

# Sustav upravljanja momentom e-spojke uključujući kompenzaciju utjecaja toplinskih učinaka

---

**Bencek, Martin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:794361>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Martin Bencek**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Joško Deur, dipl. ing.

Student:

Martin Bencek

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Najsrdajnije se zahvaljujem prof. dr. sc. Jošku Deuru na prihvaćanju mentorstva te što je svojim stručnim i znanstvenim komentarima znatno pomogao pri izradi ovog rada.

Zahvaljujem se dr. sc. Branimiru Škugoru na nesebičnom odvajanju vremena i uvijek spremnim odgovorima na sve nedoumice te na iznimno kvalitetnom vođenju kroz ovaj rad.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Matiji Hoiću koji je svojim stručnim komentarima i znanjem značajno pomogao pri eksperimentalnom dijelu ovog rada.

Na kraju volio bi se posebno zahvaliti obitelji, prijateljima i kolegama na iskazanoj podršci tijekom studija i izrade ovog rada.

Martin Bencek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Martin Bencek** Mat. br.: 0035212312

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sustav upravljanja momentom e-spojke uključujući kompenzaciju utjecaja toplinskih učinaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **E-clutch torque control system including compensation of thermal effects**

Opis zadatka:

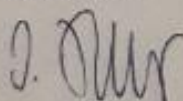
Ručni mjenjači široko se koriste u pogonima vozila zbog visoke učinkovitosti i relativno niske cijene. S ciljem proširenja funkcionalnosti i omogućavanja hibridizacije pripadnih transmisija, u automobilskoj se industriji ulažu značajni napor i usmjereni k automatizaciji ručnih mjenjača. Jedno od ključnih rješenja odnosi se na ugradnju elektronički upravljane spojke (tzv. e-spojka), čijim se okretnim momentom upravlja u otvorenoj petlji, najčešće posredstvom regulacije pozicije elektromehaničkog ili hidrostatskog aktuatora spojke. Pritom je u uvjetima promjenjive temperature spojke, a uslijed termalnog širenja njenih komponenti, moguće značajnije odstupanje okretnog momenta od referentnog iznosa. U radu je potrebno:

- provesti identifikaciju termalnih učinaka e-spojke temeljem snimljenih podataka za široki raspon radnih uvjeta;
- provesti parametriranje estimatora pozicije potisnog ležaja e-spojke;
- implementirati sustav upravljanja okretnim momentom e-spojke, koji uključuje kompenzaciju termalnih učinaka temeljenu na mjerenju te estimaciji pozicije potisnog ležaja;
- eksperimentalno provjeriti implementirani sustav upravljanja te analizirati dobivene rezultate.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
28. studenog 2019.

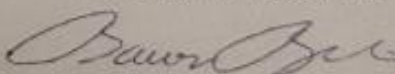
Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Joško Deur

Datum predaje rada:  
**1. rok:** 21. veljače 2020.  
**2. rok (izvanredni):** 1. srpnja 2020.  
**3. rok:** 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 24.2. - 28.2.2020.  
**2. rok (izvanredni):** 3.7.2020.  
**3. rok:** 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

---

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK .....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD .....	1
1.1. MTplus.....	1
1.2. ECM i AMT sustavi.....	3
1.3. E-spojka .....	3
2. OPIS POSTAVA E-SPOJKE .....	4
2.1. Podsustav aktuatora.....	4
2.2. Podsustav spojke .....	5
2.3. Električni i kontrolni podsustav .....	6
3. EKSPERIMENTALNA KARAKTERIZACIJA SUSTAVA .....	9
3.1. Prikaz eksperimenata .....	9
3.2. Analiza termalnih efekata .....	12
4. MODELIRANJE EFEKATA TERMALNE EKSPANZIJE.....	16
5. STRATEGIJA UPRAVLJANJA.....	19
6. VERIFIKACIJA STRATEGIJE UPRAVLJANJA .....	21
6.1. Offline analiza strategije upravljanja .....	21
6.2. Rezultati eksperimentalne verifikacije upravljačke strategije .....	26
7. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	34
PRILOZI .....	35

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Koncept MTplus sustava [4] .....	2
Slika 2.	Izvedba MTplus sustava [4] .....	2
Slika 3.	Funkcionalna shema sustava E-spojke [3, 4] .....	4
Slika 4.	Testni postav aktuatora [3] .....	5
Slika 5.	Funkcionalna shema sustava E-spojke [3] .....	6
Slika 6.	Funkcionalna shema električnog podsustava [3] .....	7
Slika 7.	Promjena temperature pritiskne ploče za različite dinamike zagrijavanja uključujući prirodno hlađenje .....	10
Slika 8.	Prikaz kvazi-statičkog eksperimenta .....	11
Slika 9.	Statičke krivulje CSC pozicije ( $s_{sc}$ ) i momenta spojke ( $M_{cl}$ ) u ovisnosti o HCA poziciji ( $s_{mc}$ ) uključujući usrednjene krivulje .....	12
Slika 10.	Utjecaj termalnih efekata na poziciju $s_{sc}$ (a), odstupanje $\Delta s_{sc}$ (b), moment $M_{cl}$ (c) i odstupanje momenta $\Delta M_{cl}$ (d) za slučaj brze dinamike grijanja .....	13
Slika 11.	Utjecaj termalnih efekata na poziciju $s_{sc}$ (a), odstupanje $\Delta s_{sc}$ (b), moment $M_{cl}$ (c) i odstupanje momenta $\Delta M_{cl}$ (d) za slučaj brze dinamike hlađenja .....	13
Slika 12.	Utjecaj termalnih efekata na poziciju $s_{sc}$ (a), odstupanje $\Delta s_{sc}$ (b), moment $M_{cl}$ (c) i odstupanje momenta $\Delta M_{cl}$ (d) za slučaj srednje dinamike grijanja .....	14
Slika 13.	Utjecaj termalnih efekata na poziciju $s_{sc}$ (a), odstupanje $\Delta s_{sc}$ (b), moment $M_{cl}$ (c) i odstupanje momenta $\Delta M_{cl}$ (d) za slučaj srednje dinamike hlađenja .....	14
Slika 14.	Utjecaj termalnih efekata na poziciju $s_{sc}$ (a), odstupanje $\Delta s_{sc}$ (b), moment $M_{cl}$ (c) i odstupanje momenta $\Delta M_{cl}$ (d) za slučaj spore dinamike grijanja .....	15
Slika 15.	Utjecaj termalnih efekata na poziciju $s_{sc}$ (a), odstupanje $\Delta s_{sc}$ (b), moment $M_{cl}$ (c) i odstupanje momenta $\Delta M_{cl}$ (d) za slučaj spore dinamike hlađenja .....	15
Slika 16.	Korelacijski indeksi K za ovisnost $\Delta M_{cl}$ vs. $\Delta s_{sc}$ i puni raspon HCA pozicije $s_{mc}$ za sve dinamike grijanja i hlađenja zasebno (a) te korelacijski indeks za sve dinamike zajedno (b) .....	17
Slika 17.	Ovisnost odstupanja momenta ( $\Delta M_{cl}$ ) o odstupanju CSC pozicije ( $\Delta s_{sc}$ ) za dvije vrijednosti HCA pozicije ( $s_{mc}$ ) .....	18
Slika 18.	Parametri $K_{line}$ i $L_{line}$ linearnog modela ovisnosti $\Delta M_{cl}(\Delta s_{sc})$ za puni raspon HCA pozicije $s_{mc}$ .....	18
Slika 19.	Osnovne krivulje momenta spojke i CSC pozicije u ovisnosti o HCA poziciji (snimljene za SH eksperiment) s polinomskim aproksimacijama .....	19
Slika 20.	Blok dijagram upravljačke strategije [1] .....	20
Slika 21.	Verifikacijski rezultati za brzu dinamiku grijanja (FH) .....	21
Slika 22.	Verifikacijski rezultati za brzu dinamiku hlađenja (FC) .....	22
Slika 23.	Verifikacijski rezultati za srednju dinamiku grijanja (MH) .....	22
Slika 24.	Verifikacijski rezultati za srednju dinamiku hlađenja (MC) .....	23

Slika 25.	Verifikacijski rezultati za sporu dinamiku grijanja (SH) .....	23
Slika 26.	Verifikacijski rezultati za sporu dinamiku hlađenja (SC).....	24
Slika 27.	Srednja i maksimalna greška momenta za širok raspon temperatura spojke, različite reference momenta, brzu dinamiku grijanja ((a) i (b)) i brzu dinamiku hlađenja ((c) i (d)) .....	25
Slika 28.	Srednja i maksimalna greška momenta za širok raspon temperatura spojke, različite reference momenta, srednju dinamiku grijanja ((a) i (b)) i srednju dinamiku hlađenja ((c) i (d)) .....	25
Slika 29.	Srednja i maksimalna greška momenta za širok raspon temperatura spojke, različite reference momenta, sporu dinamiku grijanja ((a) i (b)) i sporu dinamiku hlađenja ((c) i (d)) .....	26
Slika 30.	Eksperimentalni rezultati za raspon temperatura spojke 0.446 – 0.475 p.j. ....	27
Slika 31.	Odziv sustava na referencu momenta za raspon temperatura spojke 0.446 – 0.475 p.j.....	28
Slika 32.	Raspodjela reziduala $M_{cl} - M_{clR}$ s kompenzacijom ((a) i (b)) i bez kompenzacije ((c) i (d)) termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.446 – 0.475 p.j. ....	28
Slika 33.	Eksperimentalni rezultati za raspon temperatura spojke 0.492 – 0.515 p.j. ....	29
Slika 34.	Odziv sustava na referencu momenta za raspon temperatura spojke 0.492 – 0.515 p.j.....	29
Slika 35.	Raspodjela reziduala $M_{cl} - M_{clR}$ s kompenzacijom ((a) i (b)) i bez kompenzacije ((c) i (d)) termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.492 – 0.515 p.j. ....	30
Slika 36.	Eksperimentalni rezultati za raspon temperatura spojke 0.568 – 0.626 p.j. ....	30
Slika 37.	Odziv sustava na referencu momenta za raspon temperatura spojke 0.568 – 0.626 p.j.....	31
Slika 38.	Raspodjela reziduala $M_{cl} - M_{clR}$ s kompenzacijom ((a) i (b)) i bez kompenzacije ((c) i (d)) termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.568 – 0.626 p.j. ....	31
Slika 39.	Indeksi determinacije $R^2$ za različite estimacijske modele $\Delta_{sc}$ .....	36
Slika 40.	Odziv linearnog modela estimacije s dva ulazna parametra .....	37



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Referentne vrijednosti temperaturnih razina na kojima se provodi kvazi-statički eksperiment (prikazane su vrijednosti po jedinici, p.j.) .....	9
Tablica 2.	Vrijednosti standardne devijacije i varijable $p$ za različite raspone temperatura spojke i slučajeve s i bez kompenzacije termalnih efekata .....	32
Tablica 3.	Apsolutne srednje vrijednosti reziduala $M_{cl} - M_{clR}$ za slučaj s i bez kompenzacije termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.446 – 0.475 p.j. ....	32
Tablica 4.	Apsolutne srednje vrijednosti reziduala $M_{cl} - M_{clR}$ za slučaj s i bez kompenzacije termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.492 – 0.515 p.j. ....	32
Tablica 5.	Apsolutne srednje vrijednosti reziduala $M_{cl} - M_{clR}$ za slučaj s i bez kompenzacije termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.568 – 0.626 p.j. ....	32

---

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
$a, b, c$	koeficijenti kvadratne funkcije
$a_2, a_1, a_0$	parametri krivulje $M_{cl,0}$
$b_2, b_1, b_0$	parametri krivulje $K_{line}$
$c_2, c_1, c_0$	parametri krivulje $L_{line}$
$K_{line}$	koeficijent smjera pravca
$K$	indeks korelacije
$L_{line}$	odsječak pravca
$M_{cl}$	moment spojke
$M_{clR}$	referenca momenta spojke
$M_{cl,0}$	osnovna ovisnost momenta spojke o poziciji hidrostatičkog aktuatora pri sobnoj temperaturi
$R^2$	indeks determinacije
$s_{mc}$	položaj hidrostatičkog aktuatora
$s_{mcR}$	referenca pozicije hidrostatičkog aktuatora
$s_{sc}$	pozicija podređenog cilindra
$s_{sc,0}$	osnovna ovisnost pozicije podređenog cilindra o poziciji hidrostatičkog aktuatora pri sobnoj temperaturi
$T_{bh}$	temperatura kućišta
$T_{cl}$	temperatura spojke
$T_{fw1}$	temperatura prve zamašne mase
$T_{fw2}$	temperatura druge zamašne mase
$T_{pp}$	temperatura pritisne ploče
$T_{yo}$	temperatura jarma
$\Delta M_{cl}$	odstupanje momenta spojke
$\Delta s_{sc}$	odstupanje pozicije podređenog cilindra
$\Delta M_{cl,mean}$	srednja pogreška momenta upravljačke strategija
$\Delta M_{cl,max}$	maksimalna pogreška momenta upravljačke strategije

**SAŽETAK**

Ovaj rad bavi se kompenzacijom termalnih efekata sustava E-spojke namijenjenog za automatizaciju ručnih transmisija. Predstavljen je koncept aktuacije spojke koji pomoću hidrostatičkog aktuatora omogućuje primjenu naprednih režima vožnje i značajno smanjenje potrošnje goriva. Radi određivanja ponašanja sustava razvijen je eksperimentalni postav na kojem se provode različiti eksperimenti u svrhu određivanja ponašanja sustava u stvarnim radnim uvjetima. Analizom eksperimentalnih rezultata zaključeno je da promjene temperature sustava te različita dinamika grijanja/hlađenja značajno utječu na moment koji se prenosi preko spojke. Korelacijskom analizom odstupanja momenta spojke i pozicije podređenog cilindra utvrđeno je da postoji značajna veza između tih dviju veličina. U svrhu kompenzacije utjecaja termalnih efekata predstavljena je upravljačka strategija momenta spojke u otvorenoj petlji koja je verificirana eksperimentalno.

Ključne riječi: E-spojka, ručna transmisija, modeliranje termalnih efekata, upravljanje momentom spojke, kompenzacija termalnih efekata

---

**SUMMARY**

This thesis deals with a compensation of thermal effects of E-clutch system aimed for automation of manual transmissions. The concept of clutch actuation is presented, which enables the application of advanced driving modes by using a hydrostatic actuator and thus significant reduction of fuel consumption. In order to characterize the system, an experimental test rig has been built, and various experiments are conducted to determine behavior of the system under different realistic operating conditions. Analyses of experimental data revealed that variations of the system temperature under different heating/cooling dynamics significantly impacts the transmitted clutch torque. Furthermore, a comprehensive correlation analysis reveals existence of significant correlation between the clutch torque and slave cylinder position deviations. For the purpose of eliminating the thermal effects, an open-loop control strategy is presented and experimentally verified.

Key words: E-clutch, manual transmission, modelling of thermal effects, clutch torque control, compensation of thermal effects

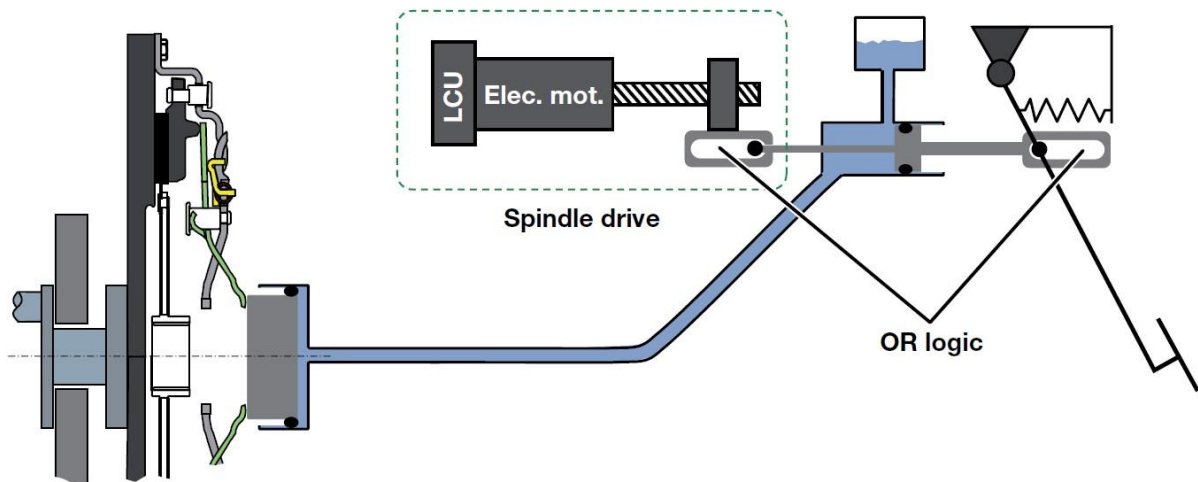
## 1. UVOD

Unatoč značajnom razvoju električnih automobila, na današnjem tržištu najzastupljenija su vozila koja koriste motore s unutarnjim izgaranjem kao pokretačku jedinicu. Očekuje se da će takvo stanje ostati još dugi niz godina. Zbog toga se velika važnost u današnjoj automobilskoj industriji pridaje smanjenju potrošnje goriva. Kako bi se postiglo značajno smanjenje potrošnje goriva, a time i emisija štetnih plinova, potrebno je utvrditi moguća poboljšanja oko samog motora i transmisije. Pri tome, užitak i udobnost vožnje ne smiju se smanjiti i ugroziti na bilo koji način. Ručne transmisije bile su superiornije nad automatskim transmisijama u pogledu potrošnje goriva. Primjena optimiziranih krivulja promjene brzina omogućila je automatskim transmisijama razne prednosti u voznom ciklusu u odnosu na ručne transmisije. Današnje nove tehnologije koje omogućuju smanjenje potrošnje goriva pružaju priliku da se automatska transmisija optimira u tom pogledu. Kako bi se zadržala ručna transmisija i omogućila primjena različitih strategija štednje goriva kao što su vožnja na konstantnoj brzini, sprječavanje gušenja motora nepravilnom upotrebom spojke te omogućila primjena regenerativnog kočenja i ostalih metoda rekuperacije energije kod hibridnih vozila potrebno je automatizirati spojku. Pokazano je u [4] da se implementacijom ovih strategija može smanjiti potrošnja goriva čak za više od 6%, što je vrlo značajna brojka u smislu globalne primjene.

U sljedećem dijelu će se ukratko opisati tri varijante implementacije automatizirane spojke.

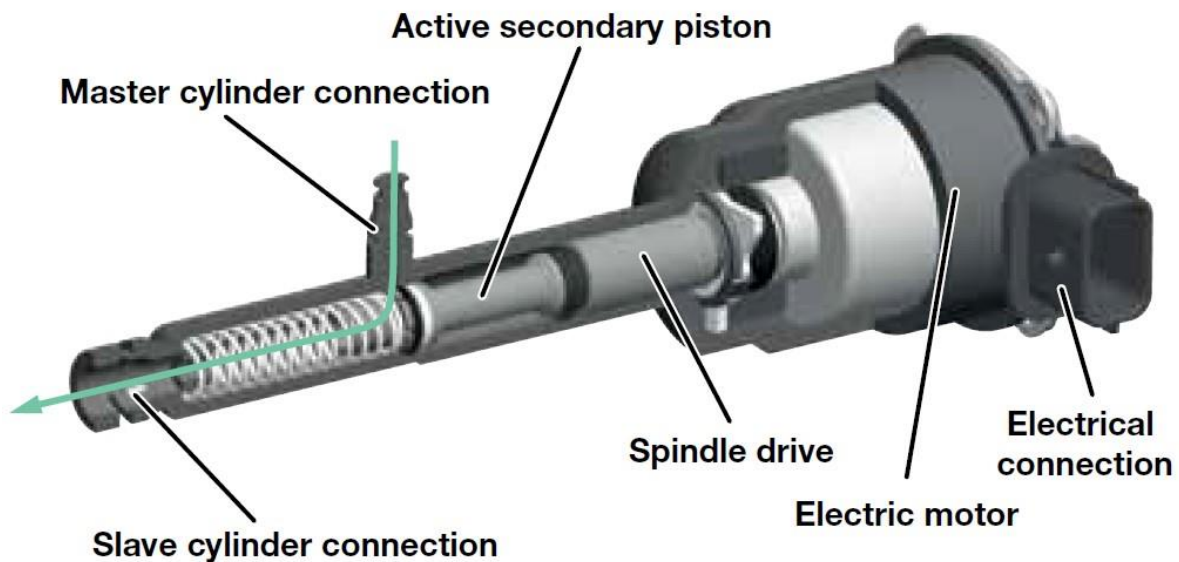
### 1.1. MTplus

Ovo rješenje omogućava klasičnu i automatsku aktuaciju spojke. Bitno je napomenuti da se kod ovog sustava cijelo vrijeme prioritet kontrole nad vozilom daje vozaču. Na Slici 1 prikazan je koncept ovog sustava te se mogu primijetiti dvije značajne karakteristike. Prva karakteristika je da se nikada rad koji obavlja aktuator nikada ne prenosi na pedal spojke, a druga karakteristika je da se pozicija otpuštanja spojke definira pomoću ILI logike (kontrolu ima vozač ili aktuator). Ovo osigurava da se u svakom trenutku daje prioritet naredbi vozača.



Slika 1. Koncept MTplus sustava [4]

U [1] su predstavljena ukupno tri koncepta ove aktuacije. Na Slici 2 prikazano je najbolje rješenje ovog sustava. Direktna veza između glavnog i podređenog cilindra za vrijeme aktuacije spojke od strane vozača ostvarena je hidrauličkim putem (zeleni linija na Slici 2). Bitno je napomenuti da kod ovakve direktne veze nema izraženih dodatnih gubitaka (primarno gubici trenja). U modu automatske aktuacije srednji klip (povezan s motorom) blokira glavni tok fluida (tok od strane glavnog cilindra) te preuzima kontrolu nad aktuacijom. Nedostatak ovog sustava je problematika ostvarenja glatkog prijelaza bez trzaja u slučaju zaprimljenog signala od strane vozača. Stoga je ovaj koncept još uvijek u razvoju.



Slika 2. Izvedba MTplus sustava [4]

## **1.2. ECM i AMT sustavi**

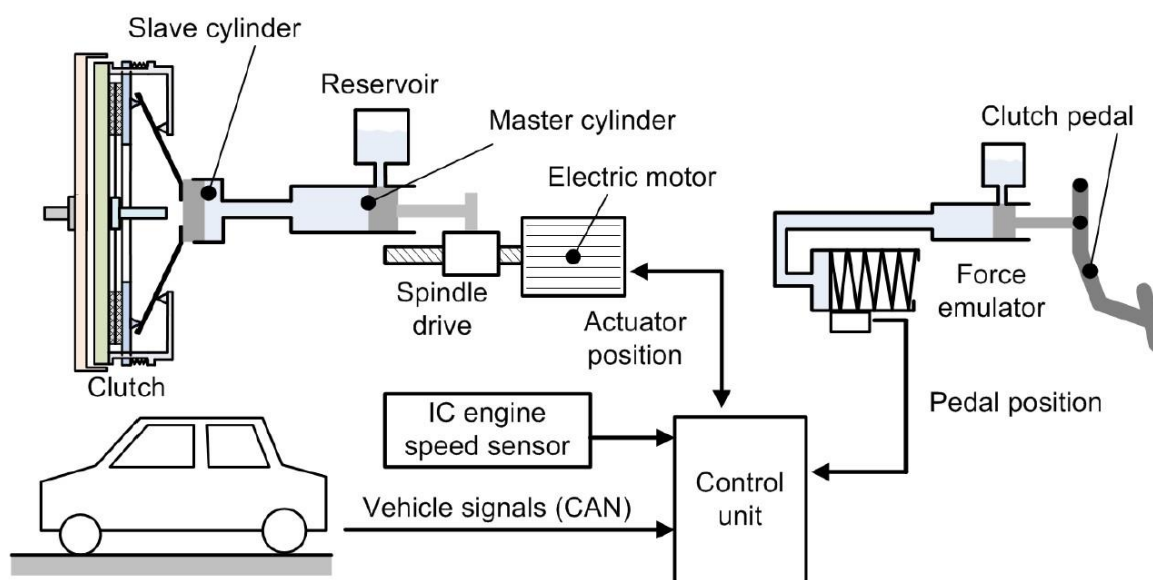
ECM sustav razvijen je od strane tvrtke LuK. Vozila opremljena s ovim sustavom nisu uspjela privući veliki broj kupaca te zbog toga više nisu na tržištu. Jedan od mogućih razloga je taj da vozilo dolazi samo s dvije pedale, odnosno pedala ubrzanja i kočnice. Zbog toga u velikom dijelu slični automatskoj transmisiji. AMT sustav također se našao na tržištu u isto vrijeme kao i ECM. Ni ovaj sustav nije doživio uspjeh na tržištu. Razlog tome je značajan prekid u vučnoj snazi kod promjene stupnja prijenosa, što stavlja AMT u nepovoljan položaj prema automatskoj transmisiji s obzirom na udobnost vožnje.

## **1.3. E-spojka**

Ovo je sustav koji za vozača ima jednaku funkcionalnost kao i klasična manualna transmisija. Pedala spojke nije mehanički spojena sa samom spojkom, već ona služi samo kao komunikacija s aktuatorom kako bi se odredila namjera vozača. Pošto više nema mehaničke veze sa spojkom, potrebno je emulirati silu na pedalu spojke kako bi vozač imao osjećaj da on upravlja aktuacijom spojke. Koncept ovog sustava poznat je već neko vrijeme, ali se nije radilo na njegovom razvoju zbog lošeg omjera cijene i korisnosti sustava. U današnje doba, gdje je došlo do značajnog razvoja efektivne vožnje s obzirom na potrošnju goriva i intenzivne elektrifikacije vozila, smisao razvoja ovog sustava dobio je novi značaj. Sustav E-spojke potpuno je automatiziran te omogućuje značajna poboljšanja tijekom vožnje zbog primjene predefiniranih strategija upravljanja spojkom. Ukoliko vozač ne uskladi pedalu spojke s pedalom gasa ili pogrešno upravlja aktuacijom spojke ovaj sustav sposoban je detektirati i ispraviti pogreške vozača. Na Slici 3 prikazana je arhitektura sustava E-spojke. Upravljačka jedinica prima informacije o vozilu, namjeri vozača (pozicija pedale spojke). Preko određenih strategija upravljanja zatim se određuje moment koji prenosi spojka. Ovo je sustav aktuacije koji je predmet ovog rada te je u sljedećem poglavlju detaljno opisan postav koji je razvijen za eksperimentalnu karakterizaciju, utvrđivanje ponašanja i efikasnosti sustava E-spojke.

## 2. OPIS POSTAVA E-SPOJKE

Za potrebe razvoja sustava E-spojke (engl. „*clutch-by-wire*“) razvijen je eksperimentalni postav na kojem su provedeni eksperimenti u svrhu utvrđivanja ponašanja sustava u stvarnim radnim uvjetima. Sustav se sastoji od hidrostatičkog aktuatora pogonjenog DC servo motorom i suhe spojke s jednom tarnom pločom, koji ujedno i čine dva glavna podsustava.

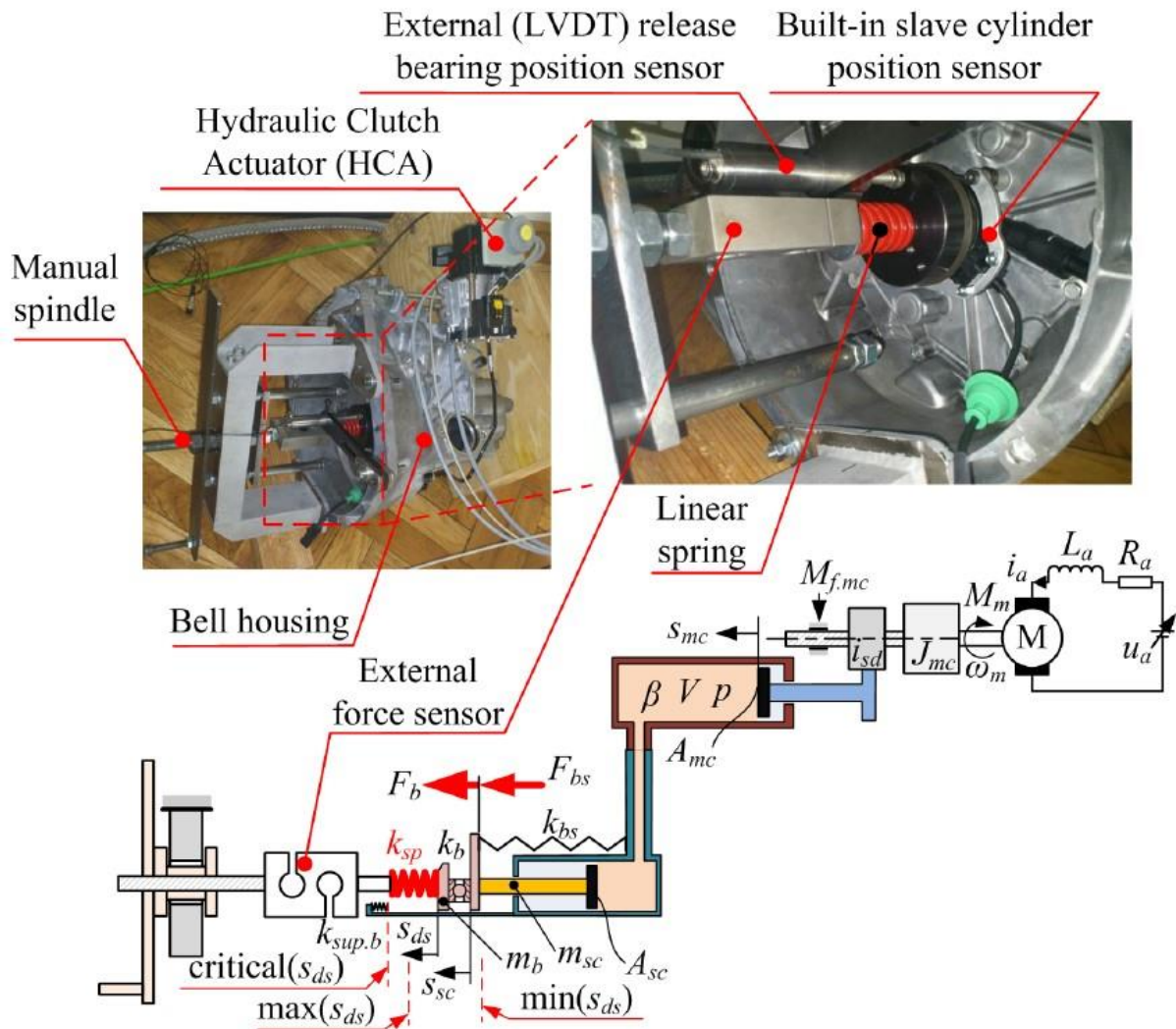


Slika 3. Funkcionalna shema sustava E-spojke [3, 4]

### 2.1. Podsustav aktuatora

Podsustav aktuatora sastoji se od hidrauličkog aktuatora spojke (engl. „*Hydraulic Clutch Actuator*“, HCA) i podređenog cilindra (engl. „*Clutch Slave Cylinder*“, CSC). HCA se sastoji od DC servo motora bez četkica, navojnog vretena i primarnog hidrauličkog cilindra. Cijeli sustav je pozicioniran izvan kućišta motora. CSC se sastoji od sekundarnog (podređenog) cilindra, sigurnosnog ventila, aksijalnog potisnog ležaja i povratne opruge. Podsustav CSC-a pozicionira se oko ulaznog vratila transmisije što omogućuje direktno djelovanje aksijalnog ležaja na tanjurastu oprugu spojke. Bitno je napomenuti da je sekundarni cilindar spojen s aksijalnim ležajem u jednu cjelinu. Veza između HCA i CSC sustava ostvaruje se pomoću jedne hidrauličke cijevi. Mjerene vrijednosti ovog podsustava su pozicija klipa HCA, napon motora i tlak fluida. Također, CSC podsustav je opremljen sa senzorom pozicije položaja aksijalnog ležaja.





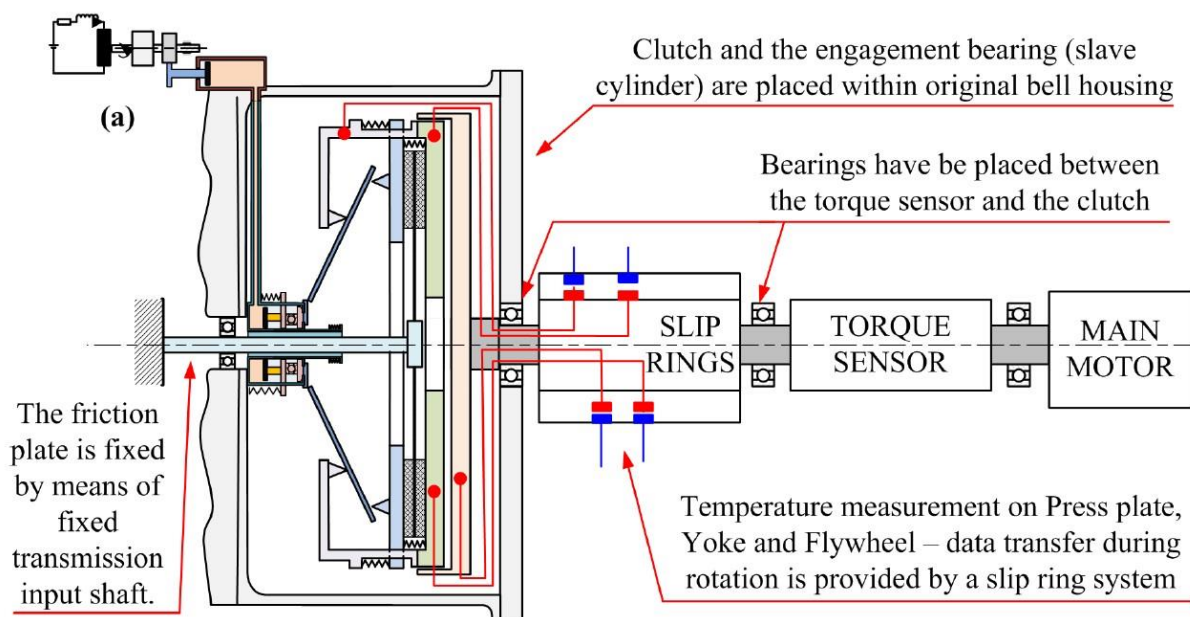
Slika 4. Testni postav aktuatora [3]

## 2.2. Podsustav spojke

Za opterećenje spojke koristi se sinkroni servo motor s permanentnim magnetima nazivne snage 35kW. Povratna informacija o momentu pogonskog motora dobiva se pomoću telemetrijskog senzora. Tarna ploča spojke montirana je na fiksirano ulazno vratilo transmisije. Ovaj način montaže cijelog podsustava jednak je onom u stvarnom vozilu (osim fiksiranog vratila transmisije) te se na ovaj način pokušava simulirati stvarna situacija u kojoj bi se ovakav sustav koristio.

Svrha ovog postava je određivanje ponašanja sustava prilikom zagrijavanja, stoga je on opremljen s pet senzora temperature. Tri senzora postavljena su u rupe napravljene u primarnom i sekundarnom zamašnjaku, te u pritisknoj ploči spojke. Svi senzori pozicionirani su na srednjem promjeru svake od komponenata. Od preostala dva senzora, jedan je postavljen na jaram dok je drugi postavljen na kućište spojke. Pomoću sustava kliznih prstenova (model SK5, tvrtke

HBM) odvija se prijenos signala temperaturnih senzora s dijelova koji rotiraju. Relativno gibanje zamašnih masa prilikom pokretanja sustava može dovesti do uništenja žica temperaturnih senzora. Kako bi se to spriječilo zamašne mase međusobno su pričvršćene vijcima. Na taj način uklonjena je mogućnost prigušenja torzijskih vibracija, što je svrha dvomasenog zamašnjaka. U stvarnom vozilu primarni izvor vibracija je motor s unutrašnjim izgaranjem. Postav E-spojke pogonjen električnim motorom izaziva torzijske vibracije značajno manjeg intenziteta u odnosu na motor s unutrašnjim izgaranjem. Stoga se u navedenom slučaju funkcija prigušivanja torzijskih vibracija pomoću dvomasenog zamašnjaka može zanemariti. Inercija, termalna masa i koeficijenti prolaza topline ostaju jednaki.



Slika 5. Funkcionalna shema sustava E-spojke [3]

### 2.3. Električni i kontrolni podsustav

Postav je upravljan pomoću industrijskog Pentium III računala. Upravljački program napisan je u C programskom jeziku za DOS operacijski sustav. Računalo je opremljeno akvizicijskom karticom koja služi za prikupljanje izmjerenih podataka temperatura spojke  $T_{pp}$ ,  $T_{fw1}$ ,  $T_{fw2}$ ,  $T_{yo}$  i primijenjenog momenta  $M_{cl}$ . Također, akvizicijska kartica koristi se za generiranje analognog signala reference i digitalnih upravljačkih signala. Brzina glavnog (pogonskog) motora spojke  $\omega_1$  i pozicija CSC-a  $s_{sc}$  mjere se korištenjem multifunkcionalne dodatne računalne kartice. Vanjska kartica za konverziju koristi se za interpolaciju sinusnog signala koji dolazi od strane inkrementalnog enkodera i daje TTL signal koji se šalje ranije spomenutoj računalnoj kartici. Na taj način omogućuje se mjerenje pozicije i brzine motora visoke rezolucije.



U upravljačkom programu implementiran je proporcionalno-integracijski (PI) regulator koji služi za regulaciju brzine vrtnje pogonskog motora. Izvršavanje upravljačkog programa podijeljeno je u nekoliko karakterističnih faza:

- otvaranje spojke postavljanjem reference HCA pozicije na maksimalnu vrijednost
- postizanje predefinirane brzine pogonskog motora
- izračunavanje pogreške mjerenja primijenjenog momenta (zbog trenja u ležajevima)
- pozicioniranje HCA i brzine pogonskog motora na inicijalnu vrijednost
- pokretanje i izvršavanje određenog eksperimenta
- zaustavljanje pogonskog motora ( $\omega_1 = 0$ ) iza čega slijedi zatvaranje spojke

Također, u svrhu dobivanja točnog mjerenja momenta koji se prenosi preko spojke, potrebno je od vrijednosti signala momenta oduzeti utjecaj momenta akceleracije koji je povezan s inercijama smještenima prije senzora momenta. Za određivanje iznosa tih „parazitskih“ momenata potrebno je poznavati akceleraciju inercijskih masa. Iznos akceleracije dobiva se deriviranjem signala brzine, ali je negativna posljedica deriviranja izražen šum u signalu. Kompenzacija šuma postiže se filtriranjem signala akceleracije zajedno s mjerenim signalom momenta pomoću nisko-propusnog filtra četvrtog reda.

### 3. EKSPERIMENTALNA KARAKTERIZACIJA SUSTAVA

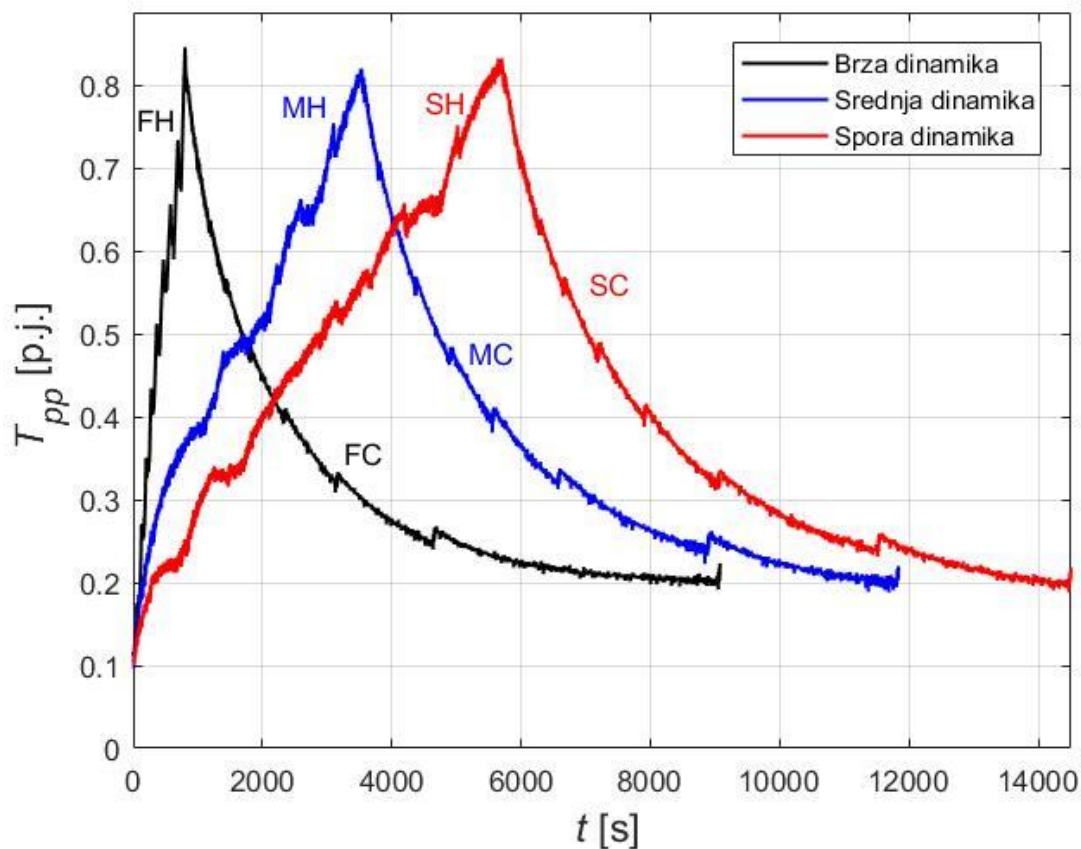
Normalnim radom spojke dolazi do disipacije topline čime se cijela spojka zagrijava. Porast temperature uzrokuje širenje komponenata spojke što u konačnici dovodi do promjena određenih parametara i netočnog pozicioniranja. U suštini, ovo znači da s promjenom temperature E-spojke ona neće prenositi isti moment za jednaku HCA poziciju, što će biti prikazano u nastavku ovog poglavlja. Kako bi se prikazala ova tendencija toplinskog širenja komponenata provedeni su eksperimenti u svrhu široke karakterizacije ponašanja sustava. Provedena su ukupno tri eksperimenta zagrijavanja. Nakon što je postignuta maksimalna temperatura uslijedilo je prirodno hlađenje E-spojke. Eksperimenti zagrijavanja provedeni su s različitim dinamikama (brzinama) grijanja kako bi se istovremeno utvrdio utjecaj ove dinamike na cijeli sustav.

#### 3.1. Prikaz eksperimenata

Provedeni su eksperimenti brze, srednje i spore dinamike zagrijavanja E-spojke, kao što je prikazano na Slici 7. Nakon što se postigne određena temperaturna razina (sve razine prikazane su u Tablici 1) provodi se kvazi-statički eksperiment. Isti eksperiment provodi se i u periodu hlađenja na predodređenim iznosima temperatura. Pritom se kao referentna vrijednost temperature uzima temperatura pritisne ploče  $T_{pp}$ .

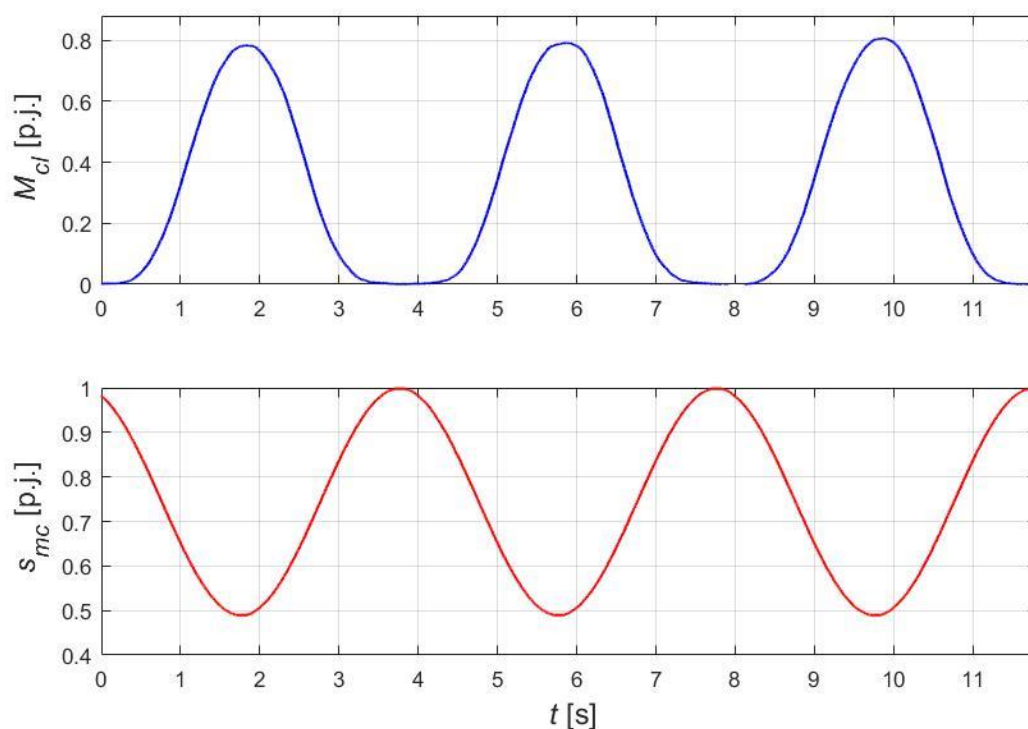
**Tablica 1. Referentne vrijednosti temperaturnih razina na kojima se provodi kvazi-statički eksperiment (prikazane su vrijednosti po jedinici, p.j.)**

	Temperatura [p.j.]									
Zagrijavanje	0.08	0.16	0.24	0.32	0.4	0.48	0.56	0.64	0.72	0.8
Hlađenje	0.72	0.64	0.56	0.48	0.4	0.32	0.24	0.2		



**Slika 7. Promjena temperature pritiskne ploče za različite dinamike zagrijavanja uključujući prirodno hlađenje nakon faze zagrijavanja**

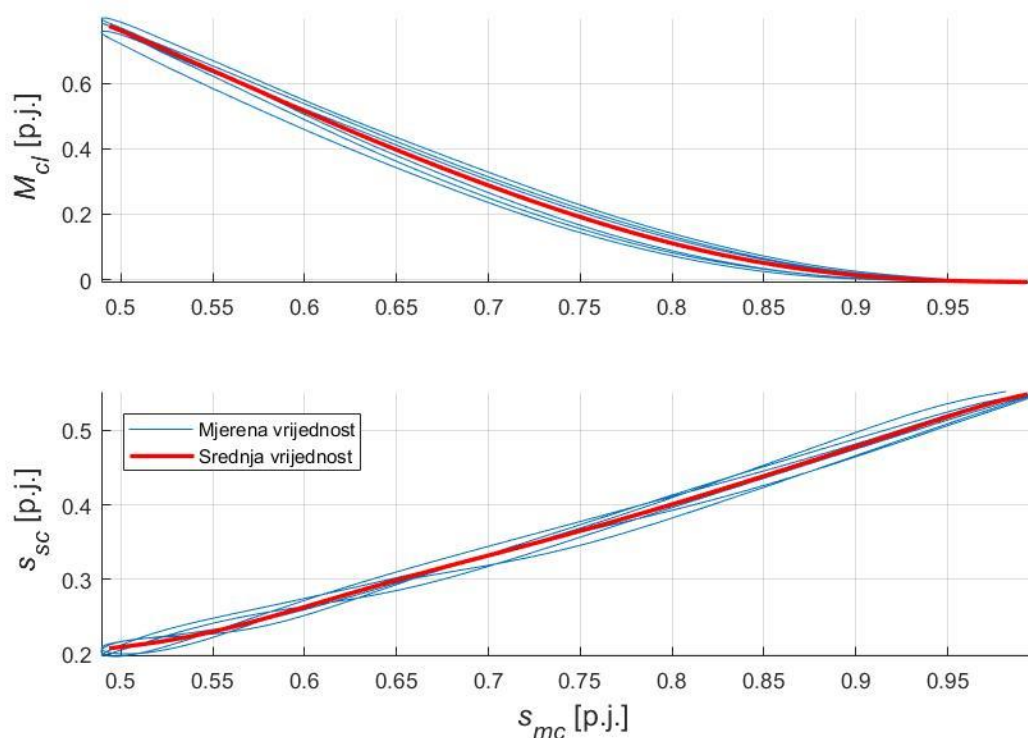
Kvazi-statički eksperiment odvija se tako da se referenca HCA pozicije ( $s_{mc}$ ) mijenja prema sinusoidi. Period sinusoide ponavlja se tri puta (prikazano na Slici 8). Bitno je napomenuti kako je prije svakog provođenja kvazi-statičkog eksperimenta potrebno provesti proceduru punjenja HCA cilindra uljem. Ova procedura služi kako bi se svaki puta eksperiment pokrenuo iz iste točke, odnosno HCA pozicija vraća se na početnu vrijednost („nuliranje“ aktuatora).



**Slika 8. Prikaz kvazi-statičkog eksperimenta**

Na Slici 8. prikazan je primjer kvazi-statičkog sinusnog eksperimenta. Spojka je isključena kada je HCA u maksimalnoj poziciji, odnosno uključena kada je HCA u minimalnoj poziciji. Na Slici 9 prikazana je ovisnost momenta spojke u ovisnosti o poziciji HCA. Kao što se može vidjeti postoji određena histereza koja je uzrokovana trenjem u sustavu. Kako bi se mogla izvršiti analiza termalnih efekata, potrebno je izračunati srednju krivulju momenta s obzirom na HCA poziciju (crvena linija na Slici 9).





**Slika 9. Statičke krivulje CSC pozicije ( $s_{sc}$ ) i momenta spojke ( $M_{cl}$ ) u ovisnosti o HCA poziciji ( $s_{mc}$ ) uključujući usrednjene krivulje**

### 3.2. Analiza termalnih efekata

Detaljnou obradom i analizom snimljenih krivulja (prikazanih u potpoglavlju 3.1.) za sve dinamike grijanja (FH, MH i SH) i hlađenja (FC, MC i SC) može se primijetiti trend povećanja CSC pozicije  $s_{sc}$  i smanjenja momenta spojke  $M_{cl}$  u skladu s povećanjem temperature E-spojke (prikazano na slikama 10, 11, 12, 13, 14, 15) za čitav raspon HCA pozicije  $s_{mc}$ . Na istim slikama prikazane su referentne krivulje  $s_{sc,0}$  i  $M_{cl,0}$ . Bitno je napomenuti da referentne krivulje odgovaraju podacima snimljenim u SH eksperimentu za prvu referentnu temperaturnu razinu (v. tablicu 1). Korištenjem referentnih krivulja može se definirati odstupanje momenta spojke  $\Delta M_{cl}$  i odstupanje pozicije CSC-a  $\Delta s_{sc}$  kako slijedi

$$\Delta s_{sc} = s_{sc} - s_{sc,0}, \quad (1)$$

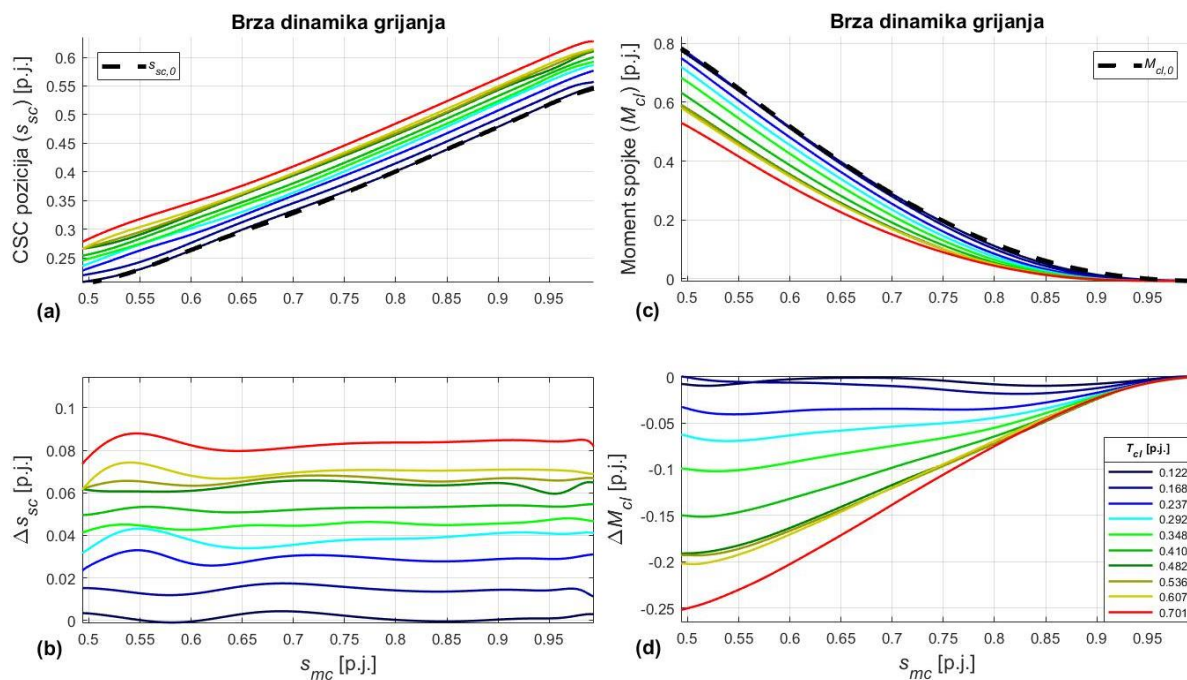
$$\Delta M_{cl} = M_{cl} - M_{cl,0}. \quad (2)$$

Temperatura spojke, označena u legendi na slikama ispod, računa se kao

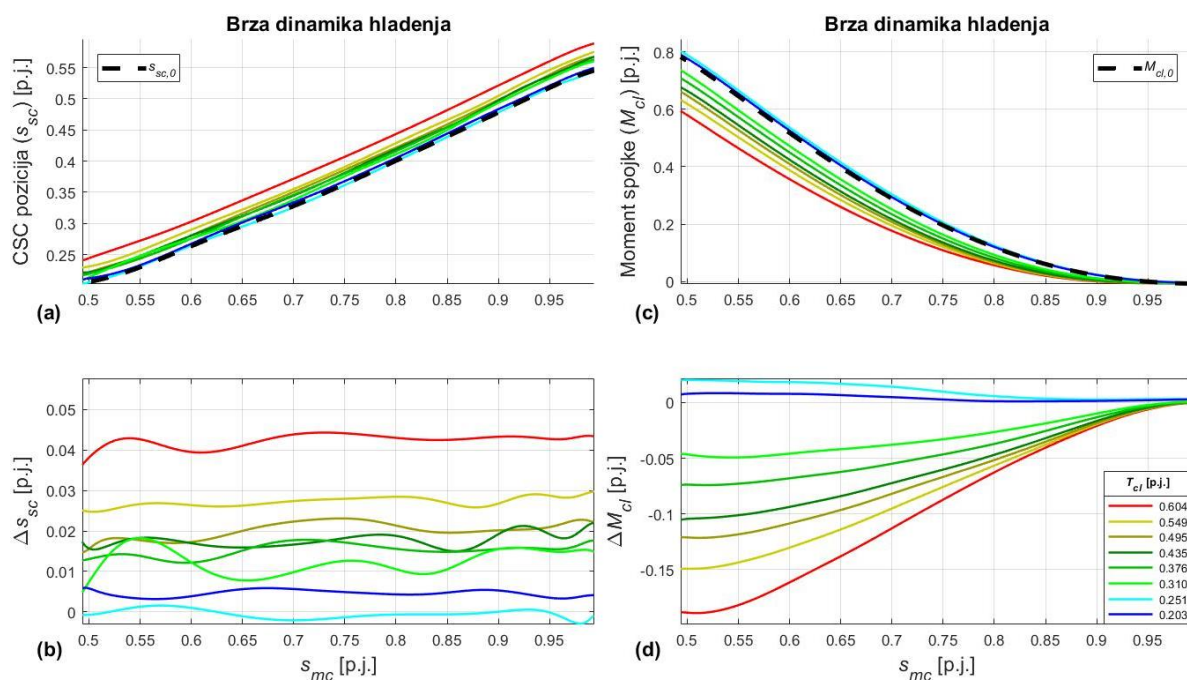
$$T_{cl} = \frac{T_{pp} + T_{fw1}}{2}. \quad (3)$$

Bitno je napomenuti da se u ovom radu sve vrijednosti na dijagramima označavaju po jedinici mjere (p.j.).



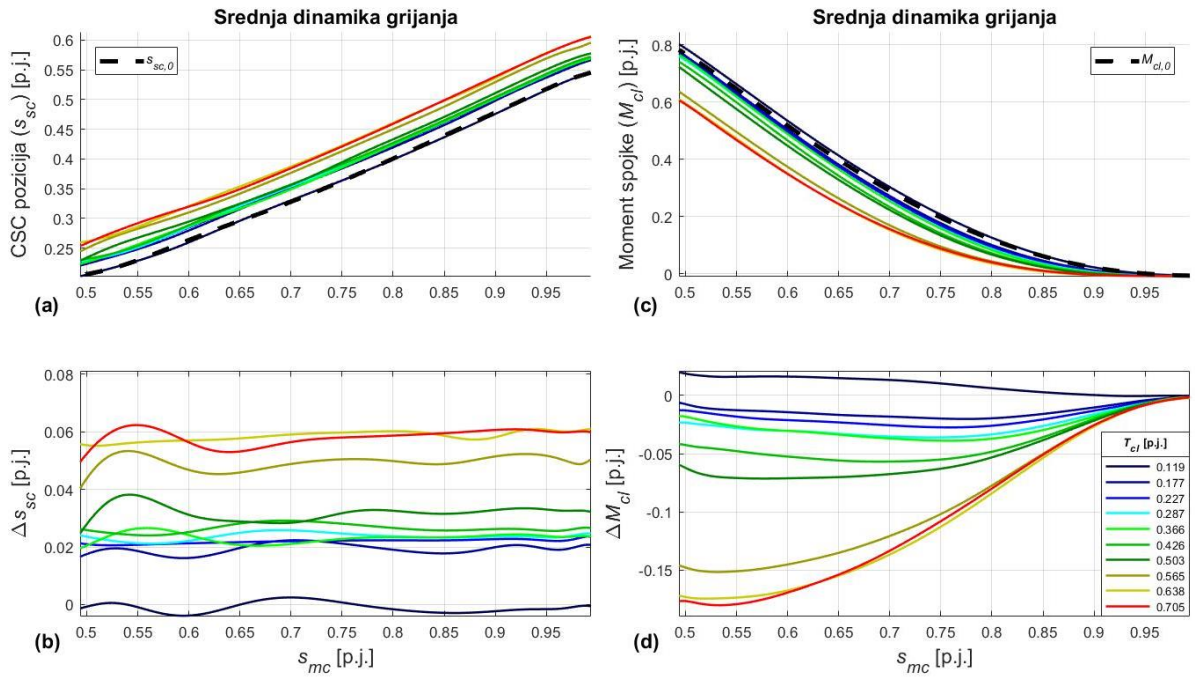


Slika 10. Utjecaj termalnih efekata na poziciju  $s_{sc}$  (a), odstupanje  $\Delta s_{sc}$  (b), moment  $M_{cl}$  (c) i odstupanje momenta  $\Delta M_{cl}$  (d) za slučaj brze dinamike grijanja

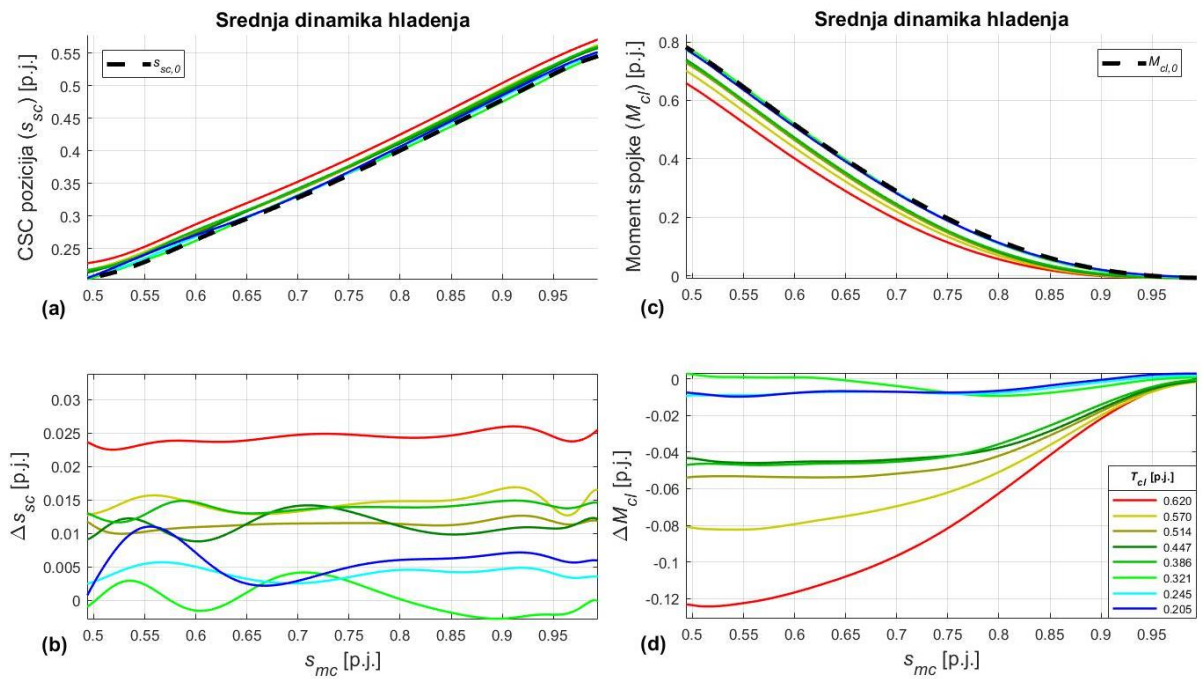


Slika 11. Utjecaj termalnih efekata na poziciju  $s_{sc}$  (a), odstupanje  $\Delta s_{sc}$  (b), moment  $M_{cl}$  (c) i odstupanje momenta  $\Delta M_{cl}$  (d) za slučaj brze dinamike hlađenja

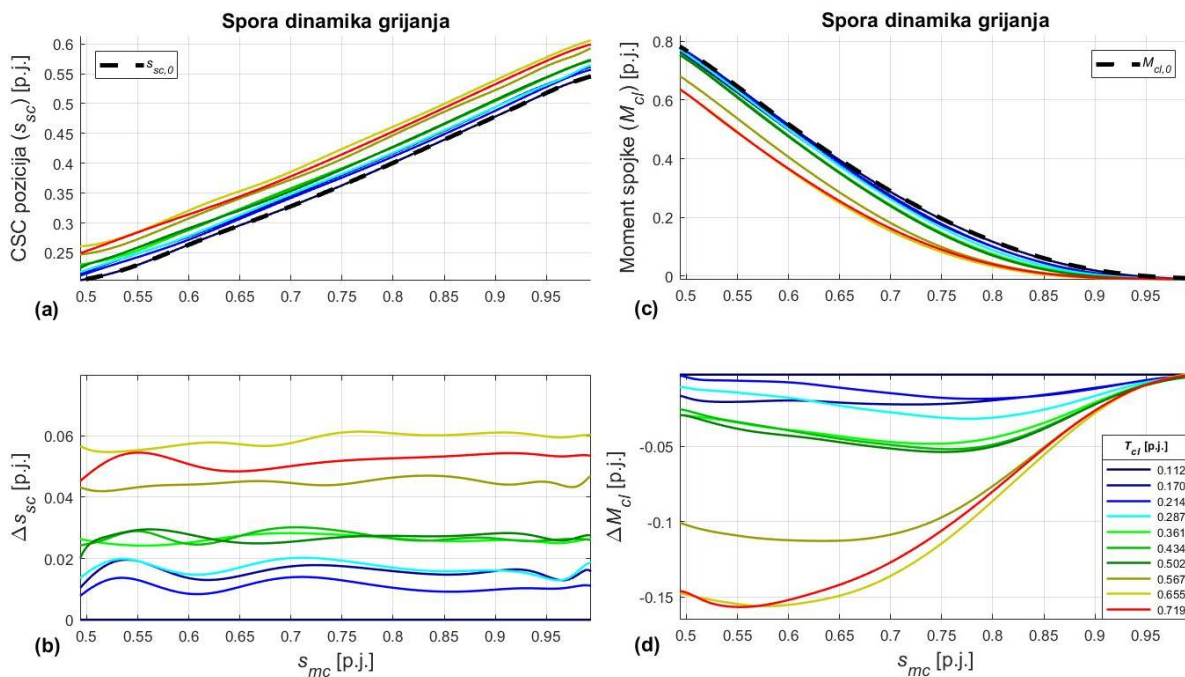
Na slikama 10b i 11b može se uočiti neovisnost odstupanja CSC pozicije  $\Delta s_{sc}$  o položaju  $s_{mc}$ , već je ona primarno ovisna o iznosu temperature i dinamici grijanja/hlađenja.



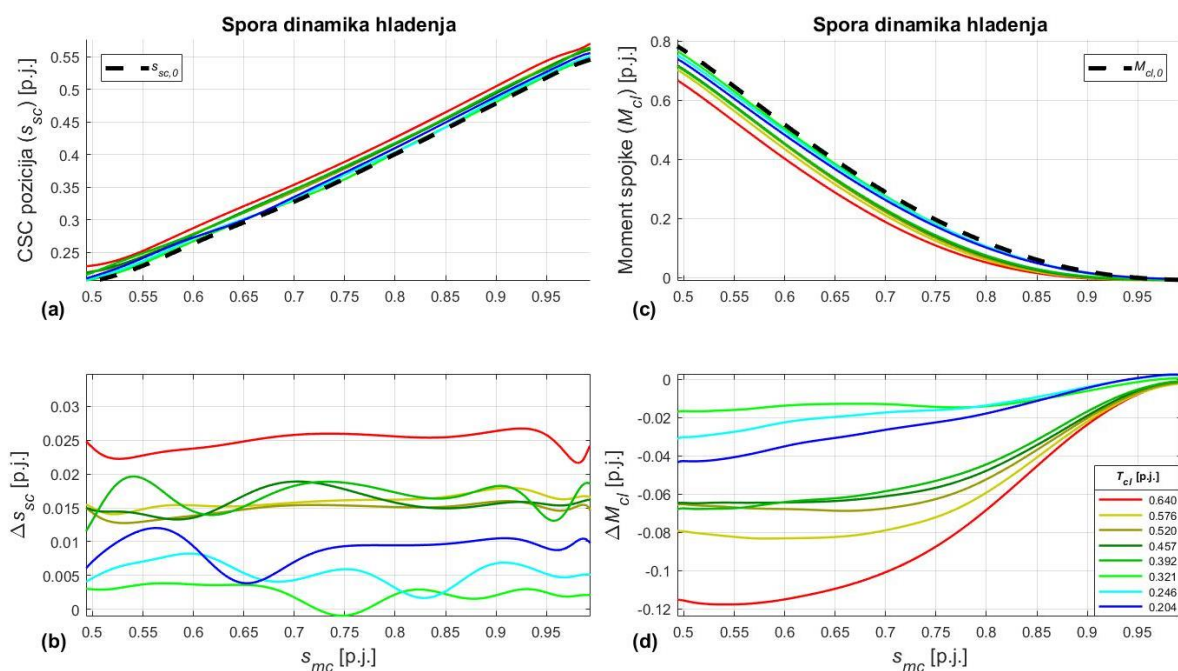
Slika 12. Utjecaj termalnih efekata na poziciju  $s_{sc}$  (a), odstupanje  $\Delta s_{sc}$  (b), moment  $M_{cl}$  (c) i odstupanje momenta  $\Delta M_{cl}$  (d) za slučaj srednje dinamike grijanja



Slika 13. Utjecaj termalnih efekata na poziciju  $s_{sc}$  (a), odstupanje  $\Delta s_{sc}$  (b), moment  $M_{cl}$  (c) i odstupanje momenta  $\Delta M_{cl}$  (d) za slučaj srednje dinamike hlađenja



**Slika 14. Utjecaj termalnih efekata na poziciju  $s_{sc}$  (a), odstupanje  $\Delta s_{sc}$  (b), moment  $M_{cl}$  (c) i odstupanje momenta  $\Delta M_{cl}$  (d) za slučaj spore dinamike grijanja**



**Slika 15. Utjecaj termalnih efekata na poziciju  $s_{sc}$  (a), odstupanje  $\Delta s_{sc}$  (b), moment  $M_{cl}$  (c) i odstupanje momenta  $\Delta M_{cl}$  (d) za slučaj spore dinamike hlađenja**

Može se primijetiti da su ubrzavanjem dinamike grijanja odstupanja CSC-a  $\Delta s_{sc}$  i momenta spojke  $\Delta M_{cl}$  izraženija (pogotovo za niže pozicije  $s_{mc}$ ), pri čemu  $\Delta M_{cl}$  može poprimiti prilično visoke vrijednosti u apsolutnim iznosima, što je vrlo nepoželjno kod upravljanja momentom spojke.

#### 4. MODELIRANJE EFEKATA TERMALNE EKSPANZIJE

Kako bi se modelirala pojava odstupanja momenta  $\Delta M_{cl}$  u ovisnosti o odstupanju CSC pozicije  $\Delta s_{sc}$ , provedena je korelacijska analiza u punom rasponu HCA pozicije  $s_{mc}$ . Cilj ovog postupka je pronaći određene ovisnosti između tih dviju varijabli kako bi se mogao uspostaviti model termalnih efekata. Pomoću računalnog programa MATLAB, uz korištenje funkcije *corrcoef*(.) dobiveni su indeksi korelacije  $K$ . Vrijednosti indeksa korelacije mogu biti između  $-1$  i  $1$ , gdje vrijednosti  $-1$  i  $1$  odgovaraju potpunoj korelaciji, odnosno vrijednost  $0$  znači da korelacija između proučavane dvije varijable ne postoji.

Iz Slike 16 može se vidjeti kako su korelacije za sve dinamike grijanja i hlađenja izrazito visoke, što znači da postoji značajna veza između odstupanja momenta  $\Delta M_{cl}$  i odstupanja CSC pozicije  $\Delta s_{sc}$  na cijelom području HCA pozicije  $s_{mc}$ . Kada se u obzir uzmu sve dinamike grijanja (FH, MH i SH) i hlađenja (FC, MC i SC) korelacijski indeksi malo su manji, ali su vrijednosti indeksa vrlo visoke i blizu idealne korelacije te se može smatrati kako postoji dobra veza između odstupanja momenta i CSC pozicije.

Na Slici 17 dan je primjer linearne aproksimacije  $\Delta M_{cl}(\Delta s_{sc})$ . Ovakva aproksimacija provodi se na cijelom opsegu HCA pozicije  $s_{mc}$ . Prikazani su eksperimentalni rezultati koji povezuju odstupanje momenta  $\Delta M_{cl}$  i odstupanje CSC pozicije  $\Delta s_{sc}$  za jednu HCA poziciju  $s_{mc}$  (označenu na vrhu a) i b) dijela), različite temperature E-spojke  $T_{cl}$  i sve dinamike grijanja i hlađenja. Budući da se ovisnost  $\Delta M_{cl}(\Delta s_{sc})$  modelirala linearnom funkcijom, za svaku poziciju mogu se zasebno izračunati dva parametra potrebna za opisivanje jednadžbe pravca, odnosno nagib pravca i njegov odsječak. Prema tome,  $\Delta M_{cl}(\Delta s_{sc})$  se može opisati kao

$$\Delta M_{cl} \approx K_{line}(s_{mc})\Delta s_{sc} + L_{line}(s_{mc}), \quad (4)$$

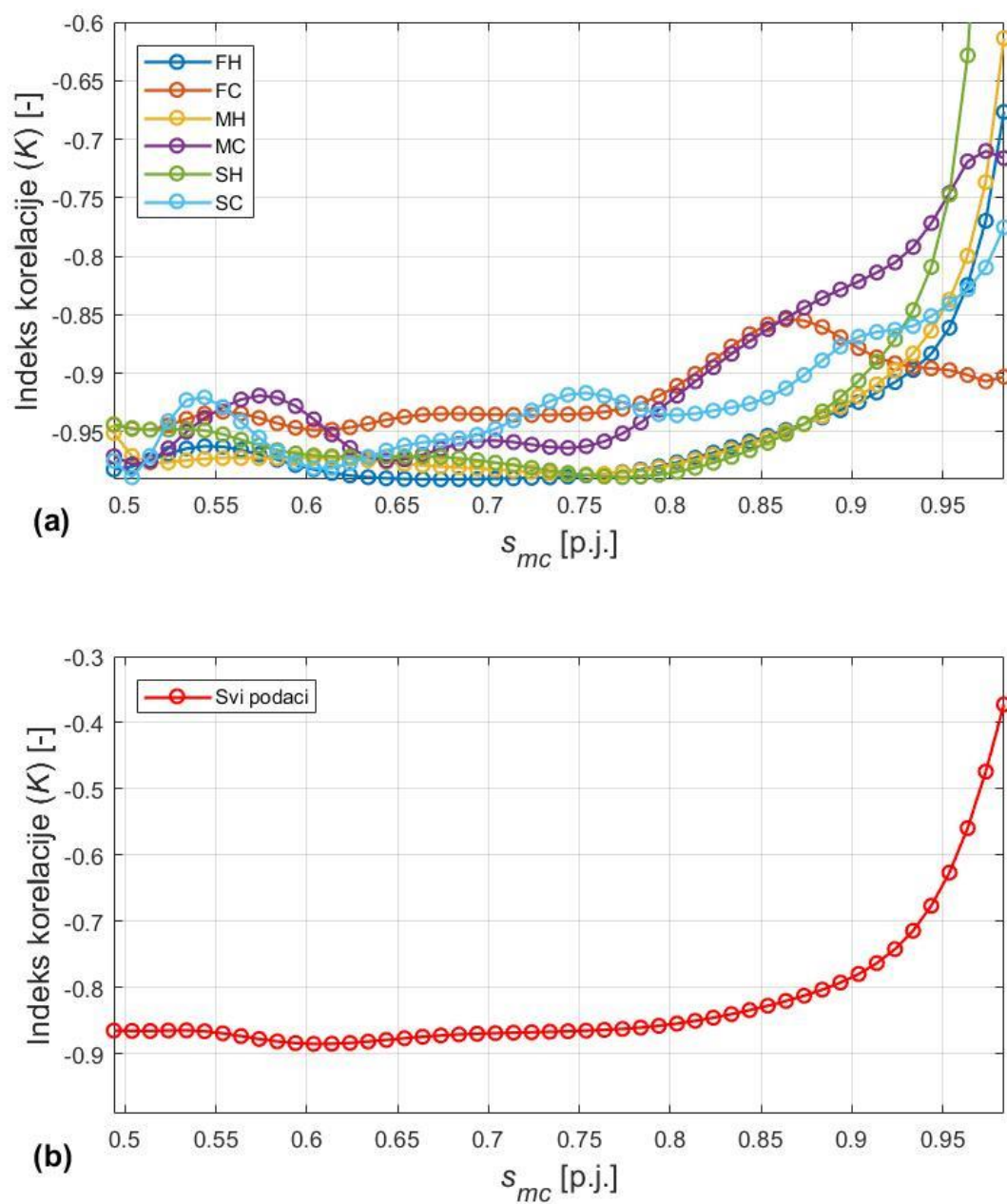
gdje je parametar  $K_{line}$  nagib pravca, a  $L_{line}$  odsječak pravca.

Parametri za linearnu aproksimaciju također su ovisni o HCA poziciji  $s_{mc}$ , pa ih je radi buduće implementacije na računalu potrebno aproksimirati pomoću polinoma (Slika 17). Ukoliko se koristi polinom drugog reda, jednadžbe za parametre  $K_{line}$  i  $L_{line}$  tada glase

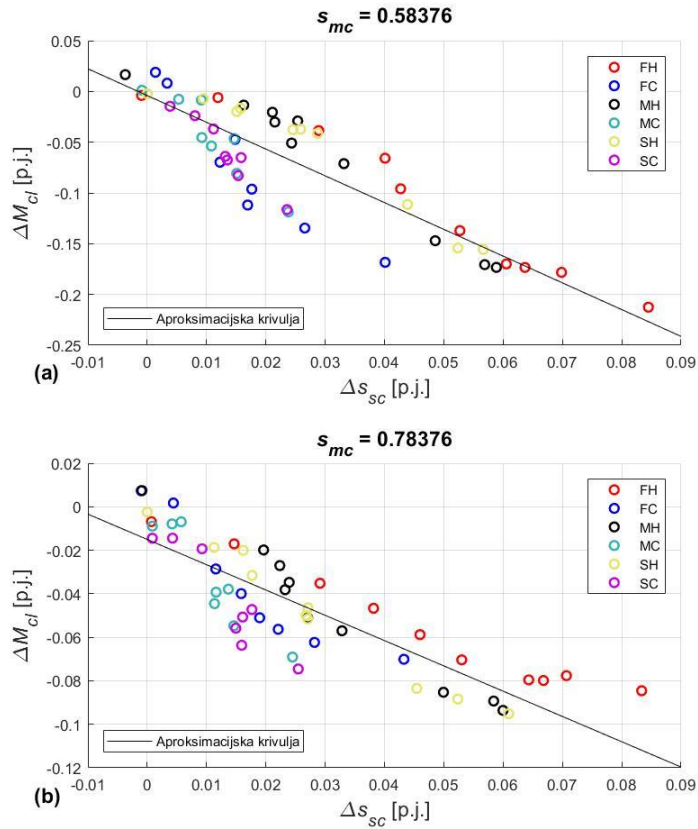
$$K_{line}(s_{mc}) = b_2 s_{mc}^2 + b_1 s_{mc} + b_0, \quad (5)$$

$$L_{line}(s_{mc}) = c_2 s_{mc}^2 + c_1 s_{mc} + c_0. \quad (6)$$

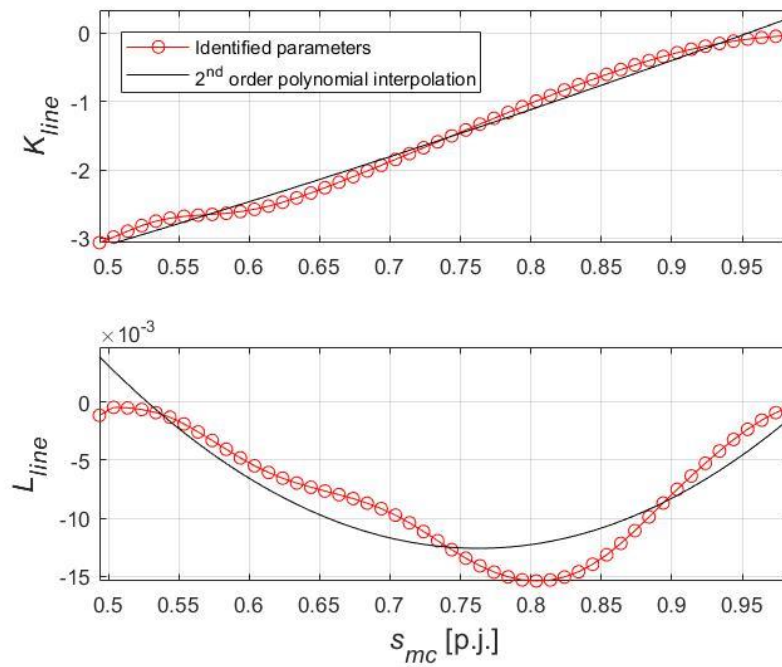




Slika 16. Korelacijski indeksi  $K$  za ovisnost  $\Delta M_{cl}$  vs.  $\Delta s_{sc}$  i puni raspon HCA pozicije  $s_{mc}$  za sve dinamike grijanja i hlađenja zasebno (a) te korelacijski indeks za sve dinamike zajedno (b)



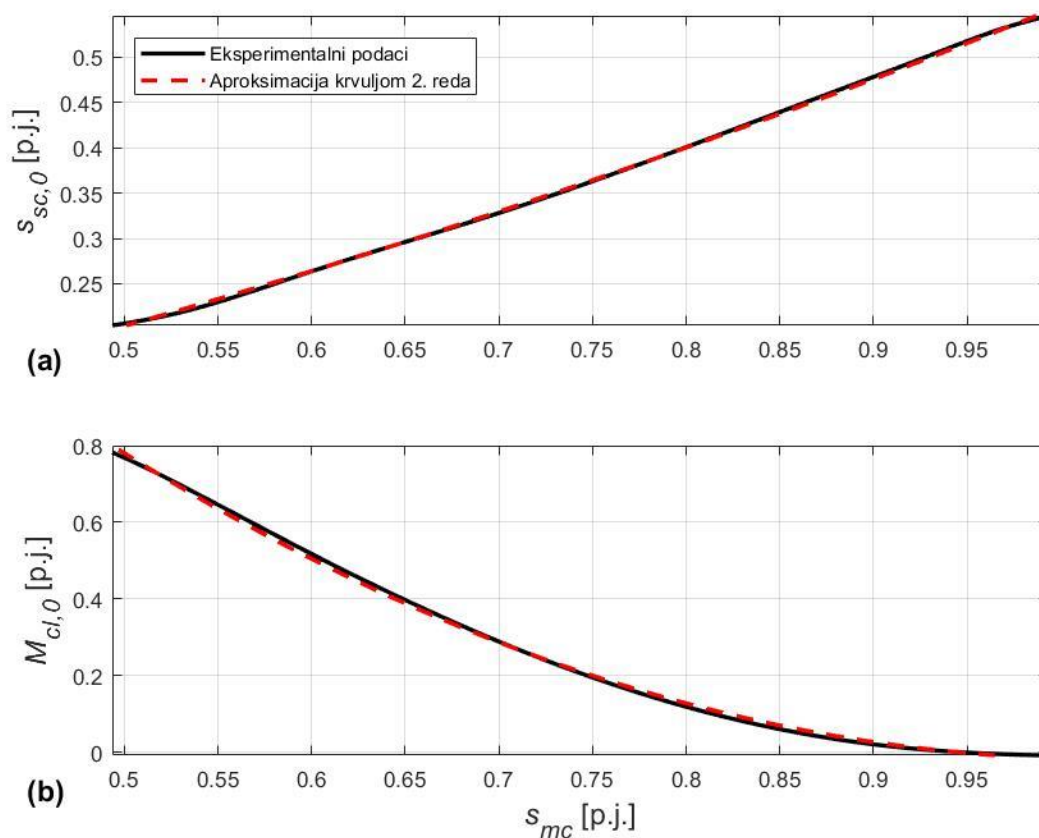
Slika 17. Ovisnost odstupanja momenta ( $\Delta M_{cl}$ ) o odstupanju CSC pozicije ( $\Delta s_{sc}$ ) za dvije vrijednosti HCA pozicije ( $s_{mc}$ )



Slika 18. Parametri  $K_{line}$  i  $L_{line}$  linearnog modela ovisnosti  $\Delta M_{cl}(\Delta s_{sc})$  za puni raspon HCA pozicije  $s_{mc}$

## 5. STRATEGIJA UPRAVLJANJA

Za implementaciju upravljanja E-spojkom potrebne su nam dvije mjerene veličine, a to su HCA pozicija  $s_{mc}$  i CSC pozicija  $s_{sc}$ . Kod upravljačke strategije u otvorenoj petlji bez kompenzacije termalnih efekata referentna HCA pozicija  $s_{mcR}$  može se izračunati iz invertirane referentne statičke karakteristike spojke (prikazano na Slici 19b) uz poznavanje reference momenta  $M_{clR}$ . Krivulja  $s_{sc,0}$  (prikazana na Slici 19a) koristi se prilikom određivanja odstupanja CSC pozicije  $\Delta s_{sc}$ .



**Slika 19. Osnovne krivulje momenta spojke i CSC pozicije u ovisnosti o HCA poziciji (snimljene za SH eksperiment) s polinomskim aproksimacijama**

Prema Slici 19b, osnovna krivulja momenta  $M_{cl,0}$  može se opisati kao

$$M_{cl,0}(s_{mc}) = a_2 s_{mc}^2 + a_1 s_{mc} + a_0. \quad (7)$$

U slučaju kompenzacije termalnih efekata, moment spojke  $M_{cl}$  može se izraziti kao suma osnovne krivulje momenta  $M_{cl,0}$  i odstupanja momenta  $\Delta M_{cl}$ , odnosno vrijedi

$$M_{cl} = M_{cl,0} + \Delta M_{cl}. \quad (8)$$

Ubacivanjem jednadžbi (4) i (7) u jednadžbu (8) dobiva se

$$M_{cl} \approx a_2 s_{mc}^2 + a_1 s_{mc} + a_0 + K_{line}(s_{mc})\Delta s_{sc} + L_{line}(s_{mc}). \quad (9)$$

Ukoliko se parametri pravca  $K_{line}$  i  $L_{line}$  aproksimiraju s obzirom na HCA poziciju  $s_{mc}$  (vidi jednadžbe (5) i (6)), dobiva se

$$M_{cl} \approx a_2 s_{mc}^2 + a_1 s_{mc} + a_0 + (b_2 s_{mc}^2 + b_1 s_{mc} + b_0)\Delta s_{sc} + c_2 s_{mc}^2 + c_1 s_{mc} + c_0. \quad (10)$$

Sređivanjem jednadžbe (10) i zamjenom stvarnog momenta spojke  $M_{cl}$  i HCA pozicije  $s_{mc}$  s njihovim referencama ( $M_{clR}$  i  $s_{mcR}$ ) dobiva se kvadratna jednadžba oblika

$$a s_{mcR}^2 + b s_{mcR} + c = 0, \quad (11)$$

gdje su koeficijenti  $a$ ,  $b$  i  $c$  opisani sljedeći jednadžbama

$$a = a_2 + b_2 \Delta s_{sc} + c_2, \quad (12)$$

$$b = a_1 + b_1 \Delta s_{sc} + c_1, \quad (13)$$

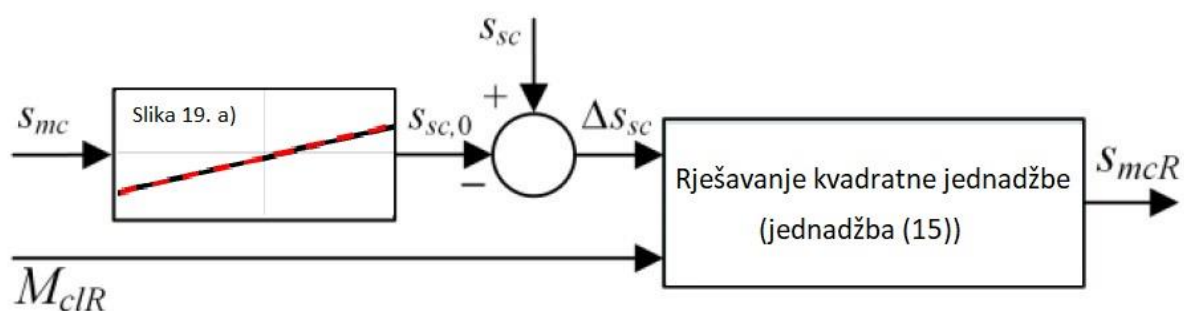
$$c = a_0 + b_0 \Delta s_{sc} + c_0 - M_{clR}. \quad (14)$$

Za danu referencu momenta  $M_{clR}$  i izračunato odstupanje  $\Delta s_{sc}$ , referenca HCA pozicije  $s_{mcR}$  računa se rješavanjem kvadratne jednadžbe (11), odnosno

$$s_{mcR} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (15)$$

gdje se dobiju dva moguća rješenja te je potrebno odabrati ono rješenje koje je unutar opsega HCA pozicije.

Na Slici 20 prikazan je blok dijagram upravljačke strategije koji opisuje gore izvedene jednadžbe (računanje reference HCA pozicije  $s_{mcR}$ ).



Slika 20. Blok dijagram upravljačke strategije [1]

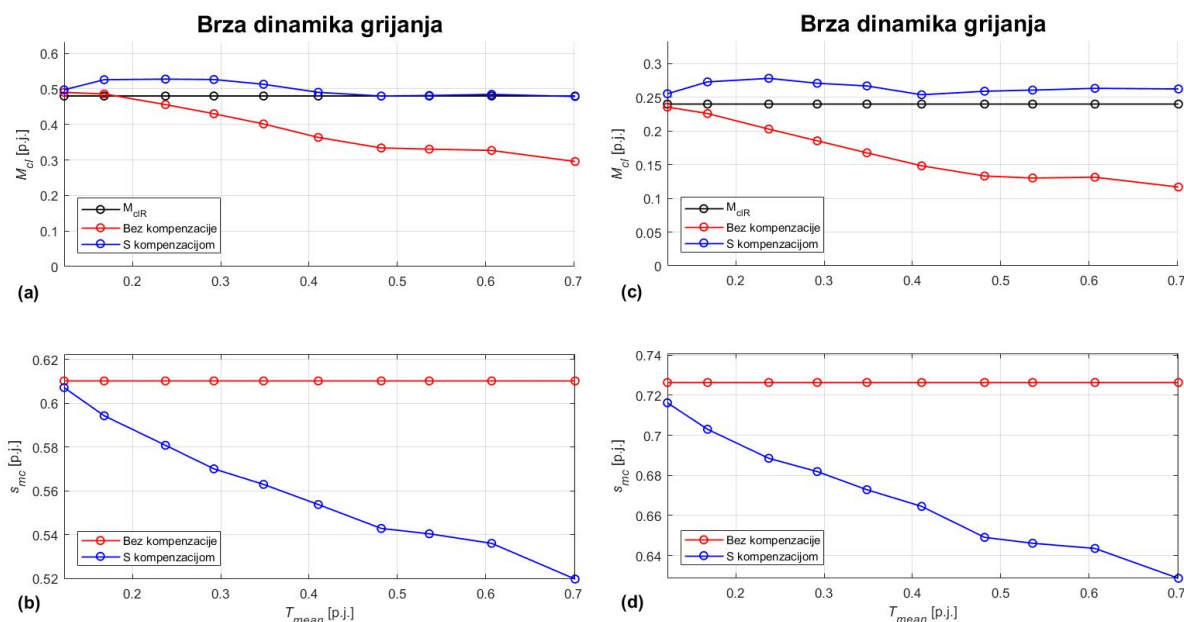


## 6. VERIFIKACIJA STRATEGIJE UPRAVLJANJA

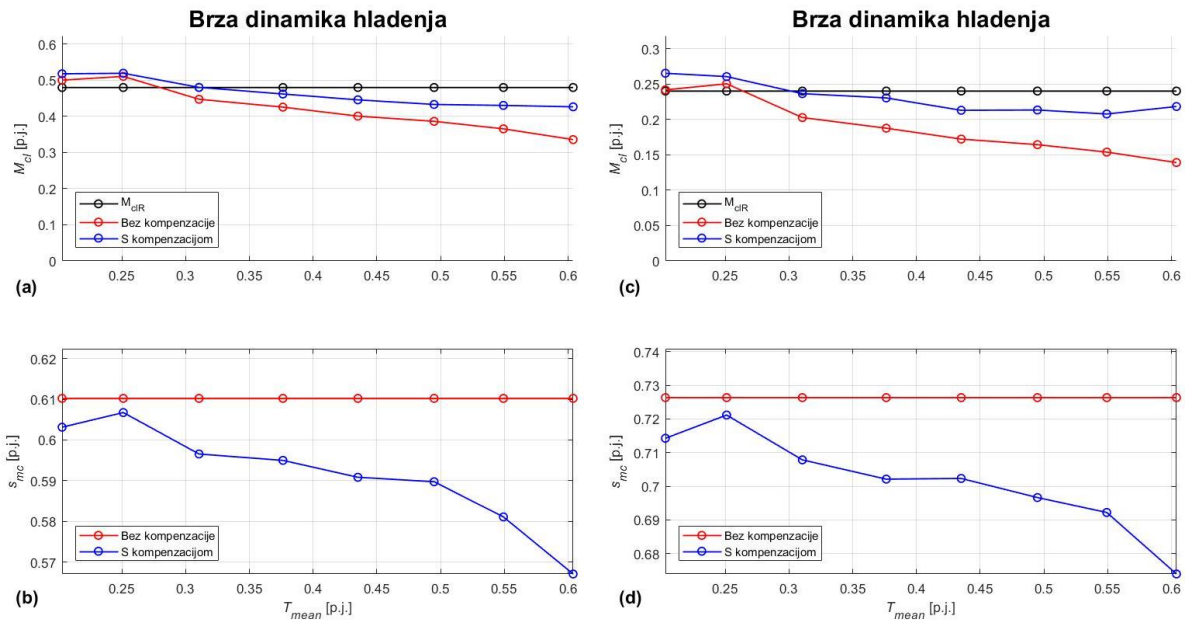
### 6.1. Offline analiza strategije upravljanja

Prije eksperimenata provedena je offline analiza kako bi se provjerila učinkovitost kompenzacije termalnih efekata. Stvarni moment spojke  $M_{cl}$  i CSC pozicija  $s_{sc}$  rekonstruirani su iz statičkih krivulja spojke (prikazanih u potpoglavlju 3.2.). Za određenu referencu momenta  $M_{clR}$  uzima se snimljena vrijednost CSC pozicije  $s_{sc}$  s ciljem izračuna odstupanja  $\Delta s_{sc}$ . Nakon toga računa se referenca HCA pozicije  $s_{smcR}$  s ciljem postizanja referentnog momenta spojke. Ova verifikacija na temelju offline podataka je opravdana iz razloga jer je upravljanje pozicijom E-spojke znatno brže u odnosu na termalnu dinamiku sustava (termalne efekte). Pošto upravljačka strategija nema informaciju o dinamici grijanja/hlađenja, glavni cilj verifikacije je provjera i testiranje robusnosti upravljačke strategije bez obzira na ovu dinamiku.

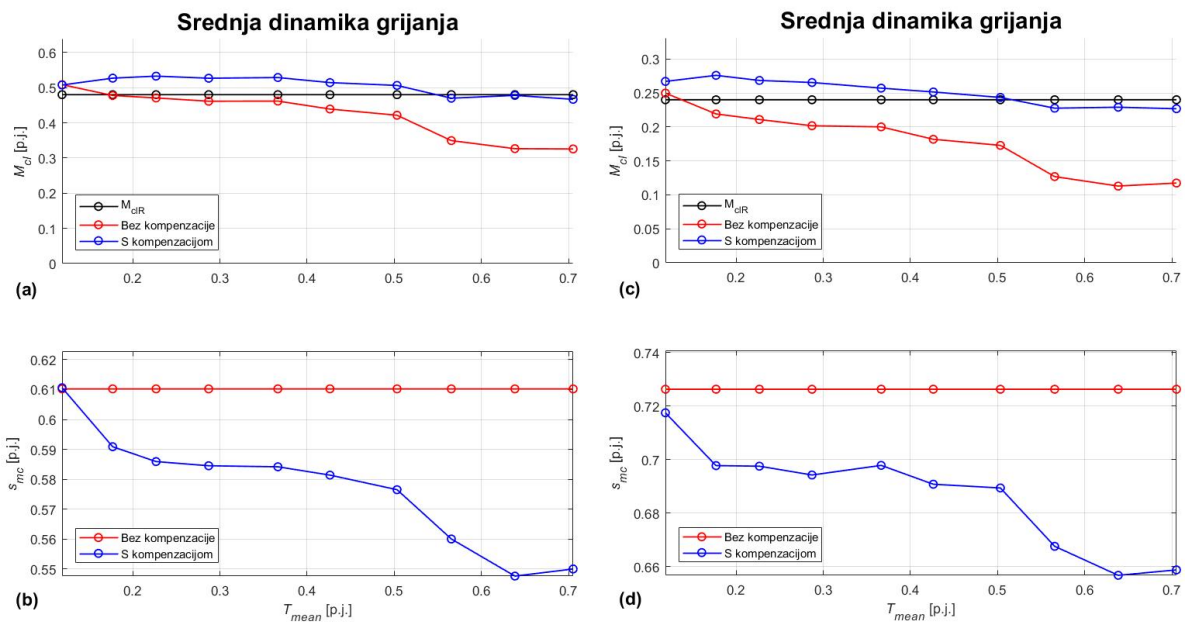
Na sljedećim slikama prikazani su rezultati offline simulacije za dvije reference momenta ( $M_{clR} = 0.48$  p.j. i  $M_{clR} = 0.24$  p.j.), različite temperature te dinamike grijanja/hlađenja. Može se primijetiti kako se postiže znatno bolji odziv sustava s kompenzacijom termalnih efekata u odnosu na upravljanje bez kompenzacije. S porastom temperature spojke, vrijednost  $s_{mc}$  koja se mora postići je sve manja kako bi se moment spojke  $M_{cl}$  održavao blizu referentne vrijednosti (povećanjem HCA pozicije  $s_{mc}$  moment spojke pada, v. Sliku 8).



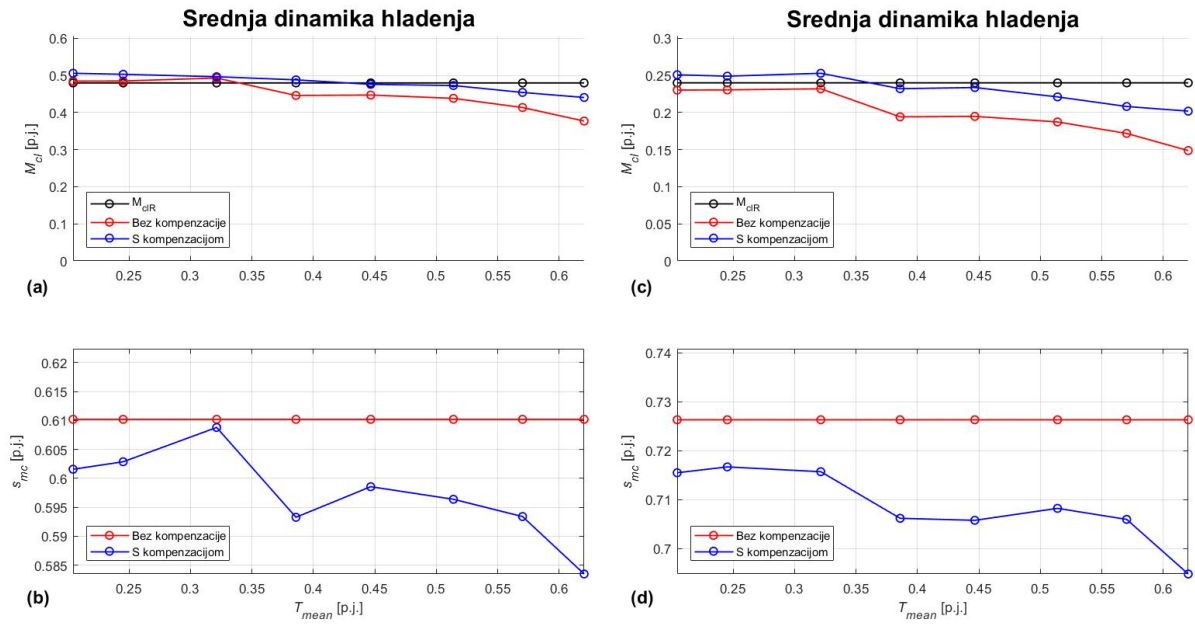
Slika 21. Verifikacijski rezultati za brzu dinamiku grijanja (FH)



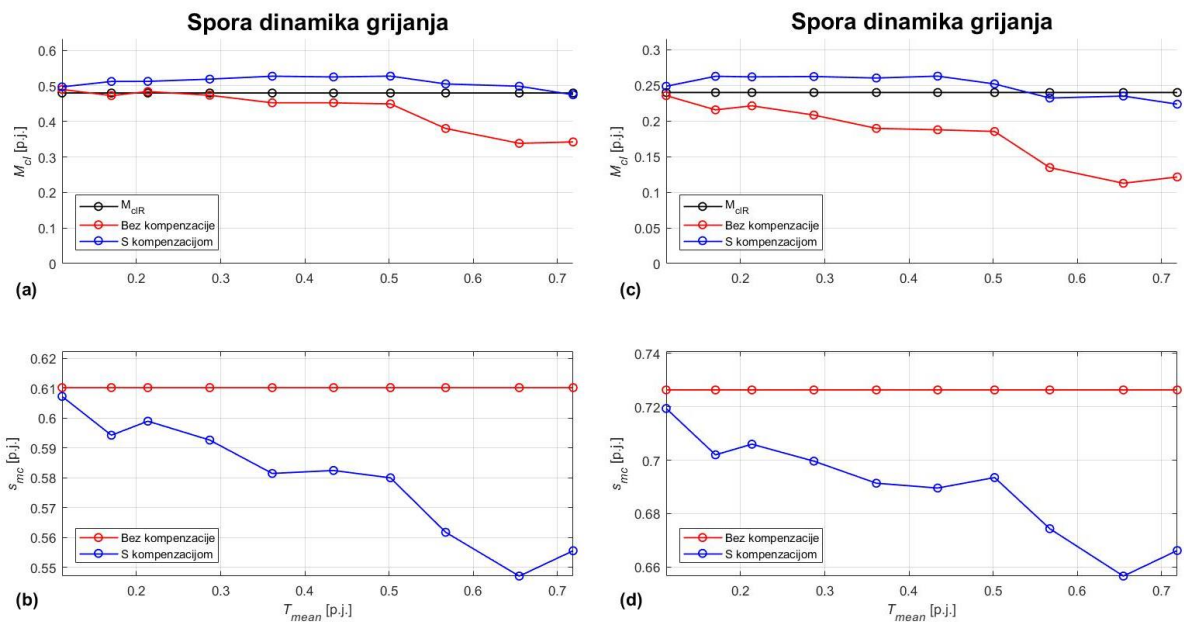
Slika 22. Verifikacijski rezultati za brzu dinamiku hlađenja (FC)



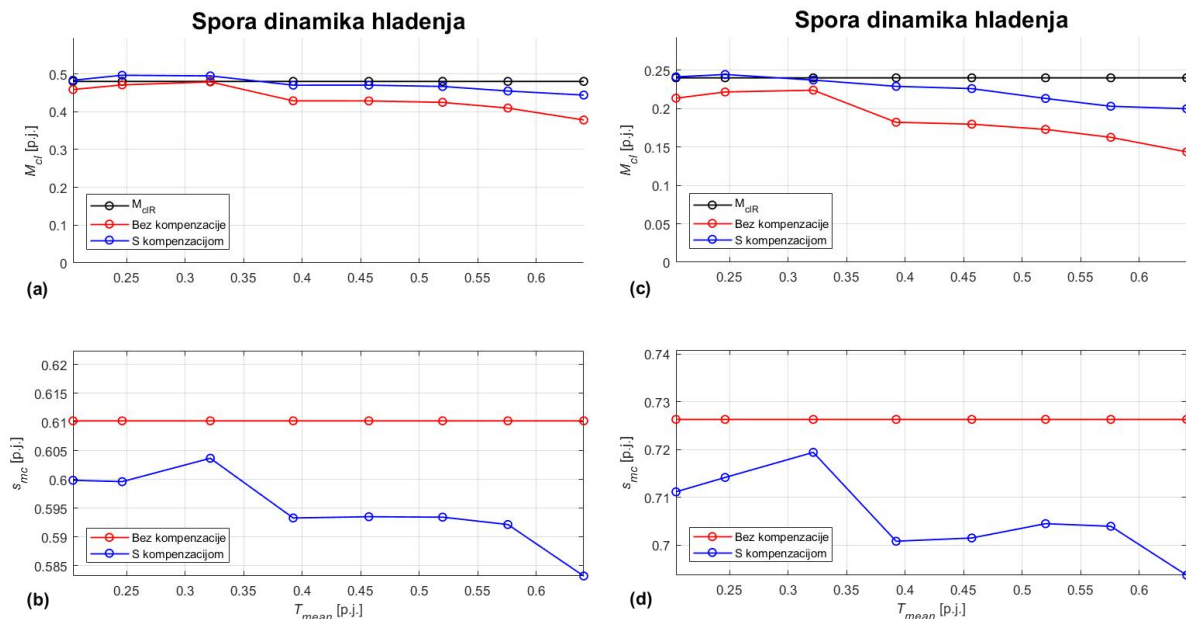
Slika 23. Verifikacijski rezultati za srednju dinamiku grijanja (MH)



Slika 24. Verifikacijski rezultati za srednju dinamiku hladenja (MC)



Slika 25. Verifikacijski rezultati za sporu dinamiku grijanja (SH)



**Slika 26. Verifikacijski rezultati za sporu dinamiku hlađenja (SC)**

Kako bi se dodatno demonstrirala učinkovitost upravljačke strategije, napravljena je analiza za širi opseg radnih uvjeta spojke, odnosno prikazani su rezultati upravljačke strategije za različite dinamike grijanja/hlađenja, različite temperature i različite reference momenta  $M_{clR}$ . Radi lakšeg opisivanja učinkovitosti uvedene su sljedeće varijable  $\Delta M_{cl,mean}$  i  $\Delta M_{cl,max}$ . Varijabla  $\Delta M_{cl,mean}$  opisuje srednju grešku momenta upravljačke strategije za određenu dinamiku grijanja/hlađenja, referencu momenta i različite temperature spojke, a opisana je jednadžbom

$$\Delta M_{cl,mean} = \frac{100\%}{N_{temp}} \sum_{i=1}^{N_{temp}} \frac{|\Delta M_{cl,i}|}{M_{clR}}, \quad (16)$$

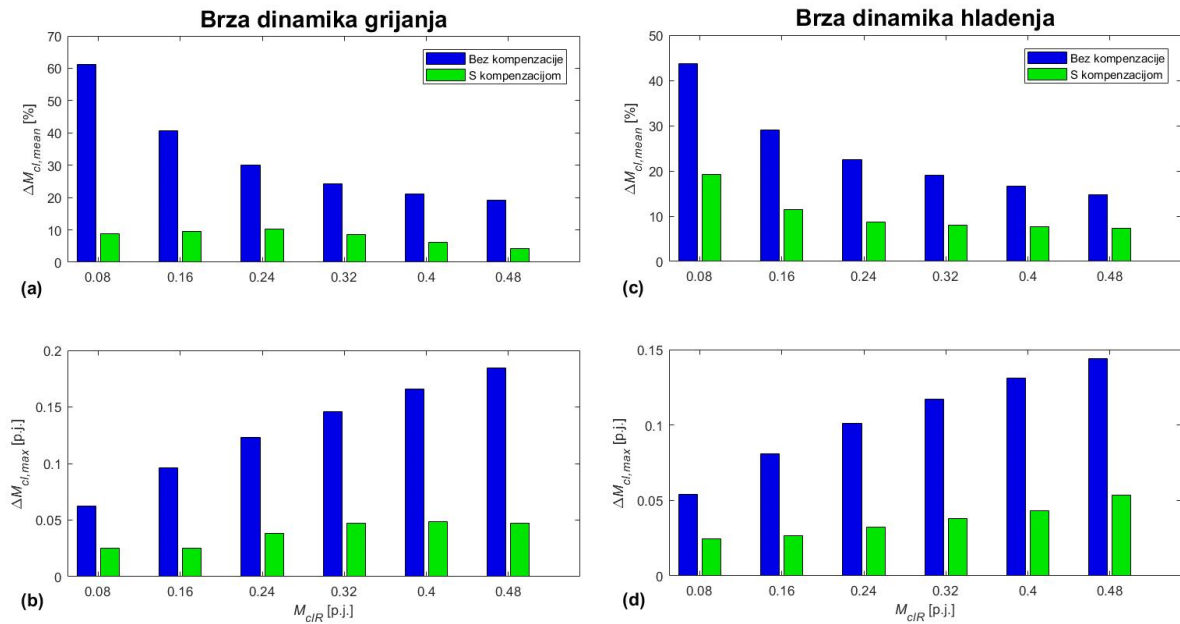
gdje je  $N_{temp}$  broj temperaturnih razina spojke  $T_{cl}$  ( $N_{temp} = 10$  za eksperimente zagrijavanja, a za eksperimente hlađenja  $N_{temp} = 8$ ).

Varijabla  $\Delta M_{cl,max}$  opisuje maksimalnu vrijednost odstupanja momenta za određenju dinamiku grijanja/hlađenja, referencu momenta i različite temperature spojke, a opisana je jednadžbom

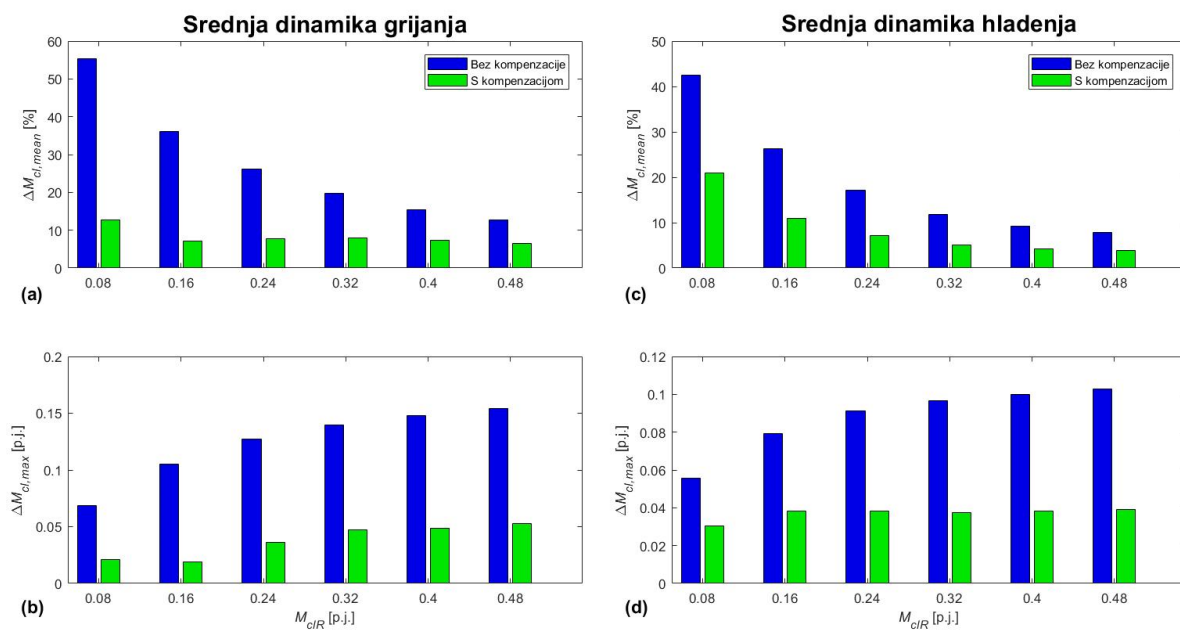
$$\Delta M_{cl,max} = \max(|\Delta M_{cl,i}|). \quad (17)$$

gdje  $\Delta M_{cl,i}$  opisuje pogrešku upravljačke strategije s obzirom na referencu momenta, odnosno

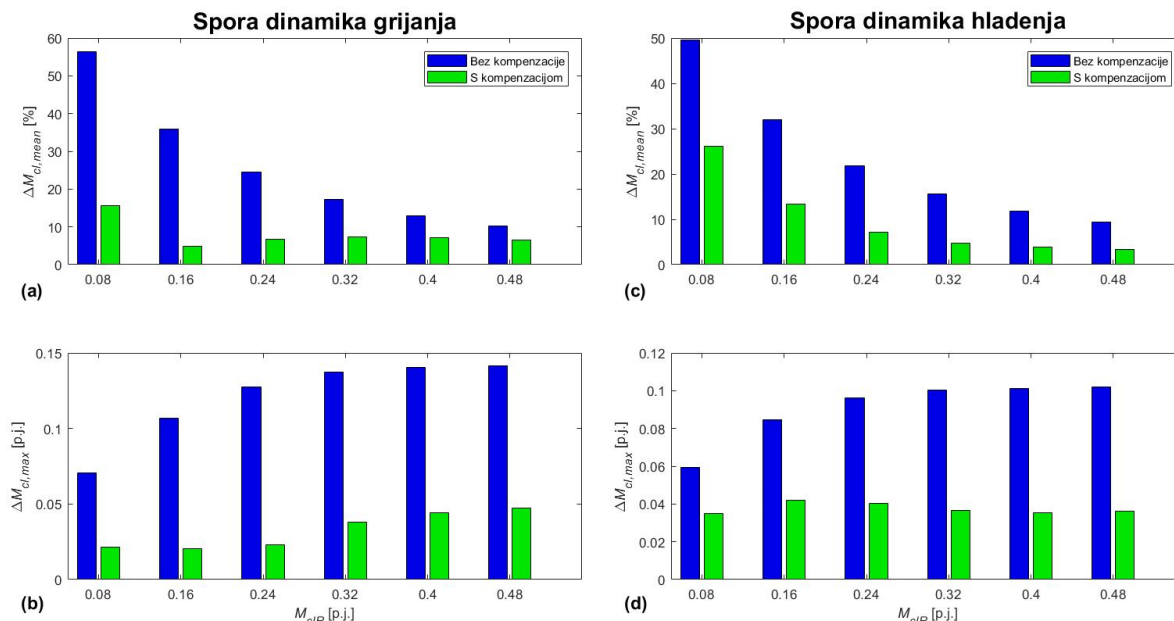
$$\Delta M_{cl,i} = M_{cl,i} - M_{clR}, i \in [1, 2, \dots, N_{temp}]. \quad (18)$$



Slika 27. Srednja i maksimalna greška momenta za širok raspon temperatura spojke, različite reference momenta, brzu dinamiku grijanja ((a) i (b)) i brzu dinamiku hlađenja ((c) i (d))



Slika 28. Srednja i maksimalna greška momenta za širok raspon temperatura spojke, različite reference momenta, srednju dinamiku grijanja ((a) i (b)) i srednju dinamiku hlađenja ((c) i (d))



**Slika 29.** Srednja i maksimalna greška momenta za širok raspon temperatura spojke, različite reference momenta, sporu dinamiku grijanja ((a) i (b)) i sporu dinamiku hlađenja ((c) i (d))

Na slikama 27, 28 i 29 prikazani su rezultati offline simulacije za širok raspon radnih uvjeta spojke. Može se primijetiti značajno smanjenje odstupanja momenta  $\Delta M_{cl,i}$  (pod (a) i (c)) za sve dinamike grijanja/hlađenja, različite temperature spojke i referentne vrijednosti momenta. Najznačajnije smanjenje može se primijetiti na Slici 27a, gdje je greška smanjena uglavnom ispod 10%. Također na istim slikama (pod (b) i (d)) može se primijetiti da je značajno smanjena i maksimalna pogreška momenta.

## 6.2. Rezultati eksperimentalne verifikacije upravljačke strategije

Upravljačka strategija implementirana je na postavu E-spojke (opisanom u 2. poglavlju). Eksperiment se proveo na način da su reference momenta mijenjane prema stepeničastoj funkciji. Svaka referenca traje 8s te se u prvih 4s svake reference odvija upravljanje bez kompenzacije termalnih efekata, dok se u preostalih 4s odvija upravljanje s kompenzacijom termalnih efekata.

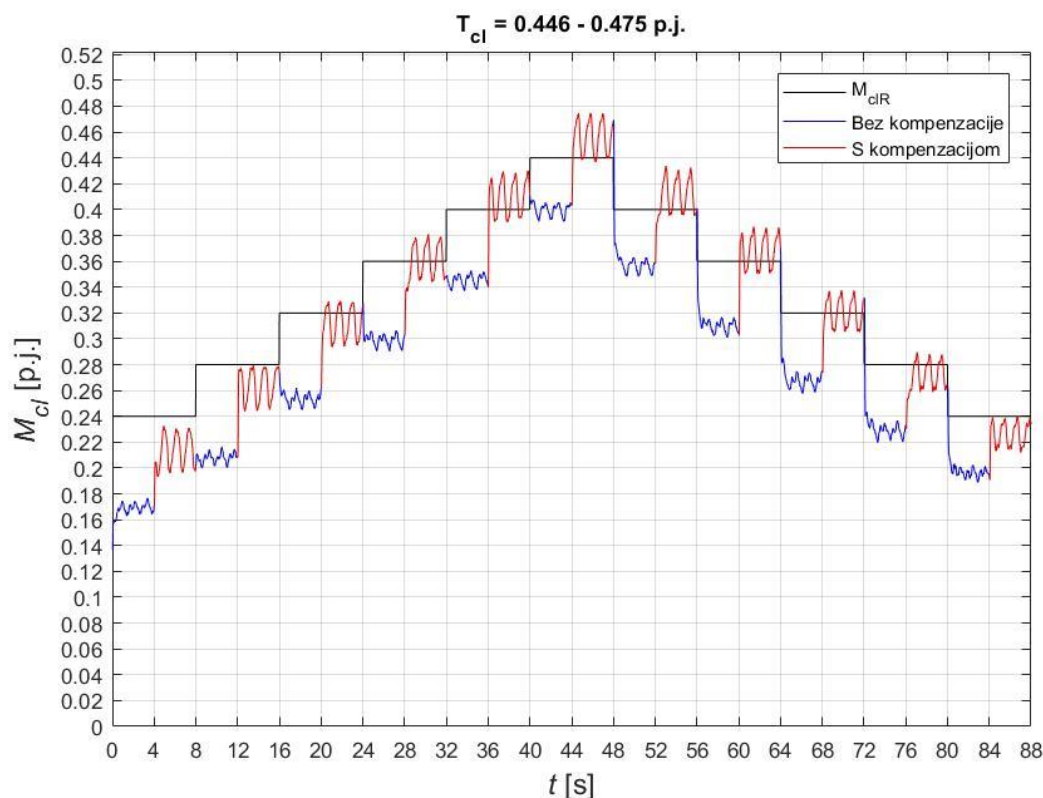
Na slikama 30, 33 i 36 prikazani su eksperimentalni rezultati. Može se primijetiti da s porastom temperature (za slučaj bez kompenzacije) moment koji se postiže za istu HCA referencu  $s_{mCR}$  je sve manji. Primjenom algoritma za kompenzaciju termalnu kompenzaciju postiže se značajno poboljšanje slijeđenja reference momenta  $M_{clR}$ . Naravno, algoritam još uvijek ima određenu grešku koja se javlja zbog određenih pojednostavljenja u modelu. Naime, cilj ove upravljačke strategije nije apsolutna točnost već je cilj bio pokazati kako ova jednostavna upravljačka struktura može postići dobre rezultate u smislu kompenzacije termalnih efekata.



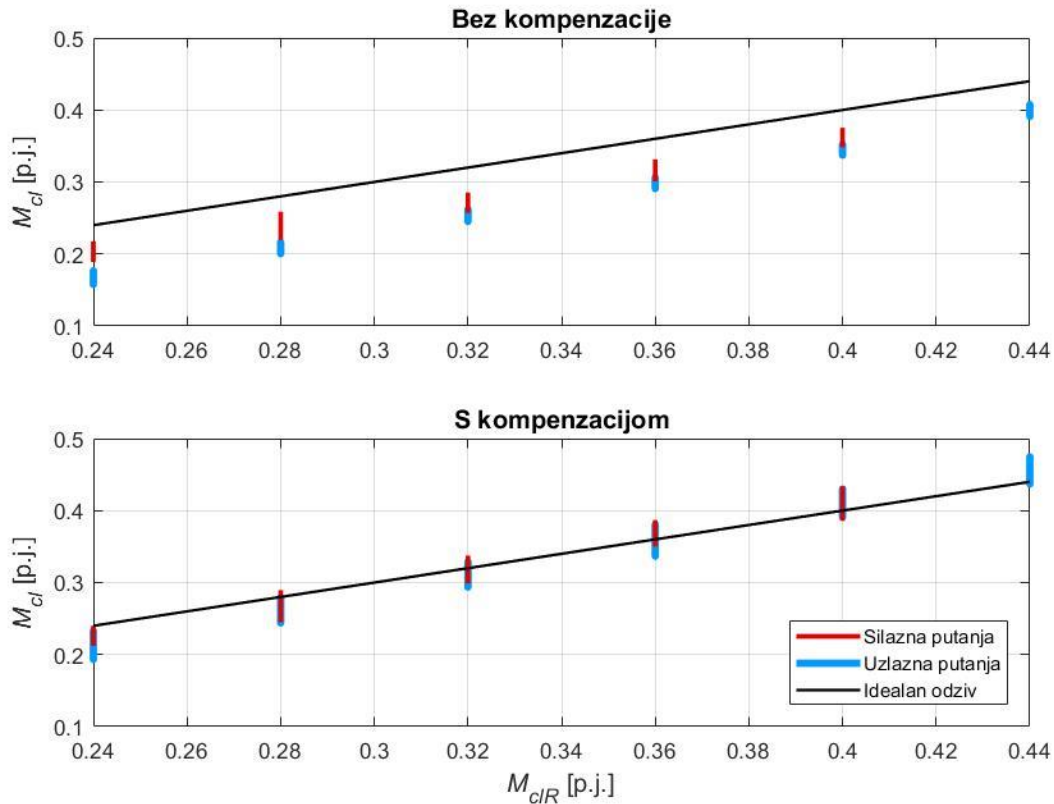
Također, velik problem u sustavu je histereza trenja koja se odmah na početku zanemarila (Slika 9). Određena greška prisutna je upravo radi histereze momenta uzrokovane trenjem u sustavu. Na slikama 31, 34 i 37 prikazane su usporedbe referentnog momenta spojke  $M_{clR}$  i mjenog momenta spojke  $M_{cl}$ . Porastom temperature dolazi do sve većeg odstupanja prilikom upravljanja bez kompenzacije termalnih efekata dok se uz kompenzaciju postiže znatno bolji odziv sustava i točnije slijeđenje reference.

Prema vrijednostima  $p$  (prikazanim u tablici 2) dobivenim iz *Lilliefors* testa može se zaključiti kako su reziduali ( $M_{cl} - M_{clR}$ ) distribuirani po normalnoj razdiobi (za  $p$  vrijednost  $> 0.05$  razdioba se smatra normalnom), što ukazuje na to da je izvor oscilacija u momentu spojke nesistematske prirode. U istoj tablici su također prikazane vrijednosti standardne devijacije koje opisuju samu razdiobu. Da je raspodjela reziduala približno normalna može se vidjeti na slikama 32, 35 i 38 (pod (a) i (c)) gdje reziduali dobro padaju na pravac. Na istim slikama (pod (b) i (d)) prikazani su histogrami te normalna raspodjela reziduala.

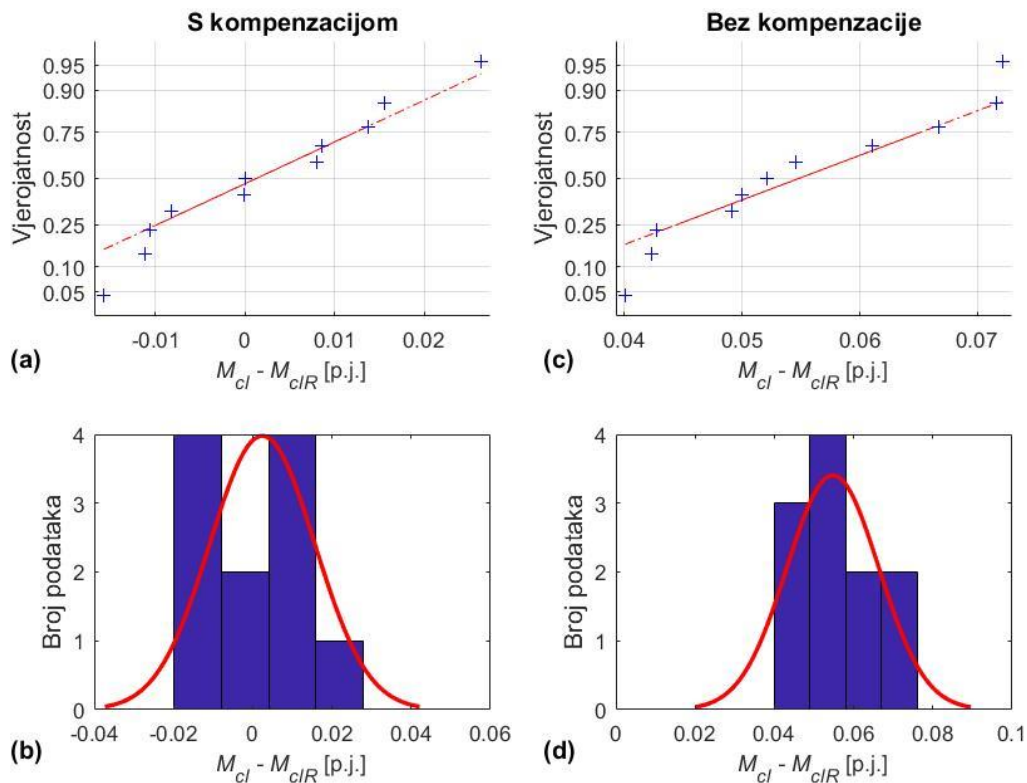
U tablicama 3, 4 i 5 prikazane su apsolutne srednje vrijednosti odstupanja od reference momenta spojke. Može se primijetiti kako s porastom temperature raste i odstupanje u slučaju bez kompenzacije termalnih efekata. Također, postignuto je značajno smanjenje odstupanja prilikom kompenzacije termalnih efekata.



**Slika 30. Eksperimentalni rezultati za raspon temperatura spojke 0.446 – 0.475 p.j.**

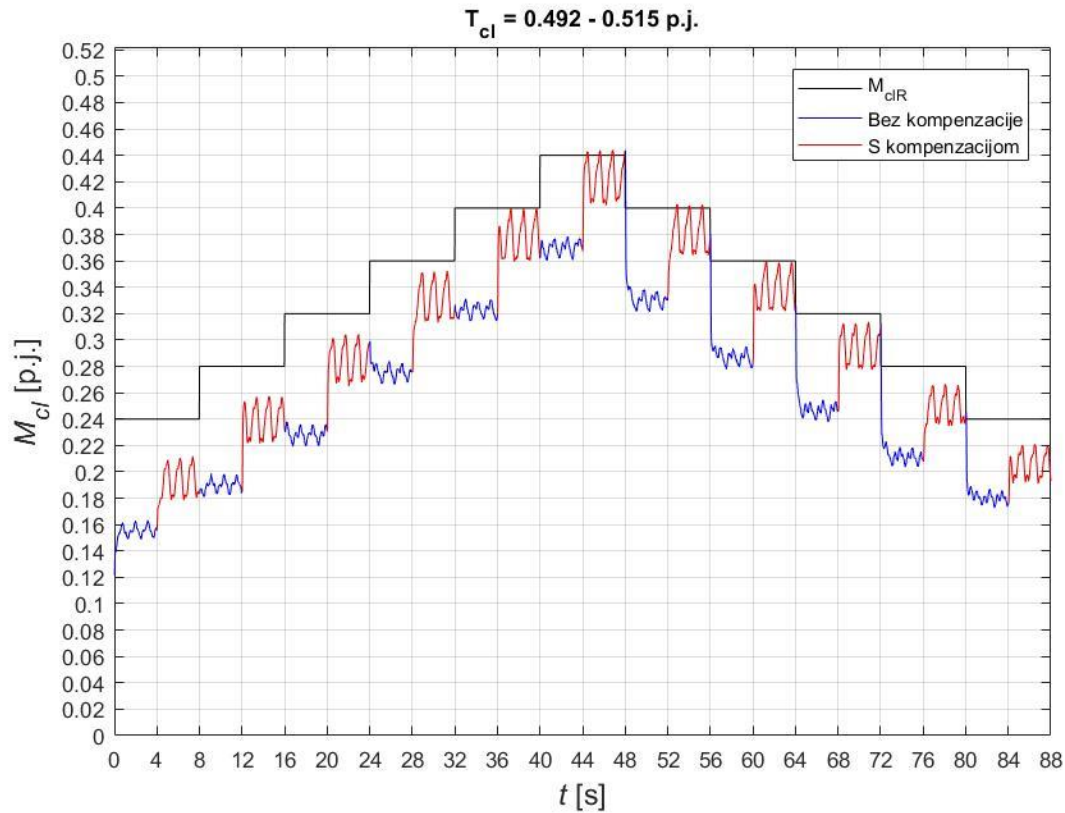


Slika 31. Odziv sustava na referencu momenta za raspon temperatura spojke 0.446 – 0.475 p.j.

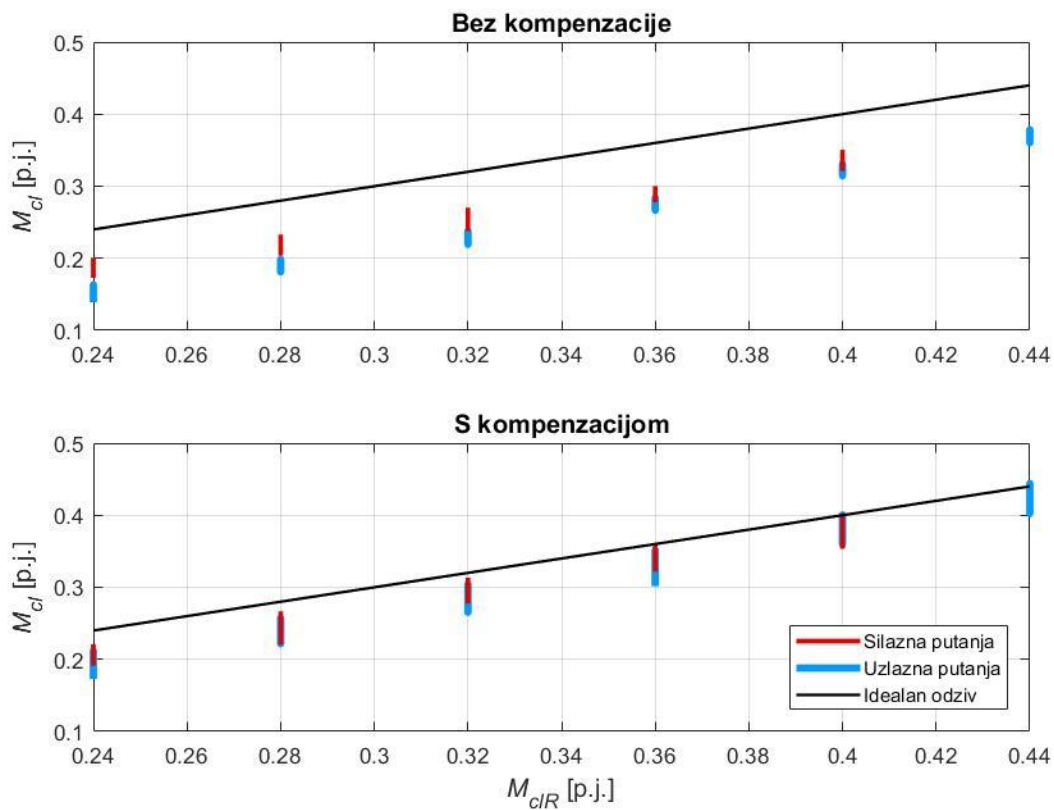


Slika 32. Raspodjela reziduala  $M_{cl} - M_{clR}$  s kompenzacijom ((a) i (b)) i bez kompenzacije ((c) i (d)) termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.446 – 0.475 p.j.

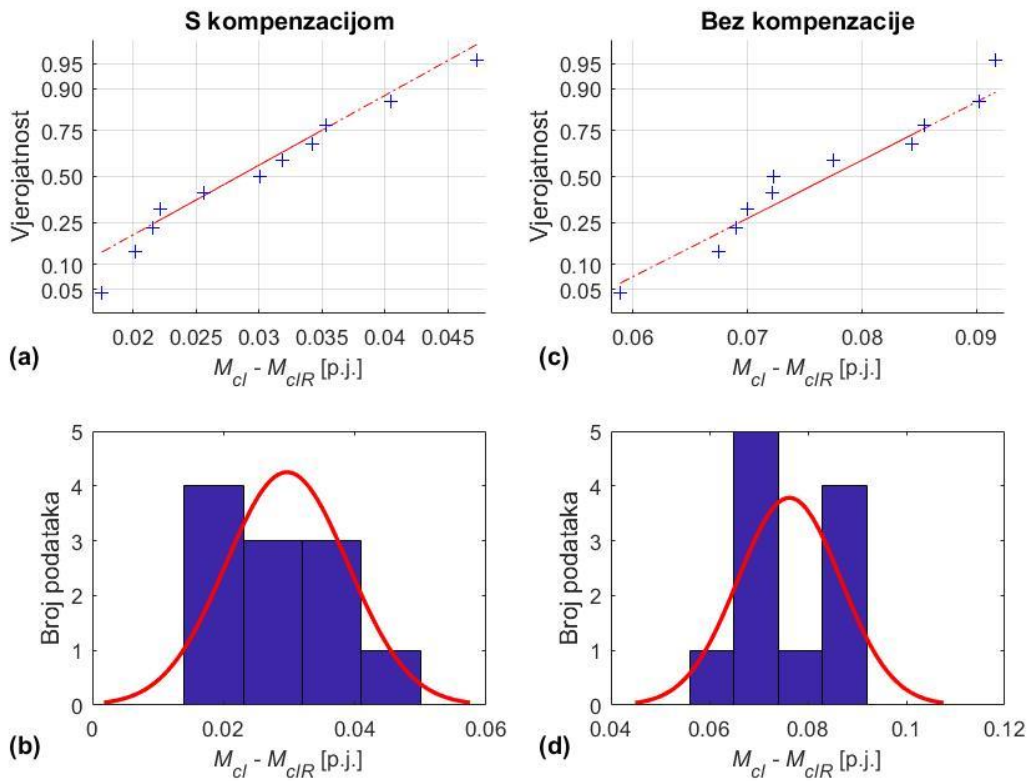




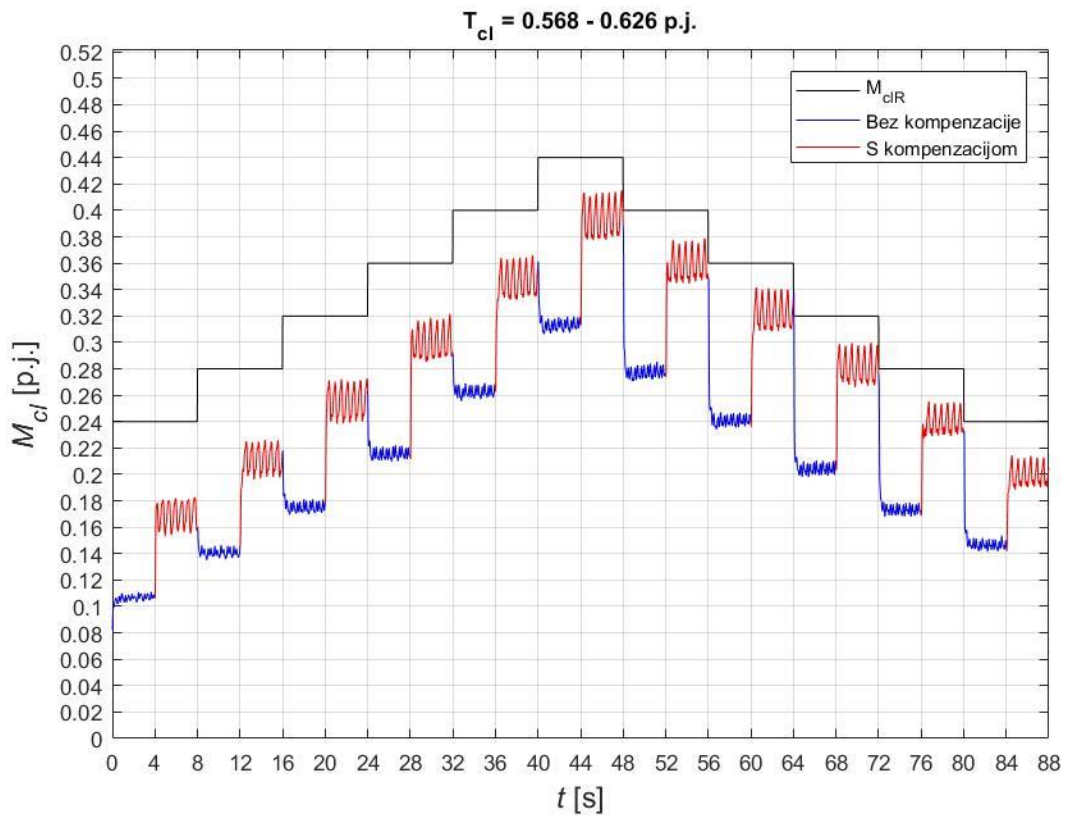
Slika 33. Eksperimentalni rezultati za raspon temperatura spojke 0.492 – 0.515 p.j.



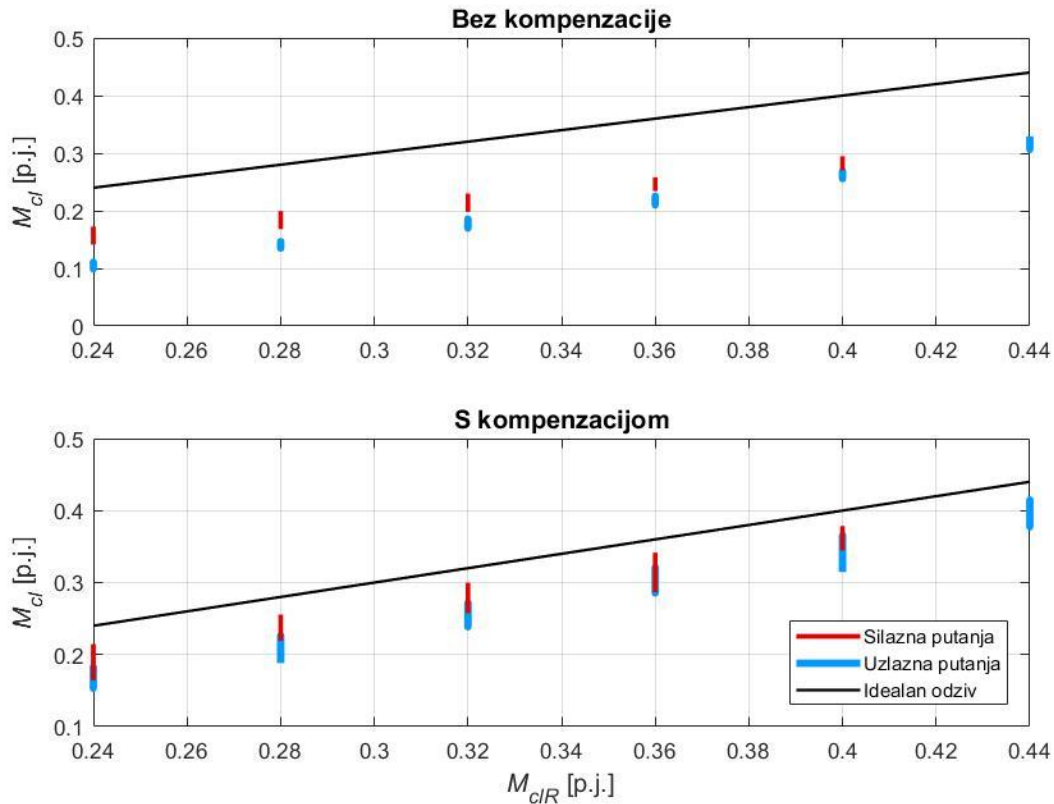
Slika 34. Odziv sustava na referencu momenta za raspon temperatura spojke 0.492 – 0.515 p.j.



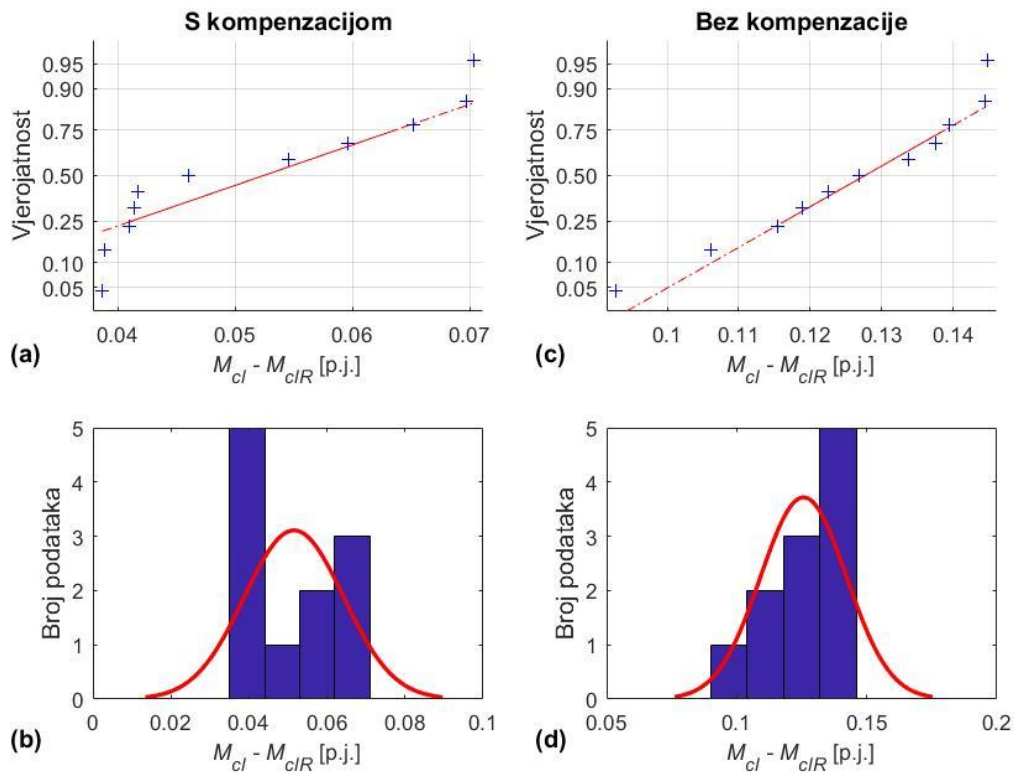
Slika 35. Raspodjela reziduala  $M_{cl} - M_{clR}$  s kompenzacijom ((a) i (b)) i bez kompenzacije ((c) i (d)) termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.492 – 0.515 p.j.



Slika 36. Eksperimentalni rezultati za raspon temperatura spojke 0.568 – 0.626 p.j.



Slika 37. Odziv sustava na referencu momenta za raspon temperatura spojke 0.568 – 0.626 p.j.



Slika 38. Raspodjela reziduala  $M_{cl} - M_{clR}$  s kompenzacijom ((a) i (b)) i bez kompenzacije ((c) i (d)) termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.568 – 0.626 p.j.

**Tablica 2. Vrijednosti standardne devijacije i varijable  $p$  za različite raspone temperatura spojke i slučajeve s i bez kompenzacije termalnih efekata**

Raspon temperatura spojke	0.446 – 0.475 p.j	0.492 – 0.515 p.j.	0.568 – 0.626 p.j
Standardna devijacija za slučaj bez kompenzacije	0.0132	0.0093	0.0127
Standardna devijacija za slučaj s kompenzacijom	0.0116	0.0104	0.0116
vrijednost $p$ Lilliefors testa za slučaj bez kompenzacije	0.5	0.2944	0.5
vrijednost $p$ Lilliefors testa za slučaj s kompenzacijom	0.5	0.5	0.0915

**Tablica 3. Apsolutne srednje vrijednosti reziduala  $M_{cl} - M_{clR}$  za slučaj s i bez kompenzacije termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.446 – 0.475 p.j.**

Apsolutne srednje vrijednosti reziduala [p.j.]											
Bez komp.	0.0716	0.0721	0.0667	0.0611	0.0546	0.0401	0.0423	0.0491	0.0521	0.0500	0.0427
S komp.	0.0264	0.0156	0.0080	0.0001	0.0105	0.0158	0.0111	0.0082	0.0001	0.0086	0.0137

**Tablica 4. Apsolutne srednje vrijednosti reziduala  $M_{cl} - M_{clR}$  za slučaj s i bez kompenzacije termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.492 – 0.515 p.j.**

Apsolutne srednje vrijednosti reziduala [p.j.]											
Bez komp.	0.0854	0.0902	0.0916	0.0844	0.0775	0.0699	0.0689	0.0723	0.0721	0.0674	0.0589
S komp.	0.0703	0.0697	0.0651	0.0596	0.0545	0.0460	0.0417	0.0387	0.0388	0.0409	0.0413

**Tablica 5. Apsolutne srednje vrijednosti reziduala  $M_{cl} - M_{clR}$  za slučaj s i bez kompenzacije termalnih efekata za raspon temperatura spojke 0.568 – 0.626 p.j.**

Apsolutne srednje vrijednosti reziduala [p.j.]											
Bez komp.	0.1337	0.1394	0.1448	0.1444	0.1376	0.1268	0.1226	0.1189	0.1154	0.1062	0.0928
S komp.	0.0473	0.0405	0.0353	0.0301	0.0222	0.0175	0.0201	0.0215	0.0256	0.0318	0.0342

## 7. ZAKLJUČAK

Za potrebe razvoja sustava E-spojke razvijen je eksperimentalni postav na kojem se simuliraju stvarni radni uvjeti. U svrhu analize utjecaja termalnih efekata provedeni su eksperimenti koji karakteriziraju ponašanje sustava s obzirom na porast temperature spojke. Primijećeno je da s porastom temperature spojke dolazi do značajnog propada momenta i porasta pozicije sekundarnog cilindra spojke (CSC) u ovisnosti o poziciji hidrostatičkog aktuatora (HCA). Također, prikazano je da dinamika grijanja i hlađenja ima značajan utjecaj na iznos odstupanja. Predložena je upravljačka strategija otvorenog tipa čija je glavna namjena kompenzacija termalnih efekata. Upravljačka strategija temeljena je na eksperimentalno pokazanoj korelaciji između odstupanja CSC pozicije i odstupanje momenta. Glavni cilj ove kompenzacije je održavanje određene reference momenta i konstantno ispravljanje HCA pozicije za različite uvjete grijanja i hlađenja. Verifikacija upravljačke strategije provedena je eksperimentalno i offline. Na temelju offline analize primijećeno je značajno poboljšanje u smislu slijeđenja reference momenta, odnosno srednja greška momenta  $\Delta M_{cl,mean}$  i maksimalna greška momenta  $\Delta M_{cl,max}$  su znatno smanjene u odnosu na upravljanje bez kompenzacije termalnih efekata. Eksperimentalni rezultati također pokazuju značajnu kompenzaciju greške momenta, ali su rezultati lošiji nego u offline analizi. To je prvenstveno zbog zanemarivanja histereze trenja (čija kompenzacija nije predmet ovog rada) i određenih greški kod modeliranja.

Budući rad na ovom sustavu trebao bi biti na kompenzaciji histereze trenja, daljnjem poboljšanju točnosti modela te razvijanju termalnog modela u svrhu estimacije temperatura.

---

**LITERATURA**

- [1] B. Škugor, J. Deur, V. Ivanović, „E-clutch torque Control Including Compensation of thermal Expansion Effects“, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 69, No. 1, January 2020
- [2] R. Welter, M. Kneißler, “The Manual Transmission Has a Future – E-clutch and Hybridization,” *11<sup>th</sup> Schaeffler Symposium*, April 11-13, 2018 in Baden-Baden
- [3] M. Hoić, M. Hrgetić, J. Deur and A. Tissot, “Design of a test rig in support of E-clutch dynamics characterization, modelling, and control,” *Powertrain Modelling and Control Conference PMC 2018*, Loughborough, UK, 2018.
- [4] J. Kroll, M. Hausner and R. Seebacher, “Mission CO2 Reduction – The future of the manual transmission,” *10<sup>th</sup> Schaeffler Symposium*, April 3-4, 2014 in Baden-Baden

---

**PRILOZI**

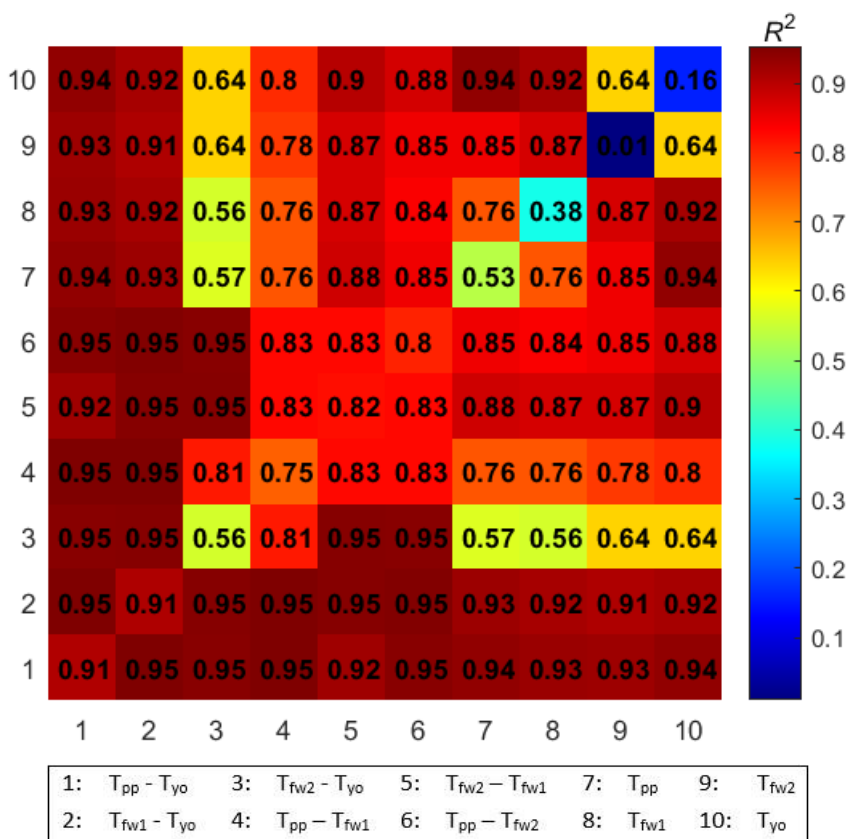
- I. CD-R disc
- II. Estimacija odstupanja CSC pozicije

## Prilog II – Estimacija odstupanja CSC pozicije

Ovdje će se predstaviti mogućnost estimacije odstupanja  $\Delta s_{sc}$  uz upotrebu mjerenih temperatura na postavu E-spojke. Ukoliko se prikaže i eksperimentalno provjeri efektivnost estimacije otvara se mogućnost uklanjanja skupog senzora CSC pozicije  $s_{sc}$ .

U 3. poglavlju prikazano je da odstupanje CSC pozicije i odstupanje momenta spojke ovise o dinamici grijanja/hlađenja. Prema tome, očekivano je da će uz vrijednosti temperatura spojke utjecaj imati i njihove međusobne razlike.

Razmatra se linearni model estimacije s dvije ulazne varijable. Ulazne varijable modela prikazane su na dnu Slike 39. Kako bi se odredila reprezentativnost modela, odnosno koliko dobro model opisuje neku pojavu koristi se indeks determinacije  $R^2$ . Model je bolji što je indeks determinacije bliži jedinici, odnosno ne postoji nikakva veza između pojave i modela ako je  $R^2 = 0$ . Za provedene eksperimente, (opisane u 3. poglavlju) temperature spojke i pripadna odstupanja CSC pozicije iskorištena su za modeliranje te su parametri modela izračunati pomoću metode najmanjih kvadrata. Prema Slici 39, najveći indeks determinacije  $R^2$  jednak je 0.95 te se postiže za više različitih kombinacija ulaznih varijabli.



Slika 39. Indeksi determinacije  $R^2$  za različite estimacijske modele  $\Delta s_{sc}$



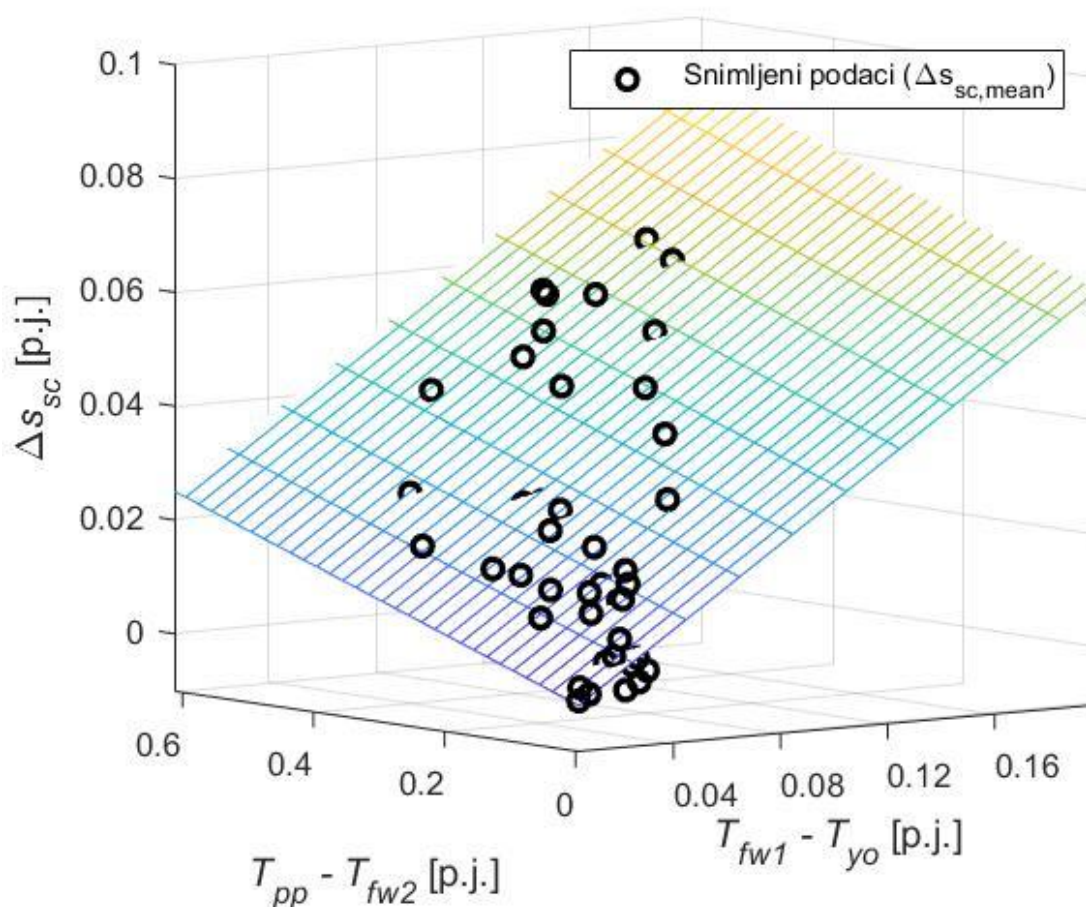
Izabrani ulazi u model su  $T_{fw1} - T_{yo}$  i  $T_{pp} - T_{fw2}$ , za koje je dobiveni indeks  $R^2$  jednak 0.95.

Prema tome, linearni model može se opisati kao

$$\Delta s_{sc,est} = p_{00} + p_{10}(T_{fw1} - T_{yo}) + p_{01}(T_{pp} - T_{fw2}), \quad (19)$$

gdje su  $p_{00}$ ,  $p_{10}$  i  $p_{01}$  parametri modela.

Odziv modela prikazan je na Slici 40 zajedno sa snimljenim podacima. Može se primijetiti visoka točnost modela s obzirom na snimljene podatke.



**Slika 40. Odziv linearnog modela estimacije s dva ulazna parametra**

Također, osim odabranih ulaza u model može se provesti analiza modela s obzirom na druge ulazne parametre čiji je indeks determinacije malo niži. Za ulazne parametre mogu se iskoristiti  $T_{pp}$  i  $T_{yo}$ , čime bi za potrebe ovog modela bila potrebna samo dva senzora temperature (umjesto četiri iskorištena u modelu (19)). Iz Slike 39 može se vidjeti kako je  $R^2$  jednak 0.91 za ulazni parametar  $T_{pp} - T_{yo}$ , čijom bi se primjenom mogao koristiti linearni model sa samo jednim ulazom.