

MAGNETOREOLOGINĮ SKYSTĮ NAUDOJANČIO SLOPINTUVO SLOPINIMO JĖGOS  
TEORINIAI TYRIMAIAndrius Klevinskis<sup>1</sup>, Vytautas Bučinskas<sup>2</sup>*Vilniaus Gedimino technikos universitetas**El. paštas: <sup>1</sup>andrius.klevinskis@vgtu.lt; <sup>2</sup>vytautas.bucinskas@vgtu.lt*

**Santrauka.** Apžvelgti magnetoreologinį skystį (MR) naudojančių slopintuvų tipai, atlikti slopintuvo išskiriamos šilumos, sukuriama magnetinio lauko skaičiavimai, nustatyta didžiausia leistinoji elektromagneto galia, apskaičiuota įrenginio sukuriama pasipriešinimo jėga, įvertinant įrenginio veikimo metu išskiriamos šilumos temperatūrą. Darbe pateikti tyrimo metu gauti rezultatų grafikai ir išvados.

**Reikšminiai žodžiai:** teoriniai tyrimai, slopintuvai, magnetoreologinis skystis.

**Įvadas**

Kuriant slopinimo sistemas, susiduriama su problema, kaip, naudojant nedidelių matmenų mechanines sistemas, užtikrinti žalingų virpesių slopinimą plačiame virpesių diapazone. Keičiantis žadinančiųjų virpesių pobūdžiui, reikia keisti sistemos standumo ir slopinimo parametrus. Atsiradus išmaniosioms medžiagoms, tokioms kaip magnetoreologiniai skysčiai, kurie nuo magnetinio lauko poveikio keičia savo reologines savybes (Jolly 1998; Kciuk, Turczyn 2006), atsirado galimybė valdyti slopinimo sistemų dinaminis parametrus, tiekiant sistemoms iš išorės elektrinį signalą ir formuojant tą signalą kompiuterio skaičiavimais. Tačiau kuriant tokias sistemas svarbu parinkti tinkamą slopintuvo tipą ir pagrindinius šios sistemos matmenis. Modeliuojant MR slopintuvus, taip pat svarbu įvertinti sistemos darbo metu išsiskiriančios šilumos poveikį įrenginiui, nes, temperatūrai pakilus aukščiau MR skysčio dokumentacijoje nurodytos didžiausios leistinosios temperatūros, įrenginys tampa nepatikimas, praranda savo darbines charakteristikas ir gali sugesti. Tai rodo ankstesnių tyrimų (Li 2003; Ashfak 2009) pateikiami teoriniai MR slopintuvų sukuriamos pasipriešinimo jėgos skaičiavimai ir atlikti eksperimentiniai tyrimai. Tačiau, atliekant minėtuosius tyrimus, neįvertinta įrenginio darbo metu išsiskirianti šiluma ir įrenginio veikimo laikas. MR slopintuvui veikiant ribotą laiką (pvz., atliekant iš anksto žinomos trukmės operacijas robotų sistemoje), įrenginys gali nespėti įkaisti iki termodinaminės pusiausvyros temperatūros. Todėl toks įrenginys gali būti maitinamas didesne elektros srove, taip sukuriama didesnę pasipriešinimo jėgą, tačiau išlaikant įrenginio patikimumą.

**Tyrimo tikslas**

Pagrindinis darbo tikslas – nustatyti teorinio MR virpesių slopintuvo modelio pasipriešinimo jėgą, įvertinant slopintuvo darbo metu išskiriamos šilumos poveikį įrenginio darbui ir patikimumui. Šiam tikslui pasiekti suformuoti tokie uždaviniai:

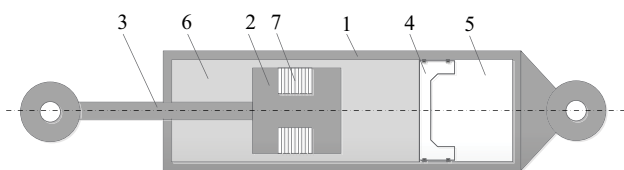
- atlikti teorinius virpesių slopintuvo išskiriamos šilumos skaičiavimus ir rasti didžiausią MR slopintuvo elektromagneto galią, kuriai esant temperatūra per 30 min. nepakyla aukščiau leistinosios MR skysčio temperatūros;
- atlikti teorinius MR virpesių slopintuvo sukuriama magnetinio lauko skaičiavimus;
- apskaičiuoti MR virpesių slopintuvo sukuriama pasipriešinimo jėgą.

**Virpesių slopintuvų klasifikavimas**

Pagrindinis MR slopintuvų privalumas yra gebėjimas keisti technines charakteristikas, keičiant magnetinio lauko stiprį (Carlson 2000; Li 2003; Ashfak 2009). Visi magnetoreologinį skystį naudojančius slopintuvai klasifikuojami į vieno cilindro, dviejų cilindro ir du kotus turinčius slopintuvus (Poynor 2001).

Vieno cilindro slopintuvą (1 pav.) sudaro cilindras 1, kuriame sumontuotas stūmoklis 2, sujungtas su kotu 3. Cilindro gale sumontuotas akumuliacinis stūmoklis 4 atsikuria dujas 5 nuo magnetoreologinio skysčio 6.

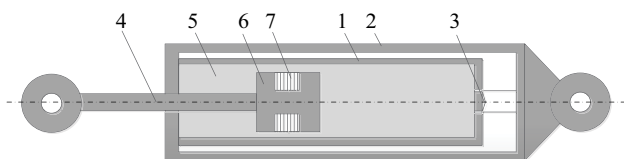
Akumuliacinis cilindras kartu su dujomis kompensuoja dėl stūmoklio koto atsirandantį magnetoreologinio skysčio tūrio pokytį.



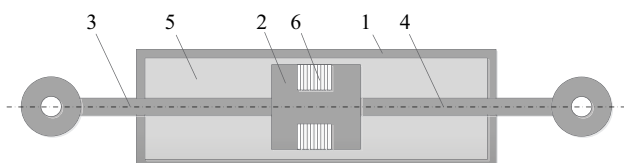
1 pav. Vieno cilindro MR slopintuvas: 1 – cilindras; 2 – stūmoklis; 3 – kotas; 4 – akumuliacinis stūmoklis; 5 – dujos; 6 – magnetoreologinis skystis; 7 – elektromagnetas  
Fig. 1. Mono-tube MR shock absorber: 1 – cylinder; 2 – piston; 3 – rod; 4 – free floating piston; 5 – gas; 6 – magnetorheological fluid; 7 – electromagnet

Dviejų cilindrų slopintuvai (2 pav.) turi du cilindrus, kur mažesnio skersmens cilindras yra įdėtas į didesnio skersmens cilindrą.

Du kotus turinčiuose slopintuvuose (3 pav.), judant slopintuvo stūmokliui 2, tūris dėl cilindro koto abiejose cilindro pusėse išlieka nepakitęs, todėl šio tipo amortizatoriams nereikalinga akumuliacinė talpa.



2 pav. Dviejų cilindrų MR slopintuvas: 1 ir 2 – cilindras; 3 – vožtuvas; 4 – kotas; 5 – magnetoreologinis skystis; 6 – stūmoklis; 7 – elektromagnetas  
Fig. 2. Twin-tube MR shock absorber: 1 and 2 – cylinder; 3 – valve; 4 – rod; 5 – magnetorheological fluid; 6 – piston; 7 – electromagnet

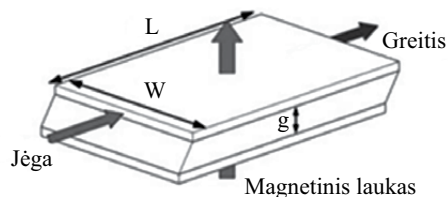


3 pav. Du kotus turintis magnetoreologinis slopintuvas: 1 – cilindras; 2 – stūmoklis; 3 ir 4 – kotas; 5 – magnetoreologinis skystis; 6 – elektromagnetas  
Fig. 3. Double-ended MR shock absorber: 1 – cylinder; 2 – piston; 3 and 4 – rod; 5 – magnetorheological fluid; 7 – electromagnet

Magnetoreologinio skysčio taikymas įrenginiuose skirstomas į keturis tipus: slėgio varomojo srauto, tiesioginės šlyties, spaudžiamąjį ir spūdinio tipo (Boetler, Joanocha 1997; Avraam 2009).

Atsižvelgiant į konstrukcijos paprastumą ir detalių skaičių, reikalingą įrenginiui pagaminti, tyrimui naudojamas du kotus turintis MR slopintuvas. Tokiuose slopintuvuose MR skystis veikia tiesioginės šlyties būdu.

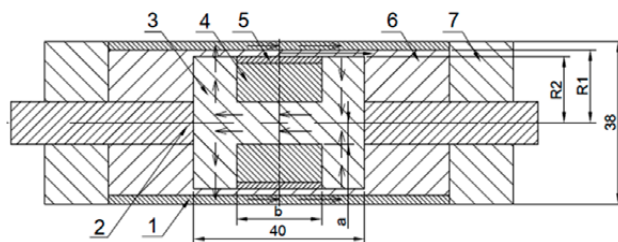
Tiesioginės šlyties būdu veikiančiuose MR slopintuvuose magnetoreologinis skystis teka tarp dviejų sienelių (4 pav.), o magnetinis laukas nukreipiamas statmenai skysčio tekėjimo kryptčiai. Skysčio pasipriešinimas kontroliuojamas keičiant magnetinio lauko stiprį (Boetler, Joanocha 1997; Avraam 2009).



4 pav. Tiesioginės šlyties tipo magnetoreologinio skysčio darbo režimas

Fig. 4. Direct shear mode magnetorheological fluid operating conditions

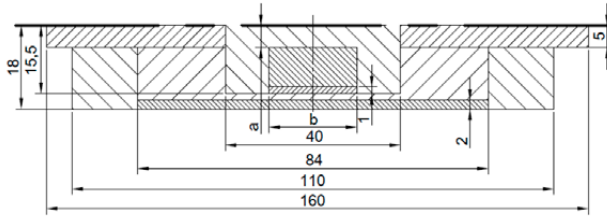
MR slopintuvas (5 pav.) sudarytas iš metalinio cilindro 1, kurio viduje ant koto 2 sumontuotas stūmoklis 3. Stūmoklio viduje iš lakuotos varinės vielos sukurtas elektromagnetas 4. Elektromagnetas nuo išorės atskirtas silikono sluoksniu 5. Cilindras pripildytas magnetoreologinio skysčio MRF-122, kuris, slopintuvo stūmokliui judant išilgai ašiai, skverbiasi per tarp cilindro ir stūmoklio esantį tarpą. Didžiausia leistinoji MRF-122 skysčio temperatūra siekia 100 °C. Kol stūmoklio elektromagnetas neįjungtas, magnetoreologinis skystis yra skystos būsenos. Įjungus stūmoklio elektromagnetą, stūmoklyje atsiranda elektromagnetinės jėgos, o magnetinio lauko linijos išsidėsto ratu apie elektromagneto vijas, taip sudarydamos uždaryjį kontūrą. Tarpelis tarp stūmoklio ir slopintuvo cilindro nėra didelis (1 mm), todėl magnetinio lauko jėgų linijos, sudarydamos uždaryjį kontūrą, kerta šį tarpelį ir pereina iš stūmoklio į slopintuvo cilindrą. Magnetinio lauko jėgų linijos, kirsdamos tarpą tarp stūmoklio ir cilindro, sukuria jame



5 pav. Du kotus turinčio MR slopintuvo schema: 1 – cilindras; 2 – kotas; 3 – stūmoklis; 4 – elektromagnetas; 5 – silikonas; 6 – magnetoreologinis skystis; 7 – korpusas  
Fig. 5. Scheme of double-ended MR shock absorber: 1 – cylinder; 2 – rod; 3 – piston; 4 – wires; 5 – silicone; 6 – magnetorheological fluid; 7 – core

santykiškai stiprų magnetinį lauką, ir šioje įrenginio dalyje magnetinio lauko poveikis magnetoreologiniam skysčiui yra stipriausias. Magnetinio lauko veikiamas magnetoreologinis skystis keičia savo klampumą ir tampa tirštesnis, todėl slopintuvo stūmoklis dėl trinties pradeda judėti lėčiau, sukurdamas pasipriešinimo jėgą. Keičiant magnetinio lauko stiprumą, galima kontroliuoti magnetoreologinio skysčio klampą ir viso įrenginio pasipriešinimo jėgą.

MR slopintuvo išskiriamos šilumos, magnetinio lauko ir slopinimo jėgos skaičiavimams atlikti sukurtas skaitinis MR slopintuvo modelis (6 pav.).



6 pav. Principinė MR slopintuvo modelio skaičiavimo schema  
Fig. 6. Principled scheme of MR shock absorber calculations

Kadangi nagrinėjama konstrukcija yra simetrinė modelio centrinės ašies atžvilgiu, skaičiavimams naudojama pusė dvimačio modelio. Taip yra sutrumpinamas modelis ir rezultatų apdorojimo laikas.

### Teorinio tyrimo metodika

Remdamiesi Omo dėsnio grandinės daliai, apskaičiuojame elektros srovės stiprį:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1)$$

čia  $I$  – elektros srovės stipris;  $U$  – elektros įtampa;  $R$  – elektromagneto lakuotos vielos varža.

MR slopintuvo stūmoklyje esančio elektromagneto sukuriamą galią skaičiuojama taikant formulę:

$$P = I^2 \cdot R. \quad (2)$$

MR slopintuvą tiriama veikiant įrenginio elektromagnetui, todėl MR skystis yra tirštas ir artimas kietajai būsenai. Temperatūros pasiskirstymas standžiuose kūnuose skaičiuojamas taikant formulę (COMSOL 1, 2002):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q, \quad (3)$$

čia  $\rho$  – tankis;  $C_p$  – savitoji šiluma, kai slėgis nekinta;  $T$  – temperatūra;  $t$  – laikas;  $u$  – greičio vektorius;  $k$  – šiluminis laidumas;  $Q$  – šilumos kiekis, gaunamas ne trinties metu;  $\nabla$  – operatorius.

Šilumos pasiskirstymas MR slopintuve nagrinėjamas esant pavojingiausiai būsenai, t. y. kai slopintuvo stūmoklis nejuda ( $u = 0$ ) ir slopintuvo cilindro elektromagnetas yra silpniausiai vėsinamas, todėl iš (3) formulės gaunama:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q. \quad (4)$$

Elektromagnetinis laukas skaičiuojamas taikant magnetostatikos formules (COMSOL 2 2002). Ampero dėsnis statiniams uždaviniams:

$$\nabla \times H = J, \quad (5)$$

čia  $H$  – magnetinio lauko stipris;  $J$  – elektros srovės tankis.

Elektros srovės tankis:

$$J = \sigma v \cdot B + J^e, \quad (6)$$

čia  $\sigma$  – elektrinis laidumas;  $v$  – greitis;  $B$  – magnetinio lauko srauto tankis;  $J^e$  – išorėje sukuriama elektros srovės tankis.

Transformavus Ampero dėsnį, gaunama (COMSOL 2 2002):

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times A - M) - \sigma v \times (\nabla \times A) = J^e, \quad (7)$$

čia  $\mu_0$  – magnetinė skvarba vakuume;  $A$  – magnetinio vektorinio potencialas;  $M$  – magnetinis momentas.

Elektromagneto sukuriama elektros srovės tankis (COMSOL 2 2002):

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{A_c}, \quad (8)$$

čia  $N$  – elektromagneto vijų skaičius;  $I_{coil}$  – elektromagneto srovės stipris;  $A_c$  – elektromagneto skerspjūvio plotas.

Laminarinio tekėjimo MR slopintuve lygtis (Li 2003; Ashfaq 2011):

$$\Delta P = \frac{(p'g - 2\tau_y)^2 (p'g + \tau_y)}{12p'^2\eta}, \quad (9)$$

čia  $p'$  – slėgio skirtumas skysčio tekėjimo kryptimi;  $g$  – skysčio tarpas;  $\tau_y$  – takumo riba;  $\eta$  – skysčio klampa, neveikiant išoriniam magnetiniam laukui.

Bendrasis slėgio skirtumas  $\Delta P$  susideda iš dėl trinties  $\Delta P_{vis}$  slėgio sukuriama ir dėl magnetoreologinio skysčio poveikio sukuriama  $\Delta P_{MR}$  slėgio. Bendrasis slėgis apytiksliai gali būti apskaičiuotas (Li 2003; Ashfaq 2011):

$$\Delta P = \Delta P_{vis} + \Delta P_{MR} = \frac{12\eta QL}{wg^3} + 2\frac{L}{g}\tau_y, \quad (10)$$

čia  $L$  – stūmoklio ilgis;  $Q$  – debitas;  $w$  – stūmoklio plotis;  $L'$  – stūmoklio krašto plotis ( $L' = 2L$ ).

Pertvarkius formulę, gaunama:

$$\Delta P = \frac{24\eta QL'}{\pi(R_1 + R_2)g^3} + 4\frac{L'}{g}\tau_y. \quad (11)$$

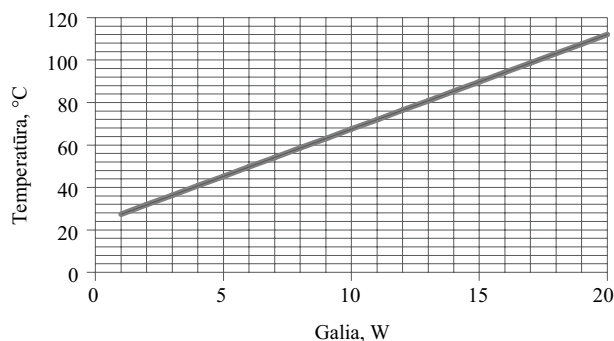
Bendroji slopinimo jėga susideda iš jėgos, atsirandančios dėl trinties  $F_{vis}$  ir jėgos, atsirandančios dėl magnetoreologinio skysčio veikimo  $F_{MR}$ , todėl ji gali būti apskaičiuota (Li 2003; Ashfaq 2011):

$$F = F_{vis} + F_{MR} = \frac{24\eta V_p L'}{\pi(R_1 + R_2)g^3} A_S^2 + 4 \frac{L'}{g} \tau_y A_S, \quad (12)$$

čia  $F_{vis}$  – trinties sukuriama pasipriešinimo jėga;  $F_{MR}$  – MR skysčio sukuriama pasipriešinimo jėga.

COMSOL *Multiphysics* programa sukurtas skaitiniai MR slopintuvo modelis ir atlikti skaičiavimai, kuriais apskaičiuota didžiausios MR slopintuvo temperatūros priklausomybė nuo elektromagneto galios po 30 min. nepertraukiamo įrenginio darbo.

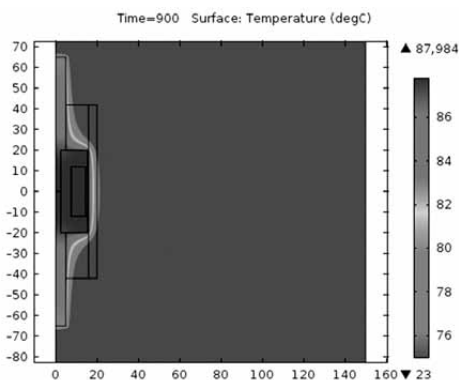
Temperatūros skaičiavimų rezultatai (7 pav.) rodo, kad įrenginys pasiekia didžiausią leistinąją 100 °C temperatūrą, kai įrenginio galia siekia 15 W.



7 pav. Didžiausios MR slopintuvo temperatūros priklausomybė nuo elektromagneto galios po 30 min. nepertraukiamo įrenginio darbo

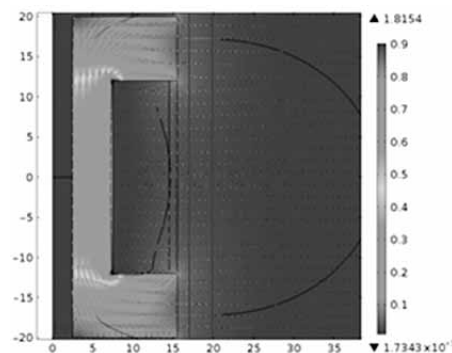
Fig. 7. Dependence of maximum temperature of MR shock absorber on the power of electromagnet, after 30 min of uninterrupted work of mechanism

MR slopintuvo darbo metu temperatūra greičiausiai kyla stūmoklyje esančiame elektromagnete (8 pav.).



8 pav. Šilumos pasiskirstymas MR slopintuve po 30 min. nepertraukiamo darbo, veikiant 15 W galios elektromagnetui  
Fig. 8. Heat distribution in the MR shock absorber after 30 min. of uninterrupted work under 15 W power electromagnet

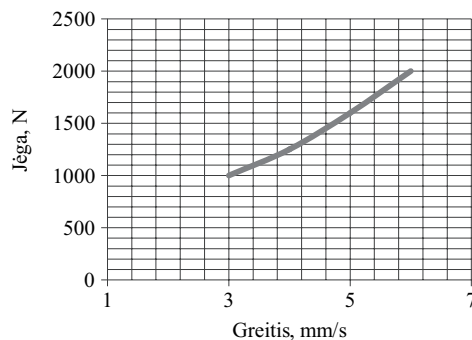
Žinant, kad didžiausia galia, kuriai veikiant MR slopintuvus nepakyla iki kritinės 100 °C temperatūros, siekia 15 W, apskaičiuotas elektromagneto sukuriamas magnetinio lauko pasiskirstymas (9 pav.). Skaičiavimo rezultatai rodo, kad stipriausias magnetinis laukas susidaro MR slopintuvo stūmoklio šerdyje. Magnetinio lauko linijos stūmoklio šerdyje kartu su įrenginio cilindru sudaro uždarytą kontūrą, todėl magnetinio lauko stipris tarpelyje tarp cilindro ir stūmoklio yra santykinai didelis.



9 pav. Magnetinio lauko pasiskirstymas MR slopintuve, veikiant 15 W galios elektromagnetui

Fig. 9. Magnetic flux density distribution in the MR shock absorber under 15 W power electromagnet

Nustačius MR slopintuvo didžiausią leistinąją galią ir šios galios sukuriamo elektromagnetinio lauko stiprį, apskaičiuota įrenginio sukuriama pasipriešinimo jėga, esant skirtingiems stūmoklio greičiams (10 pav.).



10 pav. MR slopintuvo sukuriama pasipriešinimo jėgos priklausomybė nuo stūmoklio judėjimo greičio

Fig. 10. Shock absorber damping force versus piston moving velocity

Slopinimo jėgos skaičiavimo rezultatai rodo, kad MR slopintuvo stūmokliui judant 3 mm/s greičiu, sukuriama 1000 N pasipriešinimo jėga. Didėjant stūmoklio judėjimo greičiui, pasipriešinimo jėga taip pat proporcingai didėja.

## Išvados

Atlikus tyrimą, galima teigti, kad:

– veikiant MR slopintuvo elektromagnetui, išsiskiria šiluma, kuri yra kritinis veiksnys, lemiantis saugų slopintuvo veikimo laiką, nes, temperatūrai pasiekus didžiausią leistinąją MR skysčio temperatūrą, įrenginys tampa nepatikimas, praranda savo darbinės charakteristikas ir gali sugesti;

– didžiausia MR slopintuvo galia, kuriai veikiant MR slopintuvas per 30 min. nepertraukiamo darbo nepasiekia kritinės 100 °C temperatūros, siekia 15 W;

– atlikus MR slopintuvo pasipriešinimo jėgos skaičiavimus, nustatyta, kad kai stūmoklio greitis – 3 mm/s, sukuriama 1000 N pasipriešinimo jėga. Didėjant stūmoklio greičiui, pasipriešinimo jėga taip pat didėja.

## Literatūra

- Ashfak, A.; Saheed, A.; Rasheed, K. A.; Jaleel, J. A. 2011. Design, fabrication and evaluation of MR damper, *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering* 1: 27–33.
- Avraam, M. T. 2009. *MR-fluid brake design and its application to a portable muscular rehabilitation device*. Active Structures Laboratory Department of Mechanical Engineering and Robotics.
- Boetler, R.; Joanocha, H. 1997. Design rules for MR fluid actuators in different workin modes, *Proc.SPIE* 3045: 148–159.
- Carlson, J. D.; Jolly, M. R. 2000. MR fluid, foam and elastomer devices, *Mechatronics*10(4–5 Jun): 555–569.
- COMSOL Multiphysics, COMSOL Multiphysics Modeling Guide Version 4.3a: Heat Trasnfer Mo-dule User's Guide. Stockholm, Sweden: COMSOL AB 2012 (1).
- COMSOL Multiphysics, COMSOL Multiphysics Modeling Guide Version 4.3a: AC/DC Module User's Guide. Stockholm, Sweden: COMSOL AB 2012 (2).
- Jolly, M. R.; Bender, J. W.; Carlson, J. D. 1998. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids, *SPIE*3327: 262–275.
- Kciuk, M.; Turczyn, R. 2006. Properties and application of magnetorheological fluids, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 18(1–2, September-October).
- Li, W. H.; Du, H. 2003. Design and testing of an MR steering damper for motorcycles, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 22(3–4): 288–294. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-002-1473-1>
- Poynor, J. C. 2001. *Innovative designs for magneto-rheological dampers*. Virginia Polytechnic Institute and State University.

## THEORETICAL RESEARCH OF MAGNETORHEOLOGICAL SHOCK ABSORBER DAMPING FORCE

A. Klevinskis, V. Bučinskas

Abstract

In the article an overview of magnetorheological shock absorber types is presented, theoretical calculations of heat dispersion, magnetic field strength produced by shock absorber as well as maximum power of electromagnet are provided. The article also provides device damping force in line with a change of device temperature. In the end of the research the results of experiment are presented in the graph format as well as the conclusions.

**Keywords:** theoretical research, shock absorber, magnetorheological fluid.