

UDK 681.325.2:621.757

Nadaljnji razvoj in obratni preizkusi DDC — sistema za ožičenje

AVTORSKI KOLEKTIV*

I. UVOD

O DDC sistemu za avtomatiziranje postopka za ožičenje pri telefonskih centralah smo že poročali v Strojniškem vestniku [1, 2]. Sistem je namenjen telefonskim centralam, ki jih izdeluje tovarna Iskra-Elektromehanika Kranj. Sedaj že teče redna proizvodnja, vendar je treba sproti odstranjevati še nekatere pomanjkljivosti. V pričujočem sestavku želimo prikazati preizkuse in izboljšave sistema, ki smo jih opravili med testiranjem in med obratovanjem. Sistem vsebuje računalnik, elektronski vmesnik ter programe. Izdelan je tako, da lahko krmili do 20 delovnih mest. Za upravljanje celotnega sistema smo izdelali priročnike in vso potrebno tehnično dokumentacijo z navodili za obratovanje. Konstrukcija spajanja žic sloni na načinu ovijanja (wire-wrap). Ta tehnologija je bila izbrana zato, ker skrajša potreben delovni čas in poveča zanesljivost dela. Postopek sam je v svetu že znan in preizkušen. Poleg posebne optimizacije in krmljenja ter zasedenosti računalnika smo obdelali in izmerili pozicionirni sistem in določili prenosno funkcijo. Izpeljanka sistema za ožičenje telefonskih central je konstrukcija za ožičenje modulov računalnikov, ki smo jo prav tako konstruirali v okviru tega dela. Naprava za ožičenje je bila v celoti izdelana v laboratorijih na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani.

II. OPTIMIZACIJA ZAPOREDJA VEZAV

Izhodišča in načela zgradbe programskega paketa za pripravo podatkov so bili že opisani [1, 2]. Med izdelavo programskega paketa je prišlo do vrste sprememb, ki so jih narekovala nova spoznanja ter ugotovitve in so bile nujne za zanesljivo delovanje sistema.

Vežalne tabele za vodenje zaporedja vezav so pisane po tako imenovanih pravilih za ožičenje, ki upoštevajo vse potrebne pogoje za tehnično izdelavo. Pravila za ožičenje so žal prirejena za ročni način dela. Ročno delo pa se bistveno razlikuje od strojnega. Pravila vsebujejo tudi splošne pogoje. Ti so neodvisni od načina in jih moramo strogo upoštevati. Eno od najpomembnejših pravil je, da ne sme priti do zblizanja žic v različnih nivojih, kar pomeni, da je treba najprej ožičiti vse vezave prvega nivoja in šele potem vezave drugega nivoja. Naš osnovni namen je, da ob nujno potrebnem ročnem delu čim bolj skrajšamo strojne čase. Strojno delo je pomik pozicionirne ročice od enega priključka do drugega. Najdaljša pot za okvir je $100 \times 5,08 =$

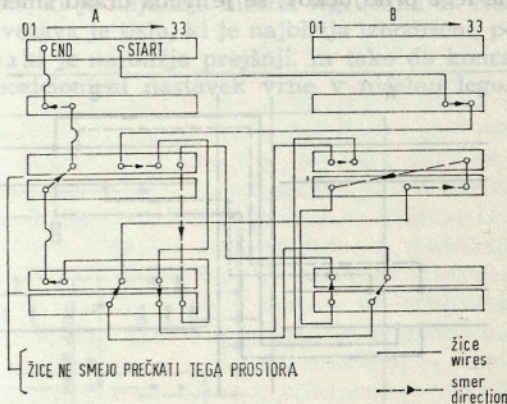
$= 508$ mm. Pri predvideni hitrosti pozicionirnega nastavka $v = 10$ m/min je čas za najdaljšo pot

$$t_{\text{stroja}} = 3,25 \text{ s}$$

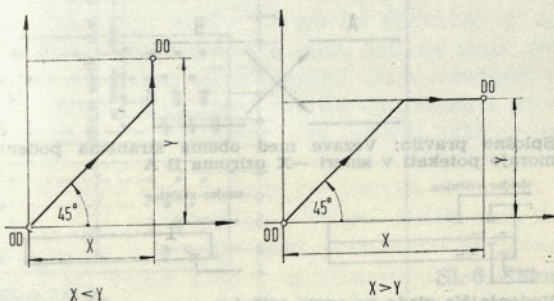
Ročno delo, ki ga opravimo med pomikom naprave traja

$$t_{\text{ročno}} = 4,46 \text{ s}$$

Ročnega časa ne moremo skrajšati. Zato je cilj optimizacije skrajšanje strojnega časa. Osnovno načelo ročne vezave je, da so vezave razvrščene po skupinah glede na dolžino žice. Dokazali smo že [2], da razvrščanje žic po dolžinah ne da nobenega prihranka pri času. To pa zato, ker vzame delavka vedno šop žic z enako dolžino. Zaporedja vezav ni treba ugotavljati po nobenih posebnih pogojih. Praktično vseeno je, katere zveze bomo najprej vzpostavili in katere pozneje. Za optimizacijo je bistveno le, da najdemo najkrajšo pot od prvega priključka (pina) do zadnjega priključka (sl. 1). To zahtevo omejuje sama naprava za ožičenje. V polje ožičenja sega ročica s pozicionirnim nastavkom in pokriva majhno površino. Od vrha priključkov je ročica oddaljena 6 cm. Nastavek vodi pištolo za ovijanje in je oddaljen od vrha priključka 15 mm. Sam nastavek je lahko ovira pri oblikovanju poti žice.



Sl. 1. Načelo optimizacije



Sl. 2. Shema pozicioniranja OD—DO

* Laboratorij za tehnično kibernetiko, obdelovalne sisteme in računalniško tehnologijo (LAKOS) FS.

OD	DO
XXX A YY	XXX A YY
OD1 B 003	DO1 B 003

Sl. 3. Označba za koordinate priključkov

Za priključke in vezalne tabele vpeljemo označbe po sl. 3, kjer pomenijo:

- OD 1 } število vrst v okviru 1—101
- DO 1 }
- OD 3 } številka priključka 1—33
- DO 3 }
- A } stran (polovica) okvira
- B }

Žice lahko razdelimo v štiri osnovne skupine glede na smer oz. medsebojno lego OD priključka in DO priključka:

— Žice z OD priključkom na strani A. Smer vezave teh žic ni problematična, razen v primeru na sl. 4 g.

— Žice z OD priključkom na strani A in DO priključkom na strani B. V tem primeru lahko moti vezavo pozicionirni nastavek in zato moramo smer vezave obrniti (sl. 4 a in 4 b).

— Žice z OD priključkom na strani B in DO priključkom na strani A. Smer vezave teh žic ni problematična (slika 4 a).

— Žice z OD in DO priključkom na strani B. Smer vezave je v tem primeru odvisna od lege priključka glede na vtičnico (slika 4 d). Glede na posamezne lege priključkov, se je treba držati smeri na sliki.

Optimiramo torej lahko, če se držimo zgoraj navedenih štirih pogojev. Načelo najkrajše poti od začetka do konca ožičenja je videti zelo preprosto, v resnici pa pomeni precejšen problem.

V literaturi najdemo načelno enak problem pod imenom »Problem trgovskega potnika« (*Travelling salesman problem*) [3].

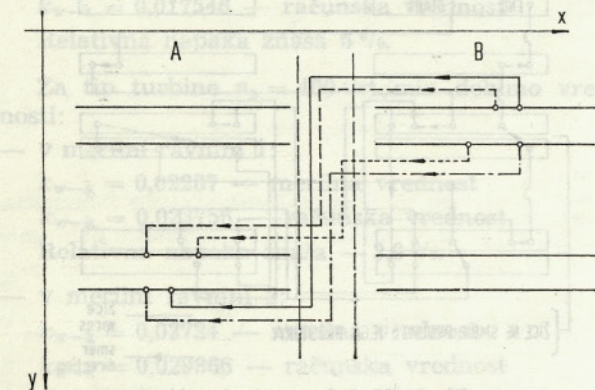
Problem se glasi: Trgovski potnik začne pot v enem mestu in želi obiskati še $n-1$ drugih mest, in sicer enkrat in samo enkrat in se vrniti v mesto, v katerem je začel. V kakšnem zaporedju mora obiskovati mesta, da bo skupna pot najkrajša? Namesto razdalje lahko upoštevamo ceno, ali katero koli drugo merilo, ki naj bi bilo odločujoče. V primeru ožičevanja predstavljajo mesta priključki razdalje med mesti pa poti od ene do naslednje vezave, to je od DO priključka prejšnje vezave do OD priključka naslednje vezave. Problem torej lahko zelo preprosto določimo, vendar ga je zelo težko rešiti. Izbrati moramo namreč med $(n-1)!$ potmi; v našem primeru med $(880-1)!$ priključki! Pravilo v naraščanju časa v odvisnosti od naraščanja števila mest pokaže, da se pri dodajanju desetih mest čas obdelave množi s faktorjem 10. Časi so seveda odvisni od vrste računalnika, ki ga uporabljamo za izračun. Pri računalniku IBM 1130 bi bil čas za obdelavo do 20 mest okrog 2 sekundi, do 30 mest okrog 20 sekund; torej po enačbi

$$t(m + k \cdot 10) = t_m \cdot 10^k$$

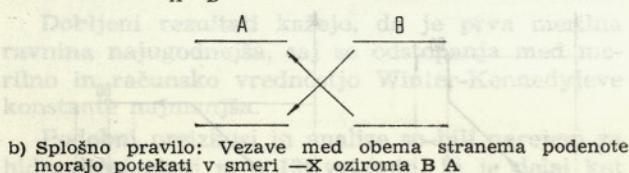
dobimo za $k = 0,1 \dots n$.

V našem primeru bi znašal čas obdelave približno

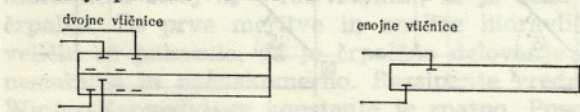
$$t(20 + 78 \cdot 10) = 2 \cdot 10^{78} \text{ s}$$



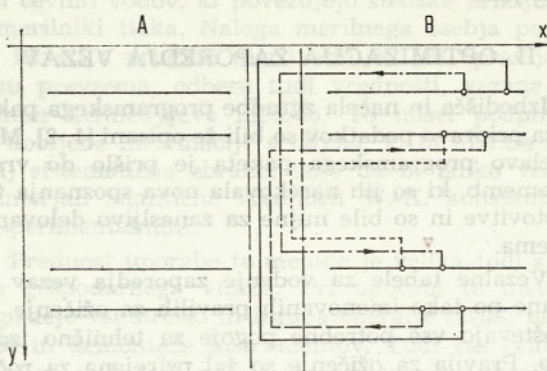
a) vezave B A; $Y_A Y_B$



b) Splošno pravilo: Vezave med obema stranema podenote morajo potekati v smeri $-X$ oziroma B A



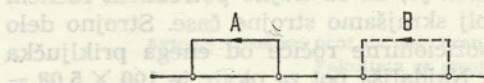
c) Vodenje žic glede na vrsto vtičnice



zakrivanje priključnega polja ne glede na smer vodenja, potrebno umikanje pozicionirnega nastavka
dopustne obe smeri vodenja

d) vezave na strani B

f) vezave na strani A niso problematične



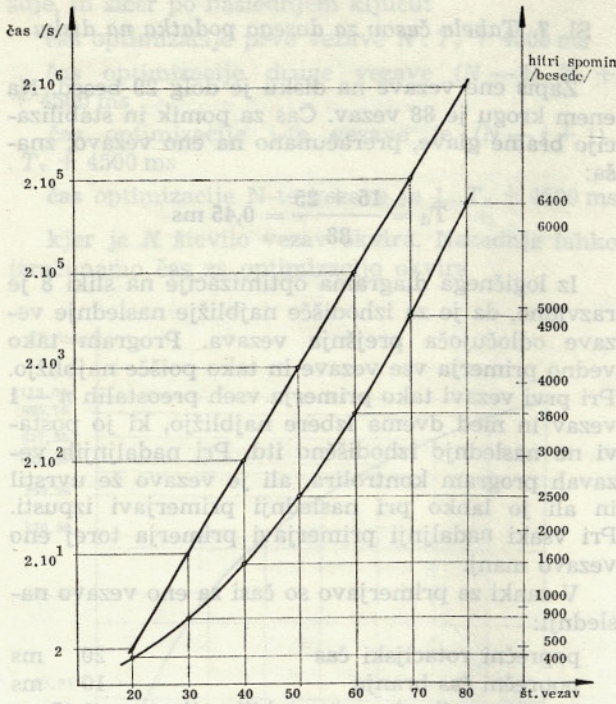
g) splošno pravilo: vse vezave v isti vrsti ($Y_{OD} = Y_{DO}$) morajo potekati v smeri $-X$

Sl. 4. Dopustne smeri gibanja pozicionirnega nastavka glede na odkrivanje priključnega polja

Iz enačbe vidimo, da je tak račun povsem neizvedljiv.

Razmere so razvidne tudi s slike 5.

Pri tej obravnavi pa čas ni edini problem. Močno narašča tudi potreben »hitri spomin« računalnika. Najmanjši potreben prostor, s katerim še lahko shajamo, je n^2 pri upoštevanju, da obe smeri



Sl. 5. Odvisnost časa optimizacije in potrebnega hitrega spomina od števila vezav pri natančnem reševanju

nista enakovredni (sl. 5). Računalnik, ki smo ga lahko uporabljali na Fakulteti za strojništvo — IBM 1130 — ima samo 16 K besed hitrega spomina, tako da natančno tega problema nismo mogli rešiti.

V splošnem lahko problem matematično opišemo z matriko mest (priključkov) $C = c(i, j)$, kjer pomeni člen v vrsti i in koloni j faktor razdalje za pot od priključka i do j . Posamezna pot je niz razvrščenih parov mest:

$$t = (i_1, i_2), (i_2, i_3) \dots (i_{n-1}, i_n), (i_n, i_1)$$

pri pogoju, da je vsak element zastopan samo enkrat. Skupni faktor razdalje za posamezno pot se izrazi z enačbo

$$Z(t) = \left[\sum_n C(i, j) \right]_t$$

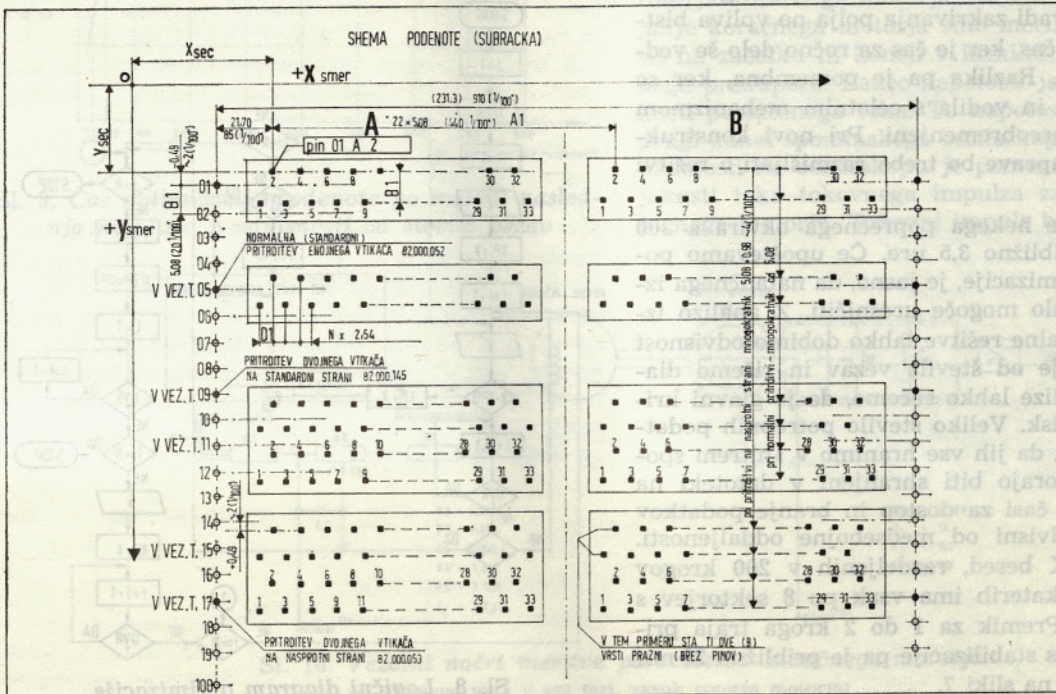
Kadar smeri i, j nista enakovredni smerema j, i , velja:

$$C(i, j) \neq C(j, i)$$

Pri tem problemu se lahko še dodatno zgodi, da so nekatere smeri sploh nedopustne. Pri ožičenju so te smeri prikazane na sliki 4. Faktor razdalje v tem primeru postavimo na

$$C(i, j) = \infty$$

Ker nismo mogli natančno izračunati rešitev, smo se odločili za suboptimalno rešitev, ki je dala povsem zadovoljive rezultate. Načela optimizacije (slika 1) so torej naslednja: začetek je v izhodiščni vezavi, ki je najbližja ničelni legi (slika 6). Naslednja vezava je tista, ki je najbližja izhodiščni, potem tista, ki je najbližja prejšnji, in tako do konca, ko se pozicionirni nastavek vrne v ničelno lego. Pri



Sl. 6. Shema podenote (okvira)

vsem tem pa se moramo nujno izogniti vsem smerem, ki ne ustrezajo pogoju na sliki 4. Pri postopku z upoštevanjem zgornjih pogojev se lahko predpisana smer vezave obrne, tako da se pri optimizaciji primerjata obe smeri vezave $C(i, j)$ in $C(j, i)$. Za nedopustno smer velja seveda $C(i, j) = \infty$. Za razdaljo med vezavama (DO prejšnje do OD naslednje vezave) velja večja koordinata med X ali Y, kakor vidimo na sliki 2. Razdalji X in Y sta v splošnem različni, ker delata oba motorja z enako frekvenco.

Pri primerjanju tega načela optimizacije vezalne tabele z originalno vezalno tabelo je skupna razdalja po optimizaciji najmanj 10-krat krajša od vezave na originalni tabeli. Vzrok je v tem, ker je originalna tabela pisana za ročno delo. Žice na njej so razvrščene po skupinah tako, da pričnemu delati vedno na priključku OD, potegnemo žico do priključka DO, ki je za nekaj vrst naprej, in ponovno pričnemu pri priključku, ki je najbližji prvotnemu priključku OD; namesto, da bi vezali s priključkom OD, ki bi bil najbližji priključku DO prejšnje vezave. Tako je pot med dvema vezavama praktično enaka dolžini poti prejšnje vezave, ker se mora delavka povrniti v bližino prejšnjega začetka, medtem ko je pri optimirani vezalni tabeli pot enaka razdalji do najbližje vezave. Pri tem primerjamo tudi smeri OD DO z DO OD. Učinek optimizacije zmanjšajo seveda omejitve, ki smo jih dobili, ko smo zahtevali, da pozicionirni nastavek ne sme prekrivati polja, ki ga obdelujemo. Iz analize optimizacije, brez upoštevanja pogojev za odkrivanje polja (umikanje) in optimizacije z upoštevanjem vseh pogojev izhaja, da je računalniško izvedena boljše za dva do petkrat od osnovne, originalne tabele, vendar je to odvisno od samega okvira. Omejitve zaradi zakrivanja polja ne vpliva bistveno na končni čas, ker je čas za ročno delo še vedno dovolj velik. Razlika pa je pomembna, ker so koračni motorji in vodila s celotnim mehanizmom za isti faktor preobremenjeni. Pri novi konstrukcijski izvedbi naprave bo treba razmišljati o rešitvi tega problema.

Čas obdelave nekega povprečnega okvira s 300 vezavami je približno 3,5 ure. Če upoštevamo pomenovitve optimizacije, je jasno, da natančnega izračuna ne bi bilo mogoče uresničiti. Z analizo izbrane suboptimalne rešitve lahko dobimo odvisnost časa optimizacije od števila vezav in rišemo diagram. Brez analize lahko rečemo, da je glavni krivec magnetni disk. Veliko število potrebnih podatkov ne dopušča, da jih vse hranimo v »hitrem spominu«. Zato morajo biti shranjeni v datoteki na disku. Potrebni časi za dostop in branje podatkov na disku so odvisni od medsebojne oddaljenosti. Disk ima 512 K besed, razdeljenih v 200 krogov (cilindrov), od katerih ima vsak po 8 sektorjev s 320 besedami. Premik za 1 do 2 kroga traja približno 15 ms, čas stabilizacije pa je približno 25 ms. Tabela časov je na sliki 7.

Gib za cilindar	Čas giba glave (ms)	Čas stabiliz. (ms)	Rotacijski poprečni čas (ms)	Čas razbiranja pisanja (ms)	Skupni čas (ms)
1-2	15	25	20	10	70
3-4	30	25	20	10	85
5-6	45	25	20	10	100

Sl. 7. Tabela časov za dosego podatka na disku

Zapis ene vezave na disku je dolg 29 besed. Na enem krogu je 88 vezav. Čas za pomik in stabilizacijo bralne glave, preračunano na eno vezavo, znaša:

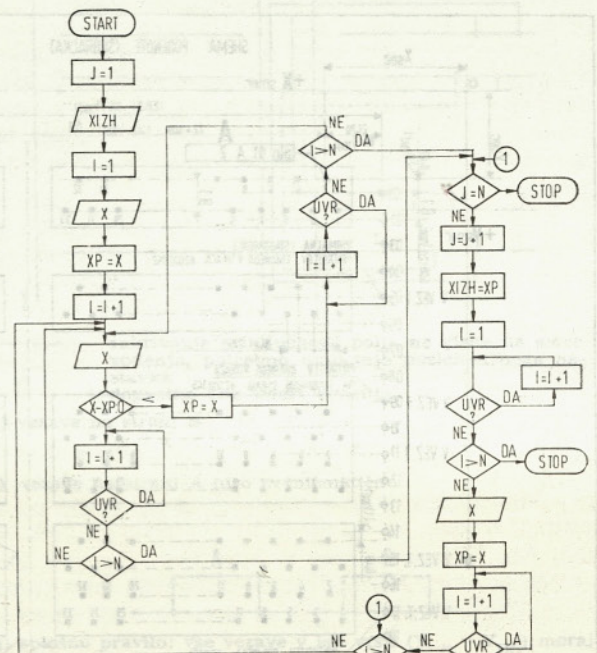
$$T_d = \frac{15 + 25}{88} = 0,45 \text{ ms}$$

Iz logičnega diagrama optimizacije na sliki 8 je razvidno, da je za izhodišče najbližje naslednje vezave odločujoča prejšnja vezava. Program tako vedno primerja vse vezave in tako poišče najbližjo. Pri prvi vezavi tako primerja vseh preostalih $n - 1$ vezav in med dvema izbere najbližjo, ki jo postavi na naslednjo izhodiščno itd. Pri nadaljnjih vezavah program kontrolira, ali je vezavo že uvrstil in ali jo lahko pri naslednji primerjavi izpusti. Pri vsaki nadaljnji primerjavi primerja torej eno vezavo manj.

V zanki za primerjavo so časi za eno vezavo naslednji:

poprečni rotacijski čas	20 ms
poprečni čas branja	10 ms
čas za pomik glave in stabilizacijo	0,45 ms
čas aritmetičnih in logičnih operacij	167 ms

skupaj $T_v = 197,45 \text{ ms}$



Sl. 8. Logični diagram optimizacije

Po končani zanki za primerjavo sledi izpis optimalne vezave na tiskalnik in luknjanje na papirni trak

tiskalnik 1500 ms,
papirni trak 3500 ms.

Čas optimizacije od prve vezave naprej se skrajšuje, in sicer po naslednjem ključu:

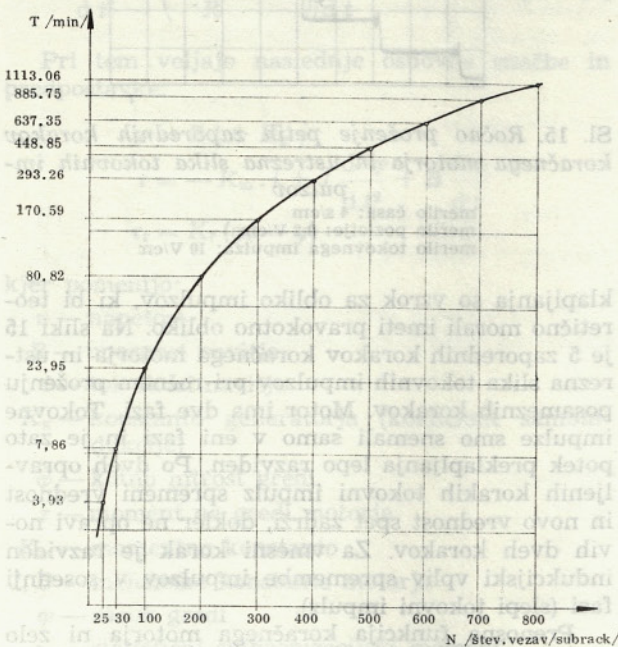
čas optimizacije prve vezave $N \cdot T_v + 4500$ ms

čas optimizacije druge vezave $(N - 1) \cdot T_v + 4500$ ms

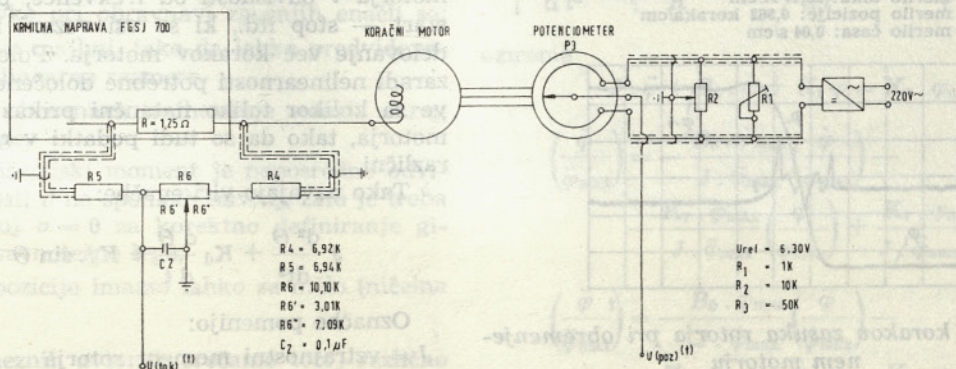
čas optimizacije j-te vezave je $(N - j + 1) \cdot T_v + 4500$ ms

čas optimizacije N-te vezave je $1 \cdot T_v + 4500$ ms

kjer je N število vezav okvira. Nazadnje lahko izračunamo čas za optimizacijo okvira



Sl. 9. Čas optimizacije podenote po metodi naslednja najbližja v odvisnosti od števila vezav



Sl. 10. Vezalni načrt meritve parametrov koračnega motorja (jakost toka v eni fazi, zasuk rotorja motorja)

$$T = \sum_{j=1}^N [(N - j + 1) \cdot T_v + 4500] = \frac{N}{2} \cdot N \cdot T_v + N \cdot 4500 = N \left(\frac{N}{2} \cdot T_v + 4500 \right) [\text{ms}]$$

Po tem obrazcu je narisana diagram na sliki 9. Na abscisi je število vezav, na ordinati pa čas optimizacije v minutah za 1 okvir v logaritmičnem merilu. Iz analize lahko sedaj ugotovimo — presenečeni —, da diskovne operacije sploh niso kritične, temveč je to čas za aritmetične in logične operacije. Vzrok je v podprogramu za optimizacijo, kjer je za vsako vezavo v zanki za primerjavo treba obdelati vse pogoje na sliki 4, kar pa vzame veliko računalniškega časa. Iz analize vidimo, da celo obdelani primer optimizacije, ki ni posebno kompleksen, pomeni velik problem s stališča avtomatične obdelave podatkov in je zato treba v okviru obstoječih računalniških zmogljivostih iskati suboptimalne rešitve.

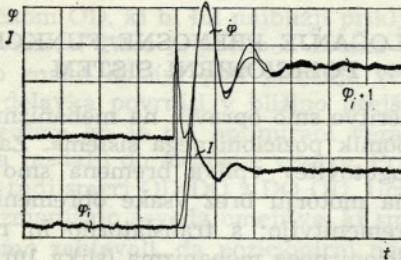
III. DOLOČANJE PRENOSNE FUNKCIJE ZA POZICIONIRNI SISTEM

Vse meritve smo opravili na mehanizmu za vodoravni pomik pozicionirnega sistema. Za primerjavo in ugotovitev vpliva bremena smo opravili meritve na motorju brez vsake obremenitve in s polno obremenitvijo: s translatorno in rotirajočo maso pozicionirnega mehanizma (slika 10).

Na os motorja smo pritrdili linearni potenciomter, napajan s konstantno napetostjo. Napetost smo odvezemali na drsniku in jo vodili na kanal spominskega osciloskopa. Spreminjanje napetosti na osciloskopu je pokazalo zasuk oziroma iznihavanje rotorja koračnega motorja. Na eni od faz za vzbujanje koračnega motorja smo merili padec napetosti na začetku in koncu v krmilni napravi vgrajenega predupora. Padec napetosti je sorazmeren jakosti pretečenega toka. To napetost smo vodili na drugi kanal spominskega osciloskopa. Spreminjanje napetosti na osciloskopu je pomenilo spreminjanje jakosti toka tokovnega impulza za vzbujanje koračnega motorja. Tokovni impulz bi teoretično mo-

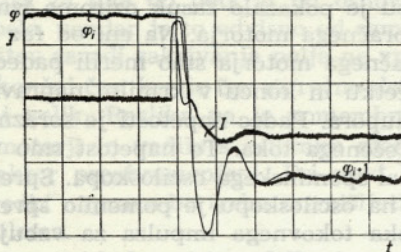
ral pomeniti koračno funkcijo, vendar se zaradi fizikalnih lastnosti uporabljanih naprav pojavljajo tudi pri tokovnem impulzu značilna iznihavanja.

S hkratnim snemanjem tokovnega impulza in zasuka rotorja motorja na spominskem osciloskopu smo lahko ugotavljali dogajanja. Vse pojave smo posneli tudi na magnetofonski trak, da bi omogočili poznejšo reprodukcijo. Na slikah 11 do 15 lahko spremljamo dogajanja. Na sliki 11 vidimo iznihavanje neobremenjenega motorja. Na sliki 12 je iznihavanje motorja z obremenitvijo. Pri obeh zadnjih slikah imamo kot primer s pisalnikom analognega računalnika narisani analogni krivulji. Na sliki 13 je posnetih 5 korakov zasuka rotorja pri obremenjenem motorju. S slike je lepo razvidno, da je že pri frekvenci 138 Hz t zelo enakomeren. Pri zadnjem koraku opazimo značilno iznihavanje. Na sliki 14 so tokovni impulzi na eni fazi motorja pri 16 zaporednih korakih motorja. Prehodni indukcijski pojavi v navitkih motorja in hitrost pre-



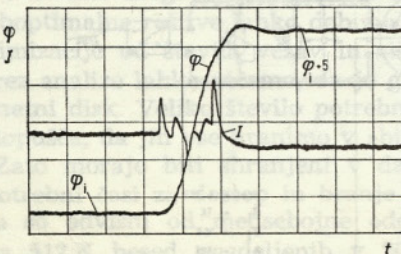
Sl. 11. Iznihavanje rotorja neobremenjenega motorja

merilo toka: 4 V/cm pri 6,367 A/V je 25,47 A/cm
merilo pozicije: 0,04 V/cm pri 0,502 koraka/cm
merilo časa: 0,04 s/cm



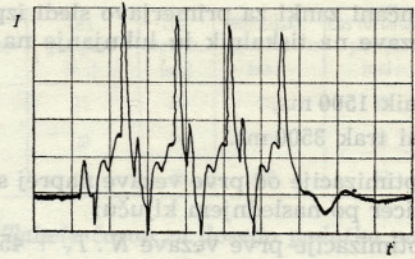
Sl. 12. Iznihavanje motorja z obremenitvijo

merilo toka: 25,47 A/cm
merilo pozicije: 0,562 koraka/cm
merilo časa: 0,04 s/cm



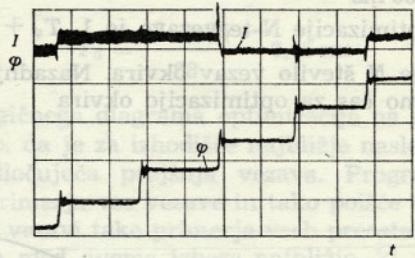
Sl. 13. Pet korakov zasuka rotorja pri obremenjenem motorju

merilo toka: 63,6 A/cm
merilo pozicije: 2,07 koraka/cm
merilo časa: 0,04 s/cm



Sl. 14. Tokovni impulzi na eni fazi motorja pri 16 zaporednih korakih motorja

merilo toka: 25,47 A/cm
merilo časa: 0,04 s/cm



Sl. 15. Ročno proženje petih zaporednih korakov koračnega motorja in ustrezna slika tokovnih impulzov

merilo časa: 4 s/cm
merilo pozicije: 0,2 V/cm
merilo tokovnega impulza: 10 V/cm

klapljanja so vzrok za obliko impulzov, ki bi teoretično morali imeti pravokotno obliko. Na sliki 15 je 5 zaporednih korakov koračnega motorja in ustrezna slika tokovnih impulzov pri ročnem proženju posameznih korakov. Motor ima dve fazi. Tokovne impulse smo snemali samo v eni fazi in je zato potek preklapljanja lepo razviden. Po dveh opravljenih korakih tokovni impulz spremeni vrednost in novo vrednost spet zadrži, dokler ne opravi novih dveh korakov. Za vmesni korak je razviden indukcijski vpliv spremembe impulzov v sosednji fazi (slepi tokovni impulz).

Prenosna funkcija koračnega motorja ni zelo pogosto prikazana v obstoječi literaturi o koračnih motorjih. Vzrok je verjetno v tem, ker je za izračun sistema osnovnega pomena potek momentov motorja v odvisnosti od frekvence, potek krivulje start — stop itd., ki so vsi vezani na zaporedno delovanje več korakov motorja. Poleg tega pa so zaradi nelinearnosti potrebne določene poenostavitve za kolikor toliko natančni prikaz dinamičnega motorja, tako da so tudi podatki v različnih virih različni.

Tako navajajo viri enačbe:

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + K_d \frac{d\theta}{dt} + K_s \cdot \sin \theta = T_L \quad [4]$$

Označbe pomenijo:

J = vztrajnostni moment rotorja

K_d = koeficient dušenja

θ = zasuk

K_s = največji moment motorja

T_L = moment bremena

$$m \ddot{x} + \lambda \dot{x} + f(x) = s \sum_{k=0}^{t/T} \delta(t - kT) \quad [5]$$

kjer so

$\delta(t - kT)$ — impulzna funkcija

t/T — celi del razmerja

$T = \frac{2\pi}{\omega}$ — perioda delovanja impulzov

λ — koeficient dušenja

m — masa

$f(x)$ — nelinearna funkcija — statistični sinhronizacijski moment (to funkcijo približno predpostavimo s sinusom)

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \left(\frac{K_m K_g}{R} + B \right) \frac{d\varphi}{dt} + K_r \varphi = K_r \varphi_c \quad [6]$$

Pri tem veljajo naslednje osnovne enačbe in predpostavke:

$$v = R i + K_g \dot{\varphi}$$

$$\tau = -K_m \cdot i + J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + B \frac{d\varphi}{dt}$$

$$\tau_r = K_r (\varphi_c - \varphi)$$

kjer pomenijo:

v — napetost

R — upornost navitja

i — tok skozi navitje

K_g — konstanto generatorja (koeficient samoindukcije)

$\dot{\varphi}$ — kotno hitrost gredi

τ — moment na gredi motorja

K_m — momentno konstanto

J, B — mehanske konstante motorja

φ — zasuk gredi

τ_r — statistični sinhronizacijski moment

K_r — magnetno momentno konstanto

φ_c — novo pozicijo

Predpostavke pri obravnavi zgornjih enačb so:

a) zasuki so majhni, tako da lahko predvidevamo približno linearne razmere,

b) enačba obravnava iznihavanje rotorja okrog ravnotežne lege,

c) sinhronizacijski moment je neposredno odvisen od napetosti v na sponkah navitij, zato je treba postaviti pogoj $v = 0$ za korektno definiranje gibanja okrog ravnotežne lege,

d) novo pozicijo imamo lahko za ničlo (ničelna lega).

Pri posameznih avtorjih srečamo torej različno obravnavanje zlasti poteka statističnega sinhronizacijskega momenta

$f(x)$ — sinusna funkcija zasuka (zasuk v električnih kotnih stopinjah)

$K_s \cdot \sin \theta$ — sinusna funkcija zasuka

$K_r (\varphi_c - \varphi)$ — linearna funkcija zasuka (zasuk iz ravnotežne lege)

in pa grobo ali bolj precizno razlaganje drugih vplivov, zlasti dušenja, na dinamične lastnosti. Na žalost med podatki za izbrani koračni motor ni nobenih podatkov za ugotavljanje prenosne funkcije, zato smo se odločili za praktično ugotavljanje enačbe in vrednosti posameznih konstant.

IV. OBNAŠANJA KORAČNEGA MOTORJA — SIMULIRANO NA ANALOGNEM RAČUNALNIKU

Meritve smo opravili na analognem računalniku podjetja MEDA 41 TA na Fakulteti za strojništvo. Na osnovi diferencialnih enačb za dinamično obnašanje koračnega motorja pri enakem koraku smo predvideli približno sliko dogajanja. Na računalniku smo realizirali analogno vezje in glede na vzorec dejanskega obnašanja motorja skušali pri simuliranju na analognem računalniku krivulje približati vzorcu. Simulacije — (opravljene seveda v spremenjenem časovnem merilu) — (pisalnik), smo položili (narisane na papir), prek fotografij realnih iznihavanj na motorju. Iz podatkov, dobljenih pri simuliranju procesa na analognem računalniku, smo ugotavljali posamezne zveze in izračunali oziroma določili konstante diferencialne enačbe. Od posameznih diferencialnih enačb za iznihavanje rotorja motorja smo ocenili za najbolj realno enačbo avtorja James A. Cadzowa in Hinricha R. Martensa in jo tudi uporabili pri našem izračunu. Postavljeno diferencialno enačbo smo primerno oblikovali in prevedli v normalizirano obliko, primerno za simuliranje na analognem računalniku. V tej enačbi se pojavijo koeficienti P, Q in S , ki jih lahko določimo po rezultatih, dobljenih na računalniku

$$\left[J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \left(\frac{K_m \cdot K_g}{R} + B \right) \frac{d\varphi}{dt} + K_r \cdot \varphi \right] = K_r \cdot \varphi_c$$

oziroma

$$J \cdot \ddot{\varphi} + B_0 \cdot \dot{\varphi} + K_r \varphi = K_r \cdot \varphi_c$$

$$\left(\frac{\ddot{\varphi}}{\ddot{\varphi}_{\max}} \right) = - \frac{B_0 \cdot \dot{\varphi}_{\max}}{J \cdot \ddot{\varphi}_{\max}} \left(\frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_{\max}} \right) - \frac{K_r \cdot \varphi_{\max}}{J \cdot \ddot{\varphi}_{\max}} \left(\frac{\varphi}{\varphi_{\max}} \right) + \frac{K_r \cdot \varphi_c}{J \cdot \ddot{\varphi}_{\max}} \left(\frac{\varphi_c}{\varphi_c} \right)$$

$$\left(\frac{\ddot{\varphi}}{\ddot{\varphi}_{\max}} \right) = - \frac{B_0 \cdot \dot{\varphi}_{\max}}{J \cdot \ddot{\varphi}_{\max}} \left(\frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}_{\max}} \right) - \frac{K_r \cdot \varphi_{\max}}{I \cdot \ddot{\varphi}_{\max}} \left(\frac{\varphi}{\varphi_{\max}} \right) + \frac{K_r \cdot \varphi_c}{J \cdot \ddot{\varphi}_{\max}} \left(\frac{\varphi_c}{\varphi_c} \right)$$

Normirana oblika diferencialne enačbe

$$\ddot{\Phi} = -P \cdot \dot{\Phi} - Q \cdot \Phi + S \cdot \Phi_e$$

$$P = K_{33}$$

$$Q = 1$$

$$S = K_{34}$$

Za normirano obliko diferencialne enačbe realizirano vezje na analognem računalniku je na sliki 16 in 17. Vrednosti za posamezne elemente (inverter, integrator in potenciometer) so podane na samih slikah. Izbrane so tako, da je mogoče uresničiti pojav v spremenjenem časovnem merilu. Tako je proces dogajanja na računalniku upočasnjen za n -krat ($n = 50$). Realni čas opazovanega procesa znaša 0,08 s, isti proces, simuliran na računalniku, pa $50 \cdot 0,08 = 4$ s.

Za integrator v splošnem uporabljamo osnovno enačbo

$$u_2 = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_1 dt + u(0)$$

Napetost bo v našem primeru pomenila vrednost zasuka φ , zato lahko pišemo

$$\varphi(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t \dot{\varphi}(t) dt + \varphi(0)$$

Za n -krat upočasnjen proces dobi enačba vrednost

$$\varphi(n t) = -\frac{n}{RC} \int_0^{nt} \dot{\varphi}(n t) dt + \varphi(0)$$

Za integracijski proces

$$\varphi(n t) = -\int_0^{nt} \dot{\varphi}(n t) dt + \varphi(0)$$

moramo oblikovati enačbo, ki je po zgradbi enaka prejšnji. Da bi jo lahko uporabili za simuliranje procesa, podanega v normirani obliki diferencialne enačbe, opravimo naslednja preoblikovanja enačbe:

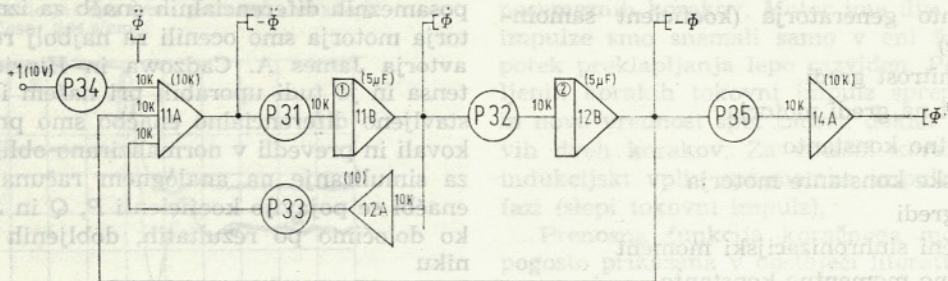
$$\varphi(n t) = -\int_0^{nt} \dot{\varphi}(n t) dt + \varphi(0)$$

$$\varphi(n t) = \frac{RC}{n} \left(-\frac{n}{RC} \right) \int_0^{nt} \dot{\varphi}(n t) dt + \varphi(0)$$

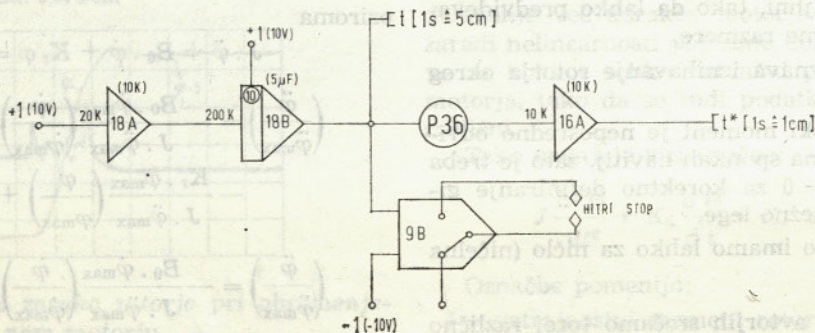
$$\varphi(n t) = \dot{\varphi}_{\max} \frac{RC}{n} \left(-\frac{n}{RC} \int_0^{nt} \frac{\dot{\varphi}(n t)}{\dot{\varphi}_{\max}} dt \right) + \varphi(0)$$

$$\frac{\varphi(n t)}{\varphi_{\max}} = \frac{\dot{\varphi}_{\max}}{\varphi_{\max}} \frac{RC}{n} \left(-\frac{n}{RC} \int_0^{nt} \frac{\dot{\varphi}(n t)}{\dot{\varphi}_{\max}} dt \right) + \frac{\varphi(0)}{\varphi_{\max}}$$

Po navedenem vzorcu lahko napišemo enačbi za konkretna integratorja skupaj s potenciometroma.



Sl. 16. Vežalni načrt meritve na analognem računalniku za simuliranje iznihavanja rotorja koračnega motorja za ordinatate (Φ , $\dot{\Phi}$, $\ddot{\Phi}$) in vrednosti potenciometrov



Sl. 17. Vežalni načrt na analognem računalniku za simuliranje iznihavanja rotorja koračnega motorja za absciso (t)

Integrator 12 B in P 32 ($T = RC = 0,01 \text{ M}\Omega \cdot 5 \mu\text{F} = 0,05 \text{ s}$, $n = 50$)

$$\Phi = \frac{\varphi(n t)}{\dot{\varphi}_{\max}} = \frac{\ddot{\varphi}_{\max}}{\dot{\varphi}_{\max}} \frac{T}{n} \left[-\frac{n}{T} \int_0^{n t} \dot{\varphi}(n t) dt \right]$$

Začetni pogoji so nič, zato integracijska konstanta odpade. Integrator 11 B in P 31 ($T = RC = 0,01 \text{ M}\Omega \cdot 5 \mu\text{F} = 0,05 \text{ s}$, $n = 50$).

$$\dot{\Phi} = \frac{-\dot{\varphi}(n t)}{\dot{\varphi}_{\max}} = \frac{\ddot{\varphi}_{\max}}{\dot{\varphi}_{\max}} \frac{T}{n} \left[-\frac{n}{T} \int_0^{n t} \ddot{\varphi}(n \cdot t) dt \right]$$

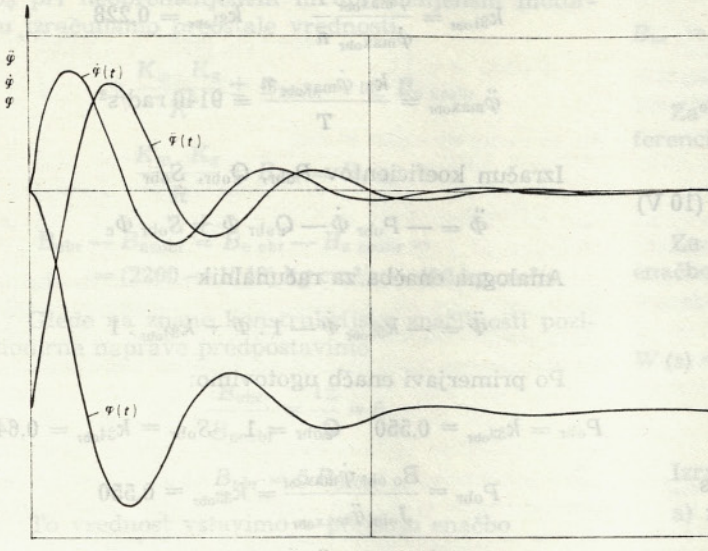
Po shemi na sliki 16 je podana zveza med Φ , $\dot{\Phi}$ in $\ddot{\Phi}$. Z nastavljanjem potenciometrov P 31, P 32 in P 35 smo skušali na računalniku generirano krivuljo čim bolj uskladiti z obliko realnega sistema, snemano na osciloskopu in fotografirano zaradi lažje primerjave (glej sliki 11 in 12). S potenciomet-

rom P 35 in P 36 je mogoče spreminjati razmerja na abscisi in ordinati pisalnika analognega računalnika. Tako je bila omogočena zelo natančna prilagoditev. Pri najbolj podobni in skladni obliki krivulje smo ugotovili vrednost potenciometrov:

	P 31	P 32	P 33	P 34	P 35	P 36
za neobremenjen motor	0,225	0,345	0,640	0,640	0,660	0,2
za obremenjen motor	0,228	0,230	0,550	0,640	0,650	0,2

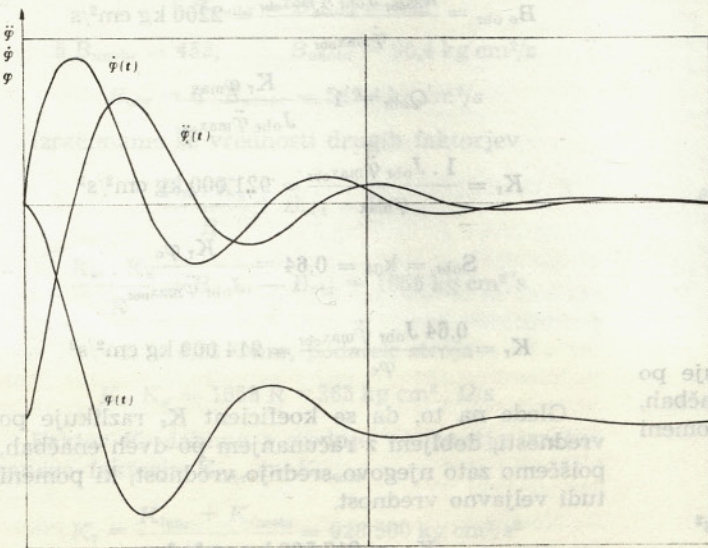
Z neposrednim odvzemanjem napetosti, ki pomenijo Φ , $\dot{\Phi}$ in $\ddot{\Phi}$, smo na pisalniku analognega računalnika realizirali prikaz vseh treh krivulj.

Slika 18 kaže simuliran pojav iznihavanja pri neobremenjenem motorju. Slika 19 pa kaže isti pojav pri obremenjenem motorju. Praktično vrednost pomenita potek vrednosti za kotno hitrost in kotni pospešek, ki lahko rabita za kontrolo izračuna sistema.



Sl. 18. Krivulje za zasuk φ , kotno hitrost $\dot{\varphi}$ in kotni pospešek $\ddot{\varphi}$ za neobremenjen koračni motor v odvisnosti od časa t

merila: čas: 0,0088 s/cm
zasuk: 0,03828 rad/cm
kotna hitrost: 13,486 rad/s/cm
kotni pospešek: 3075,6 rad/s²/cm



Sl. 19. Krivulje za zasuk φ , kotno hitrost $\dot{\varphi}$ in kotni pospešek $\ddot{\varphi}$ za obremenjen koračni motor v odvisnosti od časa t

merila: čas: 0,0088 s/cm
zasuk: 0,03806 rad/cm
kotna hitrost: 9,328 rad/s/cm
kotni pospešek: 2063,6 rad/s²/cm

Koeficiente diferencialne enačbe dobimo:

a) Za neobremenjen motor določimo iz nastavitvene vrednosti najprej $\dot{\varphi}_{\max}$ in $\ddot{\varphi}_{\max}$, ki ju potrebujemo pri izračunu koeficientov

$$k_{32\text{neobr}} = \frac{\dot{\varphi}_{\max} T}{\varphi_{\max} n} \quad \dot{\varphi}_{\max\text{neobr}} = \frac{k_{32} \varphi_{\max} n}{T}$$

$k_{32} = 0,345$ (vrednost potenciometra P 32 za neobremenjen motor)

$\varphi_{\max\text{neobr}} = 0,174$ rad, ustreza 10 V na analognem računalniku

$\dot{\varphi}_{\max\text{neobr}} = 60,0$ rad/s

$$k_{31} = \frac{\ddot{\varphi}_{\max} T}{\dot{\varphi}_{\max} n} \quad \ddot{\varphi}_{\max\text{neobr}} = \frac{k_{31} \cdot \dot{\varphi}_{\max} n}{T}$$

$k_{31} = 0,225$ (vrednost potenciometra P 31 za neobremenjen motor)

$\ddot{\varphi}_{\max\text{neobr}} = 13\,500$ rad/s²

Izračun koeficientov P_{neobr} , Q_{neobr} , S_{neobr}

$$\ddot{\Phi} = -P_{\text{neobr}} \cdot \dot{\Phi} - Q_{\text{neobr}} \cdot \Phi + S_{\text{neobr}} \cdot \Phi_c$$

Analogna enačba za računalnik

$$\ddot{\Phi} = -k_{33\text{neobr}} \cdot \dot{\Phi} - 1 \cdot \Phi + k_{34\text{neobr}} \cdot 1 \quad \Phi_c = 1 \text{ (10 V)}$$

Po primerjavi obeh enačb dobimo

$$P_{\text{neobr}} = k_{33\text{neobr}} = 0,64 \quad Q_{\text{neobr}} = 1 \\ S_{\text{neobr}} = k_{34\text{neobr}} = 0,64$$

$$P_{\text{neobr}} = \frac{B_{0\text{neobr}} \dot{\varphi}_{\max\text{neobr}}}{J \ddot{\varphi}_{\max\text{neobr}}} = k_{33\text{neobr}} = 0,64$$

$$B_{0\text{neobr}} = \frac{J \ddot{\varphi}_{\max\text{neobr}} \cdot k_{33\text{neobr}}}{\dot{\varphi}_{\max\text{neobr}}} = 1748 \text{ kg cm}^2/\text{s}$$

$$Q_{\text{neobr}} = \frac{K_r \varphi_{\max\text{neobr}}}{J \ddot{\varphi}_{\max\text{neobr}}} = 1$$

$$K_r = \frac{J \ddot{\varphi}_{\max\text{neobr}}}{\varphi_{\max\text{neobr}}} = 944\,000 \text{ kg cm}^2/\text{s}^2$$

$$S_{\text{neobr}} = k_{34} = \frac{K_r \varphi_c}{J \ddot{\varphi}_{\max}} = 0,64$$

$$K_r = \frac{J \ddot{\varphi}_{\max\text{neobr}} \cdot 0,64}{\varphi_c} = 936\,000 \text{ kg cm}^2/\text{s}$$

$$K_r = 936\,000 \text{ kg cm}^2/\text{s}$$

Glede na to, da se koeficient K_r razlikuje po vrednosti, dobljeni z računanjem po dveh enačbah, poiščemo zato njegovo srednjo vrednost, ki pomeni tudi veljavno vrednost.

$$K_{r\text{sr}} = \frac{936\,000 + 94\,400}{2} = 940\,000 \text{ kg cm}^2/\text{s}^2$$

Po izračunanih vrednostih koeficientov diferencialne enačbe lahko napišemo enačbo za neobremenjen motor

$$J \ddot{\varphi} + B_0 \dot{\varphi} + K_r \varphi = K_r \varphi_c$$

$$12,15 \ddot{\varphi} + 1748 \dot{\varphi} + 940\,000 \varphi = 940\,000 \varphi_c$$

b) za obremenjen motor

Najprej določimo iz nastavitvene vrednosti potenciometrov vrednosti za $\dot{\varphi}_{\max\text{obr}}$ in $\ddot{\varphi}_{\max\text{obr}}$, ki jih potrebujemo pri izračunu koeficientov.

$$k_{32\text{obr}} = \frac{\dot{\varphi}_{\max\text{obr}} T}{\varphi_{\max} n} \quad k_{32\text{obr}} = 0,230$$

$$\varphi_{\max\text{obr}} = 0,174 \text{ rad}$$

$$\dot{\varphi}_{\max\text{obr}} = \frac{k_{32\text{obr}} \cdot \varphi_{\max} \cdot n}{T} = 40,1 \text{ rad/s}$$

$$k_{31\text{obr}} = \frac{\ddot{\varphi}_{\max\text{obr}} T}{\dot{\varphi}_{\max\text{obr}} n} \quad k_{31\text{obr}} = 0,228$$

$$\ddot{\varphi}_{\max\text{obr}} = \frac{k_{31} \dot{\varphi}_{\max\text{obr}} n}{T} = 9140 \text{ rad/s}^2$$

Izračun koeficientov P_{obr} , Q_{obr} , S_{obr}

$$\ddot{\Phi} = -P_{\text{obr}} \dot{\Phi} - Q_{\text{obr}} \Phi + S_{\text{obr}} \Phi_c$$

Analogna enačba za računalnik

$$\ddot{\Phi} = -k_{33\text{obr}} \dot{\Phi} - 1 \cdot \Phi + k_{34\text{obr}} \cdot 1$$

Po primerjavi enačb ugotovimo:

$$P_{\text{obr}} = k_{33\text{obr}} = 0,550 \quad Q_{\text{obr}} = 1 \quad S_{\text{obr}} = k_{34\text{obr}} = 0,64$$

$$P_{\text{obr}} = \frac{B_{0\text{obr}} \dot{\varphi}_{\max\text{obr}}}{J_{\text{obr}} \ddot{\varphi}_{\max\text{obr}}} = k_{33\text{obr}} = 0,550$$

$$B_{0\text{obr}} = \frac{k_{33\text{obr}} J_{\text{obr}} \ddot{\varphi}_{\max\text{obr}}}{\dot{\varphi}_{\max\text{obr}}} = 2200 \text{ kg cm}^2/\text{s}$$

$$Q_{\text{obr}} = 1 = \frac{K_r \varphi_{\max}}{J_{\text{obr}} \ddot{\varphi}_{\max\text{obr}}}$$

$$K_r = \frac{1 \cdot J_{\text{obr}} \ddot{\varphi}_{\max\text{obr}}}{\varphi_{\max}} = 921\,000 \text{ kg cm}^2/\text{s}^2$$

$$S_{\text{obr}} = k_{34} = 0,64 = \frac{K_r \varphi_c}{J_{\text{obr}} \ddot{\varphi}_{\max\text{obr}}}$$

$$K_r = \frac{0,64 J_{\text{obr}} \ddot{\varphi}_{\max\text{obr}}}{\varphi_c} = 914\,000 \text{ kg cm}^2/\text{s}^2$$

Glede na to, da se koeficient K_r razlikuje po vrednosti, dobljeni z računanjem po dveh enačbah, poiščemo zato njegovo srednjo vrednost, ki pomeni tudi veljavno vrednost.

$$K_{r\text{sr}} = 917\,500 \text{ kg cm}^2/\text{s}^2$$

Po izračunanih vrednostih koeficientov diferencialne enačbe lahko napišemo za obremenjen motor

$$J \ddot{\varphi} + B_o \dot{\varphi} + K_r \varphi = K_r \varphi_c$$

$$17,54 \ddot{\varphi} + 2200 \dot{\varphi} + 917\,500 \varphi = 917\,500 \varphi_c$$

Iz diferencialnih enačb za obremenjen in neobremenjen motor poiščemo diferencialno enačbo za sistem s poljubno obremenitvijo. Pri tem je pogoj, da uporabimo obravnavani koračni motor za pogon sistema.

Izhajamo iz splošne oblike diferencialne enačbe sistema

$$J \ddot{\varphi} + \left(\frac{K_m K_g}{R} + B \right) \dot{\varphi} + K_r \varphi = K_r \varphi_c$$

Koeficient celotne viskoznosti B_o je odvisen od faktorjev K_m , K_g , R in B . K_m , K_g in R so konstantne vrednosti, B pa je različen pri neobremenjenem in obremenjenem motorju. Iz znanih podatkov za B_o pri neobremenjenem in obremenjenem motorju izračunamo preostale vrednosti.

$$\pm \frac{K_m \cdot K_g}{R} \pm B_{\text{neobr}} = \pm B_o \text{ obr}$$

$$\frac{K_m \cdot K_g}{R} + B_{\text{obr}} = B_o \text{ obr}$$

$$B_{\text{obr}} - B_{\text{neobr}} = B_o \text{ obr} - B_o \text{ neobr} = \\ = (2200 - 1748) \text{ kg cm}^2/\text{s} = 452 \text{ kg cm}^2/\text{s}$$

Glede na znane konstrukcijske značilnosti pozicijske naprave predpostavimo

$$\frac{B_{\text{obr}}}{B_{\text{neobr}}} = \frac{12}{2} = 6$$

$$B_{\text{obr}} = 6 B_{\text{neobr}}$$

To vrednost vstavimo v prejšnjo enačbo

$$6 B_{\text{neobr}} - B_{\text{neobr}} = 452$$

$$5 B_{\text{neobr}} = 452, \quad B_{\text{neobr}} = 90,4 \text{ kg cm}^2/\text{s}$$

$$B_{\text{obr}} = 6 \cdot B_{\text{neobr}} = 542,4 \text{ kg cm}^2/\text{s}$$

Izračunamo še vrednosti drugih faktorjev

$$\frac{K_m \cdot K_g}{R} + B_{\text{obr}} = B_o \text{ obr}$$

$$\frac{K_m \cdot K_g}{R} = B_o \text{ obr} - B_{\text{obr}} = 1658 \text{ kg cm}^2/\text{s}$$

$$R = 0,22 \text{ Ohm, podatek stroja}$$

$$K_m K_g = 1658 R = 365 \text{ kg cm}^2 \cdot \Omega/\text{s}$$

Faktor K_r dobimo s srednjo vrednostjo izračunanega faktorja $K_{r\text{obr}}$ in $K_{r\text{neobr}}$

$$K_r = \frac{K_{r\text{obr}} + K_{r\text{neobr}}}{2} = 928\,500 \text{ kg cm}^2/\text{s}^2$$

$$\varphi_c = \frac{2\pi}{56} = 0,1122 \text{ rad}$$

$R = 0,22 \Omega$ (upornost navitja koračnega motorja)

$J = 12,15 \text{ kg cm}^2$ (vztrajnostni moment koračnega motorja)

$B = 90 \text{ kg cm}^2/\text{s}$ (faktor viskoznega trenja koračnega motorja)

Iz tega izhaja dokončna oblika diferencialne enačbe pozicijskega mehanizma za sistem pogona v vodoravni ali navpični smeri

$$(12,15 + J_{\text{br}}) \ddot{\varphi} + (1748 + B_{\text{br}}) \dot{\varphi} + 928\,500 \varphi = \\ = 108\,000$$

J_{br} = vztrajnostni moment priključnega sistema, preračunan na gred koračnega motorja v kg cm^2

$J = 12,15$ — vztrajnostni moment koračnega motorja (rotor) v kg cm^2

B_{br} = faktor viskoznega trenja priključnega sistema, preračunan na gred motorja v $\text{kg cm}^2/\text{s}$.

Za ugotovitev prenosne funkcije izhajamo iz diferencialne enačbe za iznihavanje rotorja motorja:

$$J \cdot \ddot{\varphi} + B_o \cdot \dot{\varphi} + K_r \cdot \varphi = K_r \cdot f(t)$$

Za uporabo Laplaceove transformacije dobimo enačbo:

$$\Phi(s) [J s^2 + B_o s + K_r] = K_r F(s)$$

$$W(s) = \frac{\Phi(s)}{F(s)} = \frac{K_r}{J s^2 + B_o s + K_r} = \frac{1}{\frac{J}{K_r} s^2 + \frac{B_o}{K_r} s + 1}$$

Izračunamo korene karakteristične enačbe:

a) za neobremenjen motor

$$\frac{J}{K_r} s^2 + \frac{B_o}{K_r} s + 1 = 0 \quad \left| \frac{K_r}{J} \right.$$

$$s^2 + \frac{B_o}{J} s + \frac{K_r}{J} = 0$$

$$s_{1,2} = -\frac{B_o \text{ neobr}}{2 J_{\text{neobr}}} \pm \sqrt{\frac{B_o^2 \text{ neobr}}{4 J_{\text{neobr}}^2} - \frac{K_r}{J_{\text{neobr}}}} =$$

$$= -72 \pm i \cdot 267 = a \pm ib$$

$$a = -72 \text{ s}^{-1}$$

$$b = 267 \text{ s}^{-1}$$

$$T_{\text{neobr}} = \frac{2\pi}{b} = \frac{2\pi}{267} = 0,0228 \text{ s}$$

$$\omega_{n\text{neobr}} = \sqrt{a^2 + b^2} = 276 \text{ s}^{-1}$$

$$\zeta_{\text{neobr}} = -\frac{a}{\omega_n} = 0,261$$

Pri tem pomenijo:

T = periodo sinusnega iznihavanja

ω_n = lastno frekvenco

ζ = faktor dušenja sinusnega iznihavanja

b) za obremenjen motor

$$s_{1,2} = -\frac{B_0 \text{ obr}}{2 J_{\text{obr}}} \pm \sqrt{\frac{B_0^2 \text{ obr}}{4 \cdot J_{\text{obr}}^2} - \frac{K_r}{J_{\text{obr}}}} =$$

$$= -62,65 \pm i \cdot 222$$

$$a = -62,65 \text{ 1/s}$$

$$b = 222$$

$$T_{\text{obr}} = 0,283 \text{ s}$$

$$\omega_{n\text{obr}} = a^2 + b^2 = 230 \text{ s}^{-1}$$

$$\zeta_{\text{obr}} = -\frac{a}{\omega_{n\text{obr}}} = 0,272$$

Vzbujanje sistema predstavlja premik magnetnega polja koračnega motorja za en korak. Velikost koraka je

$$\varphi_c = \frac{2\pi}{z}$$

pri čemer je z = število korakov koračnega motorja za en obrat gredi. Vzbujanje tako lahko obravnavamo kot enotno koračno funkcijo z vrednostjo $f(t) = \varphi_c u_{-1}(t)$.

$$F(s) = \frac{\varphi_c}{s}$$

$$\Phi(s) = \frac{K_r}{J s^2 + B_0 s + K} F(s) = \frac{K_r \cdot \varphi_c}{s (J s^2 + B_0 s + K)} =$$

$$= \frac{\varphi_c}{s \left(\frac{J s^2}{K_r} + \frac{B_0 s}{K_r} + 1 \right)} = \frac{A(s)}{B(s)}$$

Koreni karakteristične enačbe so:

$$r_1 = 0$$

$$r_{2,3} = -a \pm ib$$

$$\Phi(s) = \frac{K_1}{s} + \frac{K_c}{s - (a + ib)} + \frac{K_{-c}}{s - (a - ib)}$$

$$K_1 = \lim (s - r_1)$$

$$\Phi(s) = \lim \left[s \frac{\varphi_c}{s \left(\frac{J s^2}{K_r} + \frac{B_0 s}{K_r} + 1 \right)} \right] = s \rightarrow r_1 = 0$$

$$K_1 = \frac{\varphi_c}{1} \quad K_1 = \varphi_c$$

Za določitev faktorjev K_c in K_{-c} upoštevamo kar končno možnost, ki da rešitev v t sistemu. V t sistemu z inverzno Laplaceovo transformacijo prevedemo tudi prvi člen $\frac{K_1}{s}$

$$\varphi(t) = K_1 + \frac{1}{b} |K(a + ib)| e^{at} \cdot \sin(bt + \alpha) =$$

$$= \varphi_c + \frac{1}{b} \frac{\varphi_c}{\sqrt{a^2 + b^2}} e^{at} \cdot \sin(bt + \alpha)$$

pri tem je

$$|K(a + ib)| = \frac{\varphi_c}{(a + ib)} = \frac{\varphi_c}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Posplošen odgovor prehoda se glasi

$$\varphi(t) = \varphi_c \left[1 + \frac{e^{at} \cdot \sin(bt + \alpha)}{b \sqrt{a^2 + b^2}} \right]$$

Odgovor prehoda za obremenjen motor

$$\varphi(t)_{\text{obr}} = \varphi_c \left[1 + \frac{e^{-62,65 t} \sin(222 t + 1,845)}{222 \cdot 230} \right]$$

in za neobremenjen motor

$$\varphi(t)_{\text{neobr}} = \varphi_c \left[1 + \frac{e^{-72 t} \sin(267 t + 1,843)}{267 \cdot 276} \right]$$

Pri tem je kot α tisti kot, ki ga oklepa absolutna vrednost vektorja konjugirano kompleksnega ničlišča proti obcisni osi in pomeni fazno premaknitev sinusnega iznihavanja od začetka vzbujanja

$$\alpha = \angle K(a + jb) = \angle \omega_n$$

$$\gamma_{\text{neobr}} = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) = 74,9^\circ$$

$$\alpha_{\text{neobr}} = 180^\circ - \gamma_{\text{neobr}} = 1,834 \text{ rad}$$

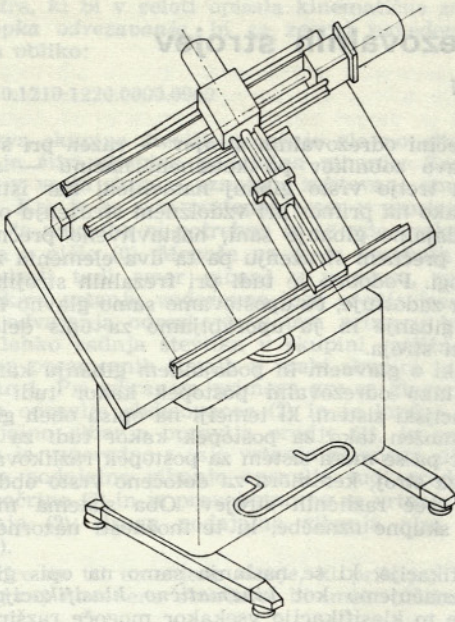
$$\gamma_{\text{obr}} = \tan^{-1} \left(\frac{a}{b} \right) = 74,23^\circ$$

$$\alpha_{\text{obr}} = 180^\circ - \gamma_{\text{obr}} = 1,845 \text{ rad}$$

KONSTRUKCIJA NOVE VARIANTE DDC — SISTEMA ZA OŽIČENJE

Po že izpeljani napravi smo naredili še nekaj variant, ki bi omogočale še boljše rešitve. Želeli smo poenostaviti sestavne dele, tako da bi bila izdelava lažja in cenejša. Pri samem snovanju nove naprave nismo puščali v nemar estetskega videza. Nova naprava za pozicioniranje je sestavljena iz pozicionirne mize, podstavka, dviznega mehanizma in sistema za pozicioniranje glave. Novo varianto vidimo na sliki 20.

Nova pozicionirna miza je glavni del naprave. Na njej so vodila s sanmi, mehanizmom za pozicio-



Sl. 20. Pozicionirna naprava

niranje, plošča za upravljanje in vodenje sistema. Elektronski vmesnik ni več za pozicionirno mizo, temveč poleg v omarici. Miza je pritrjena na vodilni steber tako, da jo je moč dvigati in nagibati v tako lego, ki delavki pri stroju najbolj ustreza. Naprava torej omogoča delavcu, da opravlja svoje delo stoje ali pa tudi sede. Pri novem stroju je dviganje in spuščanje mize hidravlično. To varianto smo sprejeli zaradi preproste rešitve s hidravličnim valjem in hidravlično tlačilko, ki ji lahko strežemo z nogo. Nekaj zaporednih pritiskov z nogo na stopalko na vzvodu že načrpa ustrezno količino olja v valj. Spuščanje zgornjega dela naprave je zelo preprosto. Spuščamo s pritiskom na drugo stopalko, s katero odpremo olje, ki v delovnem valju prosto odteka v rezervoar. Vodenje stebra je izdelano dovolj natančno, da ne potrebujemo nobene dodatne pritrditve, pač pa je sistem zavarovan proti zasuku. Nova naprava je konstruirana za ožičenje treh okvirov hkrati. Na pozicionirni glavi je pritrjen pozicionirni nastavek. Priključki na okvirih za ožičenje so nameščeni v treh nivojih. Zaradi velike gostote priključnih čepov so na vsaki strani priključki v različnih višinah, zato je pozicionirni nastavek premičen v smeri pravokotno na ravnino ožičenja. Izhodiščna lega pozicionirnega nastavka je zgornja. Ko zavzame glava s programom določeno lego, to je natančno koordinato priključka, potisnemo s pištolo nastavek tako daleč v smeri osi z , da lahko izvedemo priključitev žice na čep, ki je na sečišču koordinat y in x . Največji premik pozicionirnega nastavka po osi z je 70 mm. Pozicionirni nastavek se vrne sam v zgornjo izhodiščno lego, brž ko se odmakne pištola.

V. SKLEP

Sistem za avtomatiziranje postopka ožičenja in informacijske kontrole montažnih modulov telefonskih central z neposrednim digitalnim krmiljenjem in računalnikom je bil izdelan v treh delih v okviru projekta obdelovalni sistemi in proizvodna kibernetika. V prvem delu naloge smo preučili metode ožičenja in izbrali konstrukcijsko izvedbo pozicionirne naprave, ki je v drugem delu prišla v fazo izdelave v domačem laboratoriju LAKOS na Fakulteti za strojništvo. Obenem smo izdelali elektronsko povezavo in vmesnik med napravo in računalnikom ter programsko opremo za optimizacijo in krmiljenje ene naprave. Elektronski vmesniki in programska oprema za krmiljenje sta v tesni povezavi in odvisna od tipa računalnika. V tretjem delu smo dopolnili elektronski vmesnik in programsko opremo za krmiljenje več pozicionirnih naprav z istim računalnikom PDP-8/E. Hkrati pa smo že konstruirali novo izvedbo naprav za ožičevanje.

Izdelana pozicionirna naprava je bila testirana pri obratovanju v tovarni. Preizkusi na napravi se bodo še nadaljevali in po potrebi se bodo lahko nekateri strojni elementi še izboljšali. Isto velja seveda tudi za električno opremo.

Delo sta financirala Republiška raziskovalna skupnost in podjetje ISKRA Elektromehanika Kranj. Raziskovalci in sodelavci pri tej nalogi se žele na tem mestu zahvaliti obema finanserjema. Posebna zahvala gre tudi vsem tovarišem iz Iskre, ki so s svojimi nasveti in drugimi vrstami pomoči, ne nazadnje tudi s svojim delom, prispevali k uspešni uresnitvi tega projekta.

LITERATURA

- [1] Avtorski kolektiv: DDC-sistem za avtomatiziranje postopka ožičenja montažnih modulov telefonskih central; Strojniški vestnik, 1974, št. 5, str. 165—170.
- [2] Avtorski kolektiv: Sistem za avtomatiziranje postopka ožičenja pri telefonskih centralah; Strojniški vestnik, 1976, št. 1—2, str. 21—26.
- [3] Little John: An Algorithm for the travelling salesman problem, MIT, 1963.
- [4] Stepper Motors & Step Servos, Publikacija podjetja Muirhead, New Jersey, USA.
- [5] Kelšin D.: Poseban otisak predavanja; XII jug. seminar i izložbe za regulaciju, mjerjenje i avtomatizaciju, JUREMA, Zagreb 1967.
- [6] James A. Cadzow, Hinrich R. Martens: Discrete-Time and Computer Control Systems; Prentice Hall, Inc., Englewood, New Jersey.

Avtorski kolektiv: prof. dr. ing. habil. J. Peklenik
mag. J. Teran, dipl. ing.
prof. dr. F. Roethel, dipl. ing.
mag. D. Kelšin, dipl. ing.
M. Krisper, dipl. ing.
M. Kerševan, dipl. ing.
E. Zebec, dipl. ing.
I. Gantar, dipl. ing.