razporeditev moči po fazah, večja zanesljivost in višje hitrosti [6, 7].

Večfazni električni pogon poleg večfaznega električnega motorja običajno sestavlja tudi večfazni razsmernik z ustreznimi algoritmi vodenja, kar pomeni, da je potreben sočasen razvoj na več področjih [8, 9, 10, 11]. V literaturi lahko zasledimo precej študij večfaznih motorjev, tako asinhronskih [7] kot tudi sinhronskih motorjev s trajnimi magneti [4]. Zasledimo lahko tudi nekaj študij večfaznih razsmernikov [8, 9, 10], kjer pa so za srednje in večje moči praktično vedno uporabljena IGBT močnostna stikala. Pri napetostih od 500 V do 1200 V predvsem zaradi nižjih izgub IGBT stikala počasi nadomeščajo SiC MOSFETi [12]. Pri nižjih napetostih (do 300 V) in srednjih močeh (do 50 kW) pa so iz istega razloga zanimiva Si MOSFET močnostna stikala z večjo tokovno zmogljivostjo.

V literaturi je žal opisanih relativno malo rešitev večfaznih pogonov nazivnih napetosti do 200 V in srednjih moči, ki bi bili kompaktni in optimizirani, še

vseeno pa modularni in bi omogočali ustrezno svobodo raziskovalcu za izvajanje različnih primerjalnih analiz. Nekaj podobnega sicer predstavijo Wen *et al.* v [8], pri čemer pa predstavijo zgolj eksperimentalne rezultate za moči do 500 W. Za dopolnitev pomanjkljivosti področja je bil tako pred kratkim izdelan in predstavljen 2x3-fazni razsmernik z MOSFET močnostnimi stikali [13] nazivne napetosti 135 V in kratkotrajne moči do 40 kW. Razsmernik je kompakten, simetričen in razmeroma optimiziran, ob tem pa modularen in dovolj dostopen, da omogoča nemoteno izvajanje laboratorijskih meritev in primerjalnih analiz.

Na drugi strani je na področju razvoja algoritmov vodenja večfaznih pogonov bilo v zadnjem času doseženega precej napredka [14]. Poleg osnovnih algoritmov vodenja pogonov se vedno več pozornosti posveča tudi vpeljavi ustreznih zaščitnih mehanizmov in nadaljevanju obratovanja po napakah [15, 16, 17], kjer je obratovanje seveda odvisno predvsem od tipa napake in od obratovalne točke pogona.

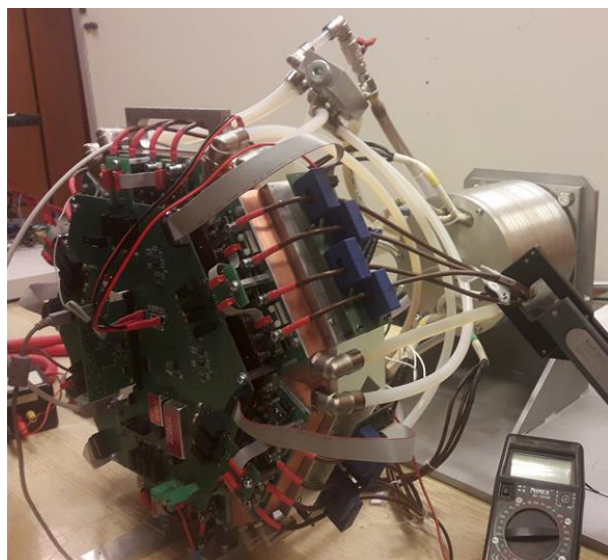
Poleg kompaktnega in modularnega razsmernika [13] se kaže potreba po kompaktni platformi večfaznega električnega pogona, ki bi bila dovolj prilagodljiva in dostopna, da bo omogočala celovite analize lastnosti večfaznih pogonov v različnih obratovalnih točkah, primerjave algoritmov vodenja in druge podobne študije. Koncept programske opreme za vodenje takega pogona je bil predstavljen v [11], platforma pa je bila realizirana v sklopu projekta EVA4green.

Namen tega članka je torej predstaviti posamezne korake priprave in zagona ter preliminarno preizkušanje vodenja 2x3-faznega pogona v različnih obratovalnih točkah.

2 Metodologija

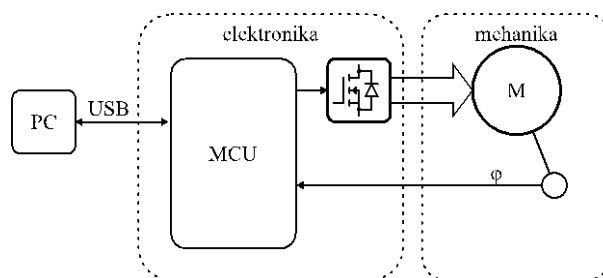
V prvem koraku je bila izvedena povezava 2x3-faznega razsmernika in 2x3-faznega sinhronskega stroja s trajnimi magneti, izdelanega v sklopu projekta EVA4green (slika 1). V tem smislu sta bila sistema povezana i) električno – 24 priključnih žic, ker je stroj navit kvadrifilarno in ima 6 faz, ter ii) preko sistema vodnega hlajenja s plastičnimi cevmi in povezovalnimi členi podjetja FESTO. Razsmernik je bil napajan z virom enosmerne napetosti HP 6479C (300 V, 35 A).

Poleg povezave obeh sistemov sta bili pripravljeni tudi i) ustreznna programska oprema na mikrokontrolerju, ki vodi stroj, ter ii) nadzorni program na osebnem računalniku, ki nadzoruje celoten pogon (slika 2).



Slika 1. Eksperimentalna postavitve 2x3-faznega razsmernika (levo spredaj) in 2x3-faznega motorja (desno zadaj), ki sta povezana električno (rjave žice) in preko sistema vodnega hlajenja (bele cevi).

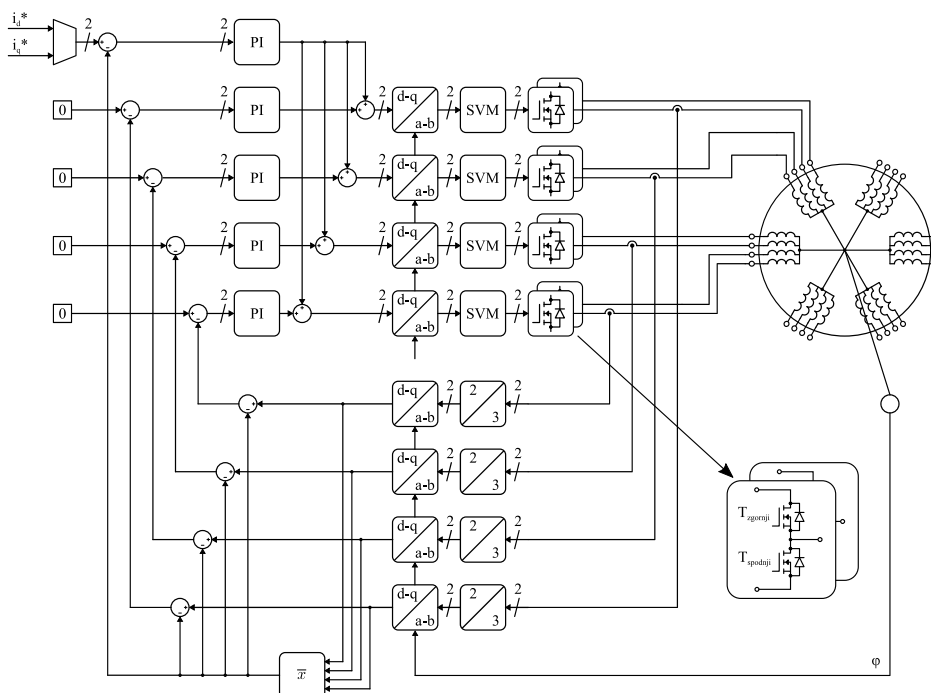
Program na mikrokontrolerju sestoji iz dela, ki skrbi za komunikacijo z nadrejenim programom, ter dela, ki skrbi za regulacijo toka, navora in hitrosti. Pri slednjem je bil zaradi specifične topologije stroja in pripadajoče močnostne elektronike razvit tokovni regulacijski algoritem, ki omogoča regulacijo toka v paralelnih vejah posameznega sistema.



Slika 2. Okvirna zasnova sistema, kjer PC označuje osebni računalnik (angl. Personal Computer), MCU mikrokontrolerjsko enoto (angl. Microcontroller Unit), M motor, φ pa položaj rotorja.

V sistem je zaradi skorajda idealne sklopitve paralelnih navitij poleg dveh glavnih tokovnih regulatorjev (d in q os) vključenih tudi osem dodatnih tokovnih regulatorjev za izenačevanje (slika 3). Dodatno je omogočeno tudi fazno premaknjeno proženje parov tranzistorskih mostičev, s čimer je možno doseči manjšo valovitost toka iz enosmernega tokokroga in s tem zmanjšati obremenitev kondenzatorjev v enosmernem tokokrogu. Regulacijski sistem, temelječ na kaskadni strukturi tokovne in hitrostne zanke, je bil nadgrajen z algoritmom povečanja sistemske učinkovitosti (angl. Maximum Torque per Ampere – MTPA).

V nadaljevanju je bilo najprej izvedeno testiranje razsmernika do višjih napetosti (do približno 120 % nazivne napetosti) in do nazivne obremenitve (do 200 A po fazi). Izvedena sta bila ocena prenapetosti ob izklopu močnostnih stikal ter testiranje trajnega delovanja.



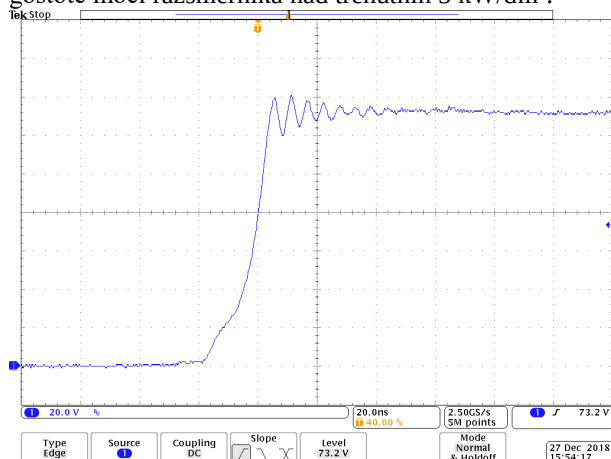
Slika 3. Blokovna regulacijska shema regulacije toka v dvoosnem $d-q$ – sistemu, kjer so uporabljeni glavni regulatorji (zgornji del sheme) in pomožni tokovni regulatorji za izenačevanje (spodnji del sheme). φ označuje položaj rotorja. Desno spodaj je prikazana tudi tranzistorska veja z zgornjim ($T_{zgornji}$) in spodnjim ($T_{spodnji}$) tranzistorjem.

Pri omejenem statorskem toku je bilo preverjeno delovanje algoritma MTPA. Temu je sledila analiza vpliva zamikanja modulacijskih signalov posameznih tranzistorovskih vej.

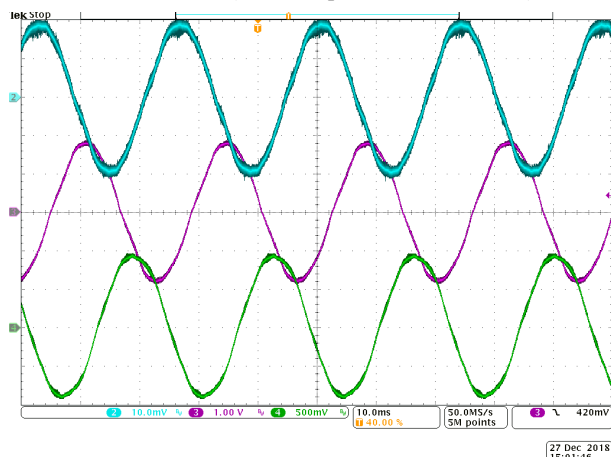
Implementirani in testirani so bili tudi nekateri zaščitni mehanizmi, ki skrbijo za odziv na morebitne napake v programski ter strojni opremi (prevelik bremenski tok v primeru kratkega stika, asimetrična porazdelitev toka, previsoka hitrost motorja, itn.). V primeru morebitne odpovedi se izvede zasilni izklop, upoštevajoč obratovalni režim (delovanje izven ali v področju slabljenja polja). V prvem primeru se izvede izklop vseh tranzistorjev, v drugem primeru pa se sklone samo spodnje tranzistorje (slika 3).

3 Rezultati in diskusija

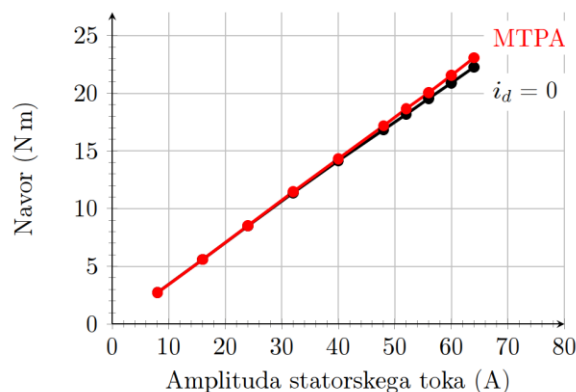
Rezultati preliminarne preizkušnje kažejo, da so prenapetosti ob izklopu zgornjega tranzistorja v nazivni obratovalni točki v območju 10 % (slika 4), kar kaže na ustrezno optimizirano razporeditev elementov močnostnega razsmernika. Poteki faznih tokov potrjujejo ustreznost pritisnjenih napetosti (slika 5), medtem ko preizkušanje trajnega obratovanja pokaže minimalno segrevanje, s tem pa ustreznost izvedbe vodnega hlajenja in dodaten potencial za povečevanje gostote moči razsmernika nad trenutnih 5 kW/dm³.



Slika 4. Oscilogram napetosti ob izklopu zgornjega tranzistorja pri nazivni napetosti $U_{DC} = 135$ V in statorskem toku $I = 170$ A (43 A čez posamezni tranzistor).

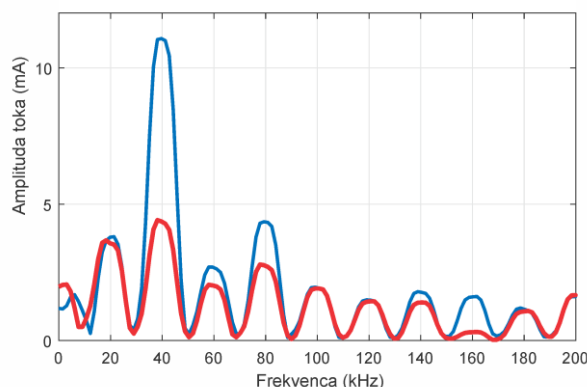


Slika 5. Trije izmed šestih faznih tokov pri $U_{DC} = 135$ V in statorskem toku $I = 180$ A (razmerje je 100 A/del).

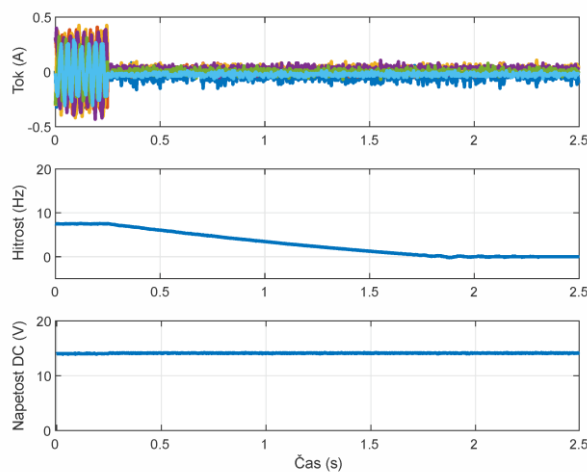


Slika 6. Rezultati testiranja delovanja algoritma MTPA.

Rezultati testiranja algoritma MTPA pri omejenem statorskem toku (60 A po faznem navitju) potrjujejo boljšo učinkovitost in sicer približno 3 % višji navor pri enakem toku (slika 6). Izrazitejšo razliko seveda pričakujemo ob polni obremenitvi. Rezultati faznega zamikanja modulacijskih signalov tranzistorovskih vej kažejo, da je možno valovitost toka v napajalni vir zmanjšati, kar je ugodno z vidika elektromagnetne kompatibilnosti (slika 7).



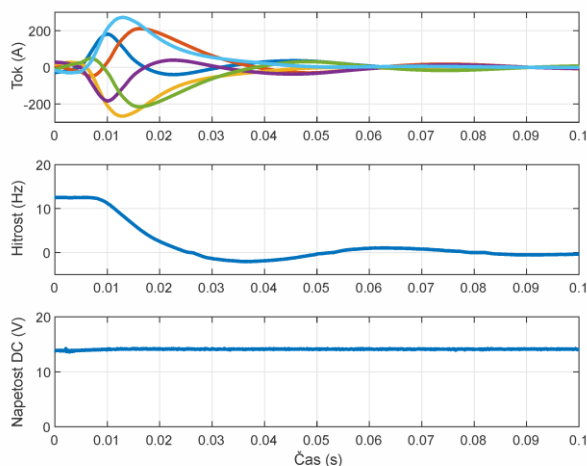
Slika 7. Amplitudni spekter napajalnega toka v primeru delovanja obeh sistemov s stikalno frekvenco 20 kHz in s faznim zamikom mod. signala 0° (modra) in 180° (rdeča).



Slika 8. Potek ključnih merjenih veličin v primeru zasilnega izklopa izven področja slabljenja polja.

Rezultati testiranja delovanja zaščitnih mehanizmov potrjujejo ustreznost implementiranih rešitev. V primeru

izrednega dogodka izven področja slabljenja polja, ob izklopu vseh tranzistorjev fazni tokovi padejo na vrednost nič, motor pa se po naravni krivulji počasi ustavi (slika 8). V primeru znotraj področja slabljenja polja, ob sklenitvi spodnjih tranzistorjev pride do namenskega povišanja toka in kratkotrajne preobremenitve sistema, saj le tako napetost na vmesnem tokokrogu minimalno naraste (slika 9).



Slika 9. Potek ključnih merjenih veličin v primeru zasilnega izklopa v področju slabljenja polja.

4 Sklepne ugotovitve

Rezultati zagona in preliminarne preizkušnje 2x3-faznega pogona srednjih moči ne le potrjujejo ustreznost zasnovane platforme za obratovanje na širokem območju delovnih točk, temveč zagotavljajo tudi odlično zasnovo za nadaljnji razvoj in napredek na področju večfaznih pogonov. Platforma omogoča številne dodatne raziskave in primerjalne analize. V smislu nadaljnjega dela so predvidena testiranja do polnih moči z obremenitvijo pogona na merilni mizi, dodatne analize vpliva topologij večfaznih motorjev na obratovanje po napaki v področju slabljenja polja ter dodatna evalvacija ustreznosti faznega zamika proženja tranzistorov na širšem območju delovanja. Tu je pričakovan precejšen doprinos predvsem k zmanjšanju elektromagnetnih motenj pretvornikov.

Zahvala

Delo sta sofinancirali Republika Slovenija ter Evropska unija v sklopu projekta EVA4green (OP20.00362).

Literatura

- [1] https://www.eei.org/issuesandpolicy/electrictransportation/Documents/EV_Trends_and_Key_Issues_June2018.pdf, Dostopano dne: 16.7.2019
- [2] https://egvi.eu/wp-content/uploads/2018/01/ertrac_electrificationroadmap2017.pdf, Dostopano dne: 16.7.2019
- [3] P. Zhao, G. Yang, Torque density improvement of five-phase PMSM drive for electric vehicles applications. *Journal of Power Electronics*, 11(4), str. 401-407, 2011.

- [4] L. Parsa, H. A. Toliyat. Five-phase permanent-magnet motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(1), str. 30-37, 2005.
- [5] P. Zheng, F. Wu, Y. Lei, Y. Sui, B. Yu. Investigation of a novel 24-slot/14-pole six-phase fault-tolerant modular permanent-magnet in-wheel motor for electric vehicles. *Energies*, 6(10), str. 4980-5002, 2013.
- [6] X. Chen, J. Wang, V. I. Patel, P. Lazari. A nine-phase 18-slot 14-pole interior permanent magnet machine with low space harmonics for electric vehicle applications. *IEEE Tran. on Energy Conversion*, 31(3), str. 860-871, 2016.
- [7] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, S. Williamson. Multiphase induction motor drives—a technology status review. *IET Electric Power Applications*, 1(4), str. 489-516, 2007.
- [8] J. Wen, K. M. Smedley. Hexagram inverter for medium-voltage six-phase variable-speed drives. *IEEE transactions on industrial electronics*, 55(6), str. 2473-2481, 2008.
- [9] L. de Lillo, L. Empringham, P. W. Wheeler, S. Khwan-On, C. Gerada, M. N. Othman, X. Huang. Multiphase power converter drive for fault-tolerant machine development in aerospace applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(2), str. 575-583, 2009.
- [10] S. Bhattacharya, D. Mascarella, G. Joós, J. M. Cyr, J. Xu. A dual three-level T-NPC inverter for high-power traction applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(2), str. 668-678, 2016.
- [11] M. Nemec, A. Rihar. Načrtovanje programske opreme za vodenje večfaznega pogona. V: *Proceedings of the Twenty-seventh International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2018*, str. 281-284, Sep. 2018.
- [12] T. Zhao, J. Wang, A. Q. Huang, A. Agarwal. Comparisons of SiC MOSFET and Si IGBT based motor drive systems. V: *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, str. 331-335, Sep., 2007.
- [13] A. Rihar, P. Zajec, M. Nemec, M. Petkovšek, D. Vončina. Načrtovanje, zasnova in izdelava večfaznega razsmernika z MOSFET stikali. V: *Proceedings of the Twenty-seventh International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2018*, str. 217-220, Sep., 2018.
- [14] F. Barrero, M. J. Duran. Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines—Part I. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), str. 449-458, 2015.
- [15] N. K. Nguyen, F. Meinguet, E. Semail, X. Kestelyn. Fault-tolerant operation of an open-end winding five-phase PMSM drive with short-circuit inverter fault. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), str. 595-605, 2015.
- [16] H. D. Do, A. Anuchin, D. Shpak, A. Zharkov, A. Rusakov. Overvoltage protection for interior permanent magnet synchronous motor testbench. V: *25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives*, str. 1-4, 2018, IEEE.
- [17] B. A. Welchko, T. M. Jahns, T. A. Lipo. Fault interrupting methods and topologies for interior PM machine drives. *IEEE Power Electronics Letters*, 2(4), str. 139-143, 2004.