

## EMULACIJA TERETA POMOĆU SINKRONOG MOTORA S PERMANENTNIM MAGNETIMA

### *LOAD EMULATION USING A SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS*

Marko Pavlek, Domagoj Malez, Toni Bjažić

*Tehničko veleučilište u Zagrebu, Vrbik 8, 10000 Zagreb, Hrvatska*

#### SAŽETAK

U sklopu ovog rada je realizirana emulacija tereta pomoću sinkronog motora s permanentnim magnetima i pretvarača frekvencije Siemens Sinamics S120. Sustav se upravlja putem programibilnog logičkog kontrolera serije Siemens Simatic S7-1200, te je razvijeno grafičko sučelje (HMI) u softverskom alatu Siemens TIA portal s kojim se putem računala upravlja i parametira sustav za emulaciju tereta. Emulirani teret se koristi za testiranje elektromotornog pogona, tj. njegovih statičkih i dinamičkih karakteristika u laboratoriju, dovodjenje motora u proizvoljnu radnu točku te promatranje prijelaznih stanja proizvoljnog (emuliranog) mehatroničkog sustava.

**Ključne riječi:** *Sinamics S120, sinkroni motor, vektorsko upravljanje, grafičko sučelje, statičke i dinamičke karakteristike*

#### ABSTRACT

The paper presents load emulation achieved using a synchronous motor with permanent magnets and a Siemens Sinamics S120 frequency converter. The system is controlled by a Siemens Simatic S7-1200 series programmable logic controller, and a graphical interface (HMI) was developed in the Siemens TIA portal software tool with which the load emulation system is controlled and parameterized via a computer. The emulated load is used for testing the electric drive, i.e. its static and dynamic characteristics in the laboratory, bringing the motor to an arbitrary operating point and observing the transient states of an arbitrary (emulated) mechatronic system.

**Keywords:** *Sinamics S120, synchronous motor, field-oriented control, human machine interface, static and dynamic characteristics*

#### 1. UVOD

##### 1. INTRODUCTION

Za testiranje elektromotornog pogona u laboratoriju, njegove statičke i dinamičke karakteristike, potrebno je emulirati teret stvarnog radnog mehanizma i procesa. Djelovanje proizvoljnim teretom na motor je jedan od ključnih testova, u svrhu testiranja statičke karakteristike elektromotornog pogona. Testiranje dinamičkih karakteristika elektromotornih pogona je još zahtjevnije, te zahtjeva da se teret dinamički mijenja.

Javlja se potreba za realizacijom tereta u laboratorijskim uvjetima, kojim se može precizno upravljati i koji može u laboratoriju simulirati/emulirati složene radne mehanizme. Nije samo cilj testirati statičke karakteristike elektromotornog pogona [10], već testirati dinamičke karakteristike cijelog proizvoljnog mehatroničkog sustava s radnim mehanizmom i procesom. Potrebno je ne samo djelovati s fiksnim teretom na motor, već simulirati/emulirati rad cijelog radnog mehanizma, kao i poremećaje koji djeluju na sustav u stvarnosti.

Prethodne zahtjeve za simulacijom/emulacijom radnog mehanizma i kompletnog mehatroničkog sustava, najbolje može realizirati drugi elektromotorni pogon.

U ovom radu je realizirana emulacija tereta pomoću sinkronog elektromotora s permanentnim magnetima.

Radovi iz članaka [1] i [2] baziraju se na upravljanju brzine vrtnje u praznom hodu pomoću PI regulatora, no u ovom radu je dodatno obrađen utjecaj promjene momenta tereta, na regulacijski krug brzine vrtnje.

## 2. VEKTORSKO UPRAVLJANJE

### 2. FIELD-ORIENTED CONTROL

Vektorsko upravljanje je metoda upravljanja frekvencijskim pretvaračem u kojoj se statorske struje trofaznog motora dijele na dvije ortogonalne komponente koje se vizualiziraju vektorom. Jedna komponenta struje ( $I_d$ ) je paralelna s magnetskim poljem rotora, koja u slučaju asinkronog (indukcijskog motora) inducira struju na rotoru i time uzrokuje magnetski tok rotora, dok je druga komponenta struje ( $I_q$ ) okomita na magnetsko polje rotora, te uzrokuje zakretni moment motora [3] [4] [5]. Upravljački sustav elektromotornog pogona zadaje referentne vrijednosti obje komponente struja, prema zadanim referencama magnetskog toka i momenta, koje daje regulator brzine vrtnje, ukoliko je elektromotorni pogon u režimu regulacije brzine vrtnje. Standardni PI regulator se koristi za regulaciju zasebnih komponenti struje  $I_d$  i  $I_q$  prema zadanim referencama. Reference napona, koje su na izlazu iz navedenih regulatora, prosljeđuju se dalje na širinsko-pulsnu modulaciju (*pulse-width modulation PWM*) koja diktira uključivanje/isključivanje tranzistora u tranzistorskom mostu. U vektorskom upravljanju, bilo da se radi o sinkronom ili asinkronom motoru,

upravlja se u svim radnim uvjetima identično kao istosmjernim motorom s nezavisnom uzbudom. U tom slučaju se izmjenični motor ponaša kao istosmjerni, jer su dvije ortogonalne komponente  $I_d$  i  $I_q$  nezavisne, tj. ako se mijenja zadani moment s promjenom komponente struje  $I_q$ ,  $I_d$  komponenta struje koja utječe na magnetski tok se ne mijenja, te se time ni magnetski tok ne mijenja.

Kod asinkronog (indukcijskog) motora, komponentu  $I_d$  je potrebno regulirati na konstantnu vrijednost, iz razloga što asinkroni motor nema konstantnu uzbudu na rotoru, već je magnetski tok uzbuđene potrebno generirati pomoću navedene komponente  $I_q$ . Komponenta  $I_q$  na identičan način kao i kod sinkronog motora generira moment motora. Namot na statoru asinkronog motora raspoređen je trofazno tako da se vektor statorskog magnetskog polja zbraja s tri vektora koja se prvo pomoću Clarke transformacije transformira u dvije ortogonalne komponente  $I_\alpha$  i  $I_\beta$  stacionarne naspram statora motora. Zatim Parkovom transformacijom se dolazi do bitnih komponenti struja  $I_d$  i  $I_q$ , statičkim s obzirom na okretno magnetsko polje.

## 3. GRAFIČKO SUČELJE

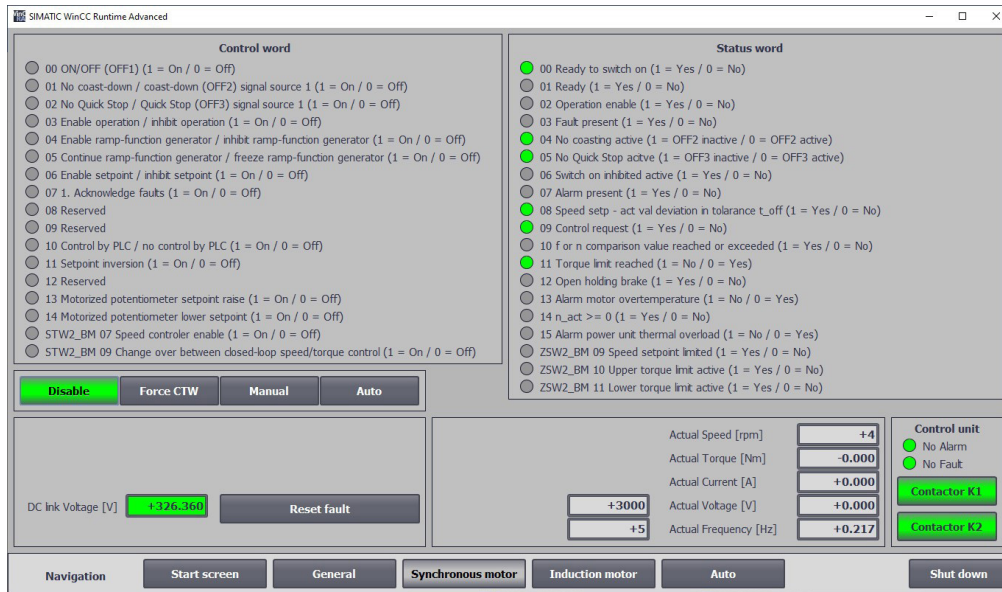
### 3. HUMAN MACHINE INTERFACE

Programsko grafičko sučelje (engl. *human machine interface HMI*) za upravljanje elektromotornim pogonom napravljeno je u Siemens-ovom programu TIA portal [9]. Služi



**Slika 1** Početna stranica programskog grafičkog sučelja

**Figure 1** HMI start screen



Slika 2 Upravljačko sučelje sinkronog motora

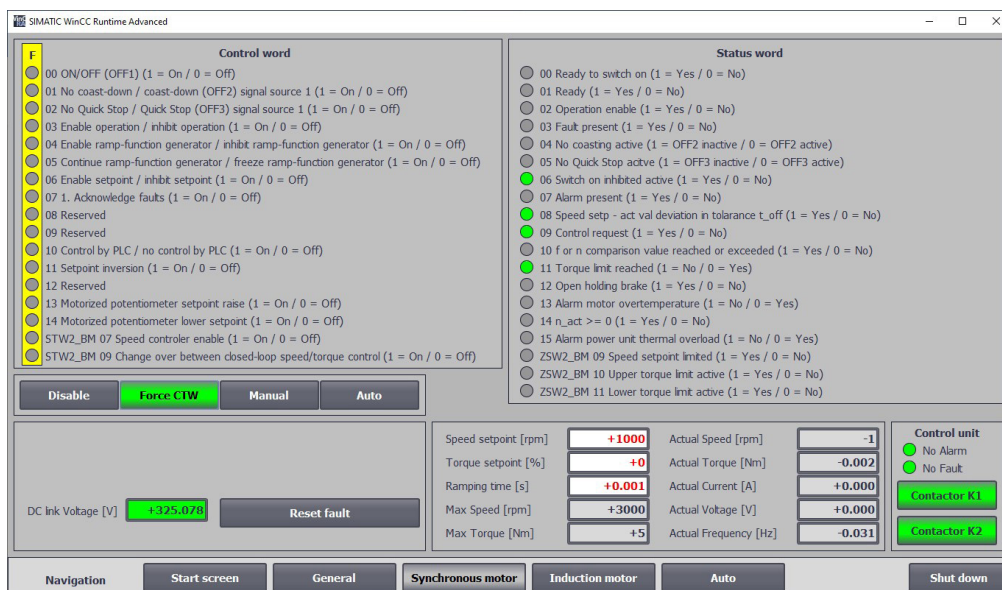
Figure 2 Synchronous motor control screen

za pokretanje sinkronog i asinkronog motora, a koriste se pretvarači Siemens Sinamics S120 [6] [7] [8]. Svaki se pretvarač sastoji od upravljačke jedinice i energetskog modula. Na svaki zasebni frekvencijski pretvarač je spojen zasebni kočioni otpornik, koji omogućuje rad svakog motora u sva 4 kvadranta. Na PLC-u također je realiziran upravljački program za emuliranje tereta motorom. Slika 1 prikazuje početnu stranicu grafičkog sučelja (*Start screen*). Na dnu ekrana je nalazi se alatna traka navigacije kroz stranice opcija za upravljanje pogonom. Bitne stranice u testiranju zaleta motora su: sinkroni motor (*synchronous motor*), asinkroni motor i automatsko (*auto*) testiranje.

### 3.1. UPRAVLJAČKO SUČELJE

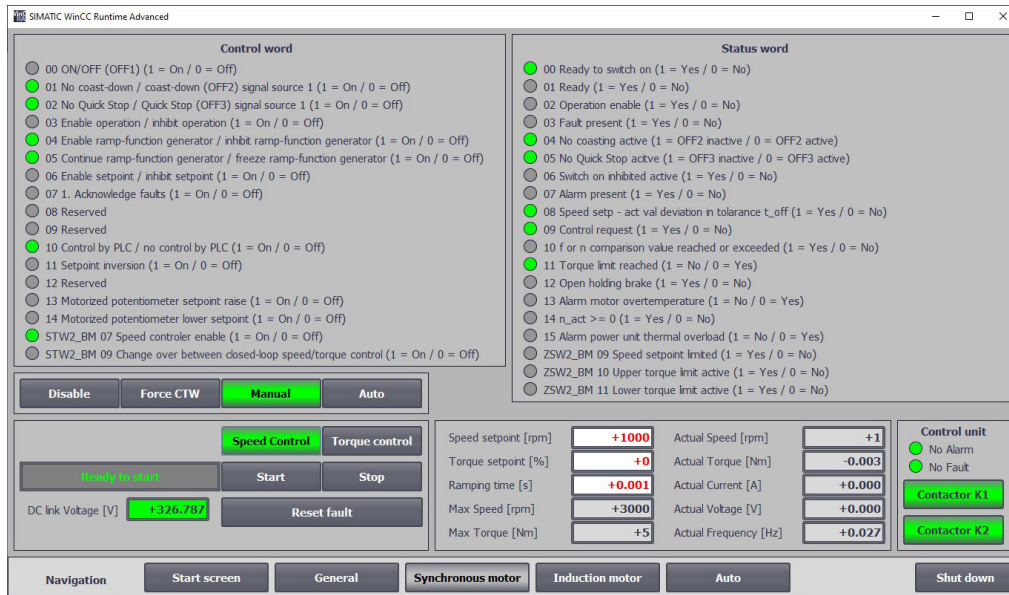
#### 3.1. CONTROL INTERFACE

Stranica sinkroni motor sastoji se od četiri opcije koje upravljaju sinkronim motorom: onemogućeno (*Disable*), direktno mijenjanje upravljačkih bitova pretvarača frekvencije (*Force CTW*), ručno upravljanje (*Manual*) i automatsko upravljanje sinkronog motora (*Auto*) po automatskom upravljačkom algoritmu, što prikazuje slika 2. Stranica se sastoji od dva stupca. U okviru upravljačka jedinica (*control unit*) nalaze se prekidači sklopnik (*Contactor*) K1 i K2 koji služe za uključivanje i isključivanje sklopnika koji dovode električnu energiju na



Slika 3 Opcija upravljanja upravljačkim bitovima

Figure 3 Mode with forcing control bits



Slika 4 Ručni način rada

Figure 4 Manual control mode

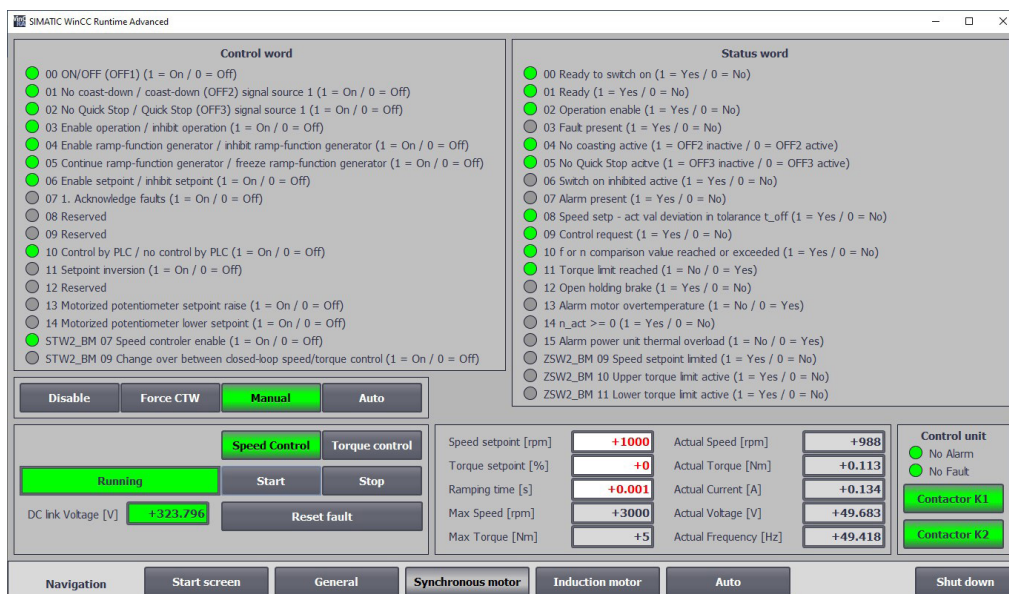
motor, što se vidi na shemi sinkronog i asinkronog motora. Također se u okviru upravljačke jedinice vide stanja upravljačke jedinice, tj. greška i alarm, koje se mogu poništiti pomoću gumba „Reset“.

Na okviru s vrijednostima mogu se vidjeti sve bitne aktualne vrijednosti s pretvarača kao što su brzina, moment, frekvencija, napon, struja, napon istosmjernog međukruga, te se može zadati zadana brzina vrtnje, moment i rampa ubrzanja/usporavanja.

U okvirima upravljačka riječ i riječ stanja (*control word/status word*) vide se svi upravljački bitovi i stanja frekventijskog pretvarača pomoću kojih je moguće izvršiti dijagnostiku.

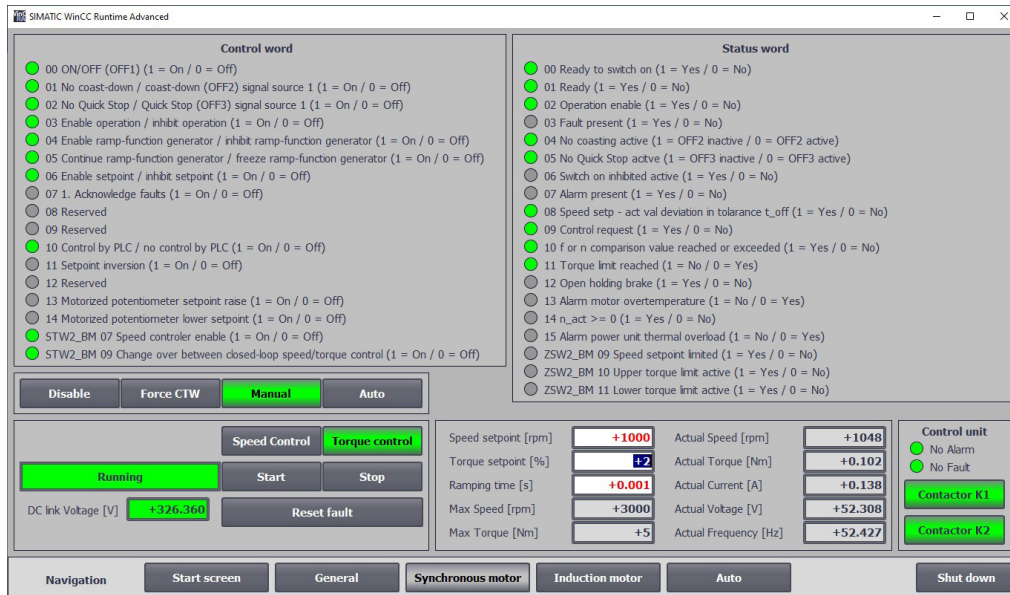
Na slici 3 vidi se opcija direktnog mijenjanja upravljačkih bitova (*Force CTW*). U žutom pravokutniku može se upravljati upravljačkim bitovima. Pritiskom na sivi kružić mijenja se stanje određenog upravljačkog bita.

Ručni način rada na slici 4 ima dvije podopcije rada sinkronog motora: upravljanje brzinom (*eng. Speed control*) i upravljanje momentom (*eng. Torque control*). U ručnom načinu rada, motor se pokreće gumbima Start/Stop. Statusno sučelje pokazuje da li je motor spreman za rad, u radu ili se dogodila greška zbog koje ne može krenuti. U opcije za upravljanje po brzini vrtnje unosi se zadana brzina vrtnje u polje (*eng. Speed setpoint*).



Slika 5 Upravljanje brzinom sinkronog motora

Figure 5 Synchronous motor speed control



Slika 6 Upravljanje momenta sinkronog motora

Figure 6 Synchronous motor torque control

PLC zadane brzine vrtnje šalje na pretvarač frekvencije, koji u sebi ima već navedeni regulator brzine vrtnje (kaskadna regulacija).

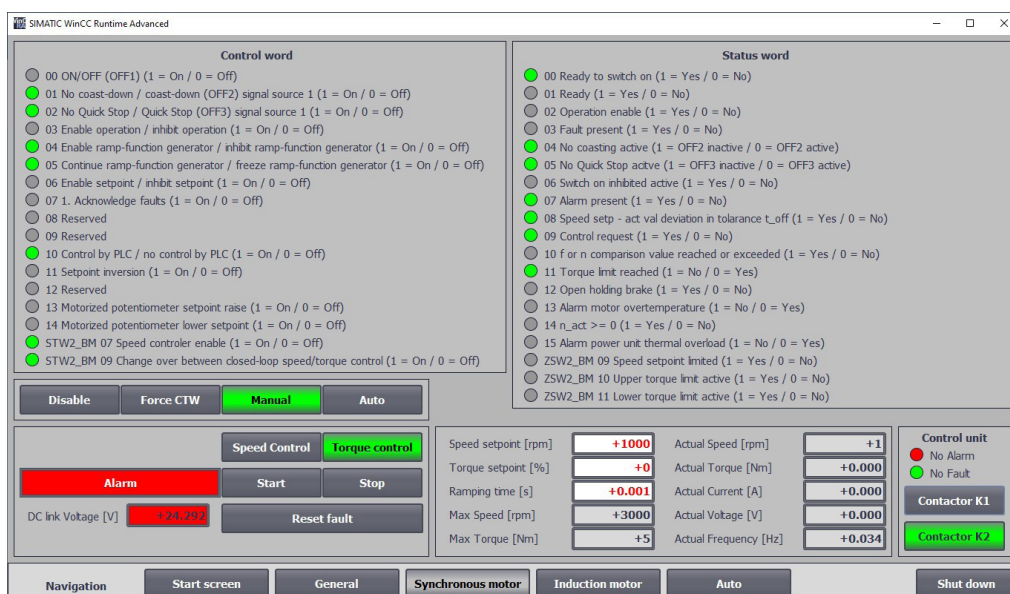
Na slici 5 vidi se kako grafičko sučelje izgleda kada je motor u radu. Prikazana su sva stanja upravljačkih bitova i bitova stanja motora. Vrijeme rampe (*Ramping time*) u ovom slučaju je vrlo malo, ali ako se postavi na veću vrijednost motor se sporije ubrzava pri pokretanju i usporava pri zaustavljanju.

Na slici 6 vidi se opcija upravljanja po momentu (*eng. Torque control*). U okviru za unos momenta (*eng. Torque setpoint*) upisuje se moment u postocima gdje je 100% jednako maksimalnom

iznosu momenta. Prilikom upravljanja po momentu, frekvencijski pretvarač isključuje vanjski krug regulacije brzine vrtnje, a zadani moment proslijeđuje direktno na unutarnji regulacijski krug momenta.

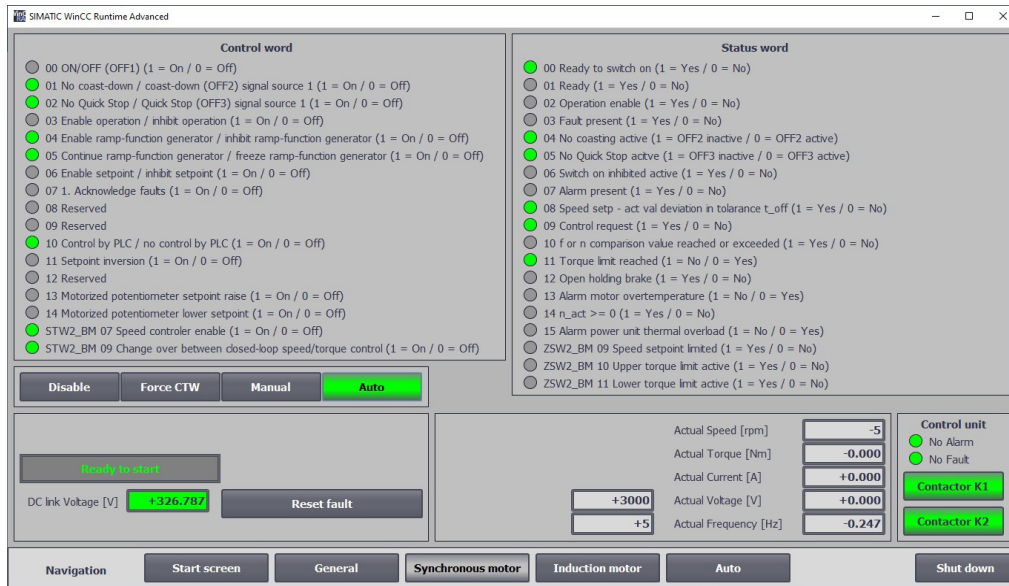
Sklopnici se mogu uključivati i isključivati preko grafičkog sučelja koja se vide na shemi. Oba sklopnika K1 i K2 moraju biti upaljena da bi motor bio spreman za rad, tj. mora biti napajanja na istosmjernom međukrugu frekvencijskog pretvarača (Slika 7).

Na slici 8 u automatskoj opciji (*Auto*) pojedinim elektromotornim pogonom upravlja automatski program testiranja.



Slika 7 Identificiranje greške

Figure 7 Error identification



Slika 8 Način rada automatske opcije

Figure 8 Automatic control mode

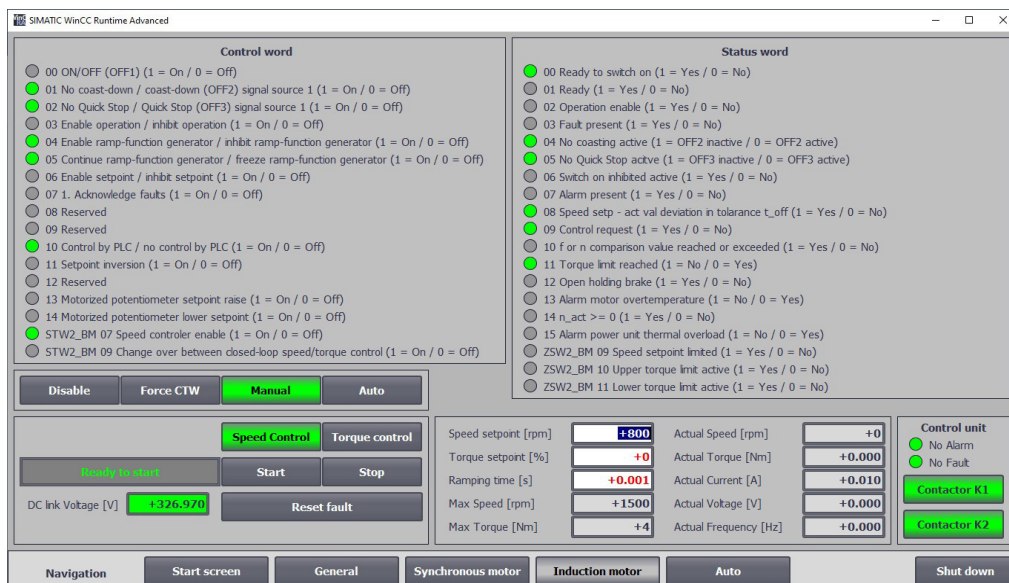
Sljedeća stranica je upravljanje asinkronim motorom što se vidi na slici 9. Grafičko sučelje sinkronog motora je identično kao kod sinkronog motora. Također ima opcije upravljanja: isključeno (*Disable*), direktno mijenjanje upravljačkih bitova (*Force CTW*), ručno (*Manual*) i automatska opcija (*Auto*).

Stranica Auto služi za automatsko testiranje motora, vidi se na slici 10. Na zaglavlju se odabire jedna od dvije opcije automatskog testiranja. U jednoj opciji testira se asinkroni motor, dok sinkroni motor emulira teret, dok u drugoj opciji se testira sinkroni motor, dok sinkroni motor emulira teret. Da bi se motori mogli upravljati po automatskom programu testiranja, potrebno je oba motora staviti u automatski način rada.

Pogonski testirani motor ima opcije upravljanja brzinom (*eng. Speed Control*), upravljanja brzinom pri ograničenom momentu (*eng. Speed Control torque Limit*) i upravljanje momentom (*eng. Torque Control*). Ovisno u kojem načinu rada upisuje se brzina vrtnje motora ili moment i može se upisati vrijeme rampe (*Ramping time*) kao na prethodnim stranicama. Vrijeme rampe je za koliko će se motor zaletiti od 0 do maksimalne brzine.

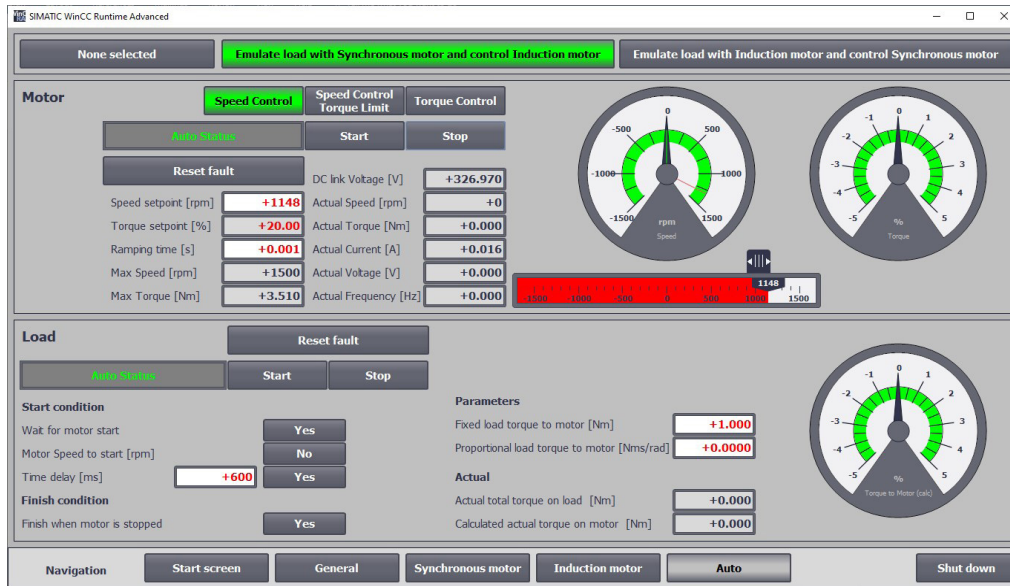
### 3.2 OPCIJA EMULIRANJA TERETA 3.2 LOAD EMULATION

Slika 11 prikazuje asinkroni motor u radu dok je sinkroni motor odabran da emulira teret.



Slika 9 Upravljačko sučelje asinkronog motora

Figure 9 Asynchronous motor control screen



*Slika 10* Sučelje automatskog rada  
*Figure 10* Automatic mode screen

Vidljive su sve bitne aktualne vrijednosti motora u digitalnom i analognom obliku. Pomoću crvenog potencijometra može se namještati brzina umjesto upisivanja u polje.

U okviru tereta (*Load*) upravlja se i parametrira emulacijom tereta. Od parametara se podešavaju fiksni i proporcionalni teret te uvjeti za početak i kraj emulacije. Gumbima start i stop pokreće se sekvenca emulacije.

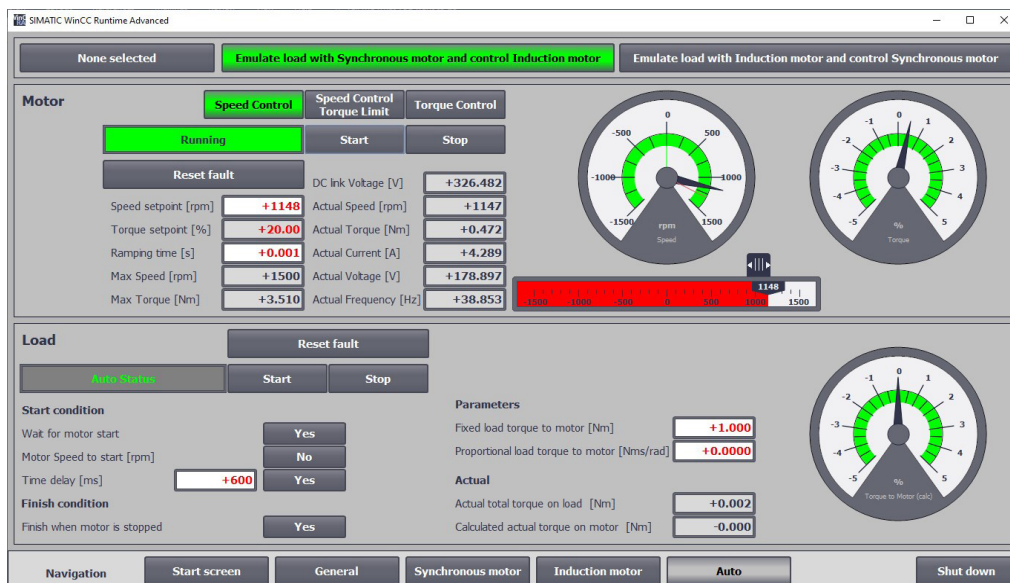
Ukoliko se odabere da emulacija tereta čeka motor da krene, pritiskom na gumb Start emulacija tereta će biti u stanju čekanja, a uključiti će se tek sa startom motora. Pokretanje emulacije se može odgoditi dok motor ne dosegne određenu brzinu ili se može zakasniti za određeno vrijeme.

Na kraju mogu se oba motora istovremeno ugasisi (*Finish when motor is stopped*).

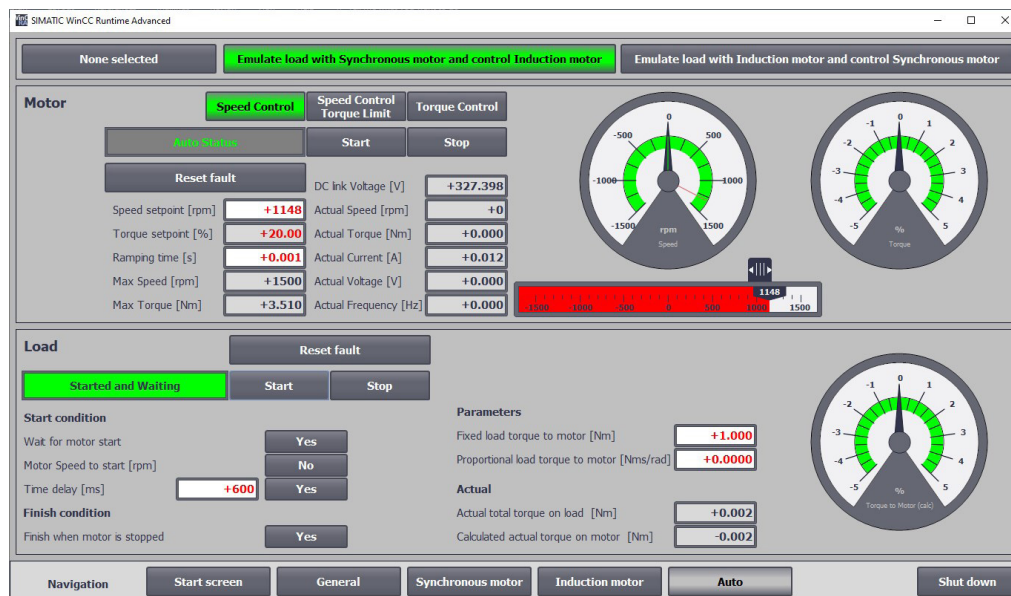
#### 4. TESTIRANJE ZALETA ASINKRONOG MOTORA I ODZIV NA PROMJENU TERETA

##### 4. TESTING MOTOR START-UP OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR AND RESPONSE TO LOAD CHANGES

U sljedećem primjeru testiraju se dinamičke karakteristike elektromotornog pogona (asinkronog motora), na način da će se asinkroni motor zaletiti u praznom hodu na zadanu brzinu, te će se nakon nekog vremena kad se brzina stabilizira, uključiti



*Slika 11* Rad asinkronog motora u automatskom radu  
*Figure 11* Asynchronous motor running in automatic mode



Slika 12 Emulacija tereta čeka pokretanje motora

Figure 12 Load emulation waiting for motor start

konstantan teret, koji će emulirati sinkroni motor. Cilj je testa vidjeti kako se elektromotorni pogon ponaša na promjenu reference brzine, a kako na promjenu momenta tereta.

Na motor je postavljena zadana referentna brzina. Teret je podešen da se emulacija fiksnog tereta pokreće 600 ms nakon starta motora, s ciljem da se i zalet i odziv na promjenu tereta snime na istom grafu. Teret je podešen da se zaustavi s motorom, u svrhu da fiksni moment tereta ne bi ubrzavao prema beskonačnosti kad se motor isključi.

Radi se o jako brzim odzivima, te zbog toga dinamičke prijelazne pojave nije moguće snimiti s grafičkog sučelja aplikacije na PLC-u, jer

je minimalno vrijeme uzorkovanja grafičkog sučelja aplikacije 100 ms. Za snimanje odziva se koristi program „Starter“, koji se koristi i za parametriranje i puštanje u rad elektromotornih pogona. U programskom paketu „Starter“ podešeno je snimanje na grafu reference brzine vrtnje, aktualna brzina vrtnje i aktualni moment. Početak snimanja je podešeno da počne kad motor dosegne neku minimalnu brzinu.

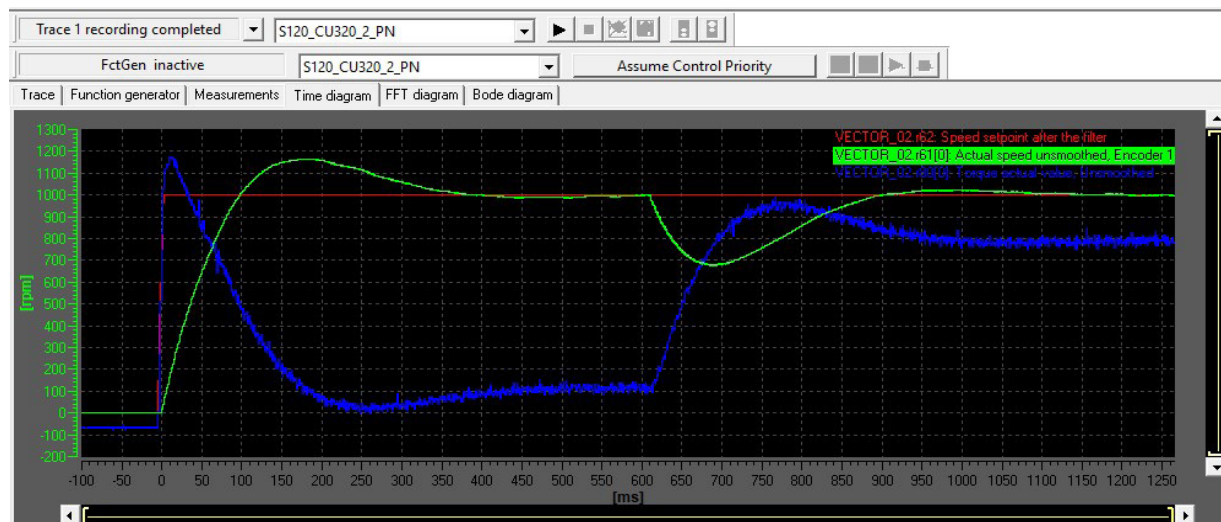
Teret se pokreće, te zatim dolazi u fazu čekanja, gdje se čeka pokretanje motora (zakašnjelo za 600 ms), slika 13. Pritiskom na gumb start elektromotora, počinje proces zaleta motora, emulacije tereta i snimanje vrijednosti na grafu, po već unaprijed određenoj sekvenci.



Slika 13 Motor u pogonu i teret se uključio nakon 600ms

Figure 13 Motor running and load emulation after 600 ms





*Slika 14* Zalet motora i odziv brzine vrtnje na promjenu momenta

*Figure 14* Motor start and speed response after load torque change

Na slici 14 prikazan je odziv brzine vrtnje snimljene u programskom paketu „Starter“, prvo na skokovitu promjenu referentne brzine, a 600 ms nakon pokretanja na skokovitu promjenu momenta tereta. Plavom bojom je prikazan aktualni moment, koji djeluje kao upravljačka veličina u regulacijskom krugu brzine vrtnje. (Upravljačka veličina je referenca momenta, ali regulacija momenta je brza, stoga su zadani i aktualni moment skoro identični). Prilikom zaleta vidljivo je određeno nadvišenje, a s djelovanjem tereta kratki propad brzine vrtnje.

## 5. ZAKLJUČAK

### 5. CONCLUSION

Emuliranjem tereta pomoću drugog elektromotora, realiziran je sustav za testiranje statičkih i dinamičkih karakteristika elektromotora. Moment emuliranog tereta u ovom radu je moguće precizno regulirati i mijenjati. Mogućnost precizne emulacije tereta otvara s druge strane mogućnost snimanja odziva elektromotornog pogona kao što se uobičajeno radi u simulacijama mehatroničkih sustava u programskim paketima kao što je MATLAB. Emulacija tereta drugim elektromotorom može se koristiti kao drugi stupanj testiranja upravljačkih algoritama, nakon što se prethodno izvrši analiza i sinteza sustava, te simulira u MATLAB-u. S druge strane emulacija omogućuje testiranje stvarnog elektromotornog pogona u emuliranim uvjetima. Emulacija tereta

može poslužiti kao koristan most koji spaja teoretska znanja kao što je analiza i sinteza sustava, simulaciju i rad sa stvarnom opremom.

U članku [1] spomenuto je kako Starter ne omogućuje direktno upravljanje momentom motora, no taj problem je ovim radom riješen. Također je stvorena podloga za buduće radove i laboratorijske vježbe koji će se baviti testiranjem i upravljanjem Siemens Sinamics S120 elektromotornog pogona, jer je razvijeno grafičko sučelje omogućilo više načina upravljanja sinkronim i asinkronim motorom.

## 6. REFERENCE

### 6. REFERENCES

- [1.] M. Pavetić, T. Bjažić, „Utjecaj momenta tereta na brzinu vrtnje sinkronog elektromotornog pogona“, Proceedings of 38th International Convention MIPRO 2015 - Computers in Technical Systems (CTS) / Petar Biljanović (ur.). Rijeka: Croatian Society for Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics - MIPRO, 2015. pp. 1334-1339, ISBN 978-953-233-083-0
- [2.] M. Boršić, T. Bjažić, „Upravljanje brzinom vrtnje sinkronog motora s permanentnim magnetima“, Polytechnic and Design, vol. 3, no. 1, pp. 52-65, 2015., DOI:10.19279/TVZ.PD.2015-3-1-07 <https://polytechnicanddesign.tvz.hr/index.php/ojs/article/view/76>

- [3.] E. Yesilbag, L. T. Ergene, „Field oriented control of permanent magnet synchronous motors used in washers“, IEEE, 2014., <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6980685>
- [4.] A. Yousef, S. Abdelmaksoud, Review on Field Oriented Control of Induction Motor, International journal for research in emerging science and technology, Volume-2, Issue-7, 2015
- [5.] Jose Jacob, A. Chitra, „Field Oriented Control of Space Vector Modulated Multilevel Inverter fed PMSM Drive“, Energy Procedia, Volume 117, June 2017, Pages 966-973 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.217>
- [6.] SINAMICS S120 AC Drive , Manual, Siemens, 04/2014., [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/000/99673000/att\\_51983/v1/GH6\\_0414\\_eng\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/000/99673000/att_51983/v1/GH6_0414_eng_en-US.pdf)
- [7.] SINAMICS S120/S150, List Manual, Siemens, 01/2012, [https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/59750648/LH1\\_0112\\_eng.pdf](https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/59750648/LH1_0112_eng.pdf)
- [8.] SINAMICS S120 Commissioning Manual with STARTER, Commissioning Manual, Siemens, 11/2017, [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/313/109754313/att\\_937479/v1/s120\\_starter\\_commiss\\_man\\_1117\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/313/109754313/att_937479/v1/s120_starter_commiss_man_1117_en-US.pdf)
- [9.] SIMATIC, STEP 7 and WinCC Engineering V17, System Manual, Siemens, 05/2021, [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/313/109754313/att\\_937479/v1/s120\\_starter\\_commiss\\_man\\_1117\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/313/109754313/att_937479/v1/s120_starter_commiss_man_1117_en-US.pdf)
- [10.] I. Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar, Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Tehničko veleučilište u Zagrebu, 2012, ISBN 978-953-7048-26-6

## AUTORI · AUTHORS

• **Marko Pavlek** - Završio je tehničku školu Ruđera Boškovića smjer elektronika. Prediplomski studij mehatronike završava 2022. na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Trenutno studira na diplomskom stručnom studiju Strojarsstvo, smjer Mehatronika i robotika.

### Korespondencija · Correspondence

marko.pavlek@tvz.hr

• **Domagoj Malez** – Rođen je 1984. godine u Zagrebu gdje je završio V. Prirodoslovno-matematičku gimnaziju. Diplomirao je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu na smjeru Automatika. Nakon fakulteta se zapošljava u tvrtci „Montelektro“ gdje radi narednih 8 godina kao inženjer za automatizaciju gdje sudjeluje u izradi rješenja za automatizaciju industrijskih postrojenja i puštanje u pogon. Narednih godinu dana radi u tvrtci Exor tehnički servisi kao inženjer za automatizaciju. Narednih 3 godine radi za Švicarsku tvrtku „Global petroprojects services“ kao inženjer za automatizaciju na polagaču cijevi „PLV Castorone“. Zadnje 3 godine radi na „Tehničkom veleučilištu u Zagrebu“ kao asistent. Primarni interes rada mu je industrijska automatizacija i robotika.

### Korespondencija · Correspondence

dmalez@tvz.hr

• **Toni Bjažić** – (1980.) diplomirao je 2004. i doktorirao 2010. na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu. Od 2004. do 2012. radio je kao asistent i viši asistent na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, a od 2012. radi na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu kao viši predavač, od 2017. kao profesor stručnog studija te od 2022. kao profesor stručnog studija u trajnom izboru. Izabran je u području tehničkih znanosti, polje elektrotehnika, a područja njegovog znanstveno-istraživačkog i stručnog interesa su optimalno i adaptivno upravljanje procesima, posebno elektromotornim pogonima, zatim napredno upravljanje sustavima s obnovljivim izvorima energije i elektroničkim energetske pretvaračima, te ugradbeni računalni sustavi.

### Korespondencija · Correspondence

tbjazic@tvz.hr