

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Zavod za automatiku i procesno računarstvo

DIGITALNO BROJLO ELEKTRIČNE ENERGIJE

Diplomski rad broj 1056

DANIJEL DOMAZET

Zagreb, 1998.

Sadržaj:

1. BROJILA ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	5
1.1. Općenito o brojilima električne energije	5
1.2. Podjela brojila električne energije	5
1.2.1. Elektromehanička brojila.....	5
1.2.2. Elektronička brojila.....	6
2. JEDNOFAZNO ELEKTRONIČKO BROJILO - DEFINIRANJE KARAKTERISTIKA	10
3. KONSTRUKCIJA ELEKTRONIČKOG BROJILA	11
3.1. Principijelna blok shema.....	11
3.2. Rad sklopa.....	11
3.3. A-D pretvorba signala sa predznakom.....	12
3.3.1. A-D pretvorba signala sa predznakom pomoću izvora referentnog napona	12
3.3.2. A-D pretvorba signala sa predznakom pomoću dva izvora napona iste veličine i suprotnog predznaka	13
3.3.3. A-D pretvorba signala sa predznakom pomoću stabilnog strujnog izvora	14
3.4. Uzorkovanje ulaznih veličina	14
3.4.1. Uzorkovanje napona	14
3.4.2. Uzorkovanje struje	16
3.5. Električna shema brojila	17
3.5.1. Mikrokontroler.....	17
3.5.2. Dovođenje napona i struje trošila	20
3.5.3. Izvor referentnog napona	20
3.5.4. Integrirani krug za upravljanje napajanjem.....	21
3.5.5. Oscilator.....	22
3.5.6. LCD displej.....	22
3.5.7. Svjetleća dioda.....	26
3.5.8. Kratkospojnici i tipkalo	26
3.6. Mjerenje energije mikrokontrolerom tipa MSP430	27
3.6.1 Pogreške mjerenja.....	28
3.6.1.1. Pogreška zbog uzorkovanja struje i napona u različitim vremenskim trenucima.....	28
3.6.1.2. Pogreška zbog kvantizacije	29
3.6.1.3. Pogreška zbog konačne rezolucije a-d pretvarača	30
3.7. Programiranje mikrokontrolera.....	31
3.7.1 Glavni program	31
3.7.2. Obrada prekida izazvanog brojačem	32
3.7.2.1. Računanje ukupne energije	34

3.7.2.1.1 Korekcija pogreške nastale promjenom referentnog napona a-d pretvarača	34
3.7.2.1.2. Proračun energije	35
3.7.3. Kalibracija.....	38
3.8. Nadogradnja brojila	39
4. BUDUĆNOST ELEKTRONIČKIH BROJILA.....	40
PRILOG:	
Popis elektroničkih komponenti.....	41
Električna shema	42
Montažna shema	43
Štampane veze s gornje strane	44
Štampane veze s donje strane.....	45
Raspored elemenata.....	46
LITERATURA	47
SAŽETAK.....	48
ABSTRACT	49
ŽIVOTOPIS	50

1. BROJILA ELEKTRIČNE ENERGIJE

1.1. Općenito o brojilima električne energije

Brojila električne energije spadaju u grupu mjernih instrumenata posebne namjene. Većinom se upotrebljavaju za mjerenje i registriranje električne energije koja je u određenom vremenskom razdoblju predana potrošaču. Ovakva namjena daje im posebno mjesto među ostalim mjernim instrumentima. U prvom redu, zbog mnogo potrošača električne energije, brojila se proizvode u iznimno velikim serijama, mnogo većim nego ostali mjerni instrumenti. Također, obračun i naplata električne energije vrši se na osnovi pokazivanja brojila, pa treba posebno voditi računa o točnosti i pouzdanosti mjerenja.

Trenutno u Republici Hrvatskoj ukupan broj brojila električne energije je 1.700.000. Kako je prosječno trajnost brojila 30 godina, svake godine je potrebno zamijeniti približno 55.000 brojila.

Prva brojila u svijetu su uvedena u upotrebu još u prošlom stoljeću, 1881. godine. Bila su to elektrolitska (ampersatna) brojila.

1.2. Podjela brojila električne energije

Danas se upotrebljavaju različite vrste brojila električne energije. Najznačajnija podjela je podjela na elektromehanička i digitalna (u daljem tekstu **elektronička**) brojila.

1.2.1. Elektromehanička brojila

Elektromehanička brojila su u stvari indukciona brojila. Danas redovito upotrebljavano, indukciono brojilo sastoji se od dva elektromagneta (jedan naponski i jedan strujni) između kojih se nalazi vrtiva aluminijska pločica. Na pločicu djeluju magnetski tokovi koji u njoj izazivaju vrtložne struje. Posljedica svega je djelovanje zakretnih momenata na aluminijsku pločicu. Može se postići da ukupan zakretni moment izazvan naponima i strujama koji okreće aluminijsku pločicu bude proporcionalan produktu struje i napona trošila i kosinusu kuta između njih, odnosno:

$$M_1 = k_1 \times I \times U \times \cos \varphi = k_1 \times P$$

Zakretnim momentima elektromagneta suprotstavlja se tzv. kočni moment. Kočni moment se dobije pomoću permanentnog magneta. Pošto je kočni moment proporcionalan brzini vrtnje aluminijske pločice:

$$M_k = k_2 \times \omega ,$$

a kako će se brzina vrtnje aluminijske pločice ustaliti kada se momenti izjednače, brzina vrtnje aluminijske pločice proporcionalna je snazi potrošača, a broj njenih okretaja mjerenoj energiji. Dakle:

$$M_1 = M_2$$

$$\omega = k \times P$$

Elektromehanička brojila danas su najčešća i u industrijskim postrojenjima i u domaćinstvima. Glavne prednosti ovih brojila su postojanost, dugotrajnost i robustnost.

1.2.2. Elektronička brojila

U novije vrijeme zahvaljujući brzom razvoju elektronike i znatnom pojeftinjenju samih elektroničkih komponenti postalo je moguće konstruirati pouzdana i točna elektronička brojila električne energije. Glavne prednosti elektroničkih brojila su mogućnost postizanja užih granica pogrešaka, rad sa većim brojem tarifa, daljinsko očitavanje stanja brojila i programiranje parametara preko lokalne mreže (npr. IEC 1142), integracija većeg broja funkcija u jednom uređaju (uklopni sat, MTK* prijemnik, maksigraf, mjerenje jalove energije itd.) i automatska kalibracija. Ove prednosti elektroničkih brojila smanjuju ukupnu cijenu zato što su sve funkcije brojila integrirane, omogućavaju racionalnije trošenje električne energije većim brojem tarifa, smanjuju troškove očitavanja, i dr.

Princip rada elektroničkih brojila se zasniva na množenju uzoraka struje i napona određenim vremenskim intervalima i njihovom zbrajanju.

Električna energija matematički predstavljena formulom:

$$W = \int_{t=0}^{t=+\infty} u(t) \times i(t) \times dt$$

aproksimira se zbrojem:

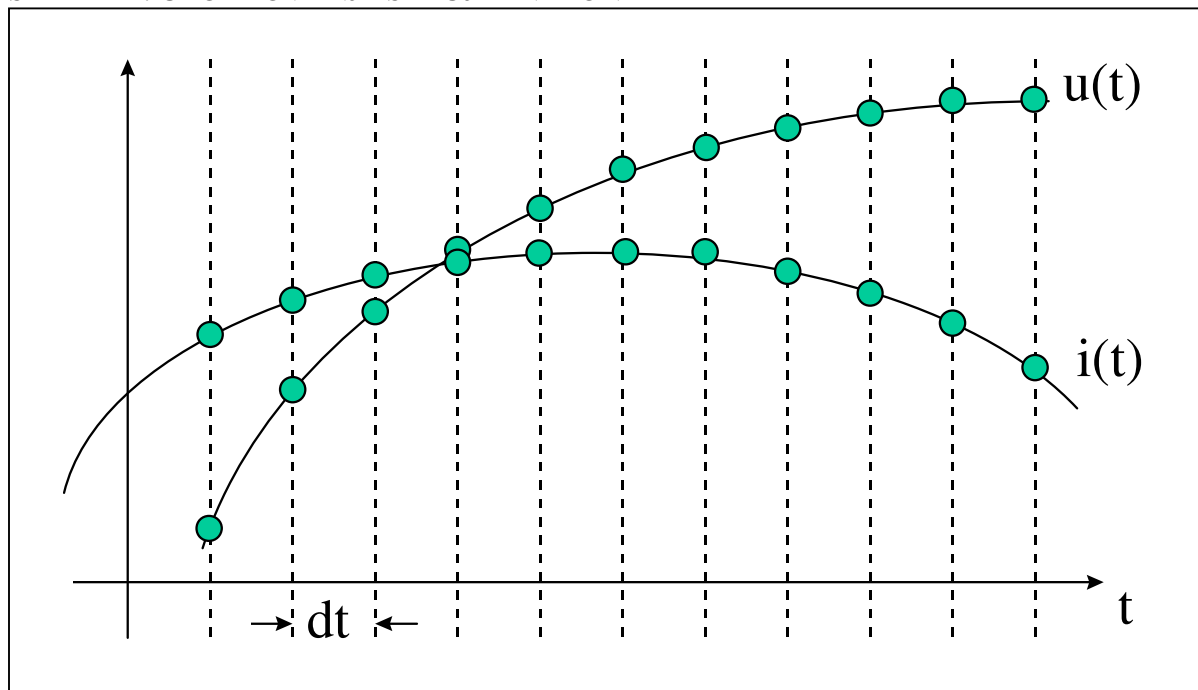
$$W = \sum_{t=0}^{t=+\infty} u_n \times i_n \times \Delta t$$

gdje je:

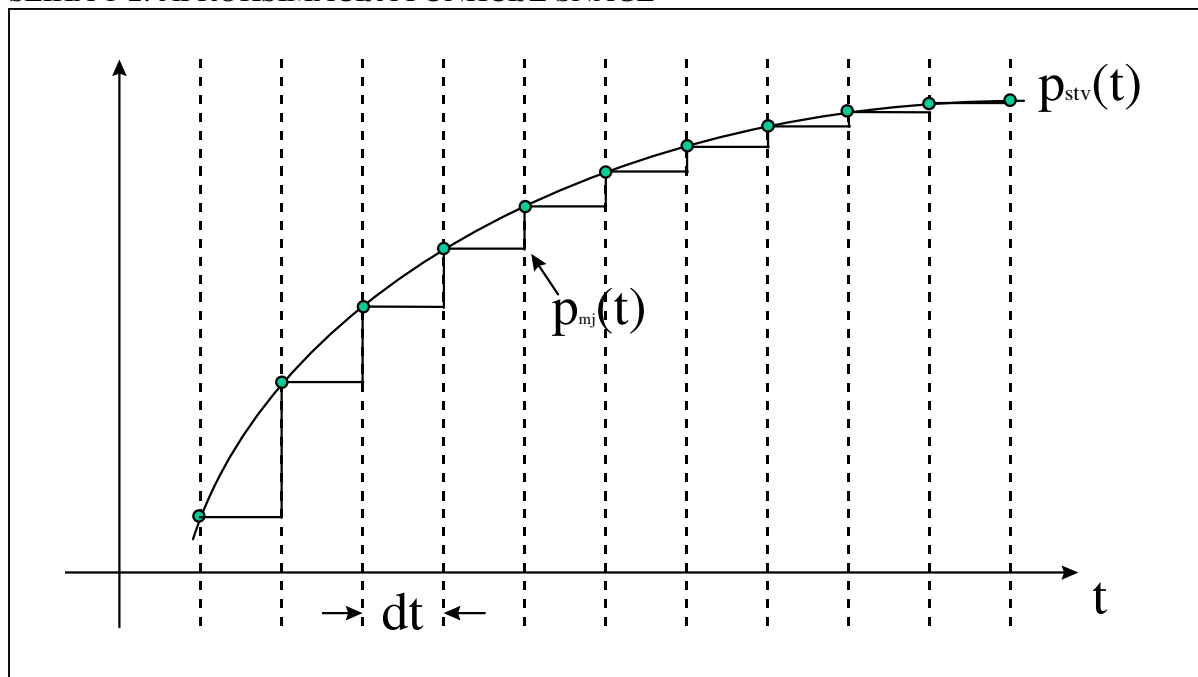
- W Akumulirana energija [Ws]
- u_n Uzorak napona u trenutku t_n
- i_n Uzorak struje u trenutku t_n
- Δt Vrijeme između dva uzastopna uzorkovanja struje i napona

*Mrežno Tonska Komanda (MTK) - signal kojim se putem elektroenergetske mreže vrši prebacivanje tarifa na brojilima.

SLIKA 1-1: UZORKOVANJE STRUJE I NAPONA



SLIKA 1-2: APROKSIMACIJA FUNKCIJE SNAGE

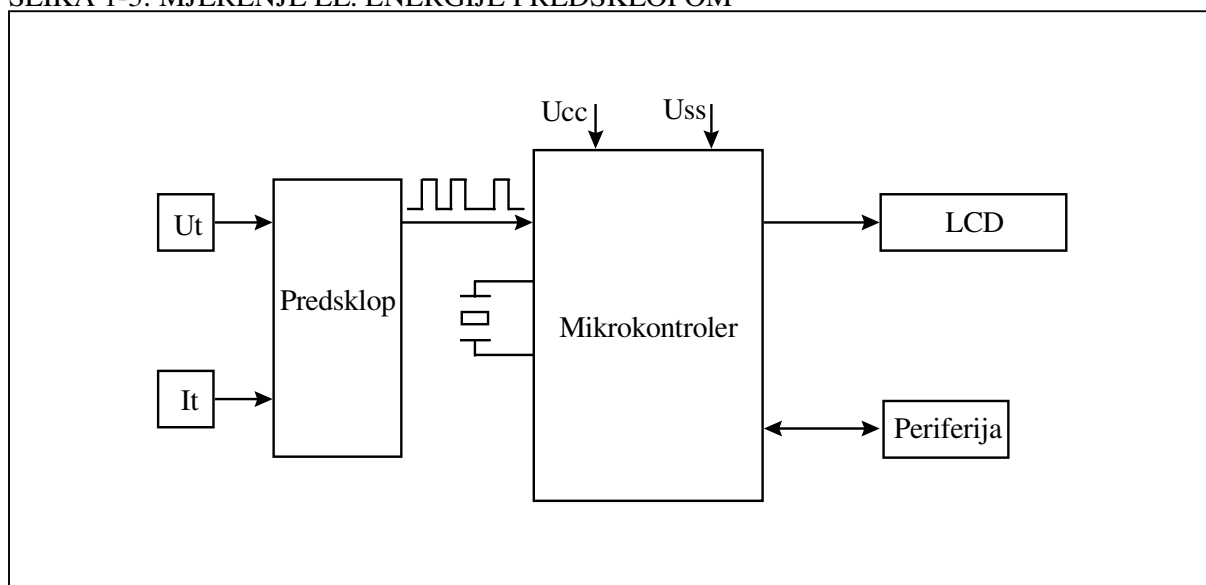


Elektroničko brojilo se u principu sastoji iz dva osnovna dijela: analognog i digitalnog. Između ova dva dijela nalazi se analogno-digitalni pretvarač. Glavni zadatak analognog dijela je dovođenje struje i napona trošila čija se potrošnja mjeri u granice prihvatljive za analogno-digitalni pretvarač. Digitalni dio sklopa obrađuje podatke dobivene iz analogno-digitalnog pretvarača. Naravno, analogni i digitalni dio sklopa nisu strogo odvojeni i kao takve ih ne treba promatrati.

Principijelno elektronička brojila se mogu konstruirati na dva različita načina. Glavna razlika je u mjestu gdje se sama energija mjeri. Svaki od ovih načina zahtijeva mikrokontroler kao neophodan dio sklopa.

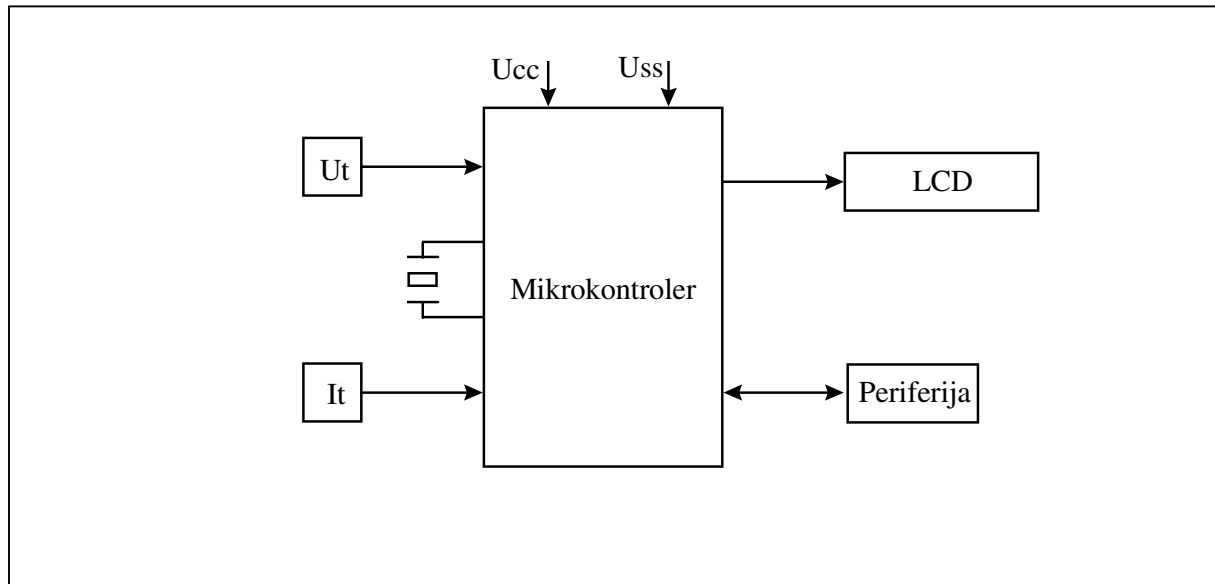
Prvi način mjerenja podrazumijeva mjerenje energije u posebnom predsklopu nakon kojeg se nalazi mikrokontroler. Mjerenje se može zasnivati na Hallovom efektu, analognim množilima, i sl. Nakon predsklopa dolazi mikrokontroler. Mikrokontroler iz predsklopa dobiva informaciju u obliku niza impulsa, od kojih svaki predstavlja kvant potrošene energije, a čija je frekvencija proporcionalna snazi. Mikrokontroler zbraja potrošenu energiju, ispisuje rezultat na LCD displej i komunicira sa perifernim uređajima. Ovakav način mjerenja je prikazan na Slici 1-3.

SLIKA 1-3: MJERENJE EL. ENERGIJE PREDSKLOPOM



Drugi način je mjerenje električne energije samim mikrokontrolerom (Slika 1-4) koji u ovom slučaju između ostalog mora sadržavati analogno-digitalni pretvarač i mora raditi na dovoljno visokoj frekvenciji. Na ovaj način predsklop postaje suvišan.

SLIKA 1-4: MJERENJE EL. ENERGIJE MIKROKONTROLEROM



Odabir jedne od dvije metode ponajprije ovisi o mogućnostima mikrokontrolera. U drugom slučaju mikrokontroler mora biti sposoban izvršiti veliki broj zadataka u malom vremenu: uzorkovanje napona i struje, računanje, ispis, upravljanje perifernim uređajima, itd. Ovo može biti ograničavajući faktor ukoliko se mogućnosti mikrokontrolera u potpunosti iskoriste prije nego što su implementirane sve zamišljene funkcije brojila, npr. daljinska komunikacija.

2. JEDNOFAZNO ELEKTRONIČKO BROJILO ELEKTRIČNE ENERGIJE - DEFINIRANJE KARAKTERISTIKA

Jednofazno elektroničko brojilo električne energije koje je predmet ovog diplomskog rada, definirano je sljedećim karakteristikama:

- Nazivni napon: $U_n=230\text{ V}$
- Nazivna struja: $I_n=10\text{ A}$
- Maksimalna struja: $I_{\max}=60\text{ A}$

Brojilo mora zadovoljiti točnost koja je definirana standardom IEC 1036^{*} za razred točnosti 2:

- Za struje između $10\%I_n$ i $600\%I_n$ točnost mora biti bolja od $\pm 2\%$
- Za struje između $5\%I_n$ i $10\%I_n$ točnost mora biti bolja od $\pm 2.5\%$

Za struje manje od 5% i veće od 600% nazivne struje točnost nije definirana.

Također standardom, definirana je stalnica (konstanta) brojila koja ovdje iznosi 1000 impulsa svjetleće diode po jednom kilowat-satu (kWh), a koja služi za kalibraciju brojila.

Ostale karakteristike brojila definirane standardom IEC 1036 nisu obuhvaćene ovim diplomskim radom (npr. promjena pogreške uzrokovana promjenom temperature, utjecajem vanjskog elektromagnetskog polja itd.).

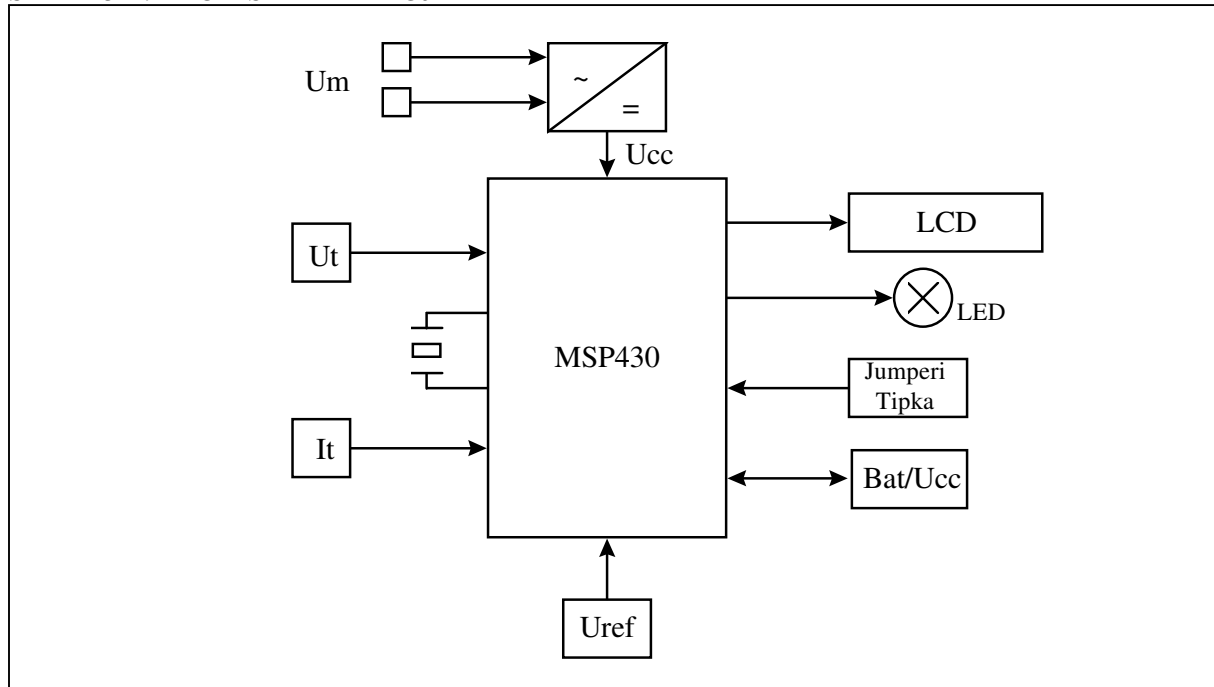
^{*}Standard IEC (Engl. International Electrotechnical Commission) br. 1036 pod imenom *Statički wat-sat metri izmjenične struje za aktivnu energiju* (Engl. Alternating current static watt-hour meters for active energy) donesen je 1990. godine.

3. KONSTRUKCIJA ELEKTRONIČKOG BROJILA

3.1. Principijelna blok shema sklopa

Pojednostavljena blok shema elektroničkog brojila prikazana je na Slici 3-1. Centralni dio sklopa zauzima mikrokontroler. Ulazne veličine koje se šalju kao podaci mikrokontroleru su struja trošila I_t , napon trošila U_t i referentni napon U_{ref} . Mikrokontroler također provjerava da li je došlo do promjene stanja na kratkospojnicima i ako jeste poduzima odgovarajuću akciju (kalibracija, brisanje trenutnog stanja, i dr.). Ostali glavni dijelovi sklopa su izvor istosmjernog napona napajanja 5V, kristalni oscilator, LCD displej i sklop za preklapanje napajanja na bateriju u slučaju nestanka napajanja iz ispravljača. Svjetleća dioda je implementirana zbog ispunjavanja zahtjeva za stalnicom brojila.

SLIKA 3-1: BLOK SHEMA BROJILA



3.2. Rad sklopa

Sklop radi na sljedeći način: u jednakim vremenskim razmacima mikrokontroler naizmjenično uzima uzorke napona i struje sa svoja dva ulaza. Između uzorkovanja vrši se pretvorba analognog signala u digitalni, a zatim i računanje. Računanje sa prethodna dva uzorka mora biti završeno prije sljedećeg nadolazećeg uzorkovanja. Nakon određenog vremena (koje je puno veće od vremena uzorkovanja) vrši se ispis na LCD displej i kontrola različitih perifernih signala (tipke, kratkospojnici, itd.). Ove radnje nisu vremenski kritične i mogu biti prekidane uzorkovanjem.

3.3. A-D pretvorba signala sa predznakom

Mikrokontroler vrši analogno-digitalnu pretvorbu signala koji su u rasponu od U_{cc} do U_{ss} . Ako je potrebna analogno-digitalna pretvorba signala sa predznakom onda je neophodno imati neku vrstu *zamišljene nule*. Signali iznad zamišljene nule bili bi smatrani pozitivnima, a oni ispod negativnima. Postoji nekoliko načina rješenja problema zamišljene nule:

- Pomoću izvora referentnog napona
- Pomoću dva izvora napona iste veličine i suprotnog predznaka
- Pomoću stabilnog strujnog izvora

3.3.1. Analogno-digitalna pretvorba signala sa predznakom pomoću izvora referentnog napona

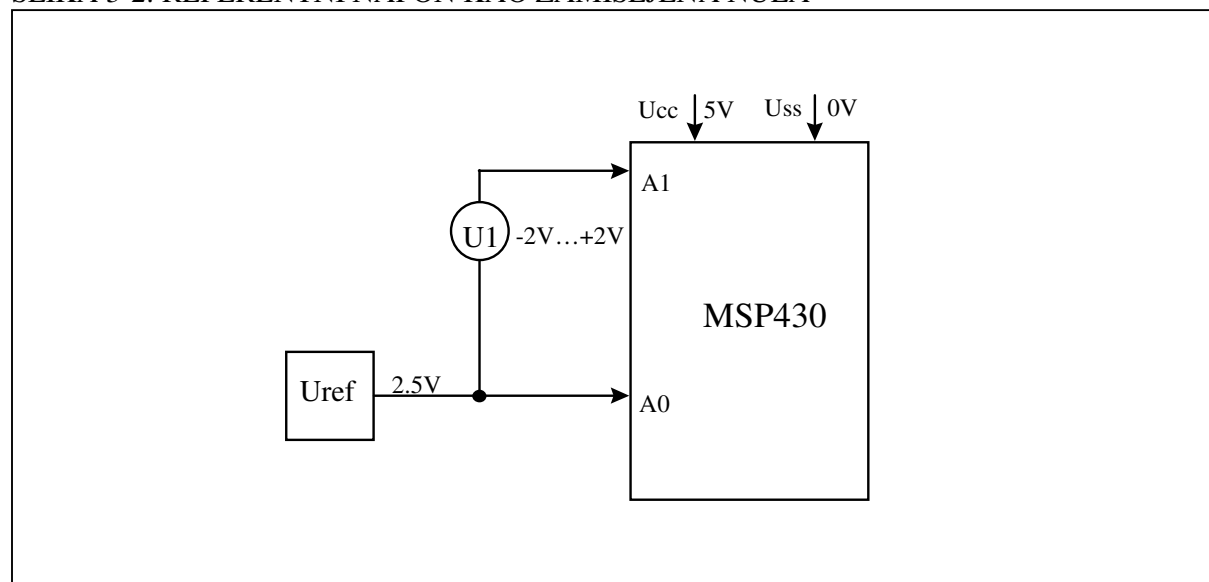
Analogno-digitalna pretvorba signala sa predznakom pomoću izvora referentnog napona zasniva se na spajanju izlaza referentnog izvora na potencijal neutralnog vodiča (Slika 3-2). Napon na ulazu A_1 mikrokontrolera postaje jednak zbroju mjerenog i referentnog napona. Pošto ukupan napon na ulazu A_1 ne smije biti negativan ni u jednom trenutku:

$$U_{A_1} = U_{MAX} + U_{ref} \geq 0$$

mora biti:

$$U_{ref} \geq U_{1MAX}$$

SLIKA 3-2: REFERENTNI NAPON KAO ZAMIŠLJENA NULA

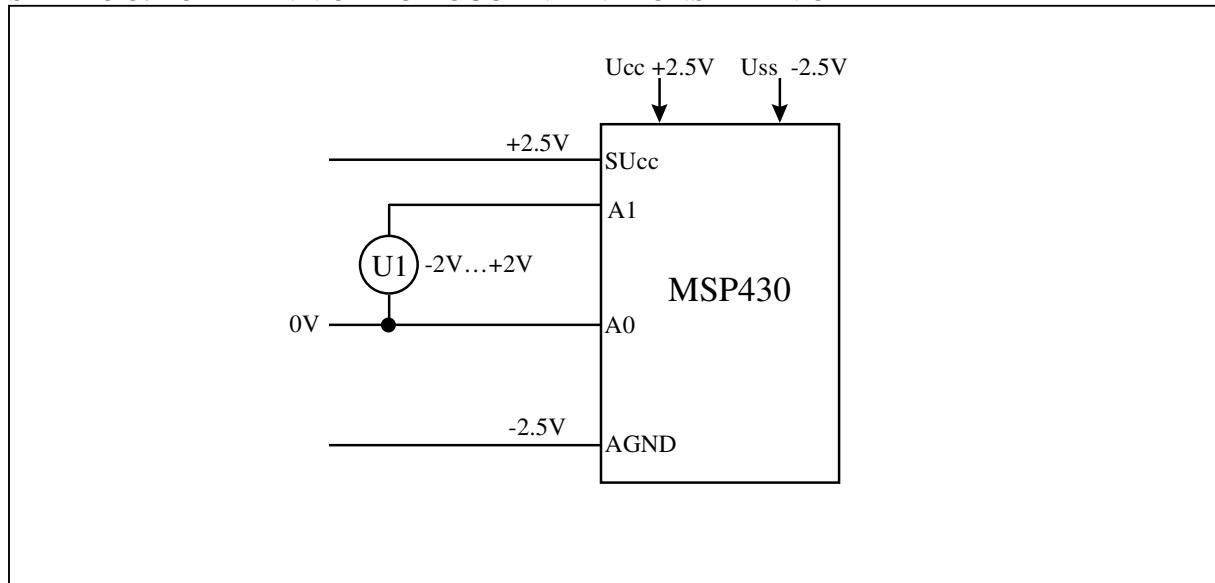


Najbolje je da referentni napon ima vrijednost polovine napona a-d pretvorbe. Svi ulazni naponi sa predznakom čija se analogno-digitalna pretvorba vrši moraju svoj referentni potencijal (0 V) vezati sa referentnim naponom.

Da bi se izmjerila vrijednost ulaznog signala U_1 , potrebno je izmjerenu vrijednost referentnog napona na ulazu A_0 oduzeti od izmjerene vrijednosti napona na ulazu A_1 . Na ovaj način je vrijednost napona U dobivena sa predznakom.

3.3.2. Analogno-digitalna pretvorba signala sa predznakom pomoću dva izvora napona iste veličine i suprotnog predznaka

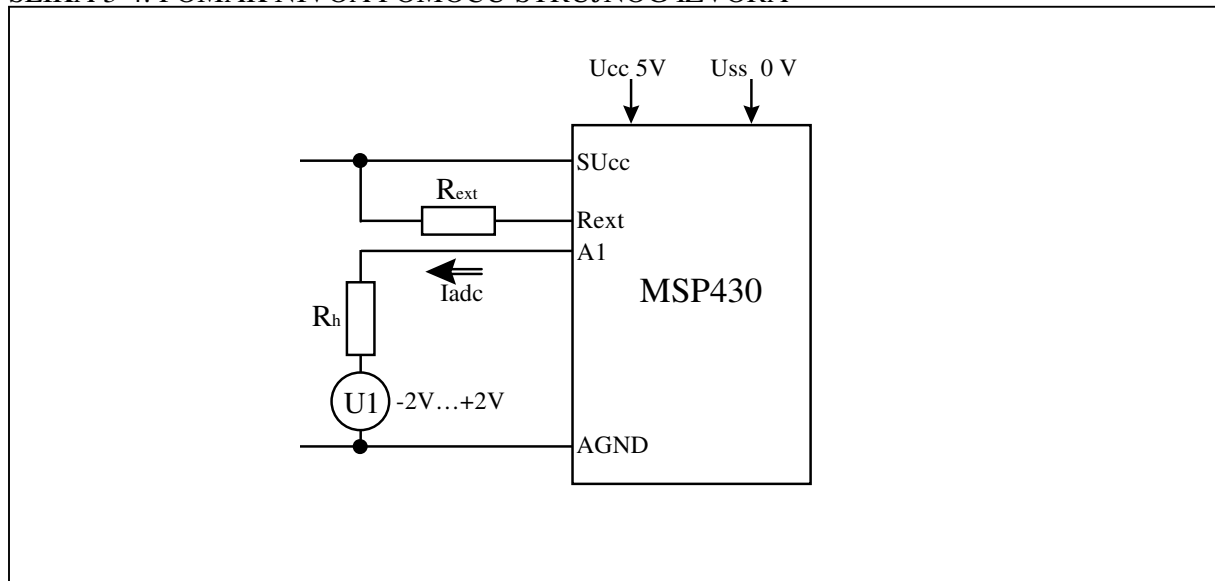
SLIKA 3-3: POMAK NIVOVA POMOĆU DVA NAPONSKA IZVORA



Sa dva napona napajanja iste veličine i suprotnog predznaka (npr. $\pm 2.5\text{ V}$) lako se dobiva potencijal u sredini napona a-d pretvarača. Svi ulazni naponi svoj referentni potencijal vežu sa ovim srednjim potencijalom. Srednji potencijal se redovito mjeri i oduzima od izmjerenih vrijednosti ulaznih napona.

3.3.3. Analogno-digitalna pretvorba signala sa predznakom pomoću stabilnog strujnog izvora

SLIKA 3-4: POMAK NIVOA POMOĆU STRUJNOG IZVORA

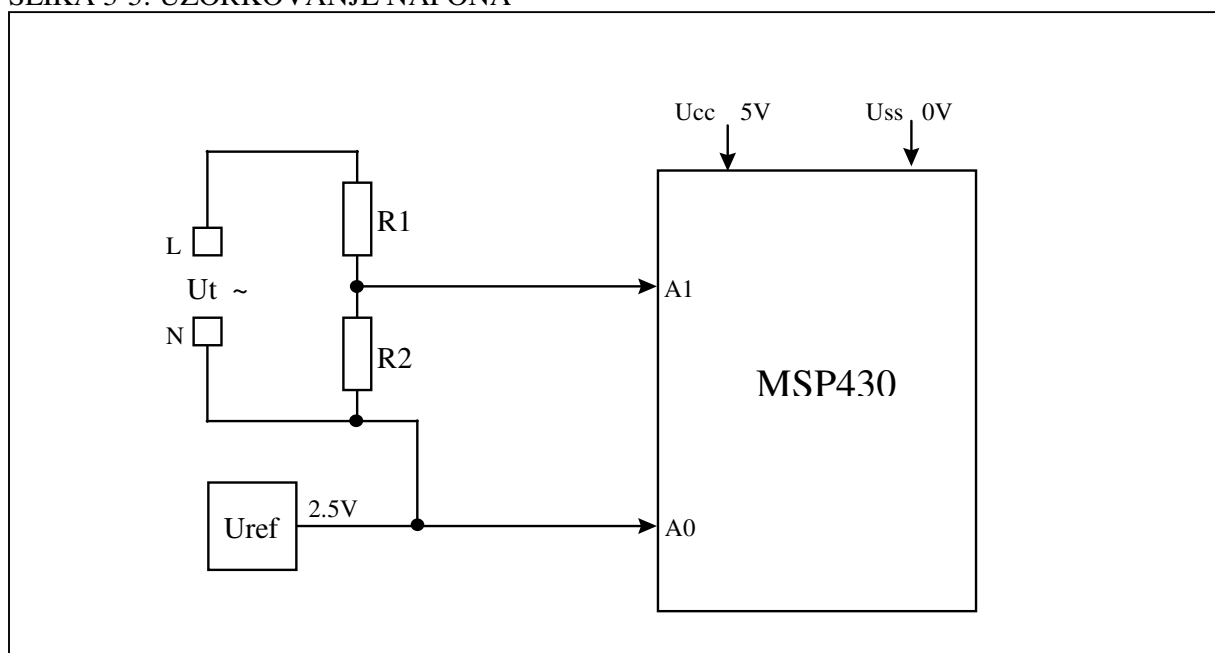


Strujnim izvorom se također negativan napon pomiče prema sredini napona a-d pretvarača. Ovdje se to postiže vanjskim otpornikom na kome se uslijed konstantne struje stvara konstantan pad napona. Taj napon se pri mjerenju dodaje ulaznom naponu.

3.4. Uzorkovanje ulaznih signala

3.4.1. Uzorkovanje napona

SLIKA 3-5: UZORKOVANJE NAPONA



Nazivni napon tereta čija se potrošnja mjeri iznosi 230 V. Elektroničko brojilo se napaja iz naponskog izvora od +5 V. Napon od +5 V je i referentni napon analogno-digitalnog pretvarača. Tako napon na analognim ulazima mikrokontrolera mora biti između 0 i +5 V. Da bi ovaj uvjet bio zadovoljen napon tereta mora biti sveden u granice -2.5 V do +2.5 V. Kad se ovom naponu zbroji referentni napon za podizanje nivoa od +2.5 V dobiju se tražene granice od 0 do 5 V. Zbog sigurnosti mjerenja napon tereta se svodi u granice manje od ± 2.5 V. Dovoljno je sigurno da te granice budu omeđene naponom ± 2.3 V.

Napon tereta se dovodi u tražene granice pomoću jednostavnog naponskog djelitelja koji se sastoji od dva otpora. Otpori (R_1 i R_2) se određuju na osnovu maksimalnog ulaznog napona. Pošto je nazivni napon brojila $U_n=230$ V, najveća vrijednost ulaznog napona je:

$$U_{\max} = U_n \times \sqrt{2}$$

Napon na otporniku R_2 ne smije preći 2.3 V:

$$U_{R2_{\max}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times U_{\max} = 2.3V$$

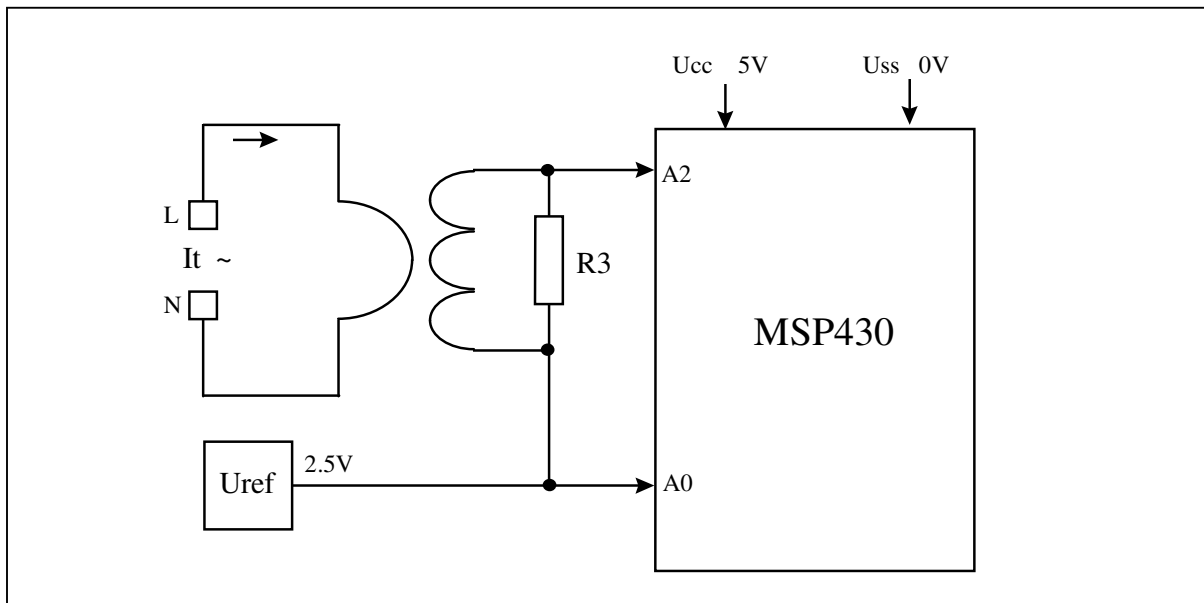
$$R_2 = \frac{R_1}{\frac{U_{\max}}{U_{R2_{\max}}} - 1}$$

Neka je $R_1 = 380k\Omega$.

$$R_2 = 2.7k\Omega.$$

3.4.2. Uzorkovanje struje

SLIKA 3-6: UZORKOVANJE STRUJE



Da bi struja trošila bila proporcionalna naponu u granicama od -2.5 V do $+2.5\text{ V}$ potrebno ju je preko strujnog transformatora umanjiti za faktor N na način da pad napona na otporu koji zaključuje transformator na sekundaru bude sveden u spomenute granice. I u ovom slučaju se zbog sigurnosti mjerenja traži napon između -2.3 V i $+2.3\text{ V}$.

Maksimalna struja brojila je $I_M=60\text{ A}$ pa je najveća trenutna vrijednost struje:

$$I_{\max} = I_M \times \sqrt{2}$$

Kako je izabrani prijenosni omjer strujnog transformatora $N=1000$, otpor $R3$ iznosi:

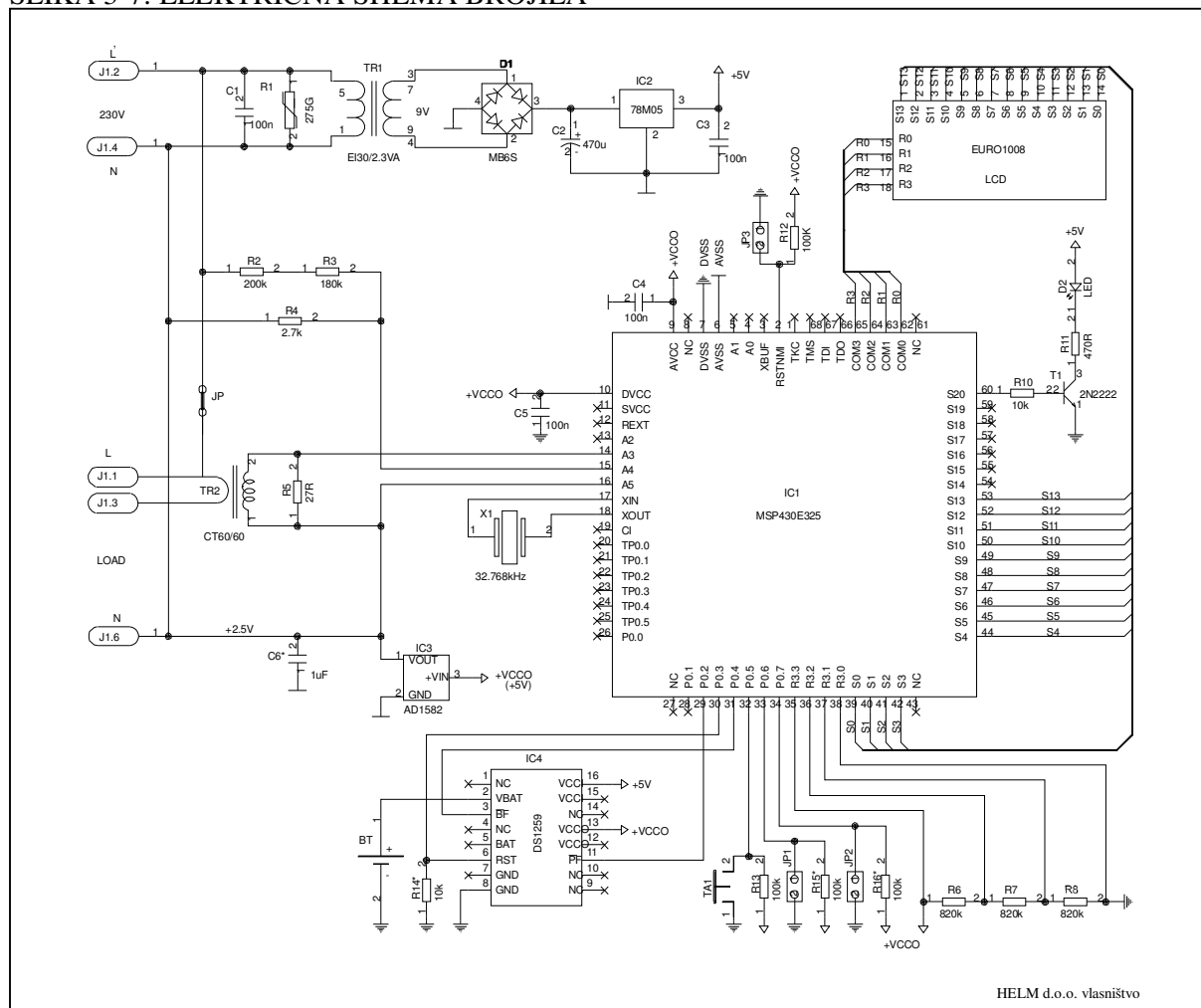
$$R3 = \frac{U_{R3}}{I_{R3}} = \frac{U_{\max_R3}}{I_{sek}} = \frac{U_{\max_R3}}{\frac{I_{\max}}{N}} = \frac{2.3}{\frac{60 \times \sqrt{2}}{1000}} \Omega$$

$$R3 = 27\Omega.$$

U ovom sklopu strujni transformator je komponenta koja presudno utječe na točnost mjerenja energije. Naime, transformator mora imati točan prijenosni omjer i mora unositi zanemariv zakretni kut između struje primara i struje sekundara u vrlo širokom strujnom području (od 500 mA do 60 A).

3.5. Električna shema brojila

SLIKA 3-7: ELEKTRIČNA SHEMA BROJILA



3.5.1. Mikrokontroler

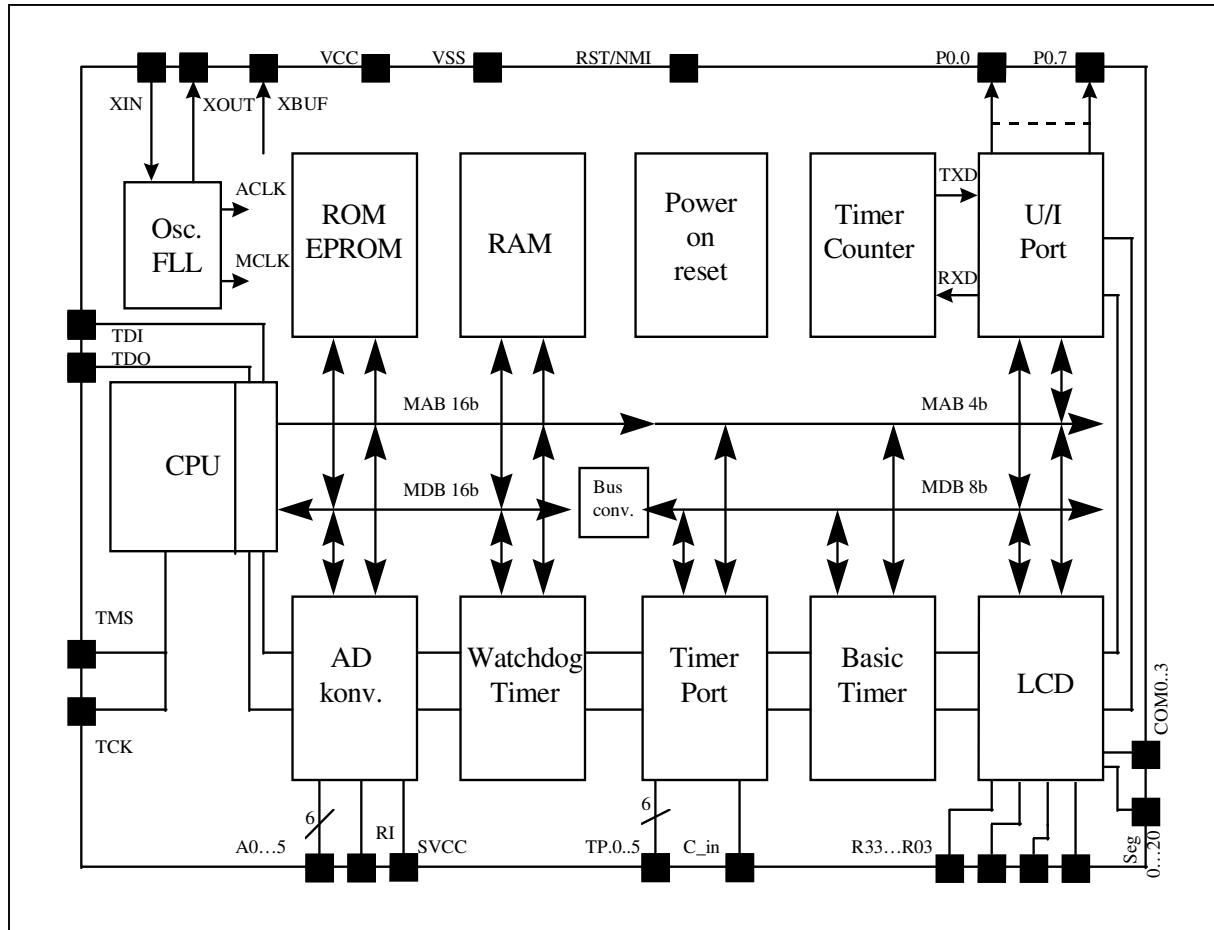
Centralno mjesto u električnoj shemi digitalnog brojila zauzima mikrokontroler. Iz više razloga odabran je mikrokontroler tipa MSP 430 proizvođača Texas Instruments Inc.

Mikrokontroler MSP430 sastoji se od sljedećih osnovnih dijelova:

- Centralna jedinica
- Programska memorija (ROM) 16 kB
- Podatkovna memorija (RAM) 512 kB
- Kontrolni dio
- Periferni moduli
- Oscilator i množilo frekvencije

MSP430 je 16 bitni RISC mikrokontroler čija se arhitektura zasniva na *von Neuman* arhitekturi, zajedničkom adresnom prostoru za sve funkcijske module i na smanjenom skupu naredbi primjenjivih na sve module.

SLIKA 3-8: ARHITEKTURA MSP430 MIKROKONTROLERA



Glave karakteristike mikrokontrolera MSP 430 su sljedeće:

- Do 64 Kbyte-a adresnog prostora za ROM, RAM, EEPROM i periferiju.
- Zbog implementacije stoga nema ograničenja na obradu prekida i podprograma.
- Samo 3 formata za instrukcije.
- Sedam načina adresiranja.
- Ulazno/Izlazni portovi (pristupi) preslikani u memoriji: periferni registri u RAMu.
- Brojači sa mogućnošću izazivanja prekida.
- 14-bitni analogno-digitalni pretvarač sa 8 analognih ulaza i strujnim izvorom.
- EPROM verzija (OTP).
- LCD modul.
- Stabilna radna frekvencija.
- Modularni dizajn.

- Mala potrošnja: CPUOff (Isključena centralna jedinica) i OscOff (Isključen oscilator) načini rada.
- Napon napajanja od +2.5 V do +5.5 V

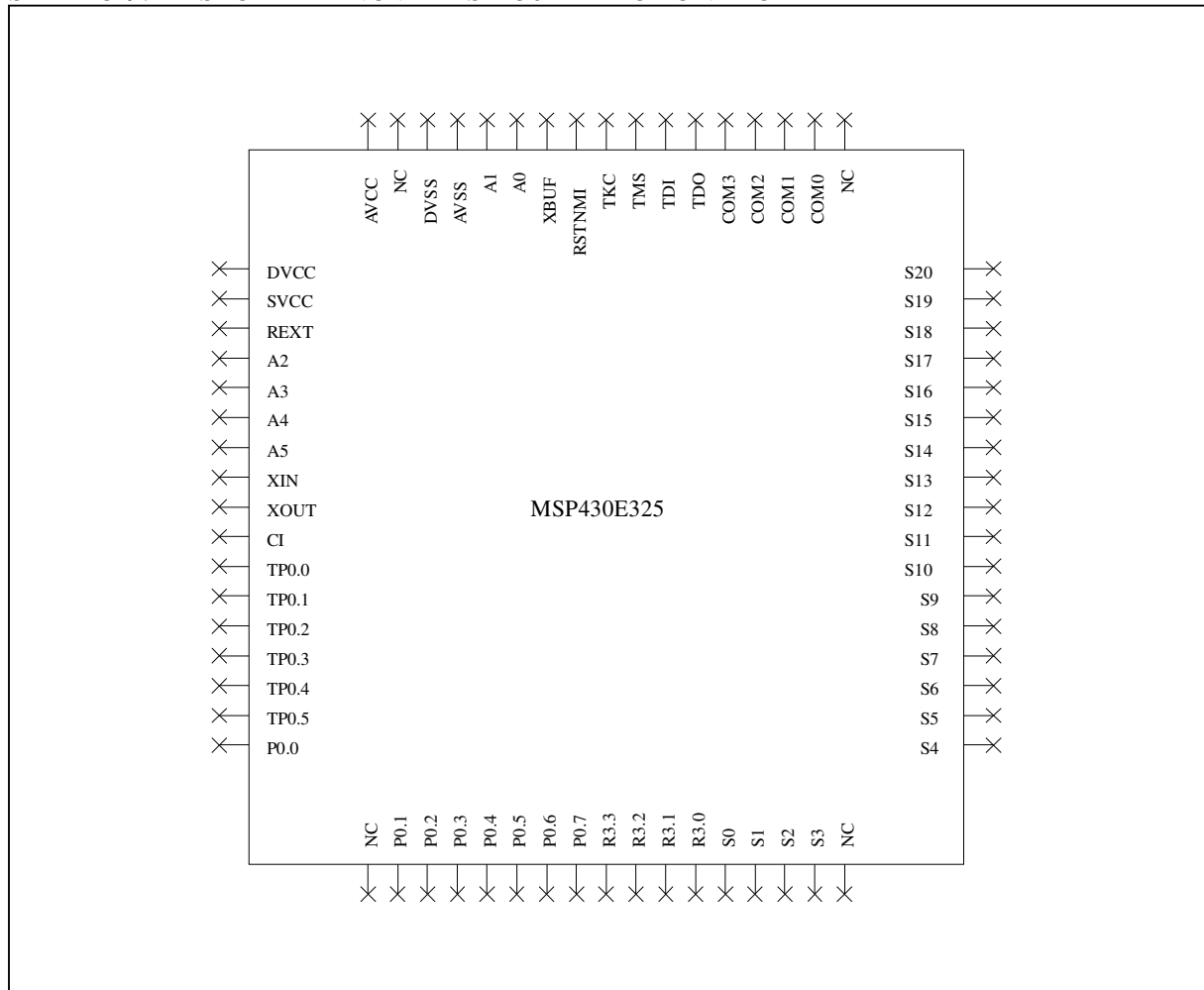
Ovaj mikrokontroler ima i neke posebne karakteristike koje ga izdvajaju od ostalih, a to su:

- Integriran na chipu 14-bitni analogno-digitalni pretvarač i LCD driver
- Vrlo mala potrošnja
- Smanjen broj naredbi na samo 27 (RISC arhitektura - Eng. Reduced Instruction Set Computer)
- Ortogonalna arhitektura (svaka instrukcija podržava svaki od 7 načina adresiranja).

Sve gore navedene posebnosti, a posebno postojanje analogno-digitalnog pretvarača (14-bitni) i LCD drivera na samom chipu čine ovaj mikrokontroler vrlo pogodnim za izradu digitalnog elektroničkog brojila maksimalno jednostavne konstrukcije.

Raspored pinova mikrokontrolera MSP430 je prikazan na Slici 3-9, a njihova namjene ukratko objašnjena u Tablici 1.

SLIKA 3-9: RASPORED PINOVA MSP430 MIKROKONTROLERA



TABLICA 3-1: NAMJENA PINOVA NA MSP430 MIKROKONTROLERU

Ime Pina	Namjena
RST/NMI	Ako je konfiguriran kao RST pin onda dovodenje nule na ovaj pin resetira sistem. Ako je konfiguriran kao NMI pin onda izaziva nemaskirni prekid pri promjeni stanja na pinu.
XBUF	Generirani takt za vanjsku upotrebu.
A0...5	Analogni ulazi za A/D pretvarač.
AVSS	Analogna masa.
DVSS	Digitalna masa.
AVCC	Analogno napajanje.
DVCC	Digitalno napajanje.
SVCC	Referentni napon A/D pretvarača.
Rext	Dodavanjem vanjskog otpora dobije se strujni izvor.
Xin	Ulaz priključak za oscilator.
Xout	Izlaz priključak za oscilator.
Cl	Vajski takt za Timer/Port module.
TP0.0, TP0.1... TP0.5	Timer/Port izlazni port.
P00 P01... P07	8-bitni Ulazno/Izlazni port.
R03, R13... R33	Dovodenje 4 nivoa analognog napona za napajanje LCD displeja (samo kod multipleksirnih načina rada).
S0...S20	Select linije za povezivanje sa LCDom.
COM0... COM3	Com linije za povezivanje sa LCDom.
TDO	Pin za programiranje.
TDI	"
TMS	"
TCK	"

3.5.2. Dovodenje napona i struje trošila

Mikrokontroler uzima uzorke napona sa naponskog djelitelja, koji je spojen na analogni ulaz A4. Pad napona na otporniku koji zaključuje izlaz transformatora predstavlja struju trošila. Ovaj napon se dovodi na analogni ulaz A3.

3.5.3. Izvor referentnog napona

Izvor referentnog napona od +2.5 V je AD1582 čiji su glavne karakteristike prikazane u Tablici 2. Za ispravan rad potrebno je dodati samo dvije vanjske komponente: kondenzator od 4.7 μ F na ulaz i kondenzator od 1 μ F na izlaz.

TABLICA 3-2: IZVOR REFERENTNOG NAPONA AD1582

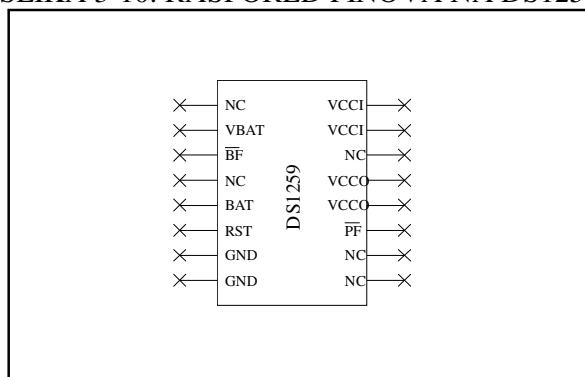
Izlazni napon	+2.5 V
Početna točnost	± 0.1 % max
Temperaturni pomak	± 50 ppm/C max
Izlazna struja	5 mA max
Ulazni napon	$U_{in}=U_{out}+(200\text{mV do }12\text{V})$
Radna temperaturna	-40 C do +85 C

Osim što se koristi za omogućavanje mjerenja napona sa predznakom (podizanje nivoa), referentni napon se u ovom slučaju koristi i za kompenzaciju pogreške nastale promjenom referentnog napona a-d pretvarača. U ovom slučaju napon napajanja je +5 V s točnošću od $\pm 5\%$.

3.5.4. Integrirani krug za upravljanje napajanjem

Integrirani krug DS1259 detektira nestanak napona napajanja +5 V, u kojem slučaju prespaja napajanje sklopa na bateriju BT (+3V) i javlja mikrokontroleru (PF signal) koji poduzima dalje akcije, u ovom slučaju odlazi u stanje *najniže aktivnosti* (Engl. Low Power), odnosno potrošnje. Nakon ponovnog dolaska primarnog napona napajanja Vcci, napajanje cijelog sklopa se vraća sa baterije na Vcci.

SLIKA 3-10: RASPORED PINOVA NA DS1259



TABLICA 3-3: FUNKCIJE PINOVA NA DS1259

Ime pina	Opis funkcije
NC	Bez funkcije
Vbat	Ulaz za bateriju
BF	Nestanak baterije
BAT	Izlaz za bateriju
RST	Reset ulaz
GND	Masa

PF	Nestanak napajanja
Vcco	Izlazni napon
Vcci	+5 V ulaz

Posebna karakteristika DS1259 komponente je mogućnost *pulsirajućeg reseta* pomoću kojeg se sprječava prespajanje baterije Vbat na izlaz Vcco čak i u slučaju nestanka primarnog napona napajanja Vcci. Pulsirajući reset se primjenjuje prije uskladištenja ili transporta uređaja kada je nepoželjna bilo kakva potrošnja sklopa. Sklop se dovodi u opisano stanje impulsom na ulaz RST u trajanju od najmanje 50 nsec. Nakon primjene pulsirajućeg reseta izlazi Vcco i BAT će biti u stanju visoke impedancije. Sljedeći put kad se priključi napajanje Vcci tako da je $Vcci > Vbat$, nastavit će se normalan rad sklopa, kada će izlazni napon Vcco biti spojen ili na ulazni napon napajanja Vcci ili na napon baterije Vbat.

3.5.5. Oscilator

Takt mikrokontrolera određuje kristal X1 frekvencije oscilatora 32768 Hz. Oscilator je posebno dizajniran za malu potrošnju. Sve analogne komponente su integrirane u samom mikrokontroleru, izvana treba povezati samo kristal. Neki moduli mikrokontrolera zahtijevaju nisku frekvenciju takta pa koriste samu frekvenciju direktno priključenog kristalnog oscilatora. Za centralnu jedinicu i druge module frekvencija kristala se umnožava (koristi se metoda Frequency Lock Loop). FLL nakon reseta počinje rad sa najnižom frekvencijom, a potrebna frekvencija se dobije *digitalno kontroliranim oscilatorom* (Engl. Digitaly Controlled Oscillator). Frekvencija takta je cjelobrojno umnožena frekvencija oscilatora i iznosi najviše $128 \times 32768 \text{ Hz} = 4.194 \text{ MHz}$.

3.5.6. LCD displej

LCD displeji koriste ambijentalno osvjetljenje za prikaz informacije. Oni sami ne emitiraju svjetlo pa zato imaju jako malu potrošnju. Električni ekvivalent LCD displeja je kondenzator. Elektrode LCD displeja su *back-plane*ovi kontrolirani signalima COMn i segmenti kontrolirani signalima SEGn. Postoji nekoliko načina rada displeja obzirom na broj segmenata i *back-plane*ova, broj korištenih pinova itd.

Mikrokontroler MSP430 ima modul za upravljanje LCDom koji podržava sljedeće načine upravljanja:

- statički način
- 2MUX (dvostruki multipleks) način
- 3MUX način
- 4MUX način

Statički način rada zahtijeva jedan pin za svaki segment (upotrebljava jedan *back-plane*). Metode 2MUX, 3MUX i 4MUX koristi dva, tri i četiri *back-plane*a što im smanjuje broj potrebnih segmenata za dva, tri i četiri puta.

Ovdje korišteni LCD displej (Slika 3-11) ima 56 segmenata. Za pojedine načine upravljanja treba sljedeći broj pinova:

- statički: $(1bp + 56seg) = 57$
- 2MUX: $(2bp + 56/2seg) = 30$

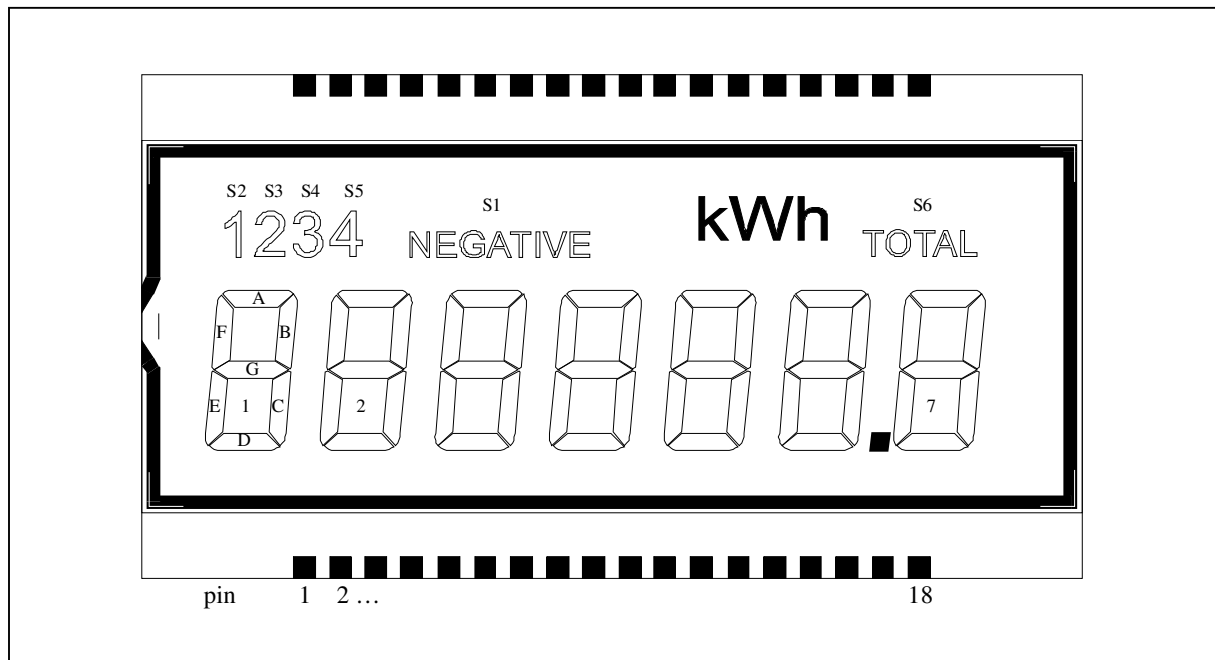
- 3MUX: $\text{int}(3\text{bp} + 56/3\text{seg}) = 22$
- 4MUX: $(4\text{bp} + 56/4) = 18$

Kontrolni registar mikrokontrolera na adresi 030h određuje način rada LCD upravljačkog modula. Informacija koju treba poslati na LCD šalje se u LCD memoriju mikrokontrolera koja se sastoji od 15 8-bitnih memorijskih lokacija koje su smještene u segmentu memorije od memorijske lokacije 031h do memorijske lokacije 03Fh.

U 4MUX načinu rada maksimalan broj segmenata LCD displaya je 120, što znači da je moguće upravljati sa 15 8-segmentnih brojki.

Povezivanje mikrokontrolera s LCD displejem vrši se preko *COM* i *Sel* linija. Za upravljanje displejem u 4MUX načinu rada potrebno je 14 od ukupno 21 *Sel* linije. Ostale *Sel* linije se mogu upotrijebiti kao obične U/I linije. Odabir 14 *Sel* linija je proizvoljan, samo u svakom slučaju treba obratiti pažnju kojoj memorijskoj lokaciji odgovara koja brojka na LCD displeju, a kojem bitu unutar same memorijske lokacije odgovara pojedini segment osam-segmentne brojke.

SLIKA 3-11: IZGLEDEDISPLEJA



LCD displej prikazan na Slici 3-11, potpuno je definiran Tablicom 4.

TABLICA 3-4: DEFINICIJA LCD DISPLEJA

LCDPin	LCD_COM0	LCD_COM1	LCD_COM2	LCD_COM3
1	1F	1G	1E	1D
2	1A	1B	1C	---
3	2F	2G	2E	2D
4	2A	2B	2C	S1
5	3F	3G	3E	3D
6	3A	3B	3C	S2
7	4F	4G	4E	4D
8	4A	4B	4C	S3
9	5F	5G	5E	5D
10	5A	5B	5C	S4
11	6F	6G	6E	6D
12	6A	6B	6C	S5
13	7F	7G	7E	7D
14	7A	7B	7C	S6
15	---	---	---	COM3
16	---	---	COM2	---
17	---	COM1	---	---
18	COM0	---	---	---
19-36	NC	NC	NC	NC

Da bi određeni broj zasvijetlio na LCDu potrebno je ‘upaliti’ pripadajuće segmente. Segmenti se ‘pale’ indirektno, pisanjem u memorijske lokacije od 031h do 03Fh. Povezivanje memorijskih lokacija i samih bitova unutar lokacija sa COM i SEL linijama **mikrokontrolera** prikazano je na Slici 3-12.

SLIKA 3-12: LCD MEMORIJA MIKROKONTROLERA U 4MUX NAČINU RADA

BIT	7	6	5	4	3	2	1	0
	COM3	COM2	COM1	COM0	COM3	COM2	COM1	COM0
03Fh								
...								
...								
034h								
033h								
032h								
031h								
	Sel(n+1)				Sel(n)			

Ukoliko je mikroprocesor povezan sa LCDom na sljedeći način:

TABLICA 3-5: POVEZIVANJE DISPLEJA SA MIKROKONTROLEROM

LCD pin	MSP pin
1	S13
2	S12
3	S11
4	S10
5	S9
6	S8
7	S7
8	S6
9	S5
10	S4
11	S3
12	S2
13	S1
14	S0
15	COM0
16	COM1
17	COM2
18	COM3

onda su pojedini bitovi u memoriji MSPa ‘povezani’ sa segmentima svake brojke LCDa na način prikazan u Tablici 6.

TABLICA 3-6: ODNOS BITOVA I SEGMENTATA

Bit #	7	6	5	4	3	2	1	0
Segment	f	g	e	d	a	b	c	h

Tada je pripadnost memorijskih lokacija pojedinim brojkama LCDa sljedeća:

TABLICA 3-7: ODNOS MEMORIJSKIH LOKACIJA I BROJKI NA LCDU

Mem. Lokacija	Brojka na LCDu
037h	1
036h	2
035h	3
034h	4
033h	5
032h	6
031h	7

Na primjer, da bi na sedmoj brojki (krajnja desna na displeju) zasvijetlio broj 4 potrebno je na memorijsku lokaciju 031h (Tablica 7.) upisati binarni broj 11100110 ($f=1$, $g=1$, $e=1$, $d=0$, $a=0$, $b=1$, $c=1$, $h=0$) (Tablica 6.).

3.5.7. Svjetleća dioda

Svjetleća dioda je priključena na jednu od *select* linija mikrokontrolera. *Select* linije su primarno namijenjene upravljanju LCD displejem, međutim, ove linije imaju i sekundarnu namjenu kada se koriste kao uobičajeni izlazni portovi za slanje digitalnog signala van iz mikrokontrolera. U ovom slučaju nakon svakog nabrojanog Wat-sata na pin S20 šalje se logička jedinica u trajanju od približno 30 msec što je dovoljno da bi dioda bljesnula. Ovim se poštuje zahtjev za stalnicom brojila koja treba iznositi 1000 paljenja-gašenja svjetleće diode po jednom kW-satu.

3.5.8. Kratkospojnici i tipkalo

Kratkospojnici JP1, JP2 i JP3 su namijenjeni posebnim funkcijama. Spajanjem prvog brojilo se kalibrira, a spajanjem drugog trenutni sadržaj izbrajane energije se briše, a spajanjem trećeg mikrokontroler se resetira. Nakon ulaska u proces kalibracije moguće je pritiskom na tipku T1 kalibraciju ponoviti.

Kratkospojnik JP se koristi u modu kalibracije kada se njime strujna grana odvaja od naponske. Na ovaj način se pri kalibraciji ne troši nikakva energija. Kroz strujnu granu se propusti struja kalibracije iz strujnog izvora ($I=10\text{ A}$, $U=0\text{ V}$), a na naponsku se priključi napon kalibracije ($U=230\text{ V}$, $I=0\text{ A}$). Ukupna snaga je $P = U \times I = 0\text{ [W]}$, dakle za vrijeme kalibracije nema potrošnje.

3.6. Mjerenje energije mikrokontrolerom MSP430

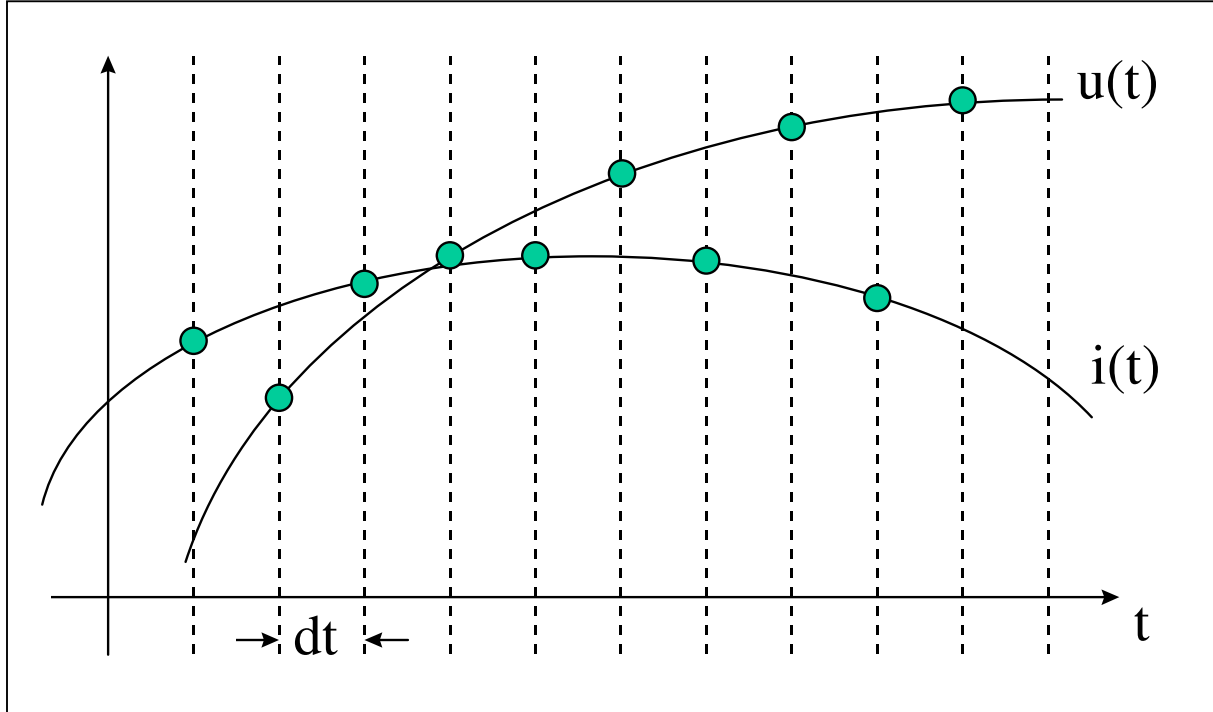
Električna energija se matematički predstavlja formulom:

$$W = \int_{t=0}^{t=+\infty} u(t) \times i(t) \times dt$$

Mjerenje potrošene električne energije pomoću mikrokontrolera MSP430 zasniva se na principu mjerenja struje i napona u unaprijed određenim vremenskim intervalima. Nakon mjerenja svaki uzorak struje se množi sa uzorkom napona da bi se dobio produkt $u(t) \times i(t)$, a zatim se produkti zbrajaju. Njihov zbroj predstavlja potrošenu energiju.

Pri ovakvom mjerenju uzorci struje i napona koji se poslije uzorkovanja množe trebali bi biti uzimani u istim vremenskim trenucima kako je prikazano na Slici 1-1. Mikrokontroler međutim može u jednom trenutku uzorkovati samo jednu veličinu jer ima jedan analogno-digitalni pretvarač. Zato se u ovom slučaju pribjegava drugačijem rješenju: struja i napon se uzorkuju u različitim vremenskim trenucima, s tim da se struja uzorkuje dva puta, jednom prije i jednom poslije napona (Slika 3-13). Stvarna vrijednost struje se dobije kao aritmetička sredina zbrajanjem dvije izmjerene vrijednosti struje i dijeljenjem zbroja sa dva. Ovako se približno dobiva vrijednost struje u istom trenutku kada je mjereno i napon.

SLIKA 3-13: UZORKOVANJE STRUJE I NAPONA S MSP430



U ovom slučaju mjerena energija W iznosi:

$$W = \sum_{t=0}^{t=+\infty} u_n \times \left(\frac{i_{n-1} + i_{n+1}}{2} \right) \times 2\Delta t$$

$$W = \sum_{t=0}^{t=+\infty} u_n \times (i_{n-1} + i_{n+1}) \times \Delta t$$

gdje je:

- W Akumulirana energija [Ws]
- u_n Uzorak napona u trenutku t_n
- i_{n-1} Uzorak struje u trenutku t_{n-1}
- i_{n+1} Uzorak struje u trenutku t_{n+1}
- Δt Vrijeme između dva uzastopna uzorkovanja struje i napona

3.6.1. Pogreške mjerenja

3.6.1.1. Pogreška zbog uzorkovanja struje i napona u različitim vremenskim trenucima

Ovakav način mjerenja unosi određenu grešku koja se može promatrati kao pomak u fazi između struje i napona zbog postojanja konačnog vremena između mjerenja struje i napona.

Ako zanemarimo grešku kvantizacije točan iznos energije bio bi:

$$W_\varphi = \sum_{t=0}^{t=\infty} u_n \times i_n \times \Delta t$$

Neka je pomak u fazi između struje i napona φ . Dodatni pomak uzrokovan mjerenjem struje i napona u različitim vremenskim trenucima neka je $\alpha = \omega\Delta t$. Kako je

$$u_n = U \times \sin(\omega t + \varphi)$$

$$i_n = I \times \sin(\omega t - \alpha)$$

$$i_{n-1} = I \times \sin(\omega t + \alpha)$$

pogreška koja se javlja uslijed dodatnog virtualnog pomaka u fazi α iznosi:

$$e_1 = \frac{W_{\varphi\alpha} - W_\varphi}{W_\varphi} \times 100\%$$

$$e_1 = \left[\frac{\frac{U \times \sin(\omega t + \varphi) \times (I \times \sin(\omega t - \alpha) + I \times \sin(\omega t + \alpha))}{2}}{U \times \sin(\omega t + \varphi) \times I \times \sin \omega t} - 1 \right] \times 100\%$$

$$e_1 = \left[\frac{\sin(\omega t - \alpha) + \sin(\omega t + \alpha)}{2 \times \sin \alpha} - 1 \right] \times 100\%$$

$$e_1 = [\cos \alpha - 1] \times 100\%$$

$$e_1 = [\cos(\omega \Delta t) - 1] \times 100\%$$

Ova pogreška dakle ne ovisi o stvarnom pomaku u fazi φ između struje i napona, nego samo o frekvenciji $\omega = 2 \times \pi \times f$ i o vremenu Δt između uzorkovanja struje i napona. Za sistem frekvencije 50 Hz i vremena uzorkovanja $\Delta t = 200 \mu\text{sec}$ pogreška iznosi **-0,197%**.

Prednosti mjerenja električne energije navedenom metodom su sljedeće:

- Potreban je samo jedan analogno-digitalni pretvarač
- Samo 50% mjerenja (uzorkovanja) je potrebno jer se svaka vrijednost struje upotrebljava dva puta
- Samo 50% množenja je neophodno jer se dvije vrijednosti struje zbrajaju prije množenja

Zbog gore navedenih ušteda mikrokontroler nije opterećen sa mnogo računanja pa ostaje dovoljno vremena za obavljanje drugih aktivnosti koje bi inače obavljale dodatne elektroničke komponente. Sve ovo vodi ka jednostavnijem i jeftinijem uređaju što je jedna od prednosti u slučaju komercijalnog plasmana uređaja.

3.6.1.2. Pogreška kvantizacije

Druga pogreška koja se također javlja je pogreška zbog kvantizacije. Ova pogreška je predstavljena razlikom površina između krivulja stvarne i mjerene snage p_{st} i p_{mj} (Slika 3-14.).

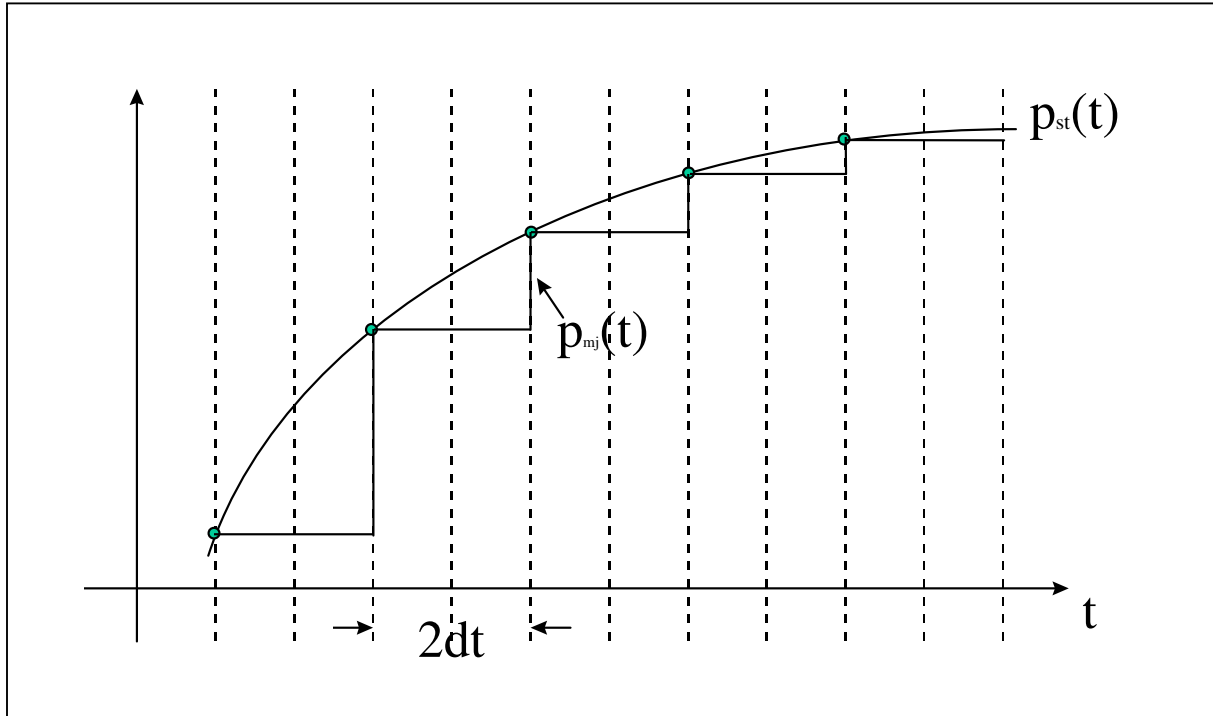
Stvarna vrijednost energije je:

$$W = \int_{t=0}^{t=+\infty} u(t) \times i(t) \times dt = \int_{t=0}^{t=+\infty} I_m \sin \omega t \times U_m \sin(\omega t + \varphi) dt$$

$$\text{uz } \varphi = 0$$

$$W = \int_{t=0}^{t=+\infty} K \sin^2 \omega t dt$$

SLIKA 3-14: POGREŠKA MJERENJA SNAGE



Mjerena vrijednost je:

$$W_{mj} = (U_m \sin \omega t_0 \times I_m \sin \omega t_0 \times 2\Delta t) + (U_m \sin \omega t_1 \times I_m \sin \omega t_1 \times 2\Delta t) + (U_m \sin \omega t_2 + I_m \sin \omega t_2) + \dots$$

$$W_{mj} = K \times 2\Delta t \times [\sin^2 \omega t_0 + \sin^2 \omega t_1 + \sin^2 \omega t_2 + \dots]$$

$$W_{mj} = K \times 2\Delta t \times [\sin^2 \omega \times 0 + \sin^2 \omega \times 2\Delta t + \sin^2 \omega \times 4\Delta t + \dots]$$

$$W_{mj} = K \times 2\Delta t \times \sum_{X=0,1,2,\dots,\infty} \sin^2 \omega \times 2\Delta t \times X$$

Vrijednost pogreške je:

$$e_2 = \frac{W_{mj} - W}{W} \times 100\%$$

Ova pogreška postaje minimalna ukoliko je funkcija snage, matematički gledano, parna funkcija. Tada se pogreška kompenzira. Površina ispod aproksimirane krivulje snage je manja od stvarne u prvoj polovici poluperiode, a za otprilike isti iznos veća u drugoj polovici poluperiode.

3.6.1.3. Pogreška zbog konačne rezolucije a-d pretvarača

Ukoliko je analogno-digitalni pretvarač 14-bitni, a njegov referentni napon 5 V, onda je razlučivost:

$$r = \frac{5V}{2^{14}} = 305 \times 10^{-6} V / bit$$

Promjene napona manje od vrijednosti $305\mu V$ a-d pretvarač *ne vidi*, i daje istu vrijednost bez obzira na promjenu. Pogreška zbog nedovoljne rezolucije analogno-digitalnog pretvarača sve više dolazi do izražaja što su manje veličine struje i napona koje se mjere.

Kod minimalne struje trošila kod koje se još zahtijeva točnost od $\pm 2.5\%$ ($I_t = 5\% I_n = 500mA$) ova pogreška teoretski maksimalno iznosi 1.129%.

Pri izradi sličnih aplikacija pokazuje se da a-d pretvarač mora biti minimalno 14-bitni, dok je za sasvim pouzdan rad potreban 16-bitni.

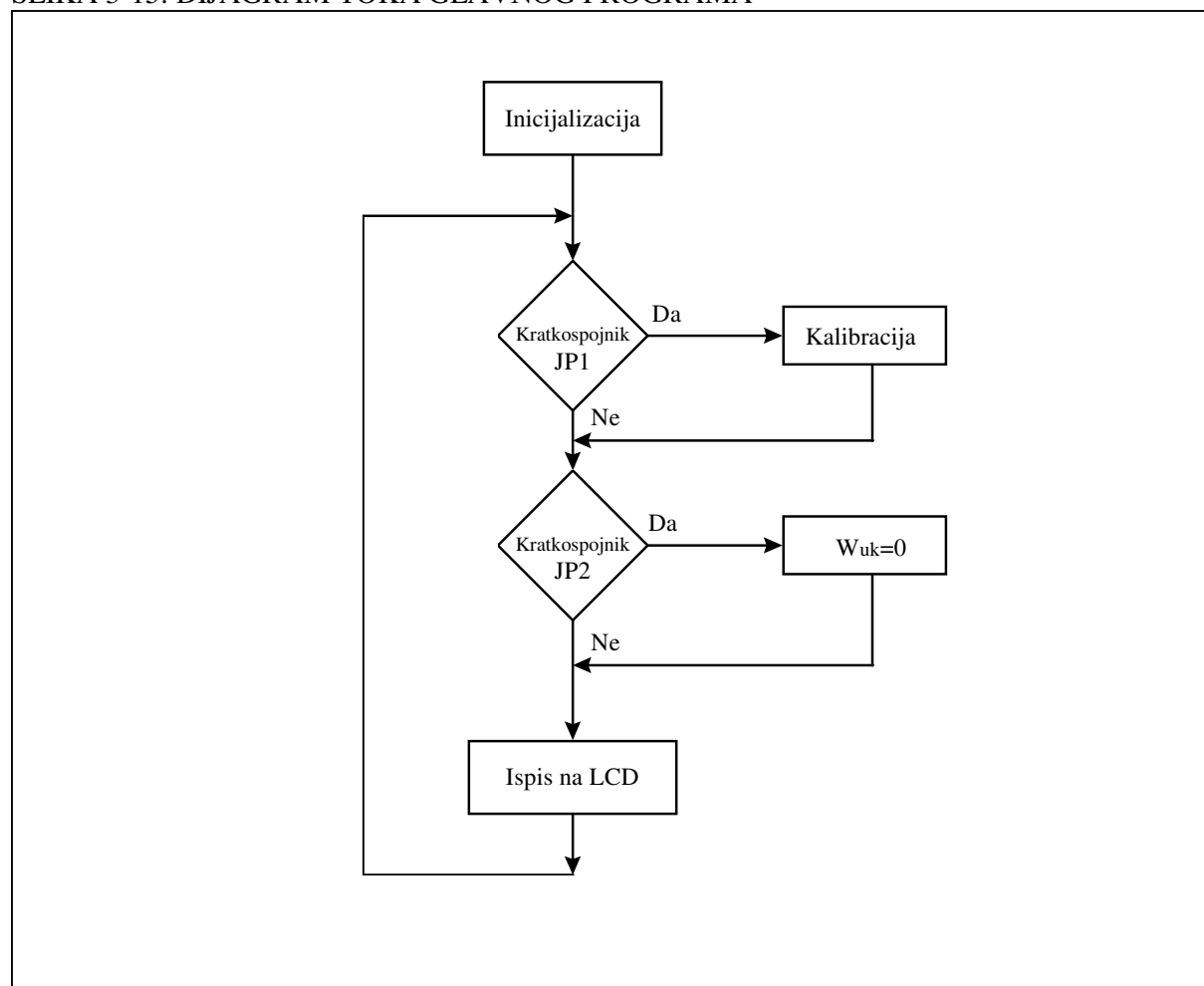
3.7. Programiranje mikrokontrolera

Program koji mikrokontroler izvršava sastoji se iz nekoliko važnijih cjelina. To su inicijalizacija, glavni program, program za obradu prekida i program za kalibraciju.

Na početku mikrokontroler se inicijalizira. Inicijalizacija podrazumijeva postavljanje bitova koji određuju takt rada mikrokontrolera, o(ne)mogućavanje pojedinih prekida, o(ne)mogućavanje pojedinih modula, konfiguriranje brojača, a-d pretvarača, LCD modula, itd. Nakon inicijalizacije izvršava se glavni program koji je u stvari kratka petlja u kojoj se ispituju stanja tipki i kratkospojnika, i vrši ispis trenutne vrijednosti energije na LCD displej. Glavni program se svakih $dt = 200 \mu\text{sec}$ prekida od strane brojača. Obrada prekida se sastoji iz uzorkovanja struje i napona, a zatim i računanja energije, koje ne smije trajati duže od dt . Treća važnija cjelina je program za kalibraciju brojila. Ovaj je dio odvojen od ostatka programa. U kalibraciji brojilo nekoliko sekundi broji energiju koja je zadana poznatim vrijednostima struje i napona (230 V i 10 A), a zatim na osnovu izmjerene i stvarne vrijednosti energije samo računa svoju pogrešku. Nakon povratka u glavni program brojilo počinje brojenje energije ispočetka, ovaj put korigirajući izbrojani iznos energije za grešku izračunatu u kalibraciji.

3.7.1. Glavni program

SLIKA 3-15: DIJAGRAM TOKA GLAVNOG PROGRAMA



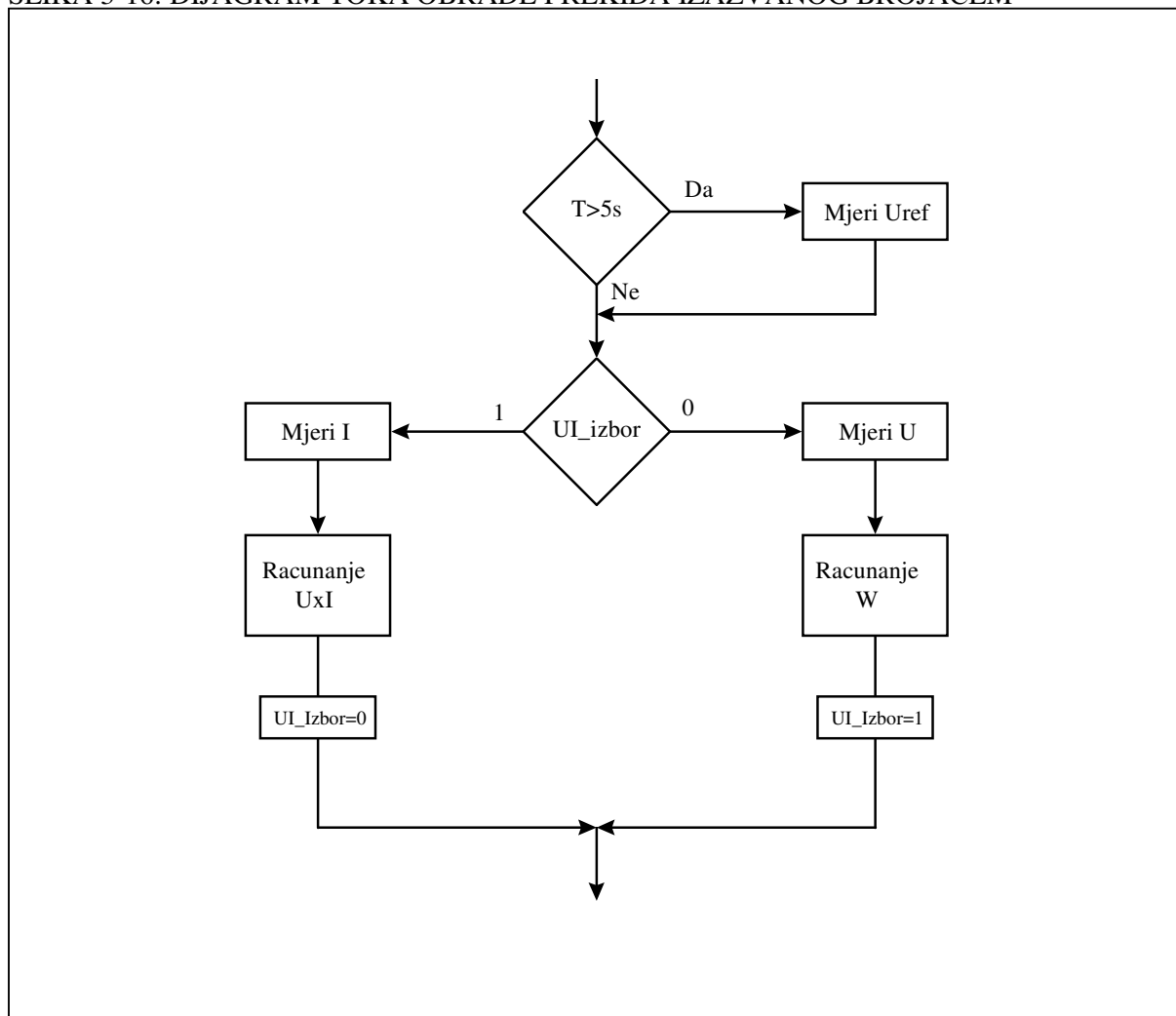
Nakon inicijalizacije sistema program se vrti u glavnoj petlji u kojoj se provjeravaju stanja kratkospojnika i vrši ispis na LCD displej. Kao što je rečeno, glavni program se svakih Δt prekida od strane brojača, nakon čega se obrađuje prekid. Nakon obrade prekida glavni program nastavlja rad od mjesta na kojem je prekinut. Sve radnje u glavnom programu nisu vremenski ograničene tako da je nebitno na kojem mjestu je glavni program prekinut od strane brojača.

3.7.2. Obrada prekida izazvanog brojačem

Brojač izaziva prekid svakih Δt . U programu se naizmjenično mjere napon i struja. Nakon mjerenja vrši se računanje energije. Energija se ne računa odjednom nego je njeno računanje podijeljeno u dva koraka. Ovako se skрати vrijeme prolaska kroz podprogram za obradu prekida, i osigurava da taj prolazak bude kraći od vremena Δt što je neophodno za ispravan rad programa.

Nakon mjerenja struje obavlja se množenje (koje je u pravilu dugotrajno), a u sljedećem prolasku kroz podprogram računa se energija W .

SLIKA 3-16: DIJAGRAM TOKA OBRADE PREKIDA IZAZVANOG BROJAČEM



3.7.2.1. Računanje ukupne energije

Mikrokontroler nakon a-d pretvorbe napona sa svoja tri analogna ulaza dobiva tri digitalna podatka (broja) pomoću kojih treba izračunati stvarni iznos energije u kilowat-satima. Dva podatka se odnose na napon i struju trošila, a treći je izmjerena referentni napon koji se koristi i za korekciju greške nastale zbog promjene napona a-d pretvorbe.

3.7.2.1.1. Korekcija pogreške nastale promjenom referentnog napona a-d pretvarača

Napon a-d pretvarača se mijenja u granicama $5\text{ V} \pm 5\%$. Pogreška se računa pomoću poznate i izmjerene vrijednosti referentnog napona U_{ref} . Naime:

$$U_{ref} = 2.5\text{V}$$

$$U_{a-d} = 5\text{V} \pm 5\%$$

Vrijednost dobivena nakon a-d pretvorbe je:

$$A_{ref} = U_{ref} \times \frac{2^{14}}{U_{a-d}}$$

i ona ovisi o trenutnom iznosu U_{a-d} . Greška se računa prema sljedećem izrazu:

$$G = \frac{A_{refSTV} - A_{refMJ}}{A_{refMJ}} \times 1024$$

$$A_{refSTV} = U_{ref} \times \frac{2^{14}}{5\text{V}} = 2^{13}$$

$$G = \frac{2^{13} - A_{refMJ}}{A_{refMJ}} \times 1024$$

Treba napomenuti da se pogreška ne računa u promilima (1000inke) nego u 1024inkama zbog jednostavnosti množenja i dijeljenja sa 1024 u binarnom brojnom sistemu. Množenje i dijeljenje sa 1024 (2^{10}) se dobije pomakom binarnog broja za deset mjesta u lijevo ili desno. Ovim se same operacije množenja i dijeljenja višestruko ubrzaju jer se pomak broja izvodi jednostavno.

Izmjerene vrijednosti napona i struje trošila se korigiraju za izračunatu grešku na sljedeći način:

$$\frac{A_{STV} - A_{MJ}}{A_{MJ}} \times 1024 = G$$

$$A_{STV} = A_{MJ} \pm A_{MJ} \times \frac{G}{1024}$$

uz

$$A_{MJ} = U \times \frac{2^{14}}{U_{a-d}}$$

Vrijednost A_{MJ} je 14-bitni broj dobiven iz a-d pretvarača.

I pri gornjem računanju nove točnije vrijednosti izmjerene veličine (struje ili napona) mikrokontroler se ne opterećuje množenjem niti dijeljenjem. Korekcija A_{MJ} se svodi samo na operacije rotiranja i zbrajanja (ili oduzimanja), jer se vrijednosti A_{MJ} dodaje (ili oduzima) vrijednost $\frac{A_{MJ}}{1024}$ i to G puta.

3.7.2.1.2. Proračun energije

Nakon korekcije mjerenih vrijednosti napona i struje računa se dio energije koju ove vrijednosti predstavljaju.

Energija u vremenu Δt je:

$$dW = U_{STV} \times I_{STV} \times 2\Delta t \quad [W \text{ sec}]$$

kako je:

$$U_{STV} = (A_U - A_{ref}) \times \frac{5V}{2^{14}} \times \frac{R1 + R2}{R2} \quad [V]$$

$$I_{STV} = \left(\frac{A_{In-1} + A_{In+1}}{2} - A_{ref} \right) \times \frac{5V}{2^{14}} \times \frac{N}{R3} \quad [A]$$

slijedi:

$$dW = \left[(A_U - A_{ref}) \times \frac{5V}{2^{14}} \times \frac{R1 + R2}{R2} \right] \times \left[\left(\frac{A_{In-1} + A_{In+1}}{2} - A_{ref} \right) \times \frac{5V}{2^{14}} \times \frac{N}{R3} \right] \times \frac{2\Delta t}{1000 \times 3600 \text{ sec}} \quad [kWh]$$

$$dW = (A_U - A_{ref}) \times \left(\frac{A_{In-1} + A_{In+1}}{2} - A_{ref} \right) \times Konst$$

gdje je:

$$Konst = \frac{5V}{2^{14}} \times \frac{R1 + R2}{R2} \times \frac{5V}{2^{14}} \times \frac{N}{R3} \times \frac{2\Delta t}{1000 \times 3600 \text{ sec}}.$$

Ukupna energija jednaka je zbroju:

$$W_{uk} = \sum_0^{\infty} dW$$

Kako mikrokontroler ne stiže u vremenu Δt izvršiti sva računanja potrebno ih je pojednostaviti ili izbjeći. U ovom slučaju moguće je izbjeći množenje sa konstantom $Konst$.

Nakon svakog intervala od $2\Delta t$ mikrokontroler računa sljedeći izraz:

$$dS = (A_U - A_{ref}) \times \left(\frac{A_{In-1} + A_{In+1}}{2} - A_{ref} \right)$$

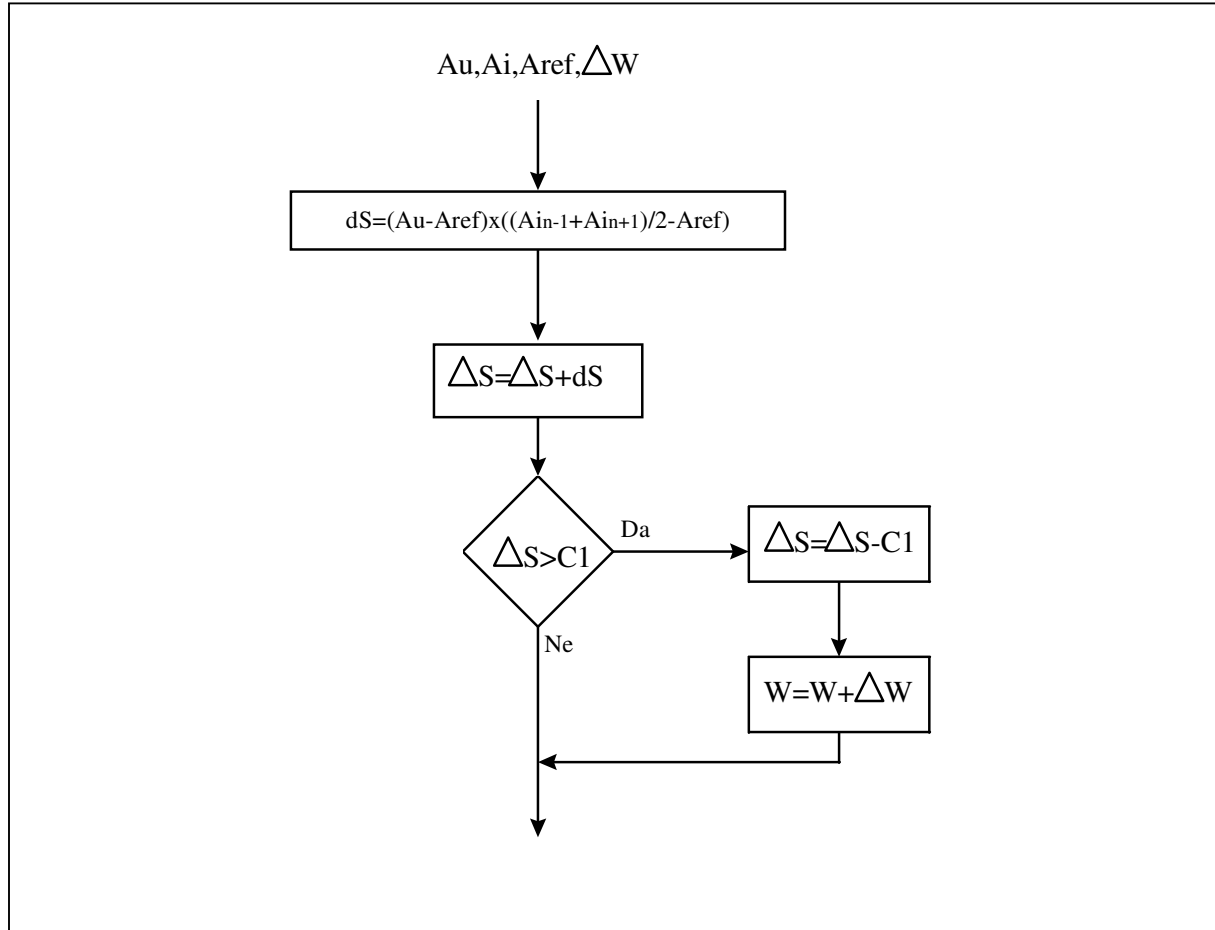
Množenje sa $Konst$ se izbjegava na sljedeći način: nakon računanja parcijalni produkti dS se zbrajaju. U trenutku kada zbroj parcijalnih produkata $\Delta S = \sum dS$ pređe određenu vrijednost (npr. C_1), ukupnoj energiji W se dodaje unaprijed poznat kvant energije ΔW koji je jednak produktu C_1 i $Konst$, a zbroj parcijalnih produkata ΔS se umanjuje za C_1 . Dakle:

$$W_{uk} = \sum \Delta W$$

$$\Delta W = C_1 \times Konst$$

Slika 3-17 pokazuje dijagram toka prilikom proračuna energije.

SLIKA 3-17: DIJAGRAM TOKA RAČUNANJA ENERGIJE



Neka je:

$$\Delta t = 200 \mu \text{sec}$$

$$C_1 = 2^{26}$$

slijedi:

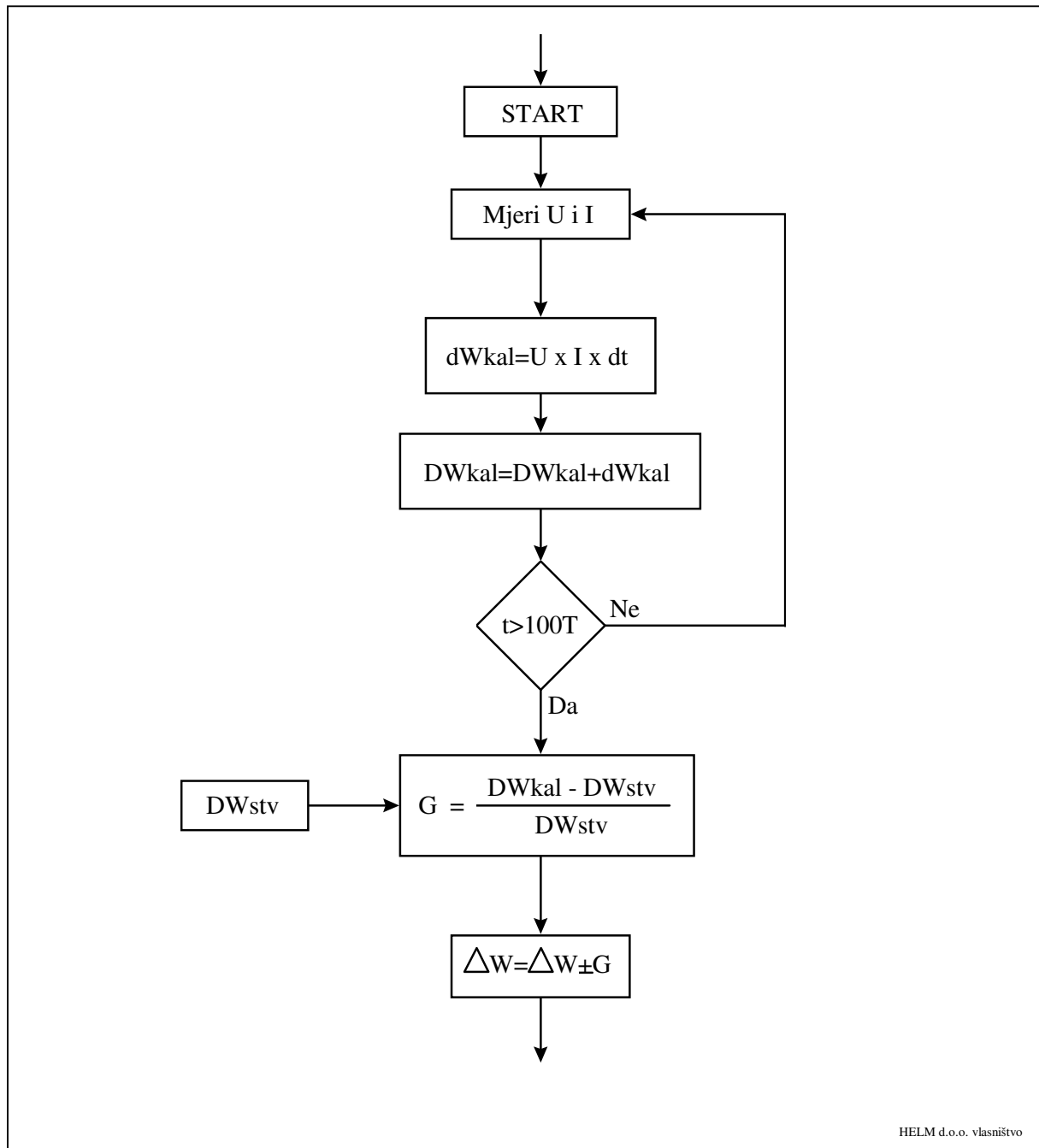
$$\text{Konst} = 5.43 \times 10^{-14}$$

$$\Delta W = 0.000003645695 \text{ kWh}$$

3.7.3. Kalibracija

Kako bi se što više poboljšala točnost brojila, nakon završetka konstrukcije vrši se njegova kalibracija. Pogreška brojila posljedica je nesavršenosti elektroničkih komponenti (tolerancije vrijednosti otpora, utjecaj smetnji, itd.).

SLIKA 3-18: DIJAGRAM TOKA KALIBRACIJE BROJILA



Kalibracija elektroničkog brojila je na neki način auto-kalibracija. Tijek procesa kalibracije je sljedeći:

- brojilu se dovodi točno poznat napon od 230 V i struja od 10 A
- kratko se spoji kratkospojnik i tako brojilu da znak za start kalibracije
- ostatak procesa vrši samo brojilo.

Sam proces kalibracije u brojilu teče ovako: nakon starta tijekom stotinu perioda napona mreže brojilo mjeri energiju. Izmjerena energija u sebi sadrži određenu pogrešku uzrokovanu nesavršenostima komponenti. Pošto je brojilu *poznata* točna vrijednost energije koja za zadani napon, struju i vremenski interval iznosi:

$$DW_{STV} = 220 \times 10 \times 100T_m \quad [kWh]$$

moguće je izračunati pogrešku brojila:

$$p = \frac{DW_{kal} - DW_{STV}}{DW_{STV}} \times 1024$$

Brojilo, dakako, samo izračunava pogrešku.

Konačan cilj računanja pogreške je promjena osnovnog *kvanta* energije ΔW (Slika 3-17). Kvant ΔW se mijenja upravo za iznos izračunate pogreške.

$$\Delta W_{Novo} = \Delta W_{Staro} \pm \frac{\Delta W_{Staro}}{1024} \times G$$

Ukoliko je pogreška pozitivna, odnosno brojilo broji više nego što treba, kvant ΔW će se smanjiti, i obrnuto, ako pokazuje manje ΔW će se povećati. Kada se brojilo ponovno vrati normalnom radu pokazivat će za $p\%$ veću ili manju energiju nego što bi je pokazivalo prije kalibracije.

Ovakav način kalibracije brojila se naziva *kalibracija u jednoj točki*.

3.8. Nadogradnja brojila

Konstruirano brojilo opisano u ovom poglavlju predstavlja samo osnovni sklop brojila koji vrši funkciju brojenja električne energije, što samo brojilo ne čini kompletnim proizvodom koji bi imao veliku prednost nad do sada najviše upotrebljavanim elektromehaničkim brojilima. Da bi ovo brojilo postalo kompletno potrebno je, kao prvo, dodati sistem za prebacivanje većeg broja tarifa (ili vlastiti uklopni sat ili MTK prijemnik), a nakon toga i sistem za daljinsku komunikaciju. Također, moguće je po potrebi dodati funkcije mjerenja jalove energije, $\cos \varphi$, i dr.

4. BUDUĆNOST ELEKTRONIČKIH BROJILA

Mnoga desetljeća unazad elektromehanička brojila su bila jedina brojila električne energije. Iako rade stabilno i točno, danas više ne zadovoljavaju sve zahtjeve postavljene pred brojila električne energije.

U današnje vrijeme svaka je ušteda energije dragocjena. Da bi bilo moguće štedjeti, odnosno racionalnije raspolagati energijom potrebno je prvo na zadovoljavajući način bilježiti potrošnju energije, onda je analizirati i tek naknadno poduzimati odgovarajuće akcije. Elektromehanička, za razliku od elektroničkih brojila, nemaju nikakvu mogućnost bilježenja niti obrade podataka o potrošnji energije. Integracija mikroračunala u brojila električne energije daje brojilima mogućnost izvršavanja velikog broja operacija u realnom vremenu koje su prije bile izvršavane jedino 'papirom i olovkom'.

Mnogi parametri su važni pri određivanju električkih karakteristika sistema: wati, vari, udio viših harmonika, faktor snage, itd. Svi ovi parametri mogu biti izračunati u samom mikroračunalu pomoću osnovnih podataka o naponu, struji i faznom kutu između njih.

Razvoj daljinske komunikacije zadnjih godina dao je novi zamah razvoju elektroničkih brojila. Svi gore navedeni podaci sada se mogu i daljinski prenijeti. Tako se dobiva mogućnost manipuliranja velikim brojem brojila sa jednog centralnog mjesta, čime se također štedi, ovaj put i novac i vrijeme.

Prednosti elektroničkih brojila su očite. Pitanje je vremena kada će elektromehanička brojila biti u potpunosti potisnuta i zamijenjena elektroničkim.

PRILOG:

TABLICA P-1: POPIS ELEKTRONIČKIH KOMPONENTI

KOL	NAZIV KOMPONENTE	OZNAKA	OPIS
4	kondenzator	C1,C3,C4,C5	100 nF
1	kondenzator	C2	470 uF
1	kondenzator	C6	1 uF
1	275G	R1	
1	otpornik	R2	200 kOhm
1	otpornik	R3	180 kOhm
1	otpornik	R4	2.7 kOhm
1	otpornik	R5	27 Ohm
3	otpornik	R6,R7,R8	820 kOhm
2	otpornik	R10,R14	10 kOhm
1	otpornik	R11	470 Ohm
4	otpornik	R12,R13,R15,R16	100 kOhm
1	transformator	TR1	E130/2.3VA
1	transformator	TR2	CT60/60
1	gretzov spoj	D1	
1	LCD displej		
1	kratkospojnik vanjski	JP	
3	kratkospojnik	JP1,JP2,JP3	
1	kristal	X1	32768 Hz
1	tranzistor	T1	2N2222
1	svjetleća dioda	D2	
1	DS1258	IC4	
1	baterija	BT	+3V, litium
1	AD1582	IC3	ref, +2,5 V
1	MSP430E325	IC1	
1	78M05	IC2	

Električna shema uređaja

Montažna shema uređaja

Tiskani vodovi s gornje strane

Tiskani vodovi s donje strane

Raspored elemenata na pločici

LITERATURA:

1. *MSP430 Family - Architecture User's Guide and Module Libraray*, Texas Instruments Inc., 1994.
2. *MSP430 Family - Software User's Guide*, Texas Instruments Inc., 1994.
3. *MSP430 Family - Assembly language Tools User's Guide*, Texas Instruments Inc., 1994.
4. *MSP430 Family - Simulation Environment and LCD Editor Manual*, Texas Instruments Inc., 1994.
5. *MSP430 Family - Metering Application Report*, Texas Instruments Inc., 1994.
6. Žagar, M. Kovač, D. Basch, *Uvod u mikroračunala*, Školska knjiga, Zagreb, 1993.
7. Vojislav Bego, *Mjerenja u elektrotehnici*, Tehnička knjiga, 1968.
8. Jeff Harvey, *Advances in electric metering*, <http://www.powervalue.com/art0007/art1.html>
9. Wayne L. Stebbins, *Energy monitoring and metering systems*, <http://www.energyusernews.com/augtest.html>
10. *Electric Energy - Water - Gas Meter EWG 95*, HELM Zagreb, 1997.

SAŽETAK

Diplomski rad se bavi digitalnim (elektroničkim) brojlama električne energije. U sklopu rada konstruiran je i prototip* jednofaznog brojila upotrebom mikrokontrolera MSP430.

Rad se sastoji od četiri poglavlja. U uvodnom poglavlju su ukratko predstavljena i uspoređena elektromehanička i elektronička brojila i načini njihovog rada. U drugom poglavlju je definirano jednofazno elektroničko brojilo čija konstrukcija je glavni zadatak rada. Sama konstrukcija brojila je korak po korak objašnjena u trećem poglavlju na kome je i težište cijelog rada. Pri konstrukciji elektroničkog brojila pošlo se od principijelne blok sheme, koja je kasnije razrađena i dovedena do električne sheme. Na kraju poglavlja analizirane su pogreške konstruiranog brojila. Zaključno poglavlje ukratko predviđa budućnost elektroničkih brojila električne energije.

*Konstrukcija elektroničkog brojila opisana u diplomskom radu izvedena je u laboratoriju tvrtke HELM d.o.o., Zagreb, Božidarevićeva 13, te se rješenja označena u diplomskom radu kao vlasništvo tvrtke mogu koristiti samo u školske, a ne i u komercijalne svrhe bez suglasnosti same tvrtke.

ABSTRACT

The thesis deals with an electronic watt-hour meters. As a part of the work done on the thesis, prototype^{*} of an electronic watt-hour meter containing MSP430 microcontroller, was constructed.

The thesis consists of four chapters. First chapter briefly presents and compares electromechanical and electronic watt-hour meters and the basics of their operation. Second chapter defines single-phase electronic watt-hour meter whose construction is the main goal of the thesis. The electronic watt-hour meter construction itself is described in detail, step by step in the third chapter, which is the focal point of the whole thesis. The starting point of the construction was simplified block-diagram, which was analyzed and at the end brought to the final electrical schematics. At the end of the chapter measurement errors of the constructed watt-hour meter were analyzed. The final chapter shortly predicts the future of the electronic watt-hour meters.

^{*}The construction of the electronic watt-hour meter described in the thesis was done in the HELM d.o.o. company, Zagreb, Božidarevićeva 13, laboratory, therefore the solutions marked in the thesis as *HELM d.o.o. vlasništvo* (Engl. HELM d.o.o. property) may be used only for educational, not for commercial purposes without the approval of the company itself.

ŽIVOTOPIS

Danijel Domazet rođen je 26. veljače 1973. godine u Banjaluci, Republika Bosna i Hercegovina. U Banjaluci završava Osnovnu školu i prva tri razreda Srednje škole elektrotehničkog usmjerenja. Nakon trećeg razreda Srednje škole, u rujnu 1991. godine odlazi u Sjedinjene Američke Države gdje završava zadnji, četvrti razred srednje škole. Nakon jednogodišnjeg boravka u SAD-u vraća se u Republiku Hrvatsku gdje u kolovozu 1992. godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Zagrebu.