



ELEKTROMOTORNI POGON OSA I REGULACIJA SNAGE LASERA

Milan Živić

Tehnička škola, Kikinda, Republika Srbija, milan.zivic@gmail.com

Sadržaj: Predstavljena je struktura kompletnog elektromotornog pogona razvojnog modela CNC mašine za lasersko graviranje. Upotrebjeni su bipolarni hibridni koračni motori sa odgovarajućim regulatorima. Detaljno je opisan princip upravljanja laserom, koji se koristi za graviranje računarske fotografije i teksta na unapred poznatom materijalu.

Ključne reči: koračni motor, laser, CNC, DSP.

1. UVOD

Razvojni model CNC mašine za lasersko graviranje po svojim performansama ne može se svrstati u grupu alatnih mašina. To znači da se prilikom njegovog konstruisanja ne postavljaju visoki zahtevi u pogledu tačnosti pozicioniranja i kvaliteta obrađenih površina. Samim tim otvorene su veće mogućnosti za postizanje optimalnog odnosa cena - kvalitet.

Pomenuta konstatacija može se u potpunosti primeniti i na izbor elektromotornog pogona osa. Kod CNC alatnih mašina, koje postižu mikronska tolerancija obrade, po pravilu se implementiraju veoma skupi i sofisticirani pogoni. Oni najčešće podrazumevaju upotrebu sinhronog motora sa permanentnim magnetom i vektorskog regulatora. Radi se o digitalnim sistemima upravljanja koji ostvaruju precizna merenja i regulaciju većeg broja zatvorenih kontura [5].

Kod razvojnog modela CNC mašine za lasersko graviranje preciznost kretanja određena je prečnikom fokusiranog laserskog zraka koji se kreće u opsegu od 50 do 100 μm . Iz tog razloga ne postoji potreba za implementiranjem pogona koji ostvaruju veću tačnost pozicioniranja. Mnogo su važniji zahtevi za povećanom brzinom kretanja, pošto se ona direktno preslikava na produktivnost mašine. Uvažavajući prethodno navedene činjenice dolazi se do zaključka da je opravdano opredeliti se za pogon sa koračnim motorima. Oni će obezbediti zadovoljavajuću tačnost i rentabilnost. Potrebno je samo voditi računa da raspoloživi moment motora odgovara dinamičkim zahtevima mehanike.

Kada je u pitanju odabir lasera, polazi se od sasvim drugačijih principa. Tada više nema prostora za minimizaciju troškova. Naime, vrsta lasera presudno utiče na rezoluciju graviranja, dok vreme uspostavljanja

snage laserskog zraka određuje maksimalnu brzinu kretanja osa. Uzimajući u obzir i druge bitne parametre kao što su pouzdanost, bezbednost i radni vek, logično je opredeliti se za što kvalitetniji laserski uređaj.

2. ELEKTROMOTORNI POGON OSA

Za obe mašinske ose projektovan je pogon sa bipolarnim hibridnim koračnim motorima i odgovarajućim regulatorima proizvođača MotionKing (slika 1.). Generalno posmatrano, koračni motori su veoma jednostavni za upravljanje, lako se održavaju, imaju nisku cenu, visoku pouzdanost i rezoluciju koračanja koja se može podešavati [1].

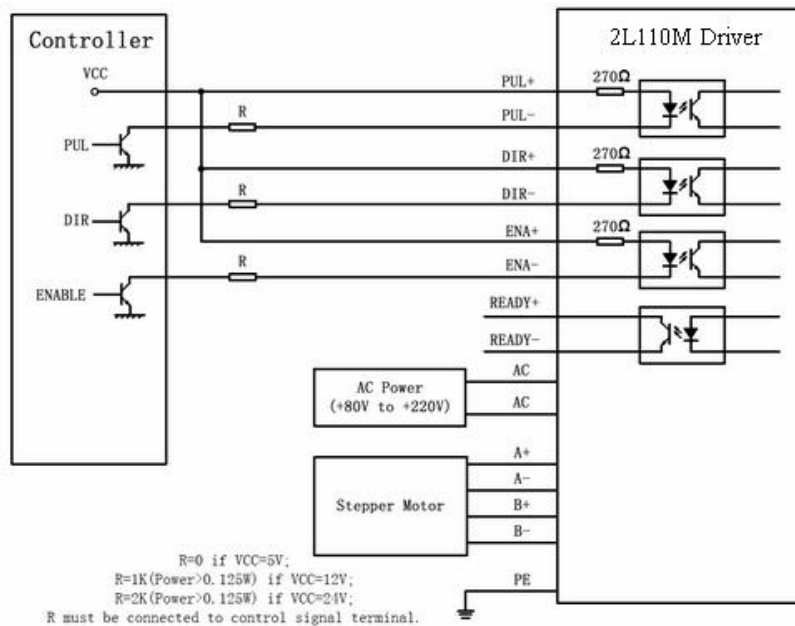


Sl. 1. Elektromotorni pogon osa

Koriste se motori kataloške oznake 43HS2A115-604. U tabeli 1. date su vrednosti osnovnih parametara izabranih motora.

Tbl. 1. Kataloški podaci motora 43HS2A115-604

| | |
|--|------|
| Step angle (deg) | 1,8 |
| Motor length (mm) | 115 |
| Rated current (A) | 6 |
| Phase resistance (Ω) | 0,95 |
| Phase inductance (mH) | 15 |
| Holding torque (Nm) | 13,7 |
| Rotor inertia ($\text{g}\cdot\text{cm}^2$) | 5500 |
| Lead wire (No) | 4 |
| Motor weight (kg) | 6,2 |



Sl. 2. Principijska blok šema povezivanja elektromotornog pogona

Na slici 2. prikazana je principijska blok šema povezivanja upravljača, regulatora i motora. Svi ulazi i izlazi drajvera galvanski su odvojeni pomoću optokaplera. Zbog toga se na izlazu upravljača moraju upotrebiti kola sa otvorenim kolektorom. Signali $PUL+$, $DIR+$ i $ENA+$ su zajednički i povezuju se na fiksni potencijal V_{CC} koji iznosi od 5 do 24 V DC. U ovom radu koristi se napon 24 V, tako da je potrebno proračunati dodatne otpornike R, kako bi struja za LED optokaplera iznosila približno $I_{LED} = 10$ mA. $DIR-$ signal definiše smer (CW ili CCW), dok frekvencija impulsa na $PUL-$ ulazu određuje brzinu obrtanja vratila motora (imp/s). Postoje i pomoćni $ENA-$ i $READY+/-$ signali. $ENABLE$ predstavlja omogućenje (dozvolu) rada regulatora i ne mora biti povezan. $READY$ je izlaz preko kojeg uređaj šalje informaciju upravljaču o svojoj spremnosti za rad [2].

Najbitniji parametri regulatora predstavljeni su u tabeli 2.

Tbl. 2. Kataloški podaci regulatora 2L110M

| Parameters | 2L110M | | | Unit |
|-----------------------|--------|-----|-----|------|
| | Min | Typ | Max | |
| Output current | 0,45 | - | 7,8 | A |
| Supply voltage | 80 | 180 | 250 | VAC |
| Logic signal current | 7 | 10 | 16 | mA |
| Pulse input frequency | 0 | - | 400 | kHz |
| Isolation resistance | 500 | - | - | MΩ |

Drajver poseduje PWM izvor konstantne struje koji napaja namotaje motora. Zahvaljujući njemu ostvaruje se veći moment pri većim brzinama, u odnosu na klasične regulatore. Podešavanje konstantne struje obavlja se posredstvom mikro prekidača. Moguće je izabrati jednu od 16 ponuđenih RMS vrednosti struja: od 0,32 A do 5,57 A. Veća struja podrazumeva veći moment, ali i pojačano zagrevanje. Veoma je važno

momentne mogućnosti motora prilagoditi mehaničkim zahtevima ose i obezbediti forsirano vazdušno hlađenje.

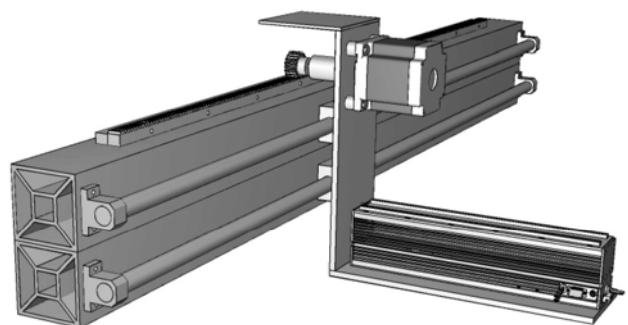
Model 2L110M pruža i mogućnost mikro koračanja. Ta opcija dodatno povećava rezoluciju pozicioniranja, smanjuje vibracije i buku prilikom kretanja. Na raspolaganju je ukupno 16 vrednosti mikro koračanja u opsegu od 400 do 10000 impulsa po obrtaju.

U pogledu bezbednosti, regulator je veoma napredan, jer sadrži niz ugrađenih zaštita:

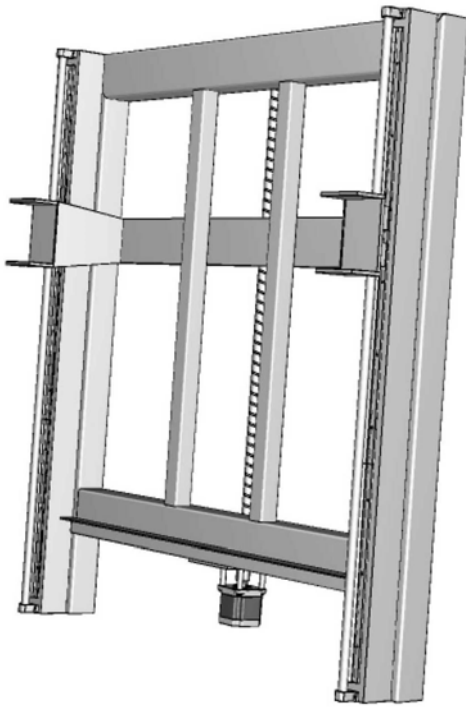
- Prenaponsku,
- Podnaponsku,
- Prekostrujnu,
- Zaštitu od kratkog spoja, i
- Zaštitu od pregrevanja.

Radi očuvanja kvaliteta električne energije i sprečavanja uticaja smetnji na rad elektronskih kola preporučuje se upotreba mrežnog filtra na AC terminalima.

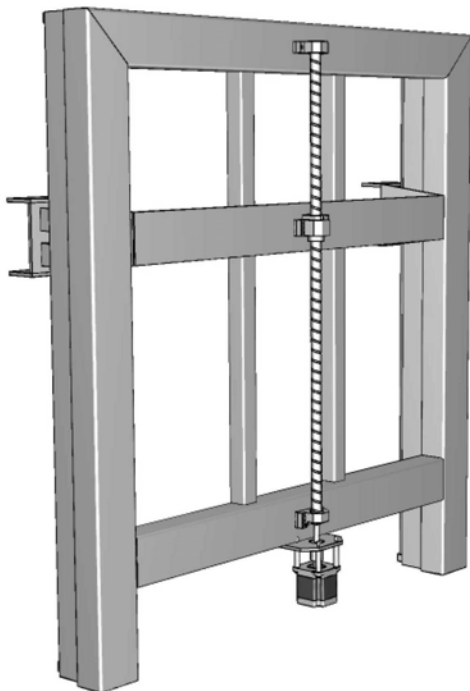
Na slici 3. dat je izgled 3D modela horizontalne X ose koji je urađen u programskom paketu CATIA. Pored elektromotornog pogona obuhvata i sve bitne mehaničke komponente: zupčastu letvu, zupčanik, vođice, ležaje vođica sa kućištem, kao i nosače vođica, motora i lasera.



Sl. 3. Model pogona X ose



Sl. 4. Model pogona Y ose (prednja strana)



Sl. 5. Model pogona Y ose (zadnja strana)

Slike 4. i 5. predstavljaju model pogona vertikalne Y ose. Kuglično zavojno vreteno fiksirano je na poledini rama sačinjenom od metalnih kutija. Vratilo koračnog motora pokreće vreteno koje linearno pomera maticu učvršćenu za čelični nosač X ose. Nosač klizi po vodičama koje su montirane na prednjem delu rama.

Motor 43HS2A115-604 poseduje zavidne momentne mogućnosti: $M_{max} = 13,7 \text{ Nm}$ u stanju mirovanja. Međutim, najsigurnije je proračunati raspoloživi moment M_r , koji uzima u obzir procenjeni faktor opterećenja K_A , faktor habanja f_n (radni vek mehanike) i koeficijent sigurnosti S_B . Na taj način dolazi se do

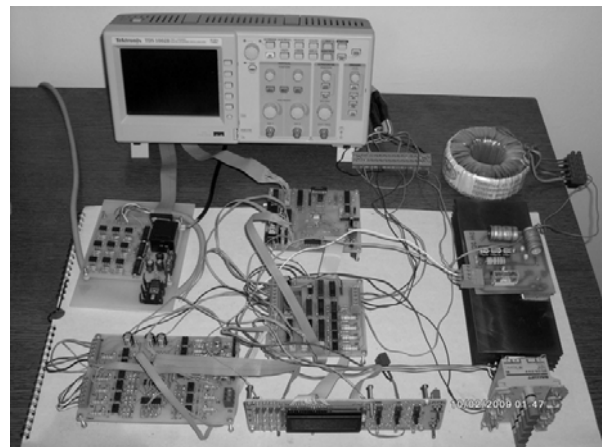
mного realnije i praktičnije vrednosti momenta $M_r = 8 \text{ Nm}$, sa kojom se može dugotrajno i bezbedno manipulirati.

Proračun maksimalnih tangencijalnih sila F_T zupčanika X-ose i matice vretena Y-ose svakako izlaze iz okvira ovog rada. Ipak, na osnovu željene dinamike mehaničkog dela sistema i izračunatog raspoloživog momenta motora M_r , može se doći do kvalitetne procene maksimalno dozvoljenih masa pokretnih delova mašinskih osa.

Kod horizontalne ose elektromotorni pogon pouzdano stvara maksimalnu tangencijalnu silu na zupčanicu $F_{T1} = 400 \text{ Nm}$. Uvažavajući koeficijente trenja zupčaste letve i vodica, nagib rama konstrukcije $\beta = 15^\circ$, kao i maksimalno željeno ubrzanje ose $a_{MAX1} = 1,57 \text{ m/s}^2$, dolazi se do vrednosti maksimalno dozvoljene pokretne mase X-ose: $m_{MAX1} = 75 \text{ kg}$. Dobijeni podatak nedvosmisleno govori da su mogućnosti motora višestruko predimenzionisane u odnosu na zahteve kretanja laserske ose.

Ako bi se za pogon vertikalne Y ose upotreabili ista zupčasta letva i zupčanik, maksimalna tangencijalna sila $F_{T2} = 400 \text{ Nm}$, koju isporučuje motor, bila bi pod istim dinamičkim zahtevima dovoljna samo za pokretanje mase $m_{MAX2} = 36 \text{ kg}$. Razlog leži u mnogo većem udelu gravitacionog ubrzanja, kojeg treba savladati prilikom vertikalnog pomeranja. Da bi se povećale momentne mogućnosti Y-ose, zupčasta letva i zupčanik zamenjeni su pogonom sa kugličnim zavojnim vretenom. Na taj način isti raspoloživi moment motora M_r stvara mnogo veću tangencijalnu silu F_{T2} . Polazeći od parametara vretena (korak, stepen iskorišćenja, koeficijent trenja) i od željenih dinamičkih karakteristika ($a_{MAX2} = 0,8 \text{ m/s}^2$), dobija se nova vrednost $m_{MAX2} = 125 \text{ kg}$, koja zadovoljava povećane dimenzije mašine. Ne treba zaboraviti da je u pokretnu masu Y-ose uključena i celokupna masa X ose.

Za potrebe upravljanja razvojnim modelom razvijen je nezavistan i originalan hardver (slika 6.) koji kontroliše rad mašine, obavlja komunikaciju sa računarem, upravljanja elektromotornim pogonom, laserom i komandnom tablom. Kompletan elektronski deo sistema zasnovan je na DSP platformi i projektovan je korišćenjem samo jednog specijalizovanog TMS320F240 procesora [3].



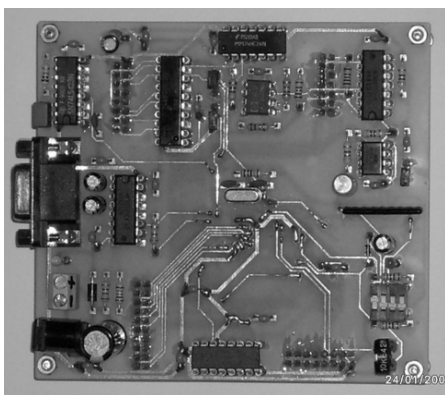
Sl. 6. Razvoj upravljačke elektronike

Predviđena su dva moda rada mašine: ručni i automatski. Graviranje je moguće samo u automatskom modu. Pomoću komandne table zadaju se sledeći željeni parametri kretanja:

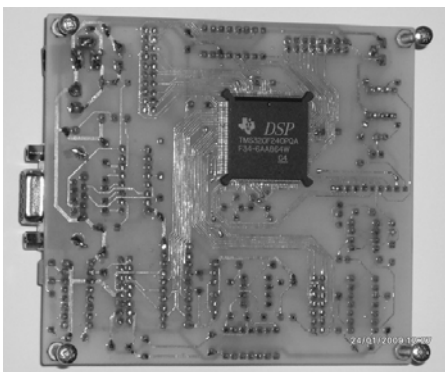
- Pozicija (0 - 32500 imp),
- Brzina (8 - 4880 imp/s),
- Ubrzanje (400 - 20000 imp/s²), i
- Smer (CW ili CCW).

Svako kretanje podrazumeva linearni zalet i kočenje [5]. Potrebno je primetiti da su parametri trajektorije definisani u impulsima. To je veoma pogodno, jer obezbeđuje veliku fleksibilnost u toku konstruisanja mehaničkog dela sistema. Bilo kakva izmena mašinskih podataka ne dovodi do izmene programa, već samo do eventualne promene parametarskih limita.

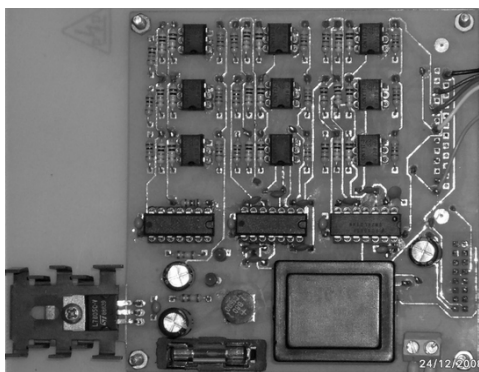
Slike 7. do 11. prikazuju najbitnije elektronske celine upravljača. Sva štampana kola izrađena su, ispitana, povezana i puštena u rad u amaterskim uslovima.



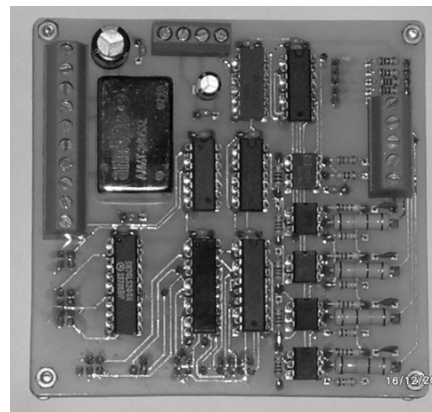
Sl. 7. DSP kartica (A strana)



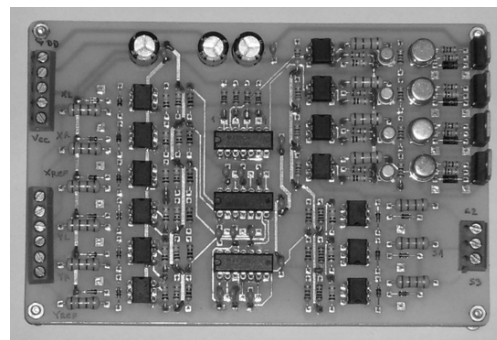
Sl. 8. DSP kartica (B strana)



Sl. 9. Kartica za PC komunikaciju



Sl. 10. Kartica portovskog proširenja

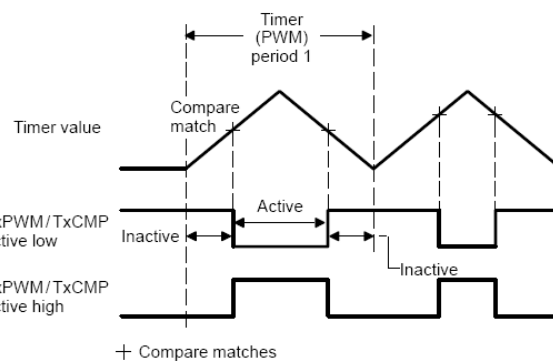


Sl. 11. I/O kartica

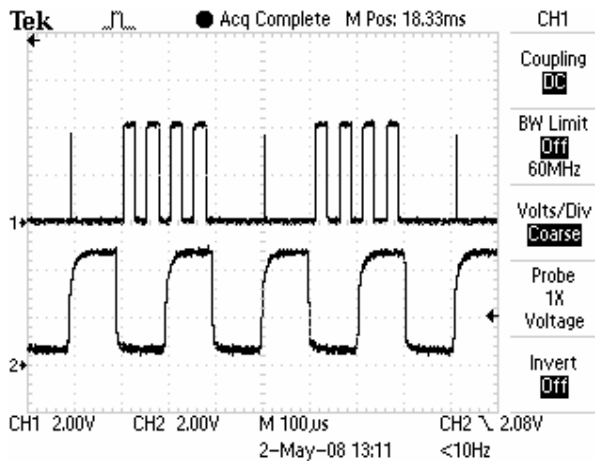
3. REGULACIJA SNAGE LASERA

Upravljanje laserom postiže se standardnim TTL signalom kojeg, na svom izlaznom pinu T3PWM/T3CMP, generiše Digitalni Signal Procesor. U standby režimu laseru se šalju tickle impulsi frekvencije $f_{TICKLE} = 5 \text{ kHz}$ sa faktorom ispunе 0,5 %. Oni se koriste za održavanje jonizacije CO₂ unutar laserske cevi i ne dovode do emisije energije [4].

Za svaki pomeraj X-ose (78,5 μm) laser se uključuje, ako je potrebna bela tačka, ili isključuje, ako je potrebna crna tačka. Snaga laserskog zraka može se podešavati od 5 do 95 % maksimalne snage, isključivo u zavisnosti od materijala koji se obrađuje. Regulacija snage obavlja se simetričnom impulsno širinskom modulacijom TTL signala noseće frekvencije $f_{PWM} = 20 \text{ kHz}$ (slika 12.). Pri tome je neophodna sinhronizacija sa kretanjem X-ose, odnosno sa pobudnim impulsima drajvera koračnog motora (slika 13.). Ako se gravira crna tačka, laser prelazi u standby režim.



Sl. 12. Simetrična PWM regulacija snage lasera



Sl. 13. Synchronizovani upravljački signali lasera i drajvera motora

Za dobijanje *PWM* signala koristi se tajmer opšte namene *GP3* koji radi u *continuous up/down* modu rada. On proizvodi diskretni trougaoni signal periode $T_{PWM} = 50 \mu s$. Inicijalno su omogućene *compare* operacije tajmera i podešen je *active high* polaritet izlaza. Promenom vrednosti *T3CMP* registra, koja se poredi sa trougaonim signalom, simetrično se podešava širina kontrolnih impulsa od $T_{MIN} = 2,5 \mu s$ do $T_{MAX} = 47,5 \mu s$. Na taj način reguliše se emitovana energija laserskog zraka (slika 12.). *Tickle* impulsi uvek imaju istu dužinu trajanja koja iznosi $T_{TICKLE} = 1 \mu s$.

Uspostavljanje željene snage lasera u jednoj tački zahteva najmanje 4 periode *PWM* signala (slika 13.). To znači da trajanje jednog koraka motora ne sme biti kraće od $4 * T_{PWM} = 200 \mu s$. Odnosno, za maksimalnu brzinu koračanja *X*-ose uzima se prva manja diskretna vrednost $V_{MAX} = 4880 \text{ imp/s}$. Tada minimalna perioda drajverskih signala iznosi $T_{DRIVERMIN} \approx 205 \mu s$. Ukoliko se motor kreće manjom zahtevanom brzinom ($T_{DRIVER} \geq T_{DRIVERMIN}$), nakon 4 *PWM* impulsa, laseru se do narednog koraka šalju *tickle* impulsi.

Digitalna fotografija se pre graviranja obrađuje u nekom od programa za editovanje slika. Zatim se poziva aplikativni softver za graviranje koji dodatno menja pripremljeni *bitmap* fajl. Softverska obrada sastoji se u minimalnoj korekciji dimenzija slike, kako bi svaki red imao ceo broj bajtova, odnosno broj bita deljiv sa 8 (važno kod paralelne komunikacije). Takođe se za svaki pami red obavlja rotacija bita u bajtu, pošto dolazi do promene smera graviranja. Formira se niz bajtova koji se, preko paralelnog porta i kartice za *PC* komunikaciju, isporučuje *DSP* kartici po strogo definisanom protokolu. Graviranje se obavlja bit po bit sa unapred postavljenom brzinom kretanja. Nakon završetka svakog reda, *Y*-osa se vertikalno pomera na dole za 2 impulsa, odnosno $80 \mu m$.

Postojanje mehaničkog zazora između zupčaste letve i zupčanika mora se takođe softverski rešiti. Merenjem pomoću preciznog komparatera može se utvrditi tačna vrednost zazora u impulsima. Prilikom promene smera obrtanja vratila motora, zbog praznog hoda zupčanika, neće doći do fizičkog kretanja *X*-ose.

Zbog toga je, na početku svakog novog reda, potrebno isključiti laser u toku trajanja impulsa motora koji kompenzuju mehanički zazor. Tada nema emitovanja energije laserskog zraka.

4. ZAKLJUČAK

Zahvaljujući Digitalnom Signal Procesoru, koji generiše upravljačke signale za regulatore koračnih motora, ostvareno je kvalitetno pozicioniranje bez upotrebe enkodera i zatvorenih povratnih petlji. Svaka trajektorija kretanja realizuje linearni zalet i kočenje, tako da ne može doći do ispadanja iz sinhronizma i gubljenja koraka. Dodatnu sigurnost obezbeđuju softverski limiti maksimalno dozvoljenih vrednosti brzina i ubrzanja osa. Na taj način zahtevana dinamika, u ručnom ili automatskom modu rada, uvek ostaje u okviru momentnih mogućnosti samih motora.

Parametri lasera presudno utiču na karakteristike mašine. Prečnik fokusiranog zraka ($76 \mu m$) garantuje odličnu rezoluciju gravirane digitalne fotografije (334 DPI). Takođe određuje i potrebne rezolucije pozicioniranja *X* i *Y*-osa. Vreme uspostavljanja željene snage laserskog zraka ($150 \mu s$) ograničava brzinu koračanja motora, a samim tim i produktivnost mašine. Zbog toga je ispravno zaključiti da kvalitetan i skup laserski uređaj uvek predstavlja dobar izbor.

Radi kompletnosti analize neophodno je obaviti praktičnu verifikaciju performansi mašine. To podrazumeva utvrđivanje stvarnih mogućnosti razvojnog modela, a sastoji se iz niza detaljnih ispitivanja i merenja. Očekuje se da će neizbežne nesavršenosti mehaničkih komponenti dovesti do nešto lošijih vrednosti rezolucija u odnosu na projektovane.

5. LITERATURA

- [1] MotionKing Documentation, "Two-Phase Hybrid Stepper Motor 43HS Series", March 2007.
- [2] MotionKing Documentation, "Two-Phase Hybrid Stepper Motor Driver", March 2007.
- [3] TI Documentation, "TMS320C240/F240 DSP Controllers Data Sheet", May 1998.
- [4] SYNRAD Documentation, "Series L48 Lasers Operator's Manual", August 2006.
- [5] M. Živić, "Primena vektorski regulisanog asinhronog pogona za pozicioniranje ose na CNC mašini u Livnici Kikinda AD", Magistarski rad, FTN, Novi Sad, 2002.

ELECTRICAL DRIVES OF MECHANICAL AXES AND LASER POWER CONTROL

Abstract: The structure of complete electrical drives for Developing model of CNC machine for laser engraving is presented. Bipolar hybrid stepping motors with appropriate regulators are used. Management of laser power using for engraving computer photos and text on well-known materials is described in detail.

Key words: stepping motor, laser, CNC, DSP.