

MIKROPROCESORSKO VODENI TRIFAZNI MOSTIČNI USMERNIK

M. Milanović, K. Jezernik, M. Čurkovič

KLJUČNE BESEDE: usmerniki, usmerniki tiristorski, regulacije, regulacije mikroračunalniške

POVZETEK: V članku bomo opisali vpeljavo mikroračunalnika v trifazni tiristorski mostični usmernik. V mikroračunalniku smo združili vse funkcije, ki jih je prej izvajala konvencionalna elektronika. Vgrajenemu mikroračunalniku smo opredelili naslednje funkcije: regulacijo toka in napetosti, meritev toka in napetosti, proženje tiristorjev, vodenje nadzorov in zaščito, za potrebe optimizacije regulatorjev parametrov smo razvili matematični model celotnega procesa. Rezultate, dobljene s simulacijo, smo verificirali na realizirani napravi.

MICROCOMPUTERS CONTROLLER FOR THREE-PHASE THYRISTOR CONVERTER

KEY WORDS: DC-Converter, DC-thyristor converter, Control, Microcomputer control

ABSTRACT: The paper describes the implementation of a microcomputer in a three-phase full wave thyristor converter. The microcomputer includes all the functions which were performed by conventional electronics: control of current and voltage, current and voltage measuring, thyristor firing, protection and supervision. For the optimization of control parameters the mathematical model was developed. The results we got with the simulation are verified on the actual device.

1. UVOD

V napravah energetske elektronike se vedno bolj uveljavljajo tudi mikroračunalniki. Ti omogočajo boljše povezavo med človekom in napravo, opravljajo vodenje naprave in povezujejo več naprav v sistem. Opravljajo tudi diagnostiko naprave, da se preprečijo okvare. Odločili smo se zgraditi trifazni tiristorski mostični mrežno vodeni usmernik, ki ga upravlja mikroračunalnik. Ta mikroračunalnik prioriteten opravlja regulacijo toka in napetosti, meritev toka in napetosti ter proženje tiristorjev, poleg tega pa opravlja še druge prej naštetje funkcije.

Naš usmernik je namenjen za uporabo v telekomunikacijskih napravah. Zato ima vgrajen tudi gladilni filter, ki pa zakomplicira regulacijsko progo.

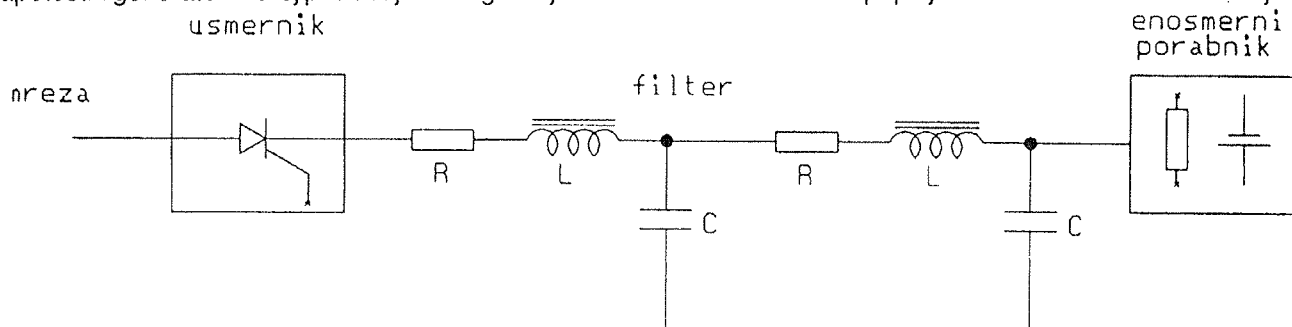
Usmernik napaja porabnike ali polni akumulatorske baterije. Glede na stanje baterije deluje kot tokovni ali napetostni generator. Torej potrebujemo regulacijo toka

in napetosti. Regulatorja sta paralelna, vendar nikoli ne delujeta sočasno.

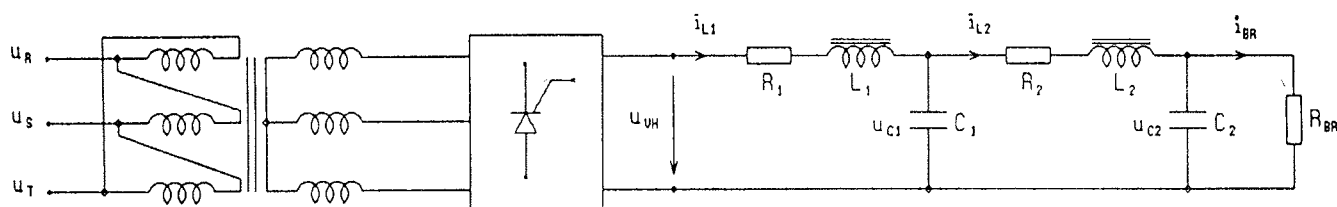
2. SIMULACIJA USMERNIKA

Za določanje parametrov tokovnega in napetostnega regulatorja smo razvili matematični model celotne regulacijske proge. Z njim smo si pomagali pri sintezi regulatorjev v diskretnem časovnem prostoru.

Matematični model obsega mostič s tremi fazno premaknjenimi napajalnimi napetostmi, merilnik toka in napetosti in filter. Pri sami sintezi regulatorja vpeljemo dve poenostavitvi, s katerima si olajšamo nadaljnje delo. Usmerniški blok obravnavamo kot D/A pretvornik, ker nas v intervalu pretvorbe binarne informacije v analogno napetost zanima le srednja vrednost analogne napetosti. Podobno obravnavamo merilni blok kot A/D pretvornik. Na vhod pripeljemo trenutno vrednost merjenega



Slika 1: usmernik z regulacijsko progo

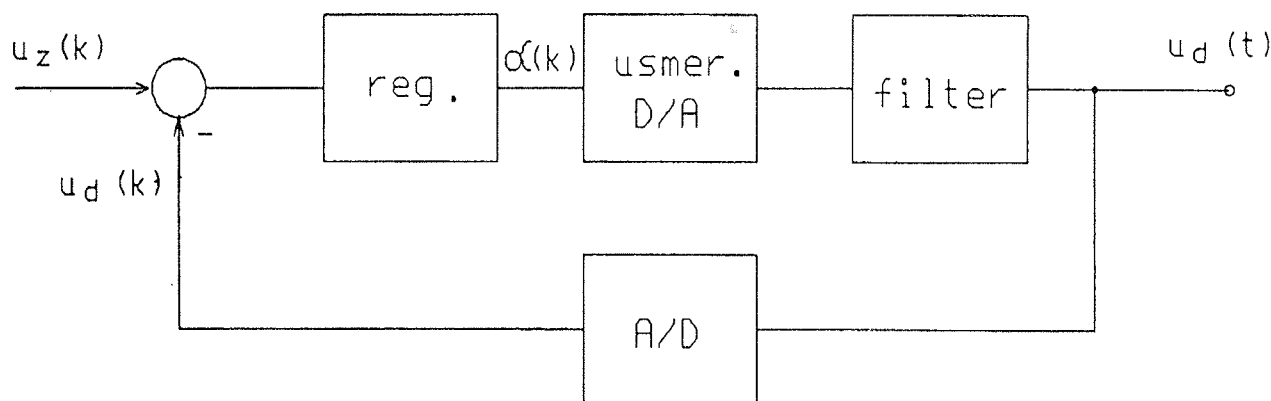


Slika 2: Usmerniško vezje s filtrom

signala, na izhodu pa dobimo po času otipavanja kvantizirano srednjo vrednost merjenega signala. S sliko 3 si lahko sedaj ponazorimo regulacijsko zanko za napetost.

$$s.x(s) = A.x(s) + B.u(s)$$

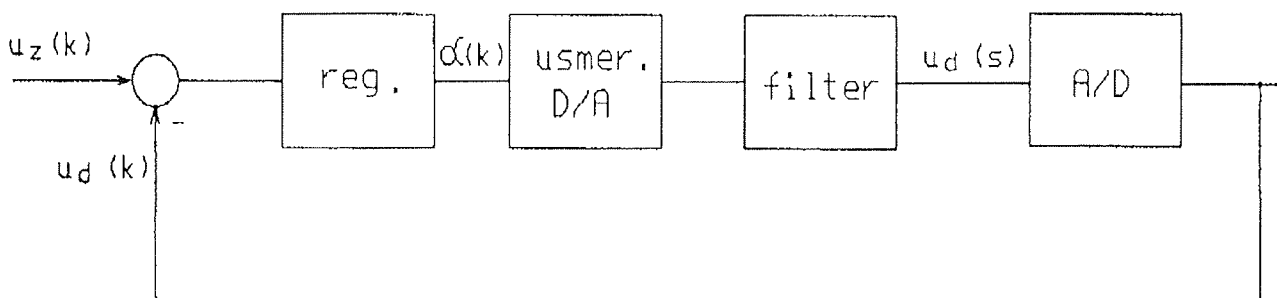
$$y(s) = c^T x(s)$$



Slika 3: napetostna regulacijska zanka

Usmernik je predstavljen z D/A pretvornikom, merilnik pa z A/D pretvornikom. Regulacijsko zanko lahko ponazorimo še s sliko 4.

Iz sistema enačb izračunamo prenosno funkcijo G(s) v "s" prostoru:



Slika 4: napetostna regulacijska zanka prirejena za analiz ov diskretnem prostoru

Takšno regulacijsko zanko lahko sedaj obravnavamo v "z" prostoru, če preslikamo vanj prenosno funkcijo G(s) ter bloka D/A in A/D (L4). G(s) je prenosna funkcija zveznega sistema, ki jo lahko dobimo iz enačb stanja:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = c^T \cdot (sI - A^{-1}) \cdot B$$

Za konkreten primer vzamemo enačbe stanj našega filtra, ki je vgrajen v usmerniku. Če pogledamo sliko 2, lahko zapišemo enačbe stanj:

$$\underline{x}(t) = A \underline{x}(t) + B u(t)$$

$$y(t) = C^T \cdot \underline{x}(t) + D u(t)$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{1}{L_1} (u_{vh} - R_1 i_{L1} - u_{c1})$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{1}{L_2} (u_{c1} - R_2 i_{L2} - u_{c2})$$

Če matriko D izenačimo z nič in naredimo Laplaceovo transformacijo sistema, dobimo:

$$\frac{du_{c1}}{dt} = \frac{1}{c_1} (i_{L1} - i_{L2})$$

$$\frac{du_{c2}}{dt} = \frac{1}{c_2} (i_{L2} - \frac{u_{c2}}{R_{BR}})$$

Spremenljivke stanj so tokovi skozi induktivnosti in napetosti na kondenzatorjih. Enačbe zapišemo z matrikami:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{L1}}{dt} \\ \frac{di_{L2}}{dt} \\ \frac{du_{c1}}{dt} \\ \frac{du_{c2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_1}{L_1} & 0 & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{c_1} & -\frac{1}{c_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_2} & 0 & -\frac{1}{R_{BR} \cdot c_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ u_{c1} \\ u_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_{vh}$$

$$u_{c2} = [0, 0, 0, 1] \cdot \begin{bmatrix} u_{L1} \\ u_{L2} \\ u_{c1} \\ u_{c2} \end{bmatrix}$$

Vstavimo še vrednosti posameznih elementov ($R_1=R_2=10m\Omega$, $L_1=L_2=1mH$, $c_1=c_2=200000 \mu F$, $R_{BR}=0,5$) in dobimo prenosno funkcijo za napetostno regulacijsko zanko:

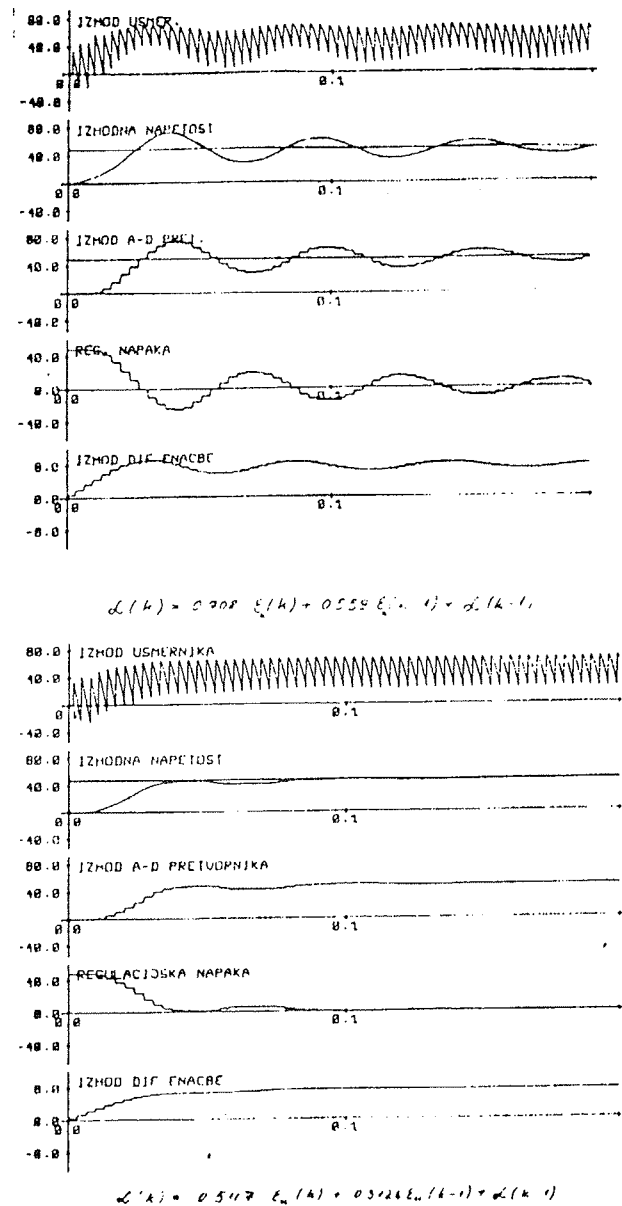
$$G_u(s) = \frac{U_2(s)}{\alpha} (s) = 0,25 \cdot 10^{10} \cdot \frac{1}{0,24 \cdot 10^{10} - 0,851 \cdot 10^7 s + 0,148 \cdot 10^6 s^2 - 80 s^3 + s^4}$$

Prenosno funkcijo filtra $G_u(s)$ in bloka D/A in A/D (slika 8) nato z metodo stopničaste invarijance preslikamo prek "z" prostora v "q" prostor. Narišemo Bodejev diagram, iz njega pa dobimo parametre regulatorja.

Napetostni regulator sedaj zapišemo z diferencialno enačbo:

$$\alpha u(k) = 0,5117 \cdot \epsilon_u(k) + 0,3126 \cdot \epsilon_u(k-1) + \alpha u(k-1)$$

Rezultat simulacije so parametri regulatorjev za tok in napetost modela usmernika. Parametre skaliramo in jih direktno prenesemo na mikroračunalnik. Na sliki 5a in 5b so prikazani rezultati simulacije z izbranimi parametri regulatorja. Rezultati so pri skočni vzbujalni funkciji zadovoljivi, še ugodnejši pa so pri zvezni vzbujalni funkciji - rampi.



Slika 5: a,b: simulacijski rezultati pri dveh različnih diskretnih regulatorjih

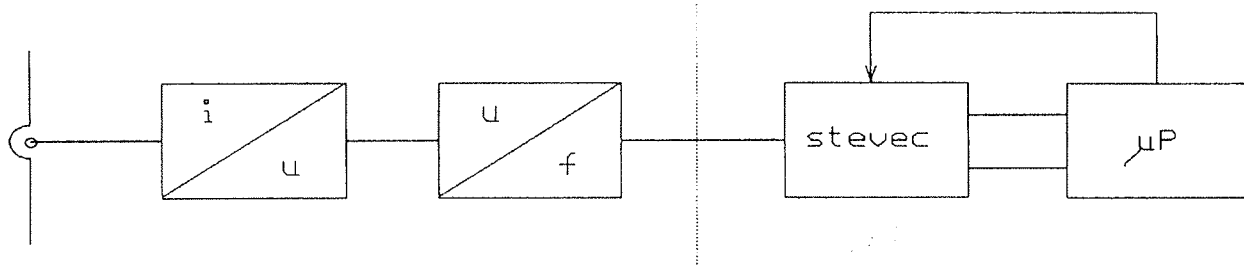
3. REALIZIRANI USMERNIK

3.1. Meritev toka in napetosti

Ugotovili smo, da mora usmernik delovati kot tokovni ali napetostni generator, zato potrebujemo informacije o teh velikostih. Za regulacijo potrebujemo srednje vrednosti toka in napetosti, ki jih lahko dobimo iz izraza:

$$i_{SR} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt$$

Torej moramo v določenem časovnem intervalu dobiti integral neke fizikalne veličine. Lahko bi ga realizirali z analognim integratorjem in analogno digitalnim pretvornikom. Izdelali smo merilnik z digitalnim integratorjem, ki ima nekatere prednosti.

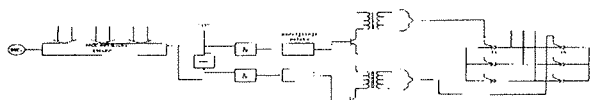


Slika 6: *principialno vezje vmesnika za proženje tiristorjev*

Osnova merilnika je napetostno frekvenčni pretvornik in binarni števec (L2). Vhod je napetost ali tok, izhod pa določeno število pulzov v časovnem intervalu. Binarni števec ima funkcijo integratorja. Prednosti takšnega merilnika so v enostavnejši in cenejši izvedbi, enostavnejši galvanski ločitvi močnostnega dela od mikroročunalnika, hkrati pa nam opravlja celotno meritev toka in napetosti kar mikroročunalnikova periferna enota. Zato meritev časovno ne obremenjuje samega mikroprocesorja.

3.2. Proženje tiristorjev

Proženje je povezano s sinhronizacijo, ker nam sinhronizacija določa tiristor, ki prevaja. Za sinhronizacijo potrebujemo informacijo o prehodih medfaznih napetosti skozi ničelno lego ter o pozitivni in negativni polperiodi medfaznih napajalnih napetosti. Iz teh informacij določamo tiristor, ki dobi prožilni pulz (L1). Ta odločitev se ponavlja ob vsakem prehodu medfazne napajalne napetosti skozi ničelno lego. Poleg tega mora prožilna enota spremeniti informacijo o zamuditvi prožilnega pulza v ustrezen pulz. Prožilno enoto smo zgradili na osnovi programabilnega števca, ki smo ga uporabili za kvantizacijo časovne osi.



Slika 7: *princip meritve toka*

V register števca vpišemo informacijo o zakasnitvi prožilnega pulza. Ko števec pride na ničlo, se na izhodni liniji števca pojavi ozek pulz. Ta pulz določa trenutek, ko moramo sprožiti tiristor. Pulz je potrebno še okrepiti in podaljšati, nato pa ga vodimo na tiristor. Z enim števcem lahko prožimo dva tiristorja, torej potrebujemo za celoten mostič tri takšne programabilne števce. Ti so za mikroročunalnik le pomnilniške celice, hkrati pa predstavljajo tiristorje. Naslov števca in pravi trenutek vpisa podatkov pa nam določa prej omenjeni sinhronizacijski postopek. Proženje prevzame nase v glavnem mik-

ročaunalnikova periferna enota, potreben program pa je kratek in enostaven.

3.3. Regulacija toka in napetosti

Ker izvajamo regulacijo z mikroročunalnikom, smo nadomestili analogni regulator z digitalnim. V praktičnih aplikacijah se je pokazalo, da v glavnem zadostuje PI algoritem, preveden v diskretni prostor. Po izpeljavi (L3) zato zapišemo:

$$y(j) = K (1 + T_s/T_i) \Delta x(j) - K \Delta x(j-1) + y(j-1) ,oz.$$

$$y(j) = K_A \cdot \Delta x(j) - K_B \cdot \Delta x(j-1) + y(j-1)$$

Pri tem je $K_A = K(1 + T_s/T_i)$ in $K_B = K$

T_s je čas otipavanja in je v našem primeru enak času med dvema točkama komutacij, torej 3,3 ms. T_i je časovna konstanta integratorja, K je ojačanje.

Ker enačba predstavlja regulator napetosti ali toka, jo lahko zapišemo še v drugačni obliki:

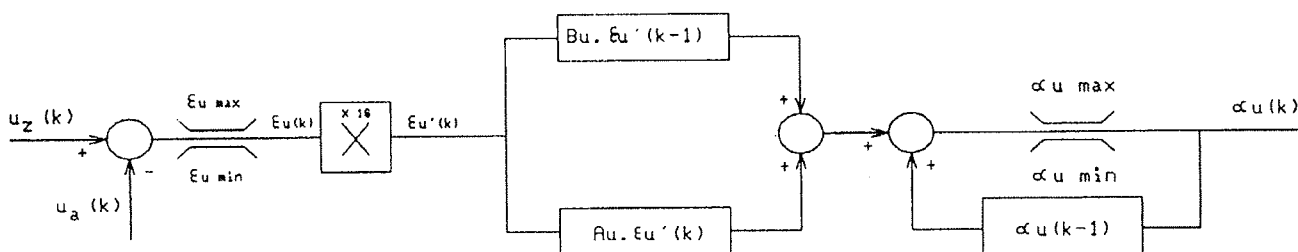
$$\alpha(j) = K_{A_u} \cdot \epsilon_u(j) - K_{B_u} \cdot \epsilon_u(j-1) + \alpha(j-1)$$

To je enačba za regulator napetosti.

Vhodna veličina je regulacijska napaka napetosti $\epsilon_u(j) = u_z(j) - u_d(j)$, izhodna veličina je informacija o zamuditvi prožilnega pulza α . Regulator je ponazorjen z diferenčno enačbo 1. reda, parametra regulatorja sta K_{A_u} in K_{B_u} . Takšna enačba ustreza za reševanje na mikroročunalniku. Težavo predstavlja množenje, ker je program za množenje dokaj zamuden. Problem smo rešili z uporabo aritmetičnega procesorja. Smo pa uporabili celoštevilčno aritmetiko, ker bi nam aritmetika s plavajočo vejico časovno preveč obremenila mikroprocesor. Da ne pride do prekoračitve celoštevilčnega formata pri aritmetičnih operacijah, omejujemo napako $\epsilon_u(j)$ na vходу regulatorja. Omejujemo tudi izhodno veličino $\alpha(j)$, ker je dovoljen vžigni kot med 0 in 150 stopinjami. Enačba za regulator toka je:

$$\alpha(j) = K_{A_i} \cdot \epsilon_i(j) - K_{B_i} \cdot \epsilon_i(j-1) + \alpha(j-1)$$

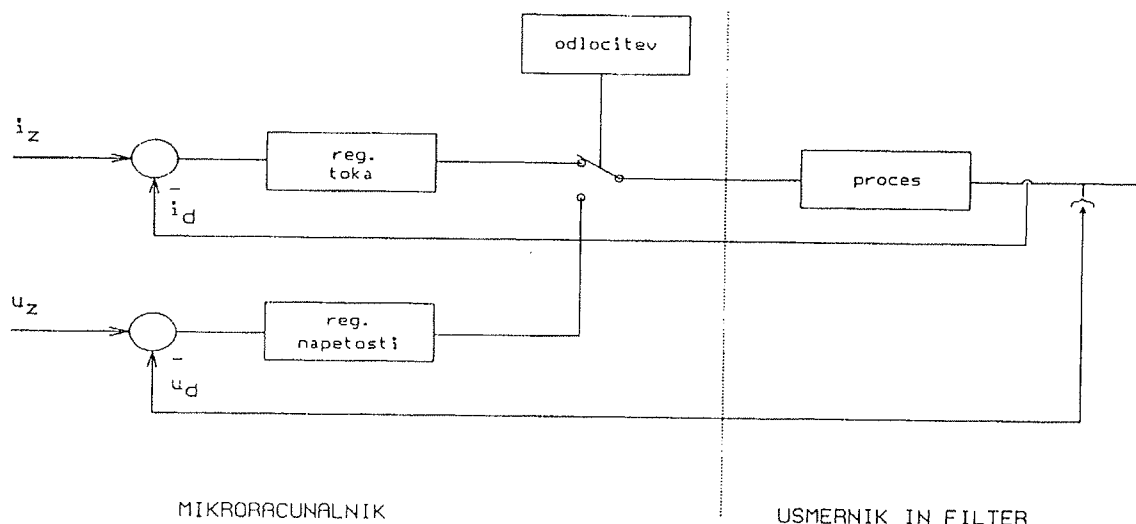
Vhodna veličina je regulacijska napaka toka $\epsilon_i(j) = i_z(j) - i(j)$, izhodna veličina je informacija o zamuditvi prožil-



Slika 8: blokovna shema regulacijskega algoritma

nega pulza. Oba regulatorja sta programsko enaka, razlikujeta se le v vhodnih veličinah in parametrih.

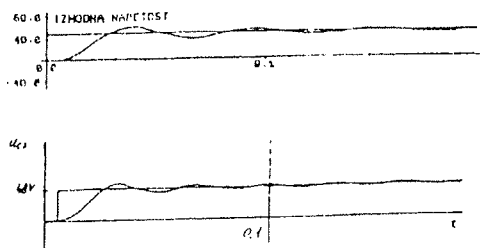
Rezultat računalniške simulacije prikazujeta sliki 10 a in 11 a, sliki 10 b in 11 b pa prikazujeta rezultate, izmerjene na tiristorskem usmerniku.



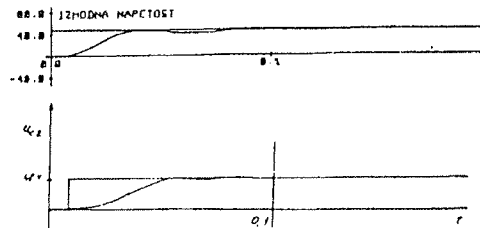
Slika 9: princi pparalelne regulacije

Na sliki 9 je shema naše regulacijske zanke. Merimo tok in napetost na bremenu, z mikroračunalniškim programom za vodenje pa generiramo zelene vrednosti toka in napetosti ter izbiramo regulator toka ali napetosti. Z dobljeno informacijo prožilna enota generira dejanske prožilne pulze za usmernik.

Meritve smo opravili pri vzburjanju usmernika s stopnično funkcijo 48 V. Posneli smo jih s pomočjo osciloskopa z digitalnim spominom in jih nato izrisali na x-y risalnik. Odziva na stopnico na simulacijskem modelu in na realiziranem usmerniku se ujemata. To potrjuje zadovoljivo izdelane simulacijske bloke in metodo simulacije. Vodenje regulatorja z zvezno vzbujujalno funkcijo, torej rampo namesto stopnične funkcije je še ugodnejše. Dobljeni rezultati so zato zadovoljivi.



Slika 10: primerjava simulacijskih merilnih rezultatov z različnimi parametri regulatorja



Slika 11: primerjava simulacijskih merilnih rezultatov z različnimi parametri regulatorja

4. ZAKLJUČEK

Z vgradnjo mikroračunalnika v mostični usmernik je možno realizirati dodatne funkcije, ki opravičujejo višjo ceno naprave. Velik napredek je v komunikaciji med človekom in napravo. Možna je s pomočjo manjše tipkovnice in LCD prikazovalnika ali terminala. Prek tipkovnice vklapljam in izklapljam tiristorski usmernik, izbiramo režim delovanja, vnašamo podatke o želenih vrednostih in karakteristikah. Na zaslonu se izpisuje režim delovanja, izmerjeni tok in napetost na porabniku, čas obratovanja v urah in minutah ter diagnostika, ki je tudi del nove kvalitete. V primeru okvare se naprava samodejno izklopi, napaka pa se izpiše na LCD prikazovalniku ali terminalu. Vgrajena diagnostika skrajša in poenostavi servisiranje, ker mikroračunalnik sam pretestira večje število enot. Ta test opravi tudi pred vsakim vklopom naprave. Vgrajeni mikroračunalnik opravlja tudi funkcijo vodenja. Režim delovanja sicer izbiramo glede na porabnika. Če polnimo akumulatorske baterije, se zahtevajo posebne polnilne karakteristike. S programskim preklapljanjem tokovnega in napetostnega regulatorja lahko realiziramo poljubne polnilne karakteristike. Ob tem lahko napajalnik deluje samostojno, možna pa je povezava več napajalnikov v sistem.

5. LITERATURA

1. M. Milanović, A. Steinbach, K. Jezernik, B. Medved, A. Šuštaršič: Mikroračunalniška prožilna enota tiristorskega šestpulznega omrežno vodenega mostičnega usmernika; Energetska elektronika, Ljubljana 1984.
2. A. Šuštaršič, A. Steinbach, M. Milanović, K. Jezernik, V. Muha: Mikroračunalniški merilnik aritmetične srednje vrednosti toka in napetosti; Energetska elektronika, Ljubljana 1984.
3. H.P.Becker: Entwurf und Realisierung digitaler Regler mit Mikroprozessoren; Elektronik 5/9.3.1984
4. D.Matko: Diskretni regulacijski sistemi; Ljubljana 1984

*M. Milanović,
K. Jezernik,
M. Čurkovič,
Tehniška fakulteta Maribor,
VTO Elektrotehnika, računalništvo in informatika,
Smetanova 17, 62000 Maribor*

Prispelo: 16.05.1989 Sprejeto 06.08.89