

# Razvoj in testiranje programske opreme mikrokrmilniškega vgrajenega sistema za varilne naprave

Janez Pogorelec<sup>1</sup>, Uroš Derstvenšek<sup>1</sup>, Andrej Koštomaj<sup>1</sup>, Marjan Golob<sup>1</sup>,  
Ivan Bohnc<sup>2</sup>, Silvin Domjan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UM FERI, Smetanova 17, Maribor

<sup>2</sup> Varstroj d.d., Industrijska c. 4, Lendava

janez.pogorelc@uni-mb.si, uros.derstvensek@ultra.si, andrej.kostomaj@ubi-mb.si,  
mgolob@uni-mb.si, ivan.bohnc@varstroj.si

## Developing and Testing a Software for a Microcontroller based Embedded System for Welding Devices

*Abstract: The constantly growing embedded systems market uses microcontrollers or digital control systems for a huge number of applications from automotive to aerospace, consumer electronics to laboratory machines, and telecommunications to process control. In most embedded applications, the ideal embedded control processor is one that is small, easy to integrate, and easy to design with, yet features low power consumption and enough performance for tomorrow's products. This paper gives some experiences on application of 8-bit microcontroller in embedded real-time system: Controller for MIG-MAG industrial welding machine VARMIG 450 Synergic.*

## 1 Uvod

Nenehno naraščajoč trg vgrajenih sistemov narekuje uporabo mikrokrmilnikov v aplikacijah vse od avtomobilske do vesoljske industrije, širokopotrošne elektronike, laboratorijskih naprav, telekomunikacijskih produktov pa vse do gradnikov procesnega vodenja.

V večini od navedenih aplikacij se uporabljajo mikroprocesorski sistemi, zgrajeni na osnovi mikrokrmilnikov [1]. Pri izbiri mikrokrmilnika velja, da so najprimernejši tisti, ki so majhnih dimenzij, preprosti za integracijo in načrtovanje naprav, imajo nizko porabo, vsebujejo ustrezno zmogljivo procesno enoto in

imajo aplikaciji primerno konfiguracijo vhodno/izhodnih vmesnikov. Upoštevanje opisanih lastnosti pri izbiri mikrokrmilnika za posamezno aplikacijo vodi k zagotavljanju ugodnega razmerja stroški/lastnosti aplikacije.

Mikrokrmilniki so zelo razširjeni na trgu »vgrajenih sistemov« (skoraj vsi pomembnejši svetovni proizvajalci mikroprocesorjev imajo v programu tudi mikrokrmilnike v cenovnem razponu od manj kot 1 USD do približno 50 USD).

V članku opisujemo izkušnje pri razvoju programske opreme krmilnika varilnega aparata podjetja Varstroj iz Lendave: VARMIG 450 Synergic [2]. Krmilnik je izveden kot vgrajen sistem v varilnem aparatu in realiziran na osnovi relativno preprostega 8-bitnega mikrokrmilnika proizvajalca Microchip [4].

V podjetju so želeli podaljšati proizvodno dobo varilnega aparata VARMIG 400 za MIG-MAG industrijsko varjenje in ponuditi tržišču posodobljeno različico VARMIG 450 Synergic. V obeh primerih gre za enak trifazni transformatorski varilni izvor za varilne tokove od 40 do 400 A, napetosti od 15,5 do 21 V in varilne žice premera od 0,6 do 1,6 mm iz različnih materialov. Prvotni model je bil vrsto let uspešno prodajan produkt, vendar je imel nekoliko zastarelo zasnovo, predvsem so želeli poenostaviti vnos parametrov in regulirati hitrost dodajanja varilne žice z ločljivostjo 0,1 m/s.

V začetku leta 2003 so v podjetju razvili krmilnik na osnovi mikrokrmilnika Microchip

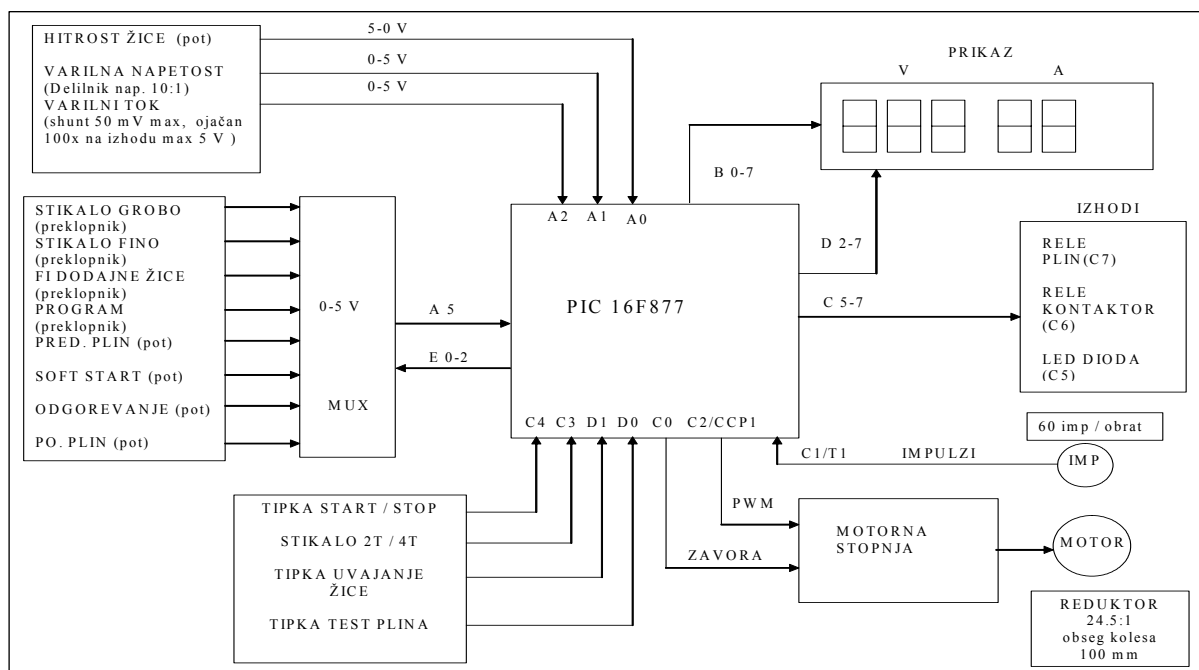
PIC16F877 [4]. Definirali so zahteve za izvedbo programske opreme, vendar niso imeli ustrezno izkušenega in usposobljenega programerja. V začetku junija 2003 je podjetje Varstroj naročilo izdelavo programske opreme pri Inštitutoma za Avtomatiko in Robotiko, ki delujeta na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko (FERI) v Mariboru. Čeprav je bil rok za izdelavo prototip izjemno kratek - približno 2 meseca, so želeli delujoč izdelek razstaviti na MOS - Celjskem obrtnem sejmu. Eden izmed vzporednih ciljev projekta je bil tudi usposabljanje njihovega programerja – absolventa VS študijskega programa.

V sredini julija 2003 je projektna skupina na FERI prevzela testno aparaturno opremo: mikrokrmilniški modul z napajalnikom in napravo za podajanje žice. V dveh tednih programiranja je projektna skupina razvila programsko kodo aplikacije in testirala večino modulov programske opreme. V začetku avgusta so v Varstroju mikrokrmilnik vgradili v prototip novega varilnega aparata. Testiranje in dopolnjevanje programske opreme je potekalo še do začetka septembra v Tehnološkem centru podjetju Varstroj. Varilni aparat so uspešno predstavili na Varstrojevem razstavnem prostoru na Celjskem obrtnem sejmu.

## 2 Zahteve za izvedbo projekta

Naročnik je podal zahteve v pisni obliki vključno z blokovno shemo aparaturne opreme, predstavljene na sliki 1. Na voljo smo imeli prototipni krmilnik na osnovi 8-bitnega mikrokrmilnika PIC16F877 (20 Mhz, 8 kW programskega pomn., 386 zlogov podatkovnega pomn., 34 vh/izh. linij) [4][7], razvit v Varstroju.

Zahteva uporabnikov tovrstnih varilnih aparatov je bila, da naj bo posluževanje identično kot pri klasičnih - analogno krmiljenih varilnih aparatih. Zato so se pri naročniku odločili za zvezni vnos referenčnih veličin (tok, napetost, hitrost dodajanja varilne žice) s pomočjo potenciometrov. Potrebni pa je bilo izvesti nastavitve osmih nastavitvenih signalov, ki se vnašajo preko preklopnikov in potenciometrov. Slednji so preko analognega multiplekserja speljani na vhod AN5, za izbiro signala pa so potrebni še trije logični izhodi mikrokrmilnika: RE0, RE1 in RE2. Tako so pri mikrokrmilniku PIC16F877 na sliki 1 uporabljeni štirje analogni vhodi od osmih razpoložljivih. Sicer so izkoriščeni tudi vsi ostali priključki mikrokrmilnika.



Slika 1: Blokovna shema aparaturne opreme krmilnika na osnovi MPU-PIC16F876 modula.

Seznam in pomen uporabljenih vhodov/izhodov:

### 17 vhodnih signalov:

- 5 analognih vhodov (potenciometri): ŽELENA HITROST ŽICE, PREDPLIN, SOFT START, ODGOREVANJE, PO PLIN;
- analogna merilna vhoda: VARILNI TOK, VARILNA NAPETOST;
- 4 preklopniki preko analo. multiplekserja: STIKALO GROBO, FINO, FI DODAJNE ŽICE, PROGRAM;
- 3 tipke: UVAJANJE ŽICE, TEST PLINA, START/ STOP;
- stikalo: izbira 2T/4T;
- števeni vhod na časovnik Timer1: IMPULZI iz inkrementalnega dajalnika.

### 6 izhodnih sig. za naprave in 15 za prikaze:

- pulzno-širinski krmilni signal PWM1 za tranzistorsko stikalo MOTORNA STOPNJA;
- pulzno-širinski krmilni signal PWM2 za tranzistorsko stikalo ZAVORA;
- izhod: LED DIOD kot indikator režima;
- izhod: RELE KONTAKTOR za vklop varilnega transformatorja;
- izhod: RELE PLIN za vklop dotoka plina;
- izhodi za prikaz na zelenih 7-segmentnih LED, izbira (po 3 za napetost oz hitrost, in 2 za tok), izbira segmentov (8 signalov);

### 3 Izvedba programske opreme

Izbira programskih orodij je bila v veliki meri pogojena z aparaturno opremo, ki jo je naročnik Varstroj dal na voljo. Za nalaganje, programiranje, testiranje in razhroščanje programske opreme v ciljnem mikrokrmilniku PIC16F877 smo izbrali ICD1 (In Circuit Debugger) modul, ki smo ga razvili na Inštitutu za robotiko in ga že nekaj let uspešno uporabljamo na UM-FERI v pedagoškem procesu [5][7]. S tem je bila pogojena izbira nekoliko zastarele verzije integriranega programskega okolja Microchip MPLAB V5.70. Alternativa bi bila izbira naprednejšega MPLAB V6.x okolja, vendar ta ne podpira ICD1, ampak samo novejši modul ICD2 [4].

Čprav nekateri še vedno zagovarjajo splošno prepričanje [1], da je za programiranje 8-bitnih procesorjev, zaradi razmeroma skromnih sredstev, primeren samo zbirni jezik (Assembler Language), se trend vedno bolj nagiba k uporabi ANSI C programskega jezika [6]. Na voljo je vedno več razmeroma kvalitetnih in učinkovitih C-prevajalnikov za PIC mikrokrmilnike, kot so IAR Systems, CCS, HI-TEC, idr. [8].

Naročnik je izrazil željo, da bi pri kodiranju uporabljali CCS-C, vendar smo na osnovi testov in analiz ugotovili, da je primernejša izbira nekoliko dražjega HI-TEC C-prevajalnika [9]. Slednji ima prednosti predvsem v večji zanesljivosti, omogoča direktno uporabo imen registrov, podpira uporabo več-dimenzionalnih polj in ima zelo dober optimizator kode [8].

Potek implementacije programske opreme na kratko povzamemo v naslednjih točkah:

- Izbira ICD1 razvojnega modula, Hi-Tech C prevajalnika, MPLAB 5.70 programsko okolje, PC platforma: MS Win. 98SE, MS Win. XP;
  - Analiza zahtev in dekompozicija specifikacij;
  - Organizacija izvedbe programa:
    - 1. proces: teče v neskončni zanki (WDG) – izvaja se ciklično zajemanje signalov iz analognih merilnih vhodov, preklopnikov in tipk, prikaz na LED, zajemanje podatkov iz tabel;
    - 2. proces: teče kot prekinitveni program (interval 3,00 ms, Timer0): izvajanje regulacije vrtljajev motorja (30 ms), osveževanje LED 7-segmentnih prikazovalnikov, generiranje časovnih markerjev za intervale (3 ms, 30 ms, 100 ms, 300 ms, 1 s, 1,5 s, 3 s, ...);
  - Kodiranje programskih modulov je potekalo postopoma ob sprotno testiranju in po fazah, kot smo si zastavili ob dekompoziciji projektnih specifikacij.
- Namesto uporabe katerega od jeder operacijskega sistema v realnem času (RTOS) [8], smo se odločili za časovno razporejanje

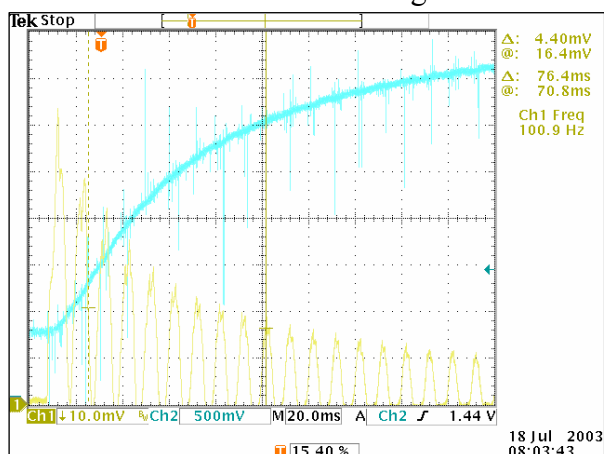
opravil na osnovi prekinitvenega intervala (3 ms) časovnika Timer0. Pri tem je bilo treba zagotoviti, da se nobeno opravilo ni izvajalo dlje kot osnovni prekinitveni interval.

#### 4 Testiranje in rezultati

Bistveni del pri implementaciji programske opreme je izvedba PI diskretnega regulatorja hitrosti. Zahtevana je regulacija hitrosti pomika dodatne varilne žice v območju od 1,0 do 20,0 m/min z ločljivostjo 0,1 m/min, kar pomeni največja vrtilna hitrost elektromotorja 3000 vrt/min. Na voljo smo imeli rotacijski inkrementalni dajalnik (ID) s 60 impulzi, kar je pomenilo na osi motorja največjo frekvenco 5000 Hz. Uporabljen je DC standardni motor za aplikacije podajanja žice (nazivna nap.: 42 V, navor: 75 Nm, nazivni tok: 3,8 A, reduktor 24,5:1). Motor je krmiljen s pulznoširinskim signalom (PWM1) s posredovanjem MOS FET močnostnega tranzistorja z 8-bitno ločljivostjo in frekvence 20 kHz. Le-ta je napajan z enofaznim nestabiliziranim usmernikom, ki je glajen le z elektrolitskim kondenzatorjem. Zato je prisotna v signalih napetosti in toka kar precejšnja valovitost.

Slika 2: Časovni odziv vrtljajev in toka

Izvedli smo PI diskretni regulator vrtljne



hitrosti z uporabo 16 oz. 32-bitne celoštevilčne aritmetike (Fixed Point s Q12 notacijo fiksne vejice) direktno v HI-TEC C-jeziku. Trajanje regulacijskega algoritma je krajše od 2 ms, kljub

temu, da se izvajajo 16 oz. 32-bitna množenja in seštevanja.

Zaradi diferencialne metode merjenja hitrost smo se odločili za 30 ms interval tipanja, pri čemer je bila dosežena zadovoljiva ločljivost meritve pomika 0,13 m/min. Parametra regulatorja sta bila določena na osnovi posnetega stopničnega odziva toka in vrtljajev na spremembo krmilne napetosti, prikazanega na sliki 2. Izbrali smo postopek določanja parametrov po Ziegler-Nichols metodi. Seveda sta bila parametra PI regulatorja med testiranjem kasneje modificirana, tako da smo dosegli čim stabilnejše obnašanje z ozirom na motnje.

Testiranja kvalitete regulacije hitrosti podajanja žice so izvajali naročniki v Tehnološkem centru podjetja Varstroj, predstavljenem na fotografiji (slika 3). Merili so s posebnim merilnim inštrumentom za merjenje hitrosti pomikanja in rezultati so dejansko pokazali, da je točnost pomika (pri različnih materialih in debelinah varilnih žic) v zahtevanem območju  $\pm 0,1$  m/min.



Slika 3: Testiranje prototipa varilnega aparata

Pomemben del programske opreme predstavlja tudi kodiranje dvodimenzionalnih polj – tabele z vnaprej določenimi tipičnimi tehnološkimi vrednostmi varilnih tokov in napetosti za različne debeline ter materiale varilne žice. Potrebno je bilo vnesti kar 16 tabel. Ker je podatkovni pomnilnik mikrokrmilnika omejen na 368 zlogov, smo tabele vnesli kot

fiksna polja v okviru programske kode. To ima za posledico potrebo po ponovnem prevajanju programa ob vsaki spremembi parametrov v tabelah.

## 5 Zaključek

Projekt je bil končan v načrtovanem roku. Pri kodiranju programske opreme sta sodelovala zelo prizadevna študenta UM-FERI univerzitetnega študijskega programa Elektrotehnika, smer Avtomatika, Uroš Derstvenšek in Andrej Koštomaj. Pri večmesečnem obratovanju v Varstroju naročnik ni zaznal problemov zaradi motenj, kljub dejstvu, da je varilni transformator s tokovnimi konicami preko 600 A v neposredni bližini tiskane plošče z mikrokrmilnikom.

Programska oprema obsega nad 1000 vrstic izvorne kode v ANSI C-jeziku, pri čemer program (naložen v FLASH ROM pomnilniku) zaseda okrog 6700 besed in zahteva 250 zlogov podatkovnega pomnilnika.

Ob izvajanju projekta je prišlo (na osnovi novih spoznanj) še do določenih izboljšav:

- Začasni (namesto toka) prikaz hitrosti pomika žice (m/min) ob vsaki spremembi reference za več kot 0,3 m/min v času 3 s po zadnji spremembi;
- Mehki zagon motorja tudi ob startu uvajanja žice do 40 % reference, kar pomeni nekajkratno zmanjšanje tokovnih sunkov ob zagonu motorja;
- PWM vzbujanje tranzistorja za zavoro - zmanjšanje tokovnih sunkov iz 10 A na 5 A;
- Ob vklopu napajanja krmilnika se izvede zagonski test (prižig vseh segmentov LED

prikazovalnika) in LED indikatorja za čas približno 2 s;

- Dodatni logični vhod v krmilnik, ki predstavlja status napajalnega transformatorja (upoštevati se kot pogoj za izvajanje varilnega cikla in prikaz na LED indikatorju);
- Galvanska ločitev signala tipke Start/Stop.

V podjetju Varstroj so po uspešni predstavitvi na Celjskem obrtnem sejmu nadaljevali z intenzivnim testiranjem serije 10 varilnih aparatov v lastni proizvodnji in pri dolgoletnih strankah. Nato so na osnovi marketinških raziskav pripravili serijsko proizvodnjo VARMIG 450 Synergie aparatov, ki jo uspešno tržijo pri nas in v tujini.

## 6 Literatura

- [1] James M. Sibigtroth: Understanding small microcontrollers; Prentice Hall, 1993;
- [2] Spletne informacije o produktih podjetja Varstroj, <http://www.varstroj.si/>;
- [3] J. Pogorelc, Mikrokrmilniški modul za študij vgrajenih sistemov, Portorož, ERK 2002;
- [4] Microchip, PIC16F87X 28/40-pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers, <http://www.microchip.com/>;
- [5] Učno gradivo za UNI in VS študijski program, <http://www.ro.feri.uni-mb.si/izobrazevanje/>;
- [6] J. Pogorelc, Mikrokrmilnik - osnovni gradnik vgrajenih sistemov, Svet elektronike, št. 79, september 2001;
- [7] Miran Rodič, Janez Pogorelc: Navodila za delo z modulom MPU-PIC16F876 (interno gradivo), [http://www.ro.feri.uni-mb.si/predmeti/mikro\\_el/nav\\_mpu\\_pic.pdf](http://www.ro.feri.uni-mb.si/predmeti/mikro_el/nav_mpu_pic.pdf) UM-FERI, Maribor, 2002;
- [8] MicrochipC.com: spletna navodila in primeri C-programov za PIC-e (angl.), <http://www.microchipc.com/>;
- [9] HI-TECH Software: spletna stran proizvajalca C-prevajalnika, <http://www.htsoft.com/>.