

RAČUNALNIŠKI PROGRAM ZA OBDELAVO ELEKTROKARDIOGRAFSKIH SIGNALOV PRI OBREMITVENEM TESTU
COMPUTER PROGRAM FOR PROCESSING OF ELECTROCARDIOGRAMS DURING EXERCISE TEST

L. Gyergyek, K. Turkulin, M. Vezjak, D. Zazula, F. Solina,
F. Jager
Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, Ljubljana
Bolnica za reumatske bolezni i rehabilitacijo, Krapinske
Toplice,
'TGO Gorenje, Velenje

Povzetek

Opisan je lastno razvit računalniški program za on-line obdelavo EKG signalov pri obremenitvenem testu. Program odstranjuje motnje, ugotavlja šumno vsebino, filtrira posnetek in tako izboljšuje razmerje signal-šum, razpozna QRS komplekse in ekstrasistole, določa povprečni srčni utrip, določa reprezentativno sistolo ter jo filtrira, grafično prikaže, razpozna in interpretira njene značilne parametre. Prav tako pripravi poročilo o testu. Podana je tudi mikroprocesorska realizacija programa ter opisana funkcionalna in aparaturna zasnova analizatorja elektrokardiogramov ter primerjava z večjimi računalniškimi sistemi.

Abstract

The paper consider with the program for processing of electrocardiograms during exercise test. The program detects artefacts and noise, filters the record, improves the ratio signal to noise, recognizes QRS complexes and extra beats, computes the heart rate, determinates the average pattern, which is after that filtered, displayed, interpreted and prints out the report. The microprocessor hardware is shown and its advantages over larger computer system are ascertained. The fundamental software solutions are explained and herewith functioning of the complete device that makes on-line control of some heart parameters during the test and print out the report.

1. UVOD

V medicini in tudi v kardiologiji se vse bolj uveljavljajo nekrvne preiskovalne metode. Med njimi ima elektrokardiogram (s kratico EKG), ki predstavlja posnetek bioelektričnih nape-
tosti srca, že precejšnjo tradicijo. Elektrokardiografija je bila v začetku izrazito empirična disciplina. Šele razvoj elektrofiziologije je pojasnil povezanost krivulje EKG in fiziološkega dogajanja. Iz zapisa na papirnatem traku lahko zdravnik specialist (kardiolog) ugotavlja odstopanja patoloških vzorcev od normalnih. Razpoznavanje vzorcev ali "umetnost diagnosticiranja" iz posnetka signala EKG pa je poleg objektivnih odvisna še od številnih subjektivnih dejavnikov. Zato so bile logične želje po uveljavitvi avtomatske analize EKG signala, ki bi poleg tehničnih prednosti, ki jih a priori vsebuje pred človeškim interpretatorjem, pa seveda tudi kljub slabostim zagotovila večjo objektivnost in ponovljivost rezultatov analize EKG signala. Naše večletno delo je osredotočeno na test obremenitve kot pomembno srčno preiskavo, s katero je mogoče doseči specifično, funkcionalno oceno kardiovaskularnega sistema. De-

presija ST segmenta v EKG, posnetem med testom obremenitve, je pri osebah z normalnim EKG v mirovanju resna indikacija prisotnosti ishemične miokarda. Prav tako ima prognostično vrednost v razvoju ishemičnega srčnega obolenja pri sicer asimptomatičnih osebah. Razlike pri vizuelni interpretaciji pri testu obremenitve so velike, in to deloma zaradi večje množine šuma prisotnega v koristnem signalu, oz. zaradi različnih kriterijev klasifikacije. Z uporabo digitalnega računalnika lahko izboljšamo razmerje signal-šum v EKG posnetku in s tem dosežemo zanesljivejšo interpretacijo. Torej lahko pričakujemo, da bo računalniška interpretacija izboljšala diagnostično vrednost EKG signala pri testu obremenitve.

Hiter razvoj mikroprocesorjev je tudi na področje avtomatskega razpoznavanja in analize EKG signalov prinesel mnogo novega. Zaradi njihove miniaturnosti, nizke cene, dobrih matematično-logičnih lastnosti in izredno hitre rasti njihovih sposobnosti danes že izpodrivajo mini- in klasične računalnike. Menimo, da so prav mikroročunalniki idealna tehnološka rešitev za obdelavo parcialnih problemov srčne diagnostike. Lastno razvit in izdelan analizator MAE 101 je plod večletnega raziskovalnega dela naše skupine in sodelovanja s TGO Gorenje. Analizator je trenutno sposoben analizirati enega od levih prekordialnih odvodov oz. odvod, kjer je V5 eksplorativna elektroda. Poleg standardnih parametrov, ki jih analizator razpozna, so posebej zanimivi naslednji: razmerje amplitud trenutnega R vala proti R valu v mirovanju, ki ima pri normalni oz. patološki populaciji dokazano različen potek; ST integral po Bruceu; produkt maksimalnega srčnega utripa in maksimalnega ročno vstavljenega sistoličnega tlaka; izračun odstotka dosežene norme in izris histogramov povprečnega srčnega utripa, ST nagiba in ST integrala za vsako minuto testa. Klinično testiramo mikroročunalnik s primerjalno študijo odčitkov zdravnikov specialistov in analizatorja.

2. RAČUNALNIŠKA OBDELAVA ELEKTROKARDIOGRAMA PRI OBREMITVENEM TESTU

Uporaba računalniške tehnologije v medicini kot tudi na drugih področjih človeške ustvarjalnosti bistveno vpliva na njen razvoj. Na ta način so v medicini postavljene nove možnosti v diagnostiki, terapiji in medicinski dokumentaciji. Elektrokardiografija je brez dvoma ena najčesteje uporabljenih preiskovalnih metod v kardiologiji. Stevilni elektrokardiografski izvidi se kopičijo v medicinskih ustanovah in pogosto potrebo po avtomatski obdelavi, ki je mogoča edino z elektronskim računalnikom. Zdravnik interpretira posnetek

odvisno od znanja in stališča, na kar lahko vplivata tudi utrujenost in psihično razpoloženje. Obstajajo znatna odstopanja tolmačenja med posameznimi zdravniki pa tudi pri istem zdravniku, če interpretira posnetek v različnih časih. Simonson in sodelavci so v enem primeru dokazali, da so odločitve desetih strokovnjakov skladne samo v 54 odstotkov primerov. Subjektivnost izključimo z uporabo računalnika, ki zaradi temeljnih in enotno definiranih kriterijev zagotavlja objektivno interpretacijo. Spremenjene najdbe lahko uporabimo v avtomatični serijski analizi, s čimer je omogočena primerjava najdb pri istem bolniku. Točnost avtomatskega merjenja posameznih elektrokardiografskih parametrov znatno presega možnosti ročne analize. Nekaterih primerov obdelave, kot je to npr. zapletena matematična ali statična analiza (vektorji, integrali, gradienti, povprečne vrednosti, standardne deviacije itd.) oziroma upoštevanje drugih spremenljivk pomembnih za diagnozo, si ne moremo zamisliti brez računalnika. S tem se v medicini odpirajo novi horizonti, preiskava in terapija pa s tem lahko pridobita novo kvaliteto /1/, /2/, /3/, /4/.

Vendar pa ima avtomatska analiza EKG s pomočjo računalnika še določene pomanjkljivosti. Med njimi naj omenimo težave pri razpoznavanju posameznih elementov krivulje, v čemer je zdravnik izrazito superioren. Računalniški programi napačno razpoznavajo artefakte, začetke in konce valov in kompleksov ter se zlasti napačno odločajo v primeru detekcije P vala.

Avtomatsko analizo EKG pri testu obremenitve je prvi opisal Blomquist leta 1965. Današnji programi prirejeni za test obremenitve največ pozornosti posvečajo odpravljanju artefaktov in šumov ter merjenju ST spojnice. V tem primeru je zadostna analiza enega samega odvoda, kar pogojuje enostavno in ceneno obdelavo. Prisotnost zdravnika med testom in vizualna kontrola testa predstavljata posrečeno dopolnjevanje zdravnika in računalnika, kar lahko znatno izboljša diagnostično točnost /1/.

Pri testu obremenitve moramo posvetiti posebno pozornost elektrodam. Pomikanje elektrod in slab kontakt s kožo sta čest izvor motenj, zlasti pomikanje bazične linije EKG. Danes v elektrokardiografiji pri testu obremenitve priporočajo elektrode srebro-srebrni klorid. Elektrode se kože ne smejo direktno dotikati, saj se električni potenciali prevajajo prek paste. Upornost električnega kroga elektrode ne sme presežati 1 K Ω /6/. Elektrokardiografski analogni signal predstavimo zdravniku v obliki elektrokardiograma na papirju ali kot kontinuirano krivuljo na osciloskopu. Zdravnik razpoznavna EKG po obliki krivulje. Posamezne parametre meri v notah električnega potenciala (mV) in časa (s). Iste parametre razpoznavna tudi program s pomočjo vgrajenega programa. Program je sestavljen iz zaporedja instrukcij, ki pogojujejo analizo.

Eden od resnih problemov pri analizi EKG, tako računalniški kot ročni, so motnje različnega porekla, ki kvarijo pravo sliko signala. Ta problem je zlasti izrazit pri analizi EKG pri testu obremenitve. Najčeste motnje so drsenje izoelektrične linije, mišični tremor in inducirana omrežna frekvenca. Omenjene motnje lahko deloma ali celo popolnoma izločimo s postopki filtriranja. Ena od najbolj pogosto uporabljenih metod filtriranja pri testu obremenitve je glajenje s tekočim povprečjem /1/, /5/, /6/.

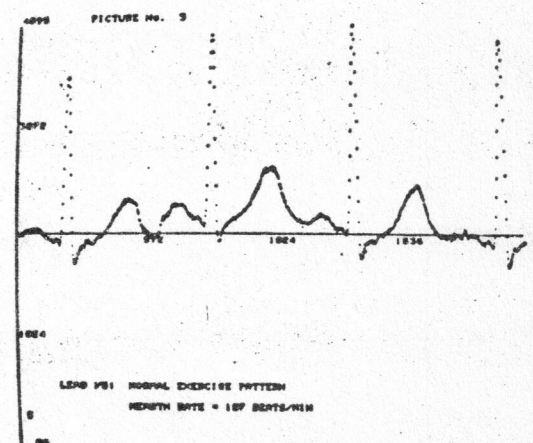
Osrednje mesto v interpretaciji testa obremenitve zavzema ST spojnica. Paralelne raziskave koronografskih in elektrokardiografskih

najdb dokazujejo neizpodbitno vrednost ST depresije pri diagnozi ishemije miokarda. Senzitivnost lahko znatno izboljšamo s povečanjem števila analiziranih odvodov. Čeprav se pogosto uporablja le en odvod, je priporočljivo analizirati tri. Točnost diagnoze ishemije miokarda se poveča, če se poleg ST depresije pojavi tudi angina, in to pri nizki fizični obremenitvi. Čeprav sta globina in oblika ST depresije različni v različnih odvodih, lahko kljub vsemu postavimo kriterij pozitivne elektrokardiografske diagnoze v vrednosti 1 mm in trajanja 0,08 s. Za asimptomatično populacijo se priporoča kriterij 2 mm v trajanju 0,08 s v odvodu V₅ /1/.

Namesto ST depresij je Sheffield uvedel izračunavanje ST integrala. ST integral je enak površini, ki jo zapirata ST segment v trajanju od kolena J do 0,08 s za to točko in horizontalna linija v višini izoelektričnega nivoja. Integral večji od 7,5 μ V/s je patološki znak. ST integral ima pred ST depresijo to prednost, da istočasno vključuje pomik in nagib ter ju izraža z eno vrednostjo in je zaradi tega vpliv nagiba na variabilnost zmanjšan /7/.

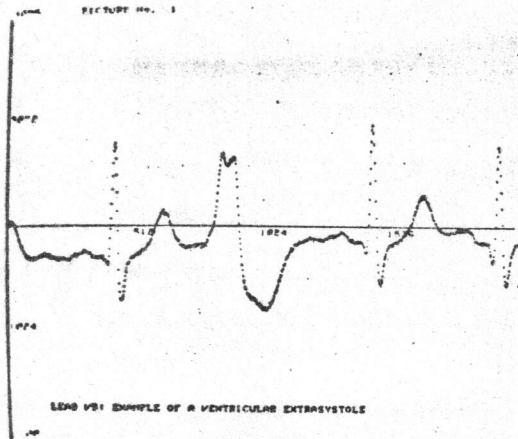
3. OPIS RAČUNALNIŠKEGA PROGRAMA ZA OBREMITVENI TEST

Preiskovance obremenimo v kliničnem okolju (Odjel za bolezni srca i krvnih žila v bolnišnici za Revmatske bolezni i rehabilitacijo v Krapinskih Toplicah, Institut za klinično kardiopulmonarno fiziologijo KC v Ljubljani) po Brucejevem protokolu. Pred, med in po testu snemamo enega od levih prekordirdialnih odvodov (lega V₅ predstavlja eksplorativno elektrodo) na profesionalni magnetofon HP 3694A z vgrajenimi FM modulatorji in demodulatorji. Po pošti magnetni trak dostavimo do računalnika PDP 11/34, kjer posnetke obdelamo off ali on-line. A/D pretvorbo izvedemo v obliki 16 bitnih besed. Avtomatsko obdelamo posnetke, ki vsebujejo vsaj 16 sistol. V mirovanju za takšno obdelavo potrebujemo časovno okno 20 s, kar pri frekvenci vzorčenja 500 Hz predstavlja 10 000 podatkov. V obremenitvi je dolžina časovnega okna običajno krajša in znaša od 10 do 16 sekund. Pri off-line obdelavi posnetek (slika 1) v celoti zapišemo na disk, medtem ko pri on-line obdelavi že med A/D pretvorbo iščemo QRS komplekse in povprečimo. Pravilno razpoznavanje QRS kompleksov je pri-



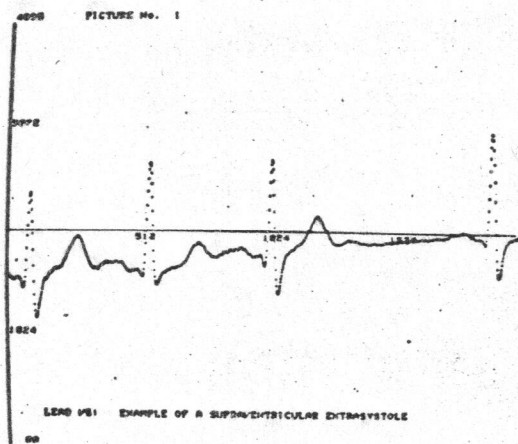
Slika 1. Normalni posnetek med obremenitvijo

mrnega značaja, saj nam v posnetku služijo kot referenčni dogodki. Na nekaj prvih sistolah posnetka se program avtomatično uči individualnih značilnosti, nato pa razpozna QRS komplekse na bazi ascendentne spojnice, širine R-S in amplitude R-S. Takšen QRS detektor je zlasti primeren za on line obdelavo. QRS komplekse definiramo še v petnajst časovnih točkah, ki so enakomerno razporejene v intervalih po 10 ms levo in desno od vrha R vala. Kompleksi katerih Hammingova razdalja odstopa za več kot 20 odstotkov, razpoznamo kot VES (slika 2).



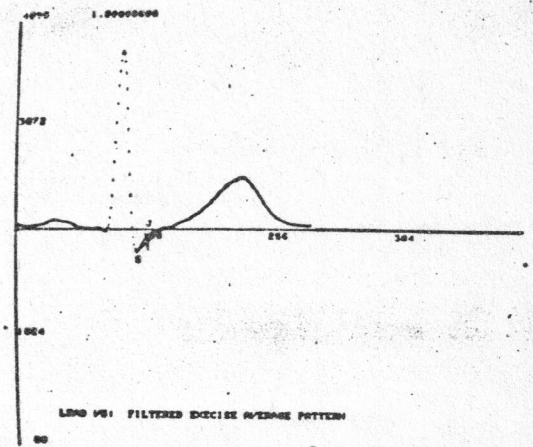
Slika 2. Primer razpoznavanja ventrikularne ekstrasistole

Supraventrikularne ekstrasistole (SVES) razpoznavamo na osnovi odstopanja R-R intervala od trenutnega povprečja za več kot 20 odstotkov (slika 3).



Slika 3. Primer razpoznavanja supra ventrikularne ekstrasistole (SVES)

Iz preostanka normalnih sistol določamo reprezentativno sistolo s povprečjem. Srčni ritem razpoznavamo na zaporedju najmanj treh normalnih sistol. Reprezentatno sistolo filtriramo /5, 6/ in jo interpretiramo. Izmerimo amplitudo R vala in jo primerjamo z amplitudo R vala v mirovanju. Diagnostično je relevantna 80 ms dolžina ST segmenta po nastopu kolena J. Pri obremenitvi je zaradi tahikardije ST skrajšan ter smo zaradi tega merili tudi dolžino 60 ms. Analizo položaja kolena J izvedemo v časovnem prostoru z algoritmom imenovanim "značilna daljica" (slika 4).



Slika 4. Določanje kolena J z algoritmom imenovanim "značilna daljica"

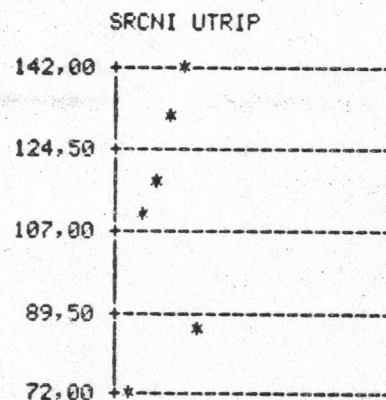
Primerjalna statistična ocena odčitkov depresije kolena J, nagiba spojnice ST in srčnega utripa zdravnika in računalnika se ne razlikuje značilno na nivoju $p=0.05$ /1/. Slika 5 pa prikazuje podrobnejše zaporedje programov pri računalniški obdelavi obremenitvenega testa, medtem ko na sliki 6 vidimo obliko izpisa in izrisa histograma za srčni utrip.

TRAJANJE TESTA:	5 MIN. 46 SEK.
POPREČNI SRČNI UTRIP:	148
AMPLITUDA VALA R:	16,60 MM
RAZMERJE R/R1:	0,82
DEPRESIJA J:	0,11 MM
NAGIB ST:	4,90 MU/SEK.
INTEGRAL ST:	45,05 MIKRO US
EKSTRASISTOLE - SVES:	0
UES:	0

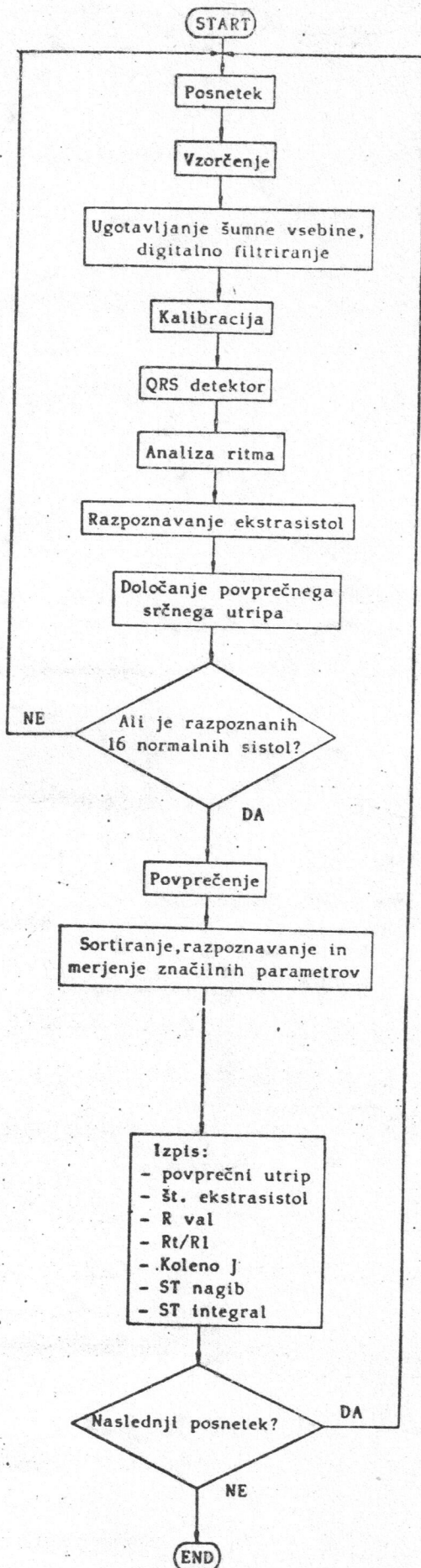
SKUPAJ EKSTRASISTOL:	
SVES	0
UES	1
NORMIRAN UTRIP:	171
DOSEZEN UTRIP:	152
DOSEZEN PROCENT:	88,88 %

MAKSIMALNI TLAK:	
NORMIRANA PORABA O2:	36,05 ML/KG/MIN
	2,37 L/MIN
DEJANSKA PORABA O2:	3,87 ML/KG/MIN
	0,25 L/MIN
DOSEZEN PROCENT:	10,75 %

HISTOGRAMI:



Slika 6. Izpis rezultatov analize in izris histograma



Slika 5. Diagram poteka avtomatske obdelave obremenitvenega testa

4. MIKROPROCESORSKA REALIZACIJA PROGRAMA

V laboratoriju za sisteme, avtomatiko in kibernetiko na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani so bili ob pomoči zdravnikov specialistov razviti računalniški programi za avtomatično analizo elektrokardiogramov na večjih računalniških sistemih /1/, /2/, /5/, /6/. Pozneje pa je bila zasnovana tudi aparaturna programska oprema za neposredni mikroprocesorski EKG analizator /8/. Le-ta je zamišljen kot dodatek, ki je neposredno vezan na standardno snemalno aparaturo in je ves čas med snemanjem aktiven. Z njim kardiolog ne dobiva novih, presenetljivih podatkov, temveč le lažje, hitreje, natančneje in bolj objektivno pride do zahtevnih parametrov. Prednost take naprave pred velikimi računalniškimi sistemi je v tem, da je preprosta, vendar zadovoljujoča glede na upravljanje in uporabo, cenena, majhnih dimenzij in hkrati zanesljiva /9/.

Analizator je zgrajen iz treh funkcijsko ločenih enot, od katerih vhodna enota sprejema od snemalne naprave, na katero je vezana, električni signal srčne aktivnosti. Iz njega odstrani motnje in ga pretvori v številski zapis. Analiza, ki poteka v osrednji enoti s pomočjo mikroprocesorja, namreč temelji na nizu aritmetičnih operacij, za katere je potrebna številka predstavitev vhodnega signala. Do nje pridemo z vzorčenjem elektrokardiograma s frekvenco 500 Hz. Podatke o pacientu vnesemo prek testature, ki je v vhodni enoti. Osrednja enota spremlja in nadzira dogajanje v analizatorju in zunaj njega. Vsebuje časovni modul, ki meri realni čas od začetka snemanja oziroma testiranja pacienta, vključuje modul za vzorčenje in sodeluje z modulom za določanje frekvenca srčnega utripa. V pomnilniškem modulu so shranjeni programi, ki vodijo delo celotnega sistema. Le-ti izvršijo tudi analizo posnetega signala /9/.

Izhodna enota posreduje kardiologu rezultate analize, sprotno pa ga s številskim prikazom obvešča o času trajanja testa in o trenutnem srčnem utripu. Matrični tiskalnik zabeleži pomembne parametre v predpisani obliki na papir.

Kakor aparaturna je tudi programska oprema izdelana modularno. Sestavljajo jo podprogrami, ki opravljajo ločene in zaokrožene naloge. Analizator pri vsaki zahtevni analizi oz. na koncu analize razpozna in interpretira naslednje parametre, dobljene na povprečni sistoli (ki predstavlja zaporedje zadnjih 16 normalnih vzorcev):

- srčni utrip
- amplitudo R vala
- razmerje R_t/R_1
- depresijo kolena J
- nagib ST segmenta
- ST integral
- število ekstrasistol med dvema izpisoma
- celotno število ekstrasistol med testom
- produkt maksimalnega srčnega utripa in maksimalnega sistoličnega tlaka.

Potem, ko vnesemo razlog za prekinitev testa obremenitve, računalnik izračuna odstotek dosežene norme in izriše tri histograme: povprečni srčni utrip, povprečni ST nagib in povprečni ST integral za vsako minuto testa obremenitve.

Opisane parametre klinično testiramo s primerjalno študijo odčitkov dveh zdravnikov specialistov in mikroročunalnika. Računalnik lahko priključimo na vsako profesionalno sne-

malno aparaturo s serijskimi izhodi standardnih odvodov. Izhod snemalne aparature in vhod računalnika povezujeta ločilna stopnja in stopnja za impedančno prilagoditev. Analogni izhod (na aparaturah običajno označen kot izhod scope) mora biti velikostnega reda 1 V, sicer je treba signal predhodno ojačati.

5. SKLEP

Opisani program za obdelavo EKG signalov je plod večletnih raziskovalnih prizadevanj. Realiziranje v časovnem prostoru, ker je takšna zasnova blizu zdravnikovega razmišljanja in prikladna za mikroprocesorsko realizacijo. Računalnik razbremeni zdravnika zamudnega kvantitativnega odčitavanja. Zdravnik ima torej na voljo več možnosti opazovanja poteka testa, kar veča varnost pacienta in senzitivnost preiskovalne metode.

6. LITERATURA

- /1/ K.Turkulin, L.Gyergyek, M.Vezjak, F.Solina, V.Valenčič, J.Trontelj, S.Ribarič:
Automatska obrada elektrokardiograma u opterećenju, Neinvazivne metode u kardiologiji, Dubrovnik 1980
- /2/ V.Valenčič, J.Trontelj, L.Gyergyek, K.Turkulin:
Analysis, recognition and diagnosis of electrocardiograms, 3rd Conference of bioengineering, Budapest 1974
- /3/ E.Simonson, N.Tuna, N.Okamoto, H.Toshima:
Diagnostic accuracy of vectorcardiogram and electrocardiogram; A cooperative study. A.J. Cardiol. 17: 829, 1966
- /4/ M.L.Simmons, H.B.K.Boom, E.Smallenburg:
On-line processing of orthogonal exercise electrocardiograms, computers & biomedical research 8, p.105, 1975
- /5/ L.Gyergyek, M.Vezjak, S.Ribarič, K.Turkulin, N.Pavešič, V.Valenčič:
Pregled dejavnosti Fakultete za elektrotehniko v Ljubljani na področju analize in razpoznavanja signalov EKG, Elektrotehniški vestnik, 5: 197, 1978
- /6/ L.Gyergyek, M.Vezjak, N.Pavešič:
Quantitative Assessment of Influence of Random and 50 Hz Noise on ECG Signals, XII. International Conference on Medical and Biological Engineering, Jeruzalem 1979
- /7/ P.Sheffield, L.N.Larkin, J.A.Burdeshaw, D.V.Conroy, T.J.Reeves:
Electrocardiographic signal analysis with out averaging of complexes. Measurement in exercise electrocardiography. Ed. H. Blackburn. Charles C. Thomas Publ. Springfield, Illinois p.108, 1969
- /8/ D.Zazula, Magistrsko delo FE, Ljubljana 1978
- /9/ D.Zazula, K.Turkulin:
Zasnova in uporabnost mikroprocesorskega analizatorja elektrokardiograma, Neinvazivne metode u kardiologiji, Dubrovnik 1980.