Razvoj servohidravličnega pogona na področju mehanike loma

Vito Tič, Darko Lovrec, Marijana Milković, Nenad Gubeljak

Izvleček:
Naprave za preizkušanje dinamične trdnosti materialov se v laboratorijskih in industrijskih okoljih uporabljajo za testiranja in raziskave na področju mehanike loma in običajno delujejo s pomočjo servohidravličnih ali servopnevmatskih pogonov. Vsebujejo vse več elektronskih in mikroprocesorsko krmiljenih komponent, s pomočjo katerih dosegajo ustrezno dinamiko ter sposobnost shranjevanja in obdelave signalov.

Prispevek opisuje načrtovanje, izvedbo in delovanje prilagodljive naprave za preizkušanje dinamične trdnosti materialov, ki bazira na osnovi linearne elektro-hidravlične servoosi z zaprtozančno regulacijo sile. Za krmiljenje komponent je vgrajen večjedrni krmilnik proizvajalca Beckhoff, na katerem se hkrati izvaja krmilni program z realno časovno regulacijo sile, kakor tudi vmesnik človek-stroj v Windows okolju. Predstavljena naprava je zmožna dosegati sile do 40 kN pri hitrostih testiranja do 20 Hz.

Ključne besede:
servohidravlika, regulacija sile, visoko dinamično obratovanje, testiranje utrujenosti materiala

1 Uvod

Razvoj novih materialov zahteva razumevanje njihovih mehanskih lastnosti, pri čemer je ena najpomembnejših njihovo obnašanje ob utrujenosti. Glavni namen tovrstnih preizkusov je zagotavljanje varnosti sestavnih delov naprav ob njihovi uporabi [1–3]. Upoštevajoč, da teoretične enačbe vedno ne ustrezajo realnemu obnašanju materiala, je določanje vzdržljivosti materialov z eksperimentalnimi postopki še toliko pomembnejše [4]. Da bi raziskali poglavitne vzroke za lom oz. odpoved inženirskih sestavnih delov, ki so bili izpostavljeni enoosni in/ali večosni obremenitvi, je potrebno izvesti preizkuse mehanske utrujenosti v različnih režimih in na najrazličnejših materialih [5].

V literaturi lahko zasledimo več namenskih naprav zasnovanih in izdelanih naprav za posebne aplikacije preizkušanja materialov [6–10]. Na področju naprav za preizkušanje dinamične trdnosti materialov pa je trg zasičen z dragimi namenskimi preskuševališči, ki lahko delujejo v zelo različnih režimih frekvenc [10]. Najnovejše raziskave so usmerjene v razvoj naprav, ki dosežejo utrujenost materiala s pomočjo resonančnega sistema ali servopogonov [11,12]. V nadaljevanju bosta predstavljena načrtovanje in izvedba lastno zasnovane naprave za preizkušanje dinamične trdnosti materialov, ki deluje na osnovi linearne elektro-hidravlične servoosi in zaprtozančne regulacije sile.

Doc. dr. Vito Tič, univ. dipl. inž., **prof. dr. Darko Lovrec**, univ. dipl. inž., **Marijana Milković**, mag. inž., **prof. dr. Nenad Gubeljak**, univ. dipl. inž., vsi
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo

Elektro-hidravlični servosistemi so servomehanizmi, ki omogočajo vodenje težkih bremen z veliko inercijo in to z visoko odzivno hitrostjo ter natančnostjo krmiljenja. To omogočajo elektro-hidravlični servoventili, ki so bili razviti z namenom zelo velikega povečanja moči, pri čemer lahko s šibkim električnim signalom zelo hitro in natančno krmilimo velike hidravlične moči.

Za upravljanje servoventilov je potrebno uporabiti mikroprocesorske sisteme. Programabilni logični krmilnik (PLK) je zelo primeren za različne naloge avtomatizacije v industriji, zato ga pogosto uporabljamo. Največje prednosti PLK-jev so modularna konstrukcija, programirljivost, enostavno vzdrževanje, odpornost na vplive okolja itd.

2 Zasnova naprave

Napravo za preizkušanje dinamične trdnosti materialov upravlja servoventil v zaprtozančni regulaciji sile. Vsak regulacijski sistem pa je sestavljen iz štirih osnovnih elementov: regulacijskega člena, merilnega člena, izvršnega člena in objekta krmiljenja. V našem primeru je regulacijski člen Beckhoffov industrijski PLK, merilni člen je senzor sile, aktuator je servoventil, krmilni objekt pa hidravlični valj.

2.1 Konstrukcija naprave

Konstrukcija naprave, prikazana na *sliki 1*, je zasnovana iz visoko kakovostnih materialov in prilagojena predhodno izdelanim hidravličnim valjem in nosilni mizi [13]. Konstrukcija je prav tako prilagojena izvedbi visoko dinamičnih preskusov z nadzorovano silo, pri čemer sta regulirani tako amplituda kot tudi frekvenca sile. Pri dimenzioniranju sta bili skrbno upoštevani največja natezna in največja tlačna sila, ki znašata 40 kN.

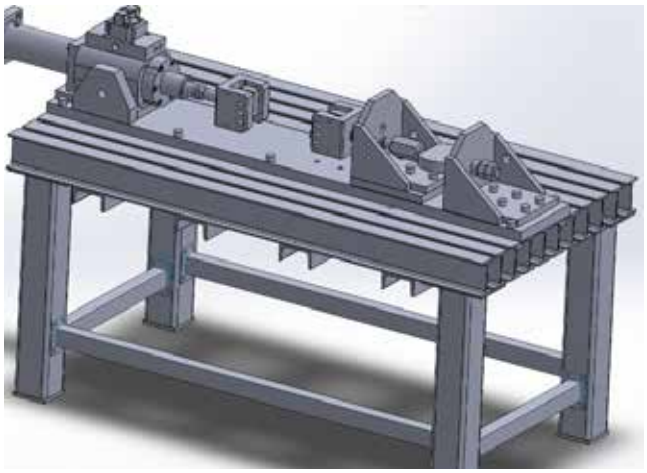
Sama zasnova naprave sicer omogoča tlačne, natezne ter tlačno-natezne statične in dinamične preizkuse, pri čemer je potrebno ustrezno zasnovati in izdelati vpenjalno pripravo za vpetje preizkušanca. Zaradi nadaljnjih potreb raziskovalnega dela na področju mehanike loma smo se sprva omejili le na natezne preizkuse, ki jih bomo v nadaljevanju izvedli na aluminijevih zlitinah.

Na eni strani naprave je hidravlični valj, ki ima na batnici nameščeno namensko klinasto vpenjalo, medtem ko je drugo klinasto vpenjalo nameščeno togo v varjeni nosilec preko merilne celice sile. Razdalja med vpenjali pa se lahko prilagodi z vijačenjem varjenih nosilcev. Posebna pozornost je bila namenjena konstrukciji klinastih samozategovalnih vpenjal, ki vsebujejo premične čeljusti z rebrasto površino za boljši oprijem. Vpenjala so izdelana iz orodnega jekla 115CrV3 (DIN), pri čemer je ogrodje vpenjala temperirano na 850 ± 20 MPa, čeljusti pa imajo trdoto 52 ± 2 HRC.

Kot smo že omenili, je senzor sile nameščen na nasprotni strani hidravličnega valja (*slika 2*), medtem ko je senzor pomika v samem podaljšku valja, kot to prikazuje slika 4.

3 Hidravlični sistem

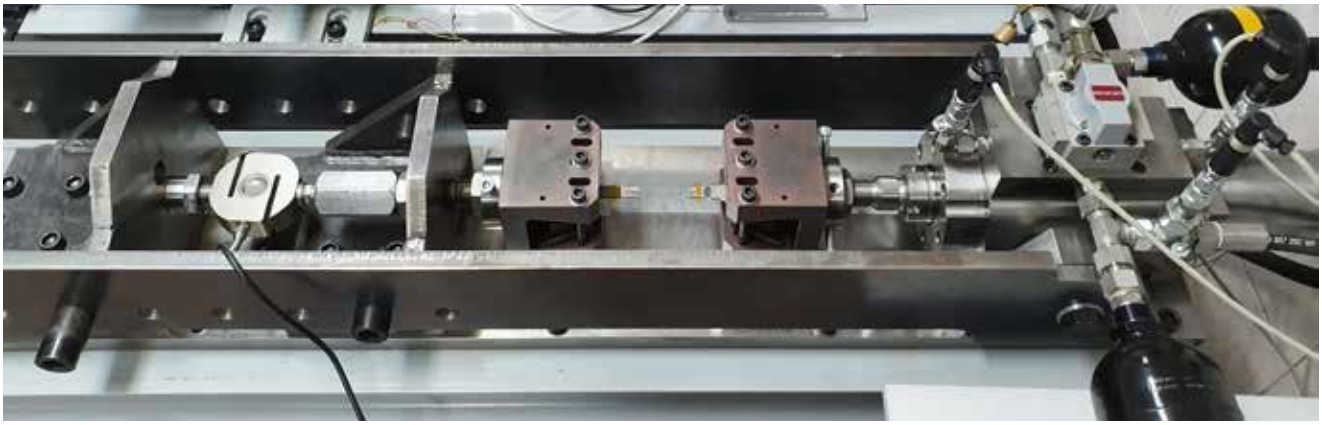
Hidravlični sistem, katerega shema je prikazana na *sliki 3*, poganja aksialna batna črpalka z nastavljivo



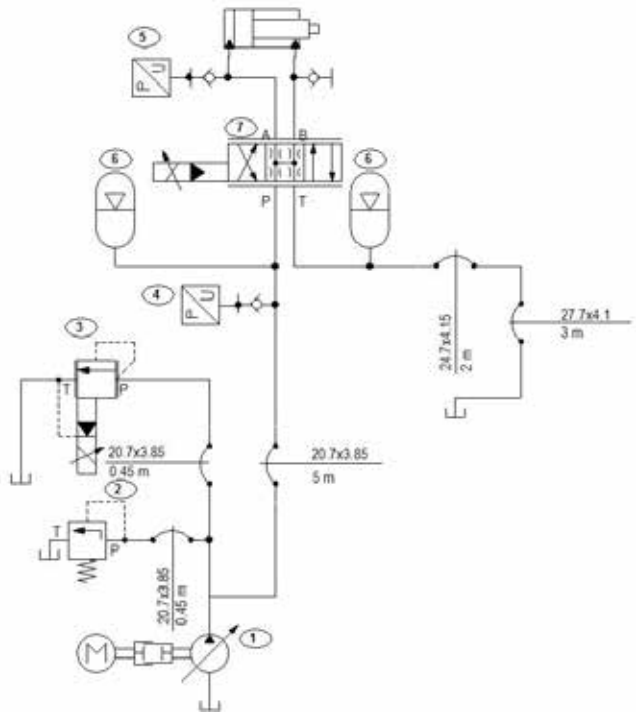
Slika 1 : *Zasnova konstrukcije naprave v programskem okolju SolidWorks*

nagibno ploščo Parker PAV 32, ki zagotavlja do 45 L/min pretoka pri delovnem tlaku do 315 bar. Uporaba črpalke z nastavljivo iztisnino je v tem primeru tako rekoč nujna, saj je potrebno pri vsakem testu znižati pretok črpalke do te mere, da skozi tlačno omejevalni ventil teče čim manjša količina hidravlične tekočine. Ta namreč ne opravlja nobenega dela in se le prekomerno greje. To še posebej velja v primeru, ko naprava deluje v režimu visokih tlakov (visoka dinamika obratovanja), pri čemer opravlja minimalne pomike bata (preizkušanci so običajno zelo togi).

Poleg varnostnega tlačno omejevalnega ventila za nastavitev delovnega tlaka skrbi električno krmiljen tlačno omejevalni ventil Bosch Rexroth DBEM, s katerim lahko programsko nastavljamo želeni delovni tlak ali pa obratujemo v obtoku. Zaradi visoke dinamike obratovanja in s tem povezanega visokega nihanja tlakov tako na tlačnem kot tudi na povratnem vodu sta bila v neposredno bližino krmilnega servoventila nameščena hidravlična akumulatorja, ki sta bila skrbno izračunana in izbrana ter nato ustrezno napolnjena z dušikom na optimalni tlak [14].



Slika 2 : *Izdelana naprava za preizkušanje dinamične trdnosti materialov*



Slika 3 : *Shema hidravličnega sistema naprave*

Za krmiljenje hidravličnega valja je uporabljen dvostopenjski hidravlični servoventil Moog G-761, ki je sestavljen iz električnega navornega motorja in dveh stopenj hidravličnega ojačenja. Kotva, ki se nahaja med navitjema, je preko naletne plošče povezana v hidravlični del valja. Nagib kotve povzroči tudi nagib naletne plošče. Tekočina ima potem lažjo pot skozi eno od šob, zaradi česar se v eni od komor druge stopnje servoventila tlak poveča, v drugi pa zmanjša. Tlačna razlika je proporcionalna pomiku drsnika, ki sledi. Ko se jeziček izravna v izhodiščno stanje, se vzpostavi ravnovesje med silo, ki preko povratne vezave deluje na jeziček, in silo, s katero na jeziček deluje momentni motor.

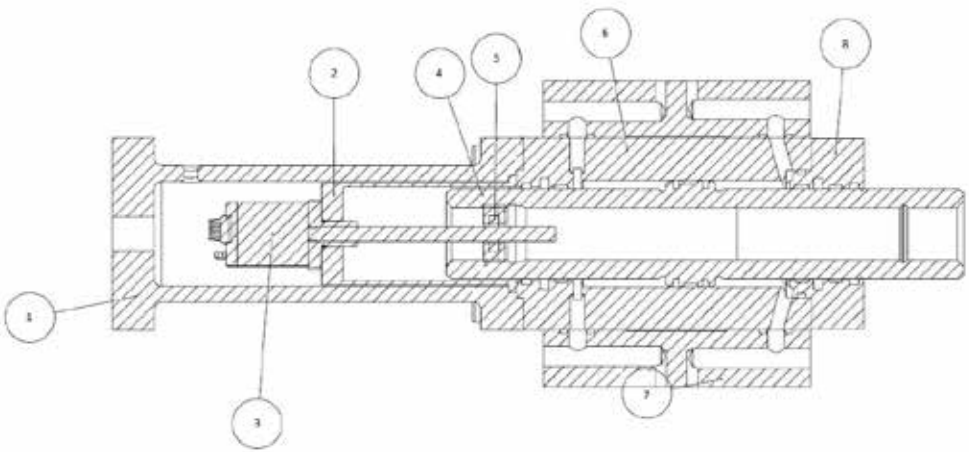
Kot glavni aktuator je uporabljen dvosmerno delujoči valj z obojestransko batnico, prikazan na *sliki 4*. V primerjavi z valjem z enostransko batnico sta zaradi enakih ploščin bata v obeh komorah hitrost giba in sila v obe smeri enaki. Prav tako ima takšna izvedba še določene druge prednosti, kot so: boljše vodena batnica, boljše prenašanje prečnih sil, senzorji so lahko nameščeni na katerikoli strani, ... Tako smo tudi v našem primeru senzor pomika namestili v posebno ohišje za valjem ter ga tako zaščitili pred zunanjimi vplivi.

Pri namestitvi hidravličnega valja je potrebno zagotoviti dovolj veliko togost sistema, zato je valj pritrjen od spodaj in z obeh strani. Sicer ima valj na spodnji strani še priključne izvrtine za dodatni ventil, s čimer bi lahko podvojili vstopno in izstopno količino hidravlične tekočine (posledično hitrost pomika), ker pa v trenutni konfiguraciji uporabljamo le en servoventil, smo omenjene izvrtine ustrezno zatesnili.

4 Krmilni sistem

Krmilni sistem temelji na štirijedrnem industrijskem krmilniku Beckhoff CX5140, na katerem se hkrati izvaja TwinCat 3 (realnočasovni PLK-del) ter Windows 7 Embedded Standard. Ključna prednost tovrstnega računalniškega krmilnika pred konvencionalnimi PLK-ji je, da lahko en sam krmilnik hkrati izvaja zelo hitre operacije, kot je npr. PID-regulacija, ki se v našem primeru izvede v približno 20 µs, kakor tudi izvaja program krmilnega panela oz. vizualizacije. Kljub izredni procesorski zmogljivosti krmilnika pa je regulacijski cikel omejen s hitrostjo vhodno-izhodnih modulov, ki so v našem primeru imeli povprečen čas pretvorbe A/D oz. D/A okoli 0,4 ms. Zato smo izvajanje PLK-programa nastavili na periodo 0,1 ms.

Posebnost pri zajemanju podatkov iz senzorjev predstavlja priklop merilne celice sile, ki je neposre-



1 Držalo
2 Zaščita senzorja
3 Senzor položaja bata
4 Batnica
5 Magnetni obroč
6 Valj
7 Ventilska plošča
8 Glava valja

Slika 4 : *Hidravlični valj z vgrajenim senzorjem pomika in hitrosti*

Slika 5 : *Krmilnik Beckhoff CX5140 z vhodno-izhodnimi moduli*

dno, brez ojačevalnika, povezana z vhodnim modulom EL3356-0010, ki omogoča priklop uporovnega mostičnega vezja merilnih trakov. Na ta način smo močno izboljšali kvaliteto in frekvenco zajemanja signala sile. Prav tako pa lahko z omenjenim modulom vedno znova umerimo merilno celico sile s pomočjo regulacije tlaka v komori valja in tlačnega preračuna. Namreč: s časom in z uporabo se lahko lastnosti merilne celice sile nekoliko spremenijo (tim. drift signala).

4.1 Krmilni program (PLK)

Krmilni program, ki smo ga izdelali v programskem okolju TwinCat 3, smo smiselno razdelili na več podprogramov. Če se omejimo le na glavni del podprograma za izvedbo zaprtozančne regulacije sile, ta poteka v naslednjem zaporedju [15]:

V prvi funkciji (*Parameter_input*) se izvede začetna nastavitev vrednosti spremenljivk. Tukaj nastavimo vrednosti spremenljivk, za katere želimo, da se nastavijo samo ob prvem prehodu programa.

V drugi funkciji (*Init*) incializiramo parametre za sinusni generator in PID-regulator ter štejemo cikle. Štetje ciklov se izvaja z opazovanjem generiranega sinusnega signala. Izvede se ob vsakem pozitivnem prehodu skozi srednjo vrednost sinusnega signala (navidezna ničla).

V naslednji funkciji (*Calculation*) se izvedejo preračuni vrednosti. Iz vnesene frekvence na krmilnem panelu se izračuna čas periode sinusa, izvede se vklop/izklop členov PID-regulatorja ter izračuna sila.

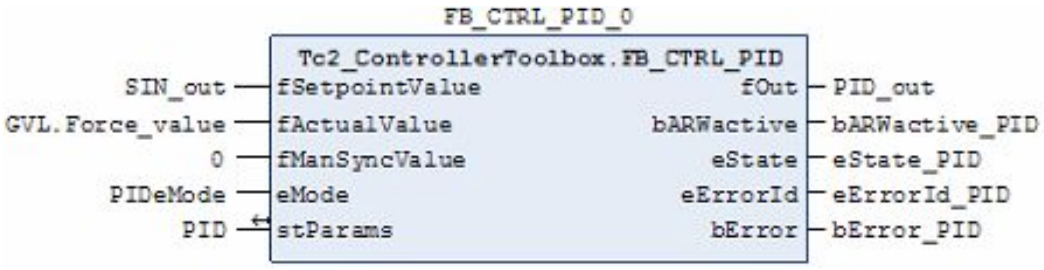
V naslednjih dveh funkcijah sta bloka s signalnim generatorjem in PID-regulatorjem, ki sta standardna bloka TwinCat 3 Controller ToolBox-a. Na vhodih in izhodih iz blokov so definirane spremenljivke (*slika 6*), katerih parametre nastavljamo na krmilnem panelu.

Sledi funkcija (*Output*), v kateri se skalira vrednost iz izhoda PID-regulatorja na vrednost, primerno za vodenje servoventila. Preden se vrednost posreduje na izhod, mora biti izpolnjen še pogoj, da je sinusni generator aktiven. S tem preprečimo, da bi regulator upravljal z drsnikom servoventila v primeru, ko sinusni generator ne deluje.

V naslednji funkciji (*Variables update*) se izvede preračun dejanske in želene vrednosti sile v format, primeren za prikaz na grafu. Prav tako se tu izvede preračun najmanjših in največjih vrednosti pozicije, sile in tlakov v trenutnem ciklu. Ko nastopi nov cikel, se vrednosti spremenljivk ponastavijo, skrajne vrednosti pa se prenesejo v krmilni panel oz. uporabniški vmesnik (HMI), kjer se prikažejo in po potrebi zabeležijo.

Zadnja funkcija (*Fail control*) je izključno varnostnega značaja in v vsakem prehodu programa preveri, ali je vrednost pozicije bata manjša od 5 mm. To je možno samo v primeru, ko je prišlo do loma preizkušanca in se je bat premaknil v skrajno notranjo lego. Takrat se sproži procedura zaključka testa.

Ko pride krmilnik z izvajanjem do konca zadnje funkcije, se vrne na funkcijo *Init* in nadaljuje z izva-



Slika 6 : *Krmilni program – PID-blok*

Slika 7 : *Uporabniški vmesnik, ki se izvaja v okolju Windows*

janjem programa. Na funkcijo *Init* se vračamo zato, ker nam to omogoča spreminjanje parametrov signalnega generatorja in PID-regulatorja tudi med izvajanjem testa, kar je v določenih pogojih zaželeno.

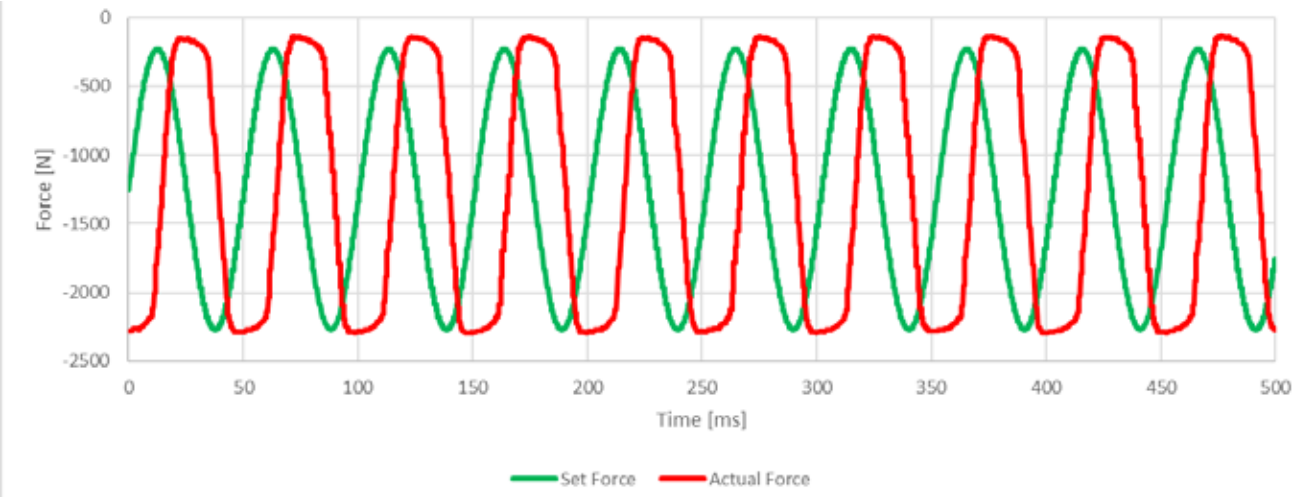
4.1 Krmilni panel (HMI)

Krmilni panel oz. uporabniški vmesnik je zasnovan v okolju *Visual Studio C#*, s katerim izdelamo klasično Windows aplikacijo, kar nam omogoča zelo veliko svobode pri programiranju in nadgrajevanju sistema. Dodatna prednost uporabe okolja *C#* za izdelavo HMI-vmesnika je tudi možnost uporabe *ScopeView*, ki omogoča izris ter shranjevanje posnetkov oz. grafikonov naših spremenljivk. Komunikacija med realnočasovnim delom (PLK-programom) in uporabniškim vmesnikom v tem primeru poteka preko protokola *TwinCat ADS*, ki omogoča branje in pisanje spremenljivk v PLK-delu, s čimer vplivamo na izvajanje realnočasovnega krmilnega programa.

Zasnovani uporabniški vmesnik je prikazan na *sliki 7* in se skupaj z realnočasovnim PLK-programom izvaja v okolju Windows na industrijskem krmilniku Beckhoff. Čeprav je vmesnik videti malce kompleksen, pa je rokovanje z njim dokaj enostavno. Na levi strani ponuja vklop/izklop črpalke ter nastavitev delovnega tlaka, ki ga lahko spremenimo tudi med testom. Poleg je okvirček *Parametri regulatorja* z nastavitvami PID-regulatorja, pri čemer so priporočene vrednosti že vpisane. Možnost imamo tudi vklopiti ali izklopiti integralni in/ali diferencialni del regulatorja. Okvirček *Parametri proge* omogočajo definicijo osnovnih parametrov testa. Tukaj določimo dolžino testa (s številom ciklov), frekvenco sile, srednjo vrednost sile in njeno amplitudo.

V okvirčku *Podatki testa* pa se med testom sprotno izpisujejo osnovni podatki, kot so čas začetka testa, iz vnesenega števila ciklov se izračuna dolžina testa, iz trenutnega cikla trajanje testa in iz preostanka ciklov čas do zaključka testa.

Drugi del uporabniškega vmesnika predstavljajo elementi, ki omogočajo pregled nad testom med samim izvajanjem. Tako imamo na voljo še graf (*Sco-*



Slika 8 : *Posnetek obratovanja naprave pri frekvenci 20 Hz*

peView), ki izrisuje želeno in dejansko vrednost sile s hitrostjo osnovnega PLK-cikla 0,1 ms. Na ta način imamo možnost avtomatiziranega periodičnega shranjevanja podatkov o utrujanju materiala, kar je bistvenega pomena za razumevanje raziskav na področju mehanike loma. Desno zgoraj pa je še en okvirček *Podatki testa*, ki prikazuje najnižje in najvišje vrednosti pozicije, sile in tlaka v vsakem ciklu.

5 Rezultati delovanja

Po uspešno izvedenem prvem zagonu naprave in odpravi programskih pomanjkljivosti smo pričeli z realnimi testiranji na področju preizkušanja dinamične trdnosti materialov. Med testiranji smo postopoma poviševali delovni tlak kakor tudi frekvenco in silo utrujanja. Pri tem smo sprotno ročno prilagajali parametre PID-regulatorja, da smo dosegli želen odziv sistema. *Slika 8* prikazuje posnetek delovanja sistema pri izvedbi dinamičnega nateznega testa pri sili od 250 do 2250 N in frekvenci 20 Hz. Skladno z zeleno krivuljo, ki ponazarja želeno vrednost sile, ter rdečo krivuljo, ki ponazarja dejansko oz. merjeno vrednost sile, lahko zaključimo, da sistem deluje z zadostno hitrostjo in natančnostjo.

6 Zaključek

Zaradi omejitev obstoječe strojne opreme za preizkušanje dinamične trdnosti materialov smo pristopili k razvoju, izdelavi in implementaciji lastne naprave za dinamično utrujanje materialov, ki je zasnovana na naprednem visoko zmogljivem hidravličnem sistemu. Lastno zasnovan sistem ima mnogo prednosti od obstoječega stroja za dinamično utrujanje materialov INSTRON 1255, ki je v Laboratoriju za strojne elemente in konstrukcije, saj nam omogoča testiranja materialov pri višjih frekvencah, tj. do 20 Hz, kar posledično pomeni, da so posamezni testi izvedeni v krajšem času. Še pomembneje pa je, da je lastno zasnovan stroj mnogo bolj prilagodljiv in nadgradljiv tako v strojnem kot v krmilnem delu. Omogoča nam zasnovo in izvedbo najrazličnejših statičnih in dinamičnih testov utrujanja materiala s hkratnim merjenjem in beleženjem sile ter pomika ter hkrati široko prilagodljivost krmiljenja stroja, saj sta celotno krmiljenje in regulacija sistema plod lastnega razvoja.

Avtomatizacija preizkuševališča je bila izdelana v programu Twincat 3, vizualizacija pa v programu Visual Studio C#. Krmilni program preko krmilnika Beckhoff CX5140 skrbi za varnost, vklop/izklop aktuatorjev, zajemanje vrednosti iz senzorjev ter regulacijsko zanko. Uporabniški vmesnik pa uporabniku zagotovi dovolj svobode pri vnosu parametrov in preglednost pri opazovanju pomembnih vrednosti med samim testom.

Viri

[1] P. S. Pao, S. J. Gill, and C. R. Feng, “On fatigue crack initiation from corrosion pits in 7075-T7351 aluminum alloy,” Scr. Mater., vol. 43, no. 5, pp. 391–396, 2000.

[2] P. Weißgraeber, J. Felger, D. Geipel, and W. Becker, “Cracks at elliptical holes: Stress intensity factor and Finite Fracture Mechanics solution,” Eur. J. Mech. A/Solids, vol. 55, pp. 192–198, 2016.

[3] D. L. DuQuesnay, P. R. Underhill, and H. J. Britt, “Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminium alloy under aircraft loading,” Int. J. Fatigue, vol. 25, no. 5, pp. 371–377, 2003.

[4] W. Cui, “A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures,” J. Mar. Sci. Technol., vol. 7, no. 1, pp. 43–56, 2002.

[5] V. Doquet and V. De Greef, “Dwell-fatigue of a titanium alloy at room temperature under

uniaxial or biaxial tension," Int. J. Fatigue, vol. 38, no. 2012, pp. 118–129, 2011.
[6] F. Marcelo and P. Bustos, "Design and construction of a torsional fatigue testing machine operated by inertial loads," Dyna, year 79, Nro. 172, pp. 46–55, 2012.
[7] D. Petersen, R. Link, D. Fletcher, and J. Beynon, "Development of a Machine for Closely Controlled Rolling Contact Fatigue and Wear Testing," J. Test. Eval., 2000.
[8] M. Feng and M. Li, "Development of a Computerized Electrodynamic Resonant Fatigue Test Machine and Its Applications to Automotive Components," in SAE Technical Paper Series, 2010.
[9] C. Bathias, "Piezoelectric fatigue testing machines and devices," Int. J. Fatigue, vol. 28, no. 11, pp. 1438–1445, Nov. 2006.
[10] J. L. A. Ambriz, G. M. D. Almaraz, C. Julio, V. Juarez, E. C. Gomez, and I. F. Zuñiga, "DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TORSION FATIGUE MACHINE : TORSION FATIGUE TESTS ON TWO INDUSTRIAL ALUMINUM ALLOYS," ISSN 1454-2358, vol. 79, 2017.
[11] G. M. . Zuñiga T., Ishvari F.; Dominguez Almaraz, M. Guzman Tapia, and J. L. Avila Ambriz, "Controlled Pre-Corrosion Attack and Ultrasonic Fatigue Endurance of Titanium Alloy Ti – 6Al – 4V," Lat. Am. J. Solids Struct., vol. 14, no. 3, pp. 512–527, 2017.
[12] M. Ouarabi, R. P. Mora, and C. Bathias, "Very high cycle fatigue strength and crack growth of thin steel sheets," vol. 36, pp. 112–118, 2016.
[13]M. Štefane, "Implementacija in prvi zagon elektrohidravlične linearne servoosi", Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2017.
[14]T. Jurgec, "Vpliv hidravličnega cevovoda na delovanje linearne hidravlične servoosi", Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2017.
[15]L. Jerebic, "Regulacija sile na linearni hidravlični servoosi", Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2018.

Development of servo hydraulic drive in the area of fracture mechanics

Abstract:
Material fatigue testing machines are used in laboratory and industrial environments for testing and research in fracture mechanics and are typically operated by servo hydraulic or servo pneumatic actuators. They contain an increasing number of electronic and microprocessor-controlled components, with which they achieve appropriate dynamics and the ability to store and process signals.

The paper describes the design, implementation and operation of a flexible machine for testing the dynamic strength of materials based on a linear electro-hydraulic servo axis with closed loop force control. To control the components, a Beckhoff multi-core controller is installed, which simultaneously runs a control program with real-time force control, as well as a human-machine interface in the Windows environment. The presented machine is capable of achieving forces up to 40 kN at test speeds of up to 20 Hz.

Keywords:
servo hydraulics, force control, high dynamic operation, material fatigue testin