



УНИВЕРЗИТЕТ  
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ  
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија  
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централа: 021 485 2000  
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763  
Телефон: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ  
СИСТЕМ  
МЕНАЏМЕНТА  
СЕРТИФИКОВАН ОД:



## ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ

# LABORATORIJSKI UREĐAJ ZA ISPITIVANJE MAGNETOREOLOŠKIH KOČNICA

Autori: Aleksandar Poznić, Ferenc Časnji, Ivan Babić, Nenad Poznanović, Boris Stojić, Dragan Ružić\*

Novi Sad 2012. godine.

\*Autori su članovi Katedre za motore i vozila Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu.

## UVOD

Zadaci procesa kočenja u vozilima, mašinama u industriji, robotici, sportskim spravama, ortopedskim pomagalima i sl. mogu se formulisati kroz sledeće zahteve:

- smanjenje brzine kretanja na željeni nivo - prema potrebi do zaustavljanja,
- održavanje konstantne brzine i
- održavanje položaja sistema

Transformacija kinetičke i/ili potencijelne energije omogućava ostvarivanje prva dva zahteva, dok je statičko uravnovešenje spoljnih sila osnova trećeg zahteva. Većina procesa kočenja se zasniva na pretvaranju kinetičke i/ili potencijalne energije u toplotnu energiju, friкционim putem. Sa energetskog stanovišta, ovakvo rešenje je krajnje nepovoljno. Ipak, zaživelo je kao funkcionalno i tehnički optimalno. Konvencionalna konfiguracija frikcionog kočnog sistema podrazumeva mehanički kontakt između obrtnog i mirujućeg elementa, načinjenih od čvrstih materijala. Osnovne karakteristike ovakvih konvencionalnih kočnih sistema koje su dovele do njihove šire upotrebe su pre svega:

- relativno jednostavna konstrukcija,
- mogućnost prenosa velikih kočnih momenata i
- cena.

Klasične frikcione kočnice imaju i nedostatke. Nedostaci klasičnih frikcionih kočnica su između ostalog:

- habanje,
- česta pojava pogoršanja komfora usled buke i vibracija,
- glomazni mehanički sistem upravljanja,
- veliko vreme odziva i
- nemogućnost fine regulacije kočnog momenta
- primena automatskog upravljanja iziskuje korišćenje dodatnih složenih hidrauličko-mehaničkih sistema.

Unapređenje karakteristika klasičnih frikcionih kočnica se postiže uvođenjem sistema automatskog upravljanja sa povratnom spregom i primenom novih materijala. Magnetoreološke - MR tečnosti spadaju u grupu materijala sa velikim potencijalom za primenu u ovoj oblasti. Rešenja ovog tipa se prvi put pojavljuju u radovima Jakoba Rabinova (Jacob Rabinow), (Rabinow, 1948, 1951).

Prevazilaženje odnosno ublažavanje navedenih nedostataka moguće je ostvariti primenom inovativnih koncepta. U ovom radu dat je prikaz kočnice sa magnetoreološkom (MR) tečnošću. Osnovna karakteristika MR tečnosti je promena viskoznosti pri promeni intenziteta magnetnog polja, koje na nju deluje. Kod ovog sistema kočni moment se ostvaruje putem viskoznog otpora koji se javlja usled relativnog kretanja rotora u odnosu kućište i na MR tečnost. Pri tome se viskoznost, a time i moment kočenja, menja pri promeni intenziteta magnetnog polja. Intenzitet magnetnog polja se menja intenzitetom struje namotaja elektromagneta. Primenom MR tečnosti kao kočnog medijuma otvaraju se mogućnosti smanjenja ili potpunog

eleminisanja prethodno navedenih nedostataka klasičnih frikcionih kočnica. MR kočni sistemi predstavljaju zatvorene sisteme bez habanja elemenata koji direktno učestvuju u procesu kočenja. Pored ovoga, ovakvi sistemi ne poseduju glomazni pogonsko-upravljački mehanizam. Sistemi koji MR tečnost koriste kao kočni medijum imaju mogućnost fine regulacije momenta električnim putem, jednostavniju konstrukciju i širok spektar MR tečnosti. MR kočni sistemi nalaze primenu u mehatroničkim sistemima poput: vozila (Nguyen, 2010), robova, transportnih sistema, ortopedskim pomagalima (Lui et al., 2006), trenažerima (More, 2009) i sl.

U ovom tekstu su prikazani osnovni delovi i opisan način rada laboratorijskog uređaja za ispitivanje rada MR kočnice. Sistem se sastoji od tri glavna dela:

- MR kočnice,
- noseće konstrukcije sa pogonom i
- merno-upravljačke grupe.

U tekstu je dat opis MR efekta, pregled svih delova sistema kao i stanje u svetu u ovoj oblasti. Ovaj laboratorijski urađaj ima za cilj dalji razvoj konstrukcije MR kočnice kao i ispitivanje kvalitativnih osobina MR tečnosti sopstvene proizvodnje. Pored toga, didaktička uloga ovog laboratorijskog uređaja je veoma bitna.

## **OBLAST NA KOJU SE TEHNIČKO REŠENJE ODNOŠI**

Tehničko rešenje laboratorijskog uređaja za ispitivanje magnetoreoloških kočnica je interdisciplinarnog karaktera, s obzirom na to da objedinjuje elemente mašinskog i elektrotehničkog inženjerstva kao i merne i regulacione tehnike. Ovakav uređaj prvenstveno ima ulogu ispitivanja različitih tipova i konfiguracija MR kočnica. Ispitivanje MR kočnica ima za cilj dalji razvoj konstrukcija i povećanje ukupnog kočnog momenta.

## TEHNIČKI PROBLEM

Regulacija sile kočenja i/ili ugaono pozicioniranje vratila predstavlja zadatak koji privlači puno pažnje. Većina konvencionalnih kočnih sistema, friкционim putem pretvara kinetičku u toplotnu energiju. Nedostaci friкционog kočnog sistema su habanje elemenata, inertnost, sistem kontrole i regulacije. MR tečnost predstavlja medijum novog kočnog sistema, putem kojeg se umanjuju prethodno navedeni negativni efekti konvencionalnih friкционih sistema kočenja ali se isto tako i povećava mogućnosti upravljanja i fine regulacije kočnog momenta. Princip rada MR tečnosti se zasniva na MR efektu. MR efekat predstavlja promenu viskoznosti fluida, kada se izloži uticaju magnetnog polja. MR tečnost predstavlja suspenziju tečnosti nosioca i feromagnetnih čestica. Većina komercijalnih MR tečnosti koriste vodu, mineralno ili silikonsko ulje kao tečnost nosilac, dok se kao feromagnetni materijal koristi gvožđe i njegove legure a sve u zavisnosti od konkretnih potreba i aplikacija.

Prikazano rešenje, kao osnovnu MR tečnost, koristi BASF®-ov proizvod, pod komercijalnim nazivom Basonetic® 5030. Pored Basonetic® 5030 u upotrebi su i mešavine MR tečnosti specijalno proizvedene u Laboratoriji za Motore i Vozila, Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad. Rezultati postignuti upotrebom Basonetic® 5030 su uzimani kao referentni.

Pored ispitivanja MR tečnosti, ovaj laboratorijski uređaj ima za cilj ispitivanje konstruktivnih karakteristika MR kočnice. Rezultati dobijeni ovakvim ispitivanjima se dalje koriste za razvoj i unapređenje MR kočnih sistema. Tendencija razvoja ispitnih postrojenja ovog tipa u svetu je sve većeg intenziteta.

## **STANJE U SVETU**

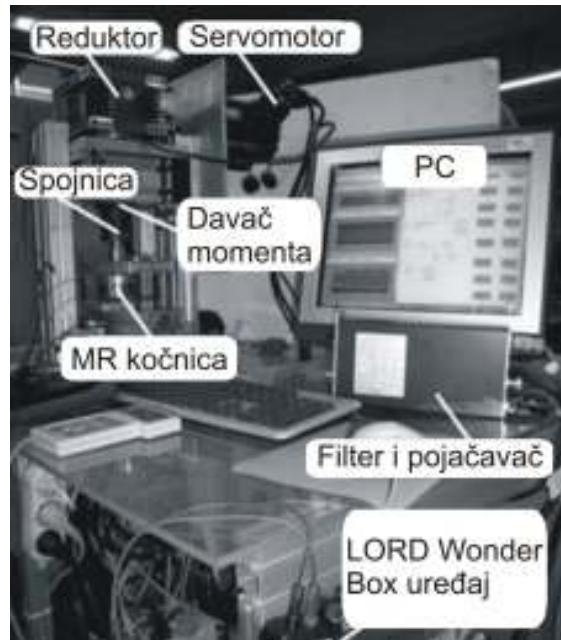
Ispitivanje kočnih karakteristika MR kočnica predstavlja proces merenja ukupnog kočnog momenta u zavisnosti od odgovarajućih parametara. Načini akvizicije ukupnog kočnog momenta se razlikuju od slučaja do slučaja. Razlozi ovih razlika se prvenstveno ogledaju u konstrukcijama MR kočnica. Pregledom literature ustanovljeno je da postoji svega nekoliko koncepta gradnje laboratorijskih uređaja za ovu vrstu ispitivanja. Razlika u metodu merenja predstavlja jedan od osnovnih načina za podelu.

Prema metodu merenja laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika MR kočnica se mogu podeliti u dve grupe.

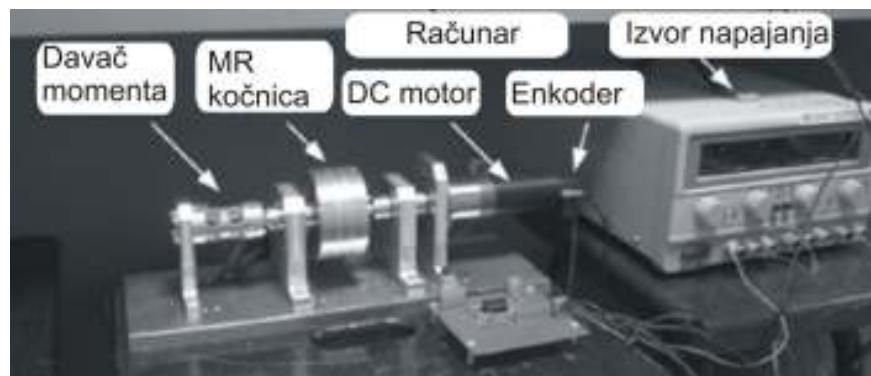
- Direktni metod merenje kočnog momenta i
- Indirektni metod merenja kočnog momenta.

Primeri laboratorijskih uređaja su prikazani na slikama 1, a) i b) i 2, a) i b). Pored ovih metoda merenja, u literaturi se pominje još jedan, koji se ređe sreće u praksi. Uredaj je prikazan na slici 3. Ovaj sistem predstavlja jednostavniji način direktnog merenja momenta jer nepostoji potreba za nosećom konstrukcijom ispitnog stola u ovom slučaju.

Razlika između direktnog i indirektnog metoda se ogleda u načinu merenja kočnog momenta. Kod direktnog metoda, vrednost ukupnog kočnog momenta MR kočnice se dobija putem davača momenta, slika 1 a) i b), obeleženi kao davač momenta. Za razliku od direktnog, kod indirektnog metoda se meri sila koja se sa kućišta MR kočnice prenosi na davač sile. Sila se prenosi na davač polugom koja je sa jedne strane spojena na kućište MR kočnice a sa druge strane oslonjena na davač, slika 2 c). Na slici 2 c) ovi elementi su obeleženi kao poluga i davač sile, respektivno.

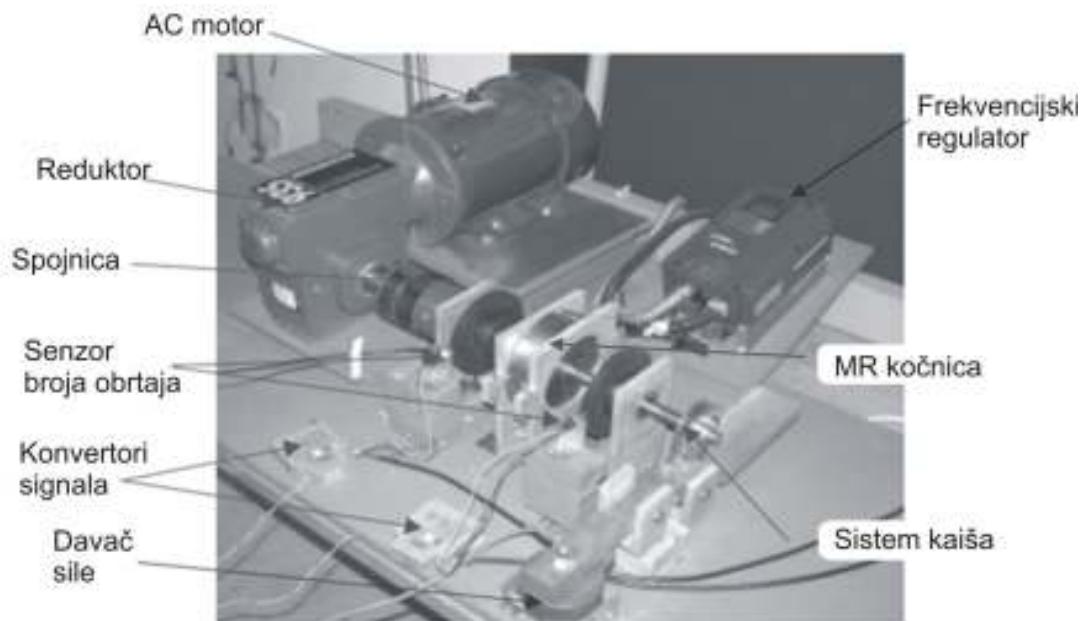


a)

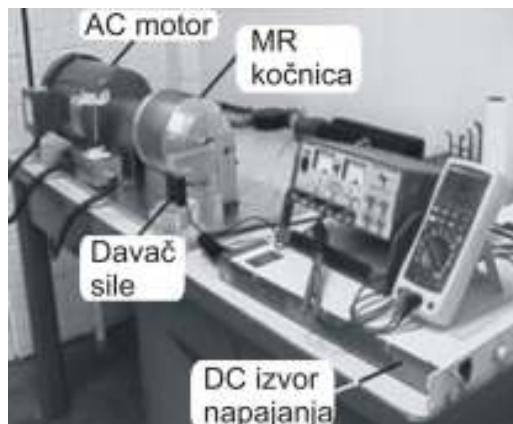


b)

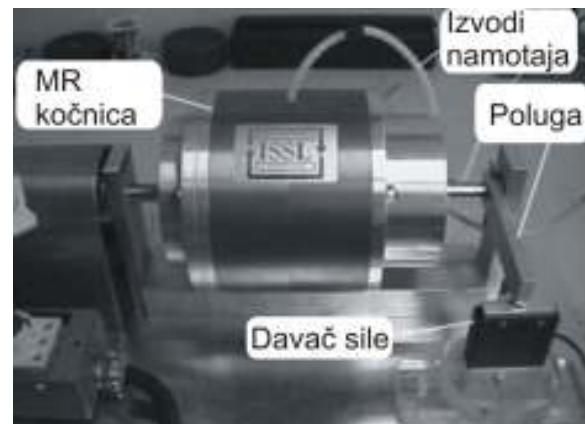
Slika 1. Laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika MR kočnica.  
Direktni metod, a) Nam and Ahn (2009), b) Wei et al. (2007).



a)



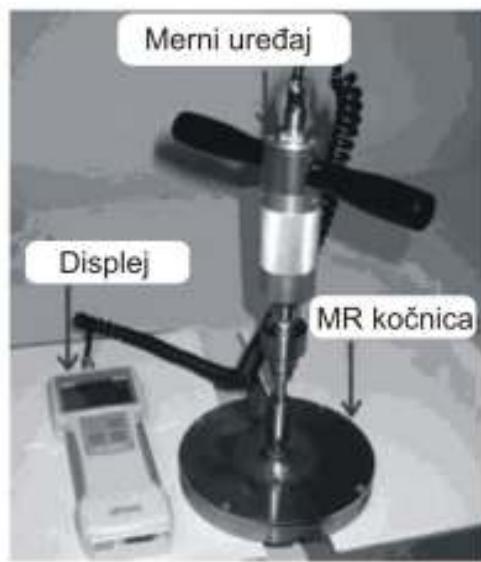
b)



c)

*Slika 2. Laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika MR kočnica.  
Indirektni metod, a) (Kavlicoglu et al., 2002), b), c) (Vijay and Washington, 2005).*

Ukoliko se izuzme razlika u načinu akvizicije, laboratorijski uređaji za merenje ukupnog kočnog momenta MR kočnice se ne razlikuju bitno prema konstrukciji. Svaki ispitni sto poseduje elektromotorni pogon, noseću konstrukciju i upravljačko akvizicionu opremu.



Slika 3. Laboratorijski uređaji za ispitivanje kočnih karakteristika MR kočnica.  
Jednostavniji direktni metod, (Lui et al., 2006).

## SUŠTINA TEHNIČKOG REŠENJA

Ukupni kočni moment MR kočnice se deli na tri osnovne komponente na osnovu prirode njihovog delovanja. Komponente ukupnog kočnog momenta su:

- frikcioni,
- viskozni i
- glavni kočni moment.

Prva i druga komponenta imaju približno konstantne vrednosti tokom vremena, dok je vrednost treće promenljiva u odgovarajućem opsegu. Frikcioni kočni moment predstavlja moment generisan od strane kotrljajnih ležajeva i zaptivajućih elemenata. Frikcioni kočni moment predstavlja komponentu ukupnog kočnog momenta koja se analitički teško modeluje i u praksi se često zamjenjuje koeficijentom određene vrednosti. Zbog ograničene količine informacija koje se mogu pronaći u vezi vrednosti ove komponente, ona se dobija merenjem za svaku MR kočnicu posebno.

Druga komponenta ukupnog kočnog momenta MR kočnice, viskozni kočni momenat, predstavlja komponentu ukupnog kočnog momenta čija vrednost zavisi od vrednosti tangencijalnog napona tečnosti. Do vrednosti ove komponente se takođe dolazi eksperimentalnim putem. Vrednost viskoznog kočnog momenta varira u zavisnosti od viskoznosti korišćene MR tečnosti.

Poslednja komponenta ukupnog kočnog momenta MR kočnice, je ujedno i komponenta čija se vrednost može varirati u zavisnosti od intenziteta jednosmerne struje u namotajima elektromagneta. Vrednost glavnog kočnog momenta se, koristeći različite analitičke modele, u suženim intervalima radnih uslova se može predvideti sa velikom preciznošću. Ipak, ni jedan model ne nudi rešenje sa visokim stepenom tačnosti zaceo dijapazon radnih uslova. Verifikacija rezultata dobijenih analitičkim putem se vrši ispitivanjem na laboratorijskom uređaju.

Merenje ukupnog kočnog momenta se vrši u nekoliko koraka. U svakom se sukcesivno mere vrednosti komponenti pri različitim vrednostima varirajućih parametara. Ovde primjenjeni, indirektni metod, vrednost sile dobija sa davača sile, slika 7, pozicija 8. Varirajući parametri su broj obrtaja vratila i intenzitet jednosmerne struje u namotaju elektromagneta a sve u zavisnosti od komponente koja se posmatra. Frikcionala i viskozna komponenta, kao varirajući parametar imaju samo broj obrtaja MR kočnice. Opseg korišćenih brzina se kreće od 150 do 750 o/min sa korakom od 50 o/min. Za svako merenje sesprovodi određeni broj merenja sa odgovarajućim vremenom trajanja. Glavni kočni moment, pored broja obrtaja vratila ima i intenzitet jednosmerne struje kao varirajući parametar. Opseg vrednosti struje se kreće od 0,2 do 2 A, sa korakom od 0,2 A. Dobijeni rezultati mogu jasno pokazivati vrednosti sve tri komponente ukupnog kočnog momenta.

## DETALJAN OPIS I KARAKTERISTIKE TEHNIČKOG REŠENJA

Glavna odlika tehničkog rešenja laboratorijskog uređaja za ispitivanje MR kočnice se ogleda u jednostavnosti konstrukcije kojom je omogućena brza izmena elemenata koji su ključni prilikom svakog ispitivanja.Takođe omogućen je visok stepen kontrole parametara i dobra ponovljivost eksperimenata.

Prilikom razvoja koncepcije ovog laboratorijskog uređaja vodilo se računa da se na što racionalniji način iskoriste resursi koji su dostupni pri Laboratoriji za Motore i Vozila - Fakulteta tehničkih nauka,Novi Sad.

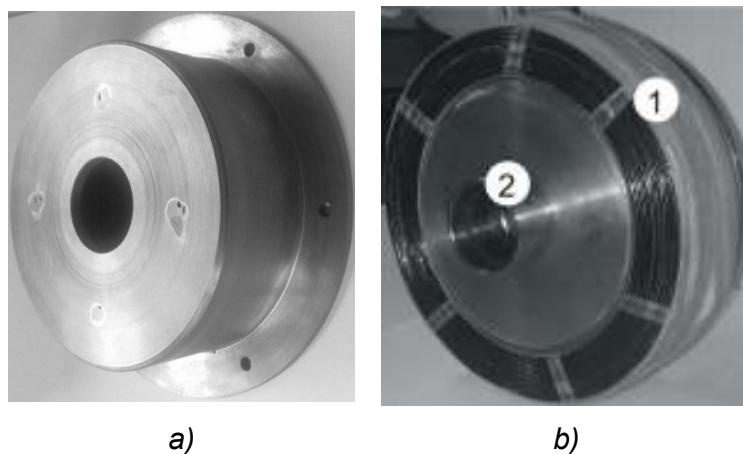
Laboratorijski uređaj se sastoji od MR kočnice, pogonskog dela sa nosećom konstrukcijom i merne opreme. Pogonski deo je u ovom trenutku isključivo rezervisan za elektromotorne pogone, različitih parametara.

MR kočnica se sastoji od:

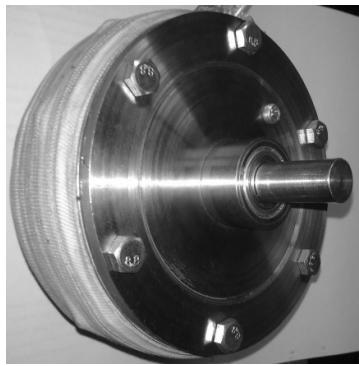
- statora,
- poklopca statora,
- namotaja,
- rotora i
- magnetoreološke tečnosti.

Stator ujedno predstavlja i nosač namotaja.Prednost ovog oblika statora je da se značajno smanjuje masa samog sistema. Elementi koje stator nosi su prikazani na slici 4, b).

MR kočnica predstavlja zatvoren sistem.Da bi se ostvarila hermetičnost sistema, stator koji ima ulogu jedne polovine kućišta se zatvara poklopcom statora.Poklopac statora je prikazan na slici 5 a).Spajanje statora i pokopca statora je ostvareno zavrtanjskom vezom u šest tačaka.



Slika 4. a) Stator bez dodatnih elemenata, b) stator sa dodatnim elementima,  
1 - namotaj, 2 - nosač ležaja.



a)



b)

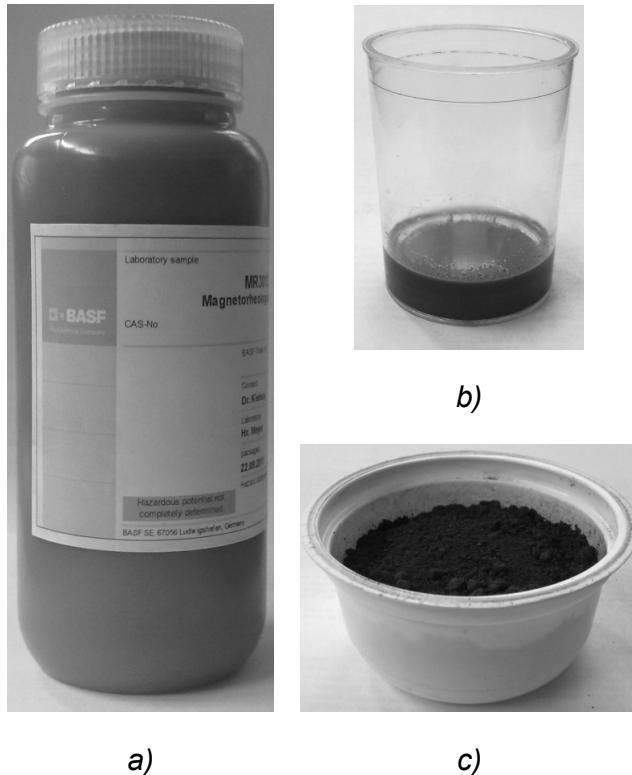
Slika 5. a) poklopac statora sa uležištenjem, b) rotor - vratilo sa diskom.

Stvaranje magnetnog polja koje deluje na MR tečnost unutar MR kočnice se ostvaruje namotajima, slika 4 b), pozicija 1. MR kočnica je sačinjena od magnetski mekog feromagnetskog materijala i sastoji se od statora, poklopca statora, diska i vratila. Geometrija i položaj ovih elemenata u odnosu na namotaj čine da sama konstrukcija ima ulogu jezgra elektromagneta. Ovakva koncepcija omogućava dobro usmeravanje magnetnog polja, paralelno sa osom vratila, što je izuzetno povoljno i očekivano sa aspekta delovanja na MR tečnost.

Rotor MR kočnice je sačinjen od dva dela, vratila i diska, slika 5 b). Deo vratila i sam disk je uvek u neposrednom kontaktu sa MR tečnošću. Rotor je takođe izložen dejstvu magnetnog polja.

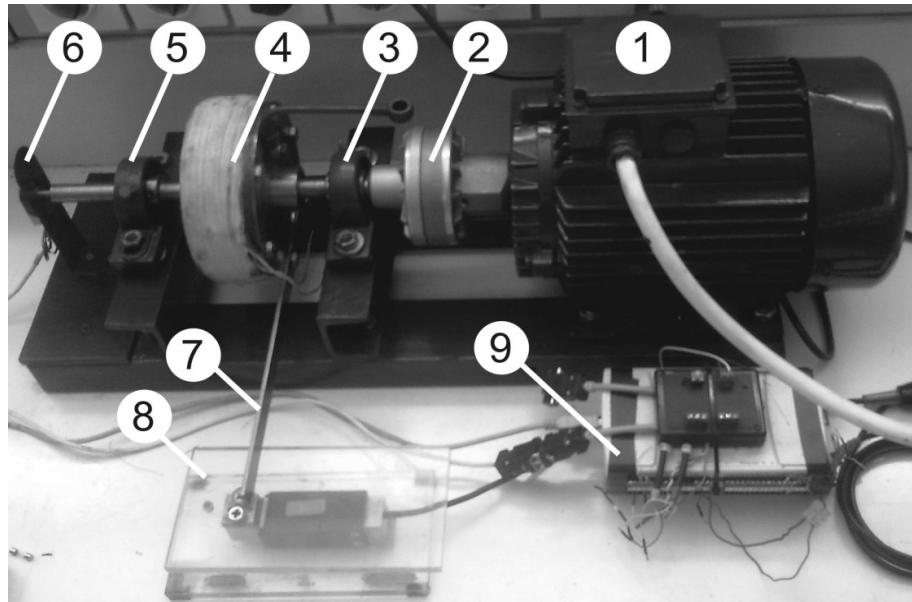
Ključni deo MR kočnice predstavlja MR tečnost. MR tečnost predstavlja suspenziju tečnosti nosioca i feromagnetskih čestica. Većina komercijalnih MR tečnosti koriste vodu, mineralno ili silikonsko ulje kao tečnost nosilac, dok se kao feromagnetski materijal koristi gvožđe i njegove legure a sve u zavisnosti od konkretnih potreba i aplikacija.

Prikazano rešenje kao osnovnu MR tečnost koristi proizvod kompanije BASF<sup>®</sup>, pod komercijalnim nazivom Basonetic<sup>®</sup> 5030. Pored Basonetic<sup>®</sup> 5030 u upotrebi su i mešavine MR tečnosti specijalno pravljene u Laboratoriji za Motore i Vozila, Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad. Svojstva posebno pravljenih MR tečnosti se upoređuju sa svojstvima tečnosti Basonetic<sup>®</sup> 5030, kako bi se eksperimentalnim putem došlo do tečnosti sa karakteristikama koje su iste ili bolje od karakteristika referentne tečnosti. Laboratorijska mešavina MR tečnosti, i feromagnetski materijal su prikazani na slici 4 a), b) i c).



*Slika 6. a) Magnetoreološka tečnost BASF®, Basonetic® 5030,  
 b) laboratorijska mešavina magnetoreološke tečnosti, c) feromagnetni materijal.*

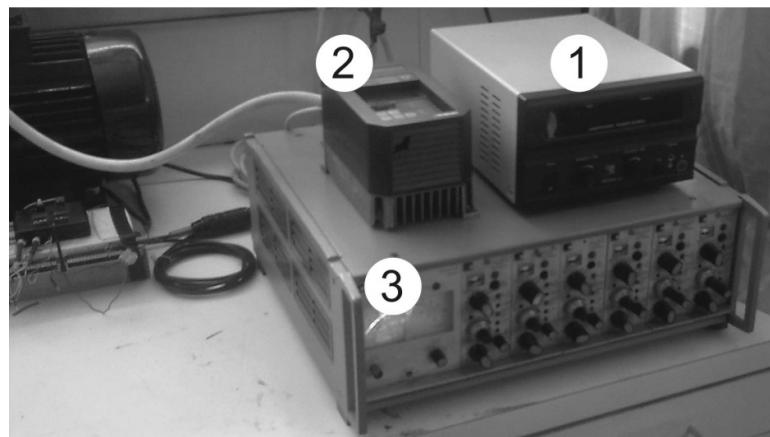
Sama MR kočnica jeu odnosu na smer obrtanja simetrična, što znači da se smer obrtanja vratila tretira jednak i za jedan za drugi smer, što je situacija koja se sreće i u literaturi (Phuong, 2011). Pogonski moment se dobija od elektromotora sa odgovarajućim karakteristikama, slika 7, pozicija 1. Veza odabranog elektromotora sa vratilom MR kočnice je ostvarena putem elastične spojnice, slika 7, pozicija 2. Sekundarna uloga spojnice je da kompenzuje male greške u nesaosnosti elemenata, koje nastaju prilikom montaže. Na istoj slici dalje su redom prikazani elementi po pozicijama: samopodesivi ležaj - 3 i 5, MR kočnica - 4, optički enkoder - 6, poluga – 7, davač sile i akviziciona kartica - 8 i 9, respektivno. Koncepcija ispitnog stola je linijskog tipa i kao takva omogućava brzu i laku izgradnju delova.



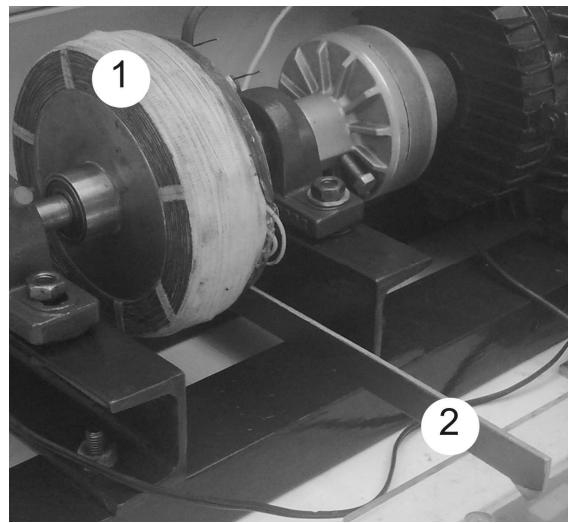
Slika 7. Laboratorijski uređaj za ispitivanje MR kočnica, 1 - elektromotorni pogon, 2 - elastična spojnica, 3 - samopodesivi ležaj, 4 - MR kočnica, 5 - samopodesivi ležaj, 6 - optički enkoder, 7 - poluga, 8 - davač sile, 9 - akviziciona kartica.

Upravljanje elektromotorom je ostvareno putem frekventnog regulatora, slika 8, pozicija 2.

Merenje kočnog momenta MR kočnice se vrši indirektno pomoću davača sile, prikazanog na slici 7, pozicija 8. Podaci sa davača sile se prvo obrađuju u mernom pojačalu, slika 8, pozicija 3, potom prikupljaju putem akvizicione kartice, slika 7, pozicija 9 i šalju u računar, na obradu. Izmereni kočni moment se može dati u funkciji vremena. Krajnji dobijeni rezultati predstavljaju ukupni kočni moment u funkciji intenziteta struje elektromagneta, pri tačno određenim vrednostima brzine.



Slika 8. Prikaz korišćene merne opreme, 1 - izvor stabilnog napona/struje, 2 - frekvencijski regulator, 3 - merno pojačalo.



*Slika 9. Princip merenja reaktivnog momenta.*

## **MOGUĆNOSTI PRIMENE TEHNIČKOG REŠENJA**

Laboratorijski uređaj za ispitivanje ponašanja MR kočionica ima primenu u širem spektru istraživačkih aktivnosti, među kojima su osnovne:

- razvojna ispitivanja MR kočnice sa ciljem optimizacije njenih karakteristika,
- eksploraciona ispitivanja MR tečnosti radi utvrđivanja spektra njenih upotrebnih osobina,
- međusobne uporedne analize različitih oblika rotora,
- izvođenje nastavnih aktivnosti.

Kako je navedeno osnovna namena laboratorijskog uređaja je ispitivanje kočnih mogućnosti MR kočionih sistema ali postoje i mogućnosti nadogradnje jednog ovakvog sistema. Nadogradnje sistema se ogledaju u promeni oblika rotora kao i broja rotora koji su u upotrebi. Mogućnost primene ovog uređajaje i u ulozi ispitivanja MR spojnica, pri čemu bi se ostvarila mogućnost izrazito fine regulacije momenta koji se prenosi. Ipak za ovaku namenu bilo bi neophodno izvršiti određene promene u konstrukciji.

## **ZAHVALNICA**

Ovo tehničko rešenje je nastalo u okviru rada na projektu TR35041 "Istraživanje bezbednosti vozila kao dela kibernetiskog sistema Vozač-Vozilo-Okruženje", finansiranog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

MR tečnost, korišćena u eksperimentima je obezbeđena posredstvom kompanije BASF®, pod komercijalnim nazivom Basonetic®5030. Autori ovog rada bi želeli da izraze zahvalnost korporaciji BASF®, kao i dr Kristoferu Kiburgu za svu podršku.

## LITERATURA

1. Kavlicoglu B. M., Gordaninejad F., Evrensel C. A., Cobanoglu N., Liu Y., Fuchs A. 2002. *A high-torque magneto-rheological fluid clutch*, Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures, San Diego, March 2002.
2. Liu B, Li W. H, Kosasih P. B. and Zhang X. Z. 2006. *Development of an MR-brake-based haptic device*, Smart materials and structures, 2006, volume 15, pp 1960-1966.
3. More T. A. 2009. *MR-fluid brake design and its application to a portable muscular rehabilitation device*. Ph. D. diss, Active Structures Laboratory Department of Mechanical Engineering and Robotics, Université Libre de Bruxelles, Faculte des Sciences Appliquées, Bruselas.
4. Nam T. H. and Ahn K. K. 2009. *A new structure of a magnetorheological brake with the waveform boundary of a rotary disk*. Smart Materials And Structures. 18 (115029), pp 1-14.
5. Nguyen Q. H. and Choi S. B. 2010. *Optimal design of an automotive magnetorheological brake considering geometric dimensions and zero-field friction heat*. Smart materials and structures 19 (115024): 1-11.
6. Phuong-Bac N. and Seung-Bok C. 2011. *A new approach to magnetic circuit analysis and its application to the optimal design of a bi-directional magnetorheological brake*. Smart materials and structures 20(125003): 1-12.
7. Rabinow J. 1948. *The magnetic fluid clutch*, American Institute of Electrical Engineers Transactions, Vol 67, pp 1308–1315.
8. Rabinow J. 1951. *Magnetic fluid torque and force transmitting device*, U.S. Pat. 2,575,360.
9. Vijay A. N. And Washington G. N. 2005. *Modeling and Reduction of Centrifuging in Magnetorheological (MR) Transmission Clutches for Automotive Applications*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures 2005 volume16, pp 703-711.
10. Wei Z., Chee-Meng C., and Geok-Soo H. 2007. *Development of a compact double-disk magneto-rheological fluid brake*, Robotica, 2007, volume 25, pp. 493–500.