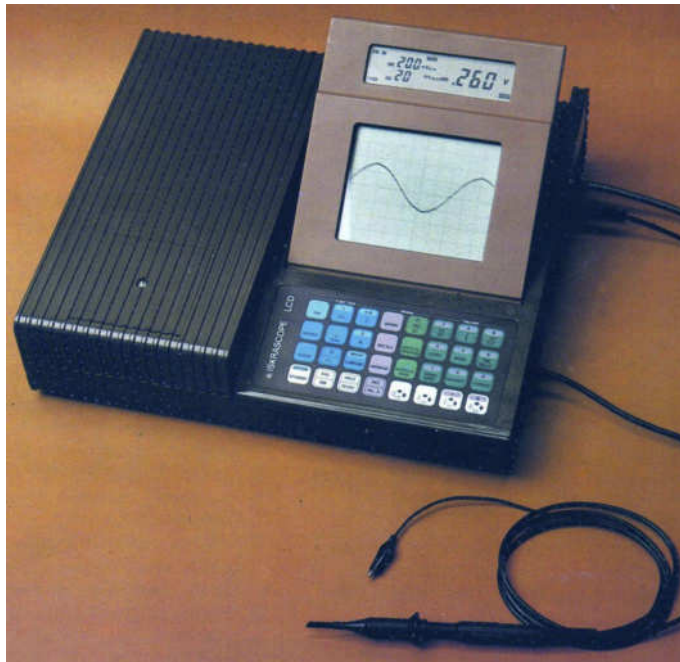


Zgodovina in tehnologija: Iskrascope LCD

Erik Margan, Institut Jožef Stefan, Ljubljana

Iskrascope LCD je bil leta 1982 prvi instrument na svetu, ki je združil takrat najnaprednejše tehnologije: mikroprocesorsko kontrolo z zunanjo povezavo, LCD zaslon, membransko tipkovnico, 6-urno baterijsko delovanje, hitro digitalno vzorčenje in spomin, ter ne nazadnje za tiste čase prav spodobne merilne zmogljivosti.



Sl.1: Iskrascope LCD (1984)

Uvod

Akronim LCD (angl., *Liquid Crystal Display*) pomeni zaslon ali prikazalnik narejen na osnovi tehnologije tekočih kristalov. LCD prikaz podatkov na elektronskih napravah vseh vrst je danes prisoten vsepovsod in je popolnoma izpodrinil vse ostale konkurenčne tehnologije. Čeprav so snovi, ki hkrati izkazujejo lastnosti tekočin in kristalov znane že od leta 1888, se je tehnološki razvoj ploščatih zaslonov začel šele po letu 1962. Ročne ure so bili prvi komercialni izdelki z tovrstnim prikazom, na trgu so se pojavile po letu 1970. Prvi laboratorijski modeli matričnih zaslonov so nastali sredi 70tih let, vendar so se prvi uporabni matrični zaslони pojavili na trgu šele v poznih 80tih letih. Leta 2008 pa se je prvič zgodilo da je prodaja TV sprejemnikov z LCD zaslóni prekosila tiste s klasično katodno cevjo.

Znanje in izkušnje s tekočimi kristali je na Institut Jožef Stefan prinesel dr. Janez Pirš po vrnitvi iz ZDA (Kent State University). Prve ideje o razvoju matričnega zaslóna, ki bi bil primeren za uporabo v merilnih instrumentih so nastale na IJS v letih 1979-80. Pod vodstvom dr. Pirša je v letih 1982-1984 na IJS bil razvit osciloskop, vključno z tehnologijo tekoče-kristalnih zaslonov, ter nato v sodelovanju z Iskro (Merilni instrumenti, Otoče in Hipot, Šentjernej) pripravljen za serijsko proizvodnjo. Žal je po nekaj letih proizvodnja bila ustavljena. Temu je botrovalo več različnih vzrokov, poglaviti vzrok pa je vsekakor tičal v galopirajoči inflaciji in neurejenih tržnih in finančnih razmerah v takratni Jugoslaviji.

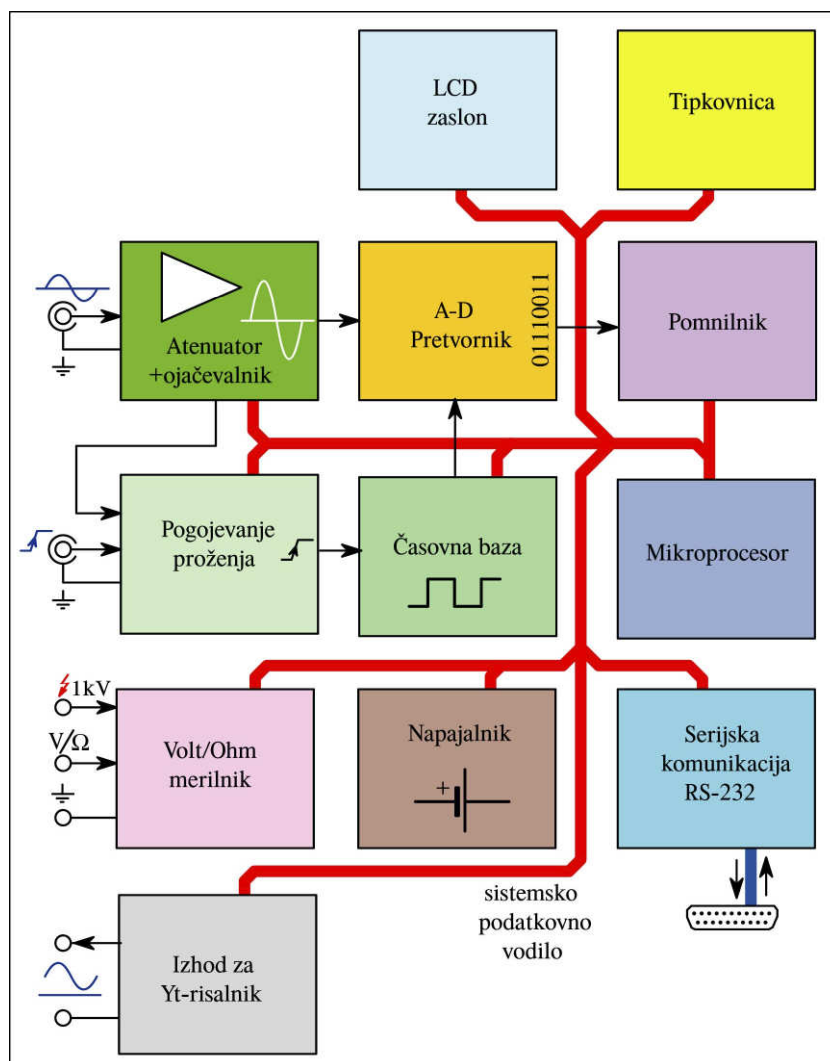
Iskrascope LCD (Slika 1), je bil mikroprocesorsko kontroliran osciloskop z ročno ali programsko nastavljivimi parametri digitalnega vzorčenja časovnega poteka električnih signalov in

tekoče-kristalnim prikazom le teh. Zahvaljujoč majhni porabi energije je lahko deloval tudi z baterijskim napajanjem, kar je omogočalo prenosnost in tudi od ozemljitve neodvisne meritve. V ta namen je tudi prenos podatkov in krmilnih ukazov iz zunanega računalnika potekal preko zaporednih podatkovnih vrat (po standardu RS-232-C), ki so bila galvansko ločena (do vzdržne napetosti 1kV). Instrument je omogočal tudi izris signalov na Y-t risalnik, kasneje tudi na matrični tiskalnik, prav tako preko galvansko ločene povezave. Vseboval je tudi 3½-mestni merilnik za enosmerne napetosti in upornosti.

Instrument je izpolnjeval stroge tehnične in varnostne zahteve, omogočal je izvedbo večine standardnih osciloskopskih meritev, tako v laboratorijskih kot industrijskih pogojih, ter kot prenosni instrument na terenu ob baterijskem napajanju. Obenem pa je omogočal povezavo z zunanjim računalnikom, ki avtomatizira merilne postopke, zajem in shranjevanje merilnih rezultatov.

Kratek opis instrumenta

Za razumevanje delovanja Iskraskopa LCD je potrebno slediti blok-diagramu na sliki 2.



Sl.2: Funkcionalni blok-diagram Iskraskopa LCD.

Instrument je zgrajen modularno, delovanje vseh modulov pa kontrolira mikroprocesor, ki sprejema ukaze operaterja bodisi preko vgrajene tipkovnice, bodisi od zunanega računalnika preko serijskih komunikacijskih vrat, skladno z mednarodnim EIA standardom RS-232-C.

Zahtevane operacijske parametre instrumenta nastavi mikroprocesor preko podatkovno-ukaznega 8-bitnega dvosmernega vodila (narisane z rdečo barvo na sliki 2).

Velikost vhodnega signala prilagodi vhodni nastavljeni atenuator-ojačevalnik na območje kot ga zahteva analogno-digitalni pretvornik. Digitalizirani signal se začasno shranjuje v vmesnem krožnem spominskem vezju, odkoder se prenaša v spomin krmilnika zaslona, po ukazu pa se lahko trajno shrani v mikroprocesorjev lokalni spomin, ali pa prenese zunanjemu računalniku. Prožilni signal (*Trigger*) se generira bodisi znotraj instrumenta iz vhodnega ojačevalnika, bodisi ga pripeljemo od zunaj na poseben prožilni vhod.

Veže za pogojevanje proženja še omogoča nastavitve ustreznega praga proženja, izbiro naklona proženja (če vhodni signal narašča čez prožilni prag ali pa vpada), slopitve (AC/DC) in načina vzorčenja (samodejno proženje če prožilnega signala ni dlje kot 250ms; normalno proženje, ko instrument lahko čaka na proženje poljubno dolgo; ali enkratno proženje, ko se instrument po proženju in končanem vzorčenju ustavi in omogoči ponovno vzorčenje šele na zahtevo operaterja). Poleg tega je signal mogoče vzorčiti pred proženjem, ali po določeni zakasnitvi.

Ob zaznavi ustreznega prožilnega signala steče vzorčenje v enakomernih časovnih presledkih, ki jih definira časovna 'baza' (razdelitev horizontalne osi zaslona). Pri klasičnih osciloskopih je časovna baza žagasta napetost, ki premika žarek katodne cevi v horizontalni smeri. Pri osciloskopu z digitalnim vzorčenjem pa je to vzorčna ura, ki jo generira temperaturno stabiliziran oscilator, ter nastavljen digitalni frekvenčni delilnik, oba pa se sinhronizirata z prožilnim signalom (razen ob vzorčenju pred proženjem, ko vzorčna ura teče prosto). Vzorčna ura hkrati poganja A-D pretvornik, ki na vsak urni pulz naredi eno pretvorbo signala po metodi postopnih približkov (zaporedno od najvišjega proti najnižjemu bitu), ter določa naslov začasnega krožnega pomnilnika kamor se trenutna 8-bitna digitalizirana vrednost signala shrani. Širina vzorčnega okna, oziroma digitalizacija trenutne vrednosti signalne napetosti traja le 450ns, kar omogoča vzorčenje v realnem času z najvišjo frekvenco 2MHz (za ponavljajoče se signale pa do 10MHz v enakovrednem času).

Po določenem številu urnih ciklov se vzorčna ura ustavi (to število je odvisno od velikosti pomnilnika; prvi modeli instrumenta so imeli kapaciteto 512 8-bitnih vzorcev, kasneje se je to povečalo na 2048 vzorcev). Posebnost pa je pri predproženju, ko vzorčenje teče samodejno od zahteve za novo vzorčenje do proženja, nato pa le še do polovičnega števila vseh vzorcev. Tako je trenutek proženja vedno na sredi pomnilnika in prva polovica pomnilnika vsebuje vzorce signala pred proženjem, druga polovica pa za proženjem. Dejansko opazovalno okno pa je mogoče izbrati poljubno, vzorec ob katerem se vzorčenje proži lahko postavimo kjerkoli na zaslonu.

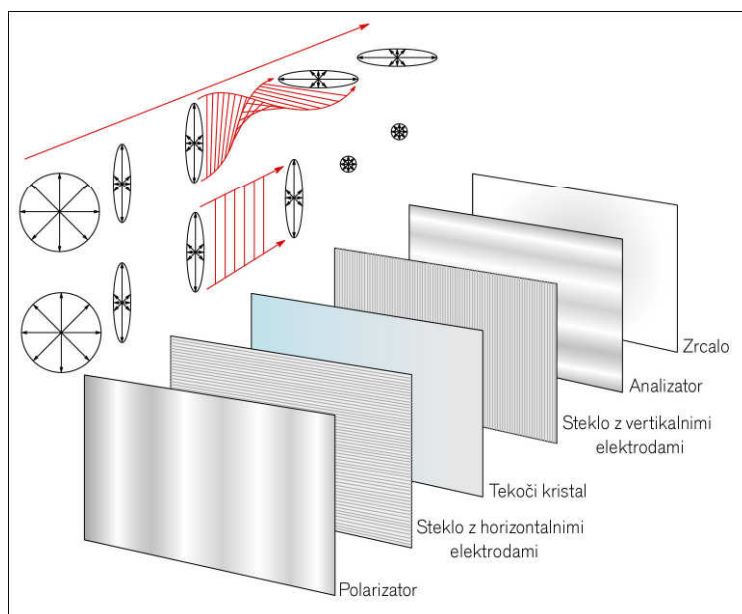
Po končanem vzorčenju mikroprocesor prebere signal iz pomnilnika in ga predela v obliko ki ustreza matričnemu prikazalniku, ter ga naloži v zaslonski pomnilnik. Ta se potem nenehno prikazuje na zaslonu dokler ni na voljo rezultat novega vzorčenja. Zamenjava vseh podatkov v zaslonskem spominu traja le 15ms.

V primeru da je po serijski komunikaciji iz zunanjega računalnika prišla koda, ki pomeni zahtevo za prenos podatkov, mikroprocesor odgovori z 'odmevom', nato pa posreduje najprej 'glavo' z vsemi vzorčnimi parametri posnetega signala, za tem pa še sam signal (dolžina je lahko različna, glede na zahtevo: le 200 vzorcev kot na LCD zaslonu, ali pa celotno dolžino pomnilnika).

Volt-meter in Ohm-meter je mogoče uporabljati na običajen način, kot pri navadnih 'univerzalnih' merilnih instrumentih. Vendar Iskrascope LCD omogoča tudi uporabo v statističnem načinu, kjer najprej vnesemo referenčno vrednost in toleranco, nakar je po meritvah večjega števila vrednosti (denimo v nekem industrijskem kontrolnem procesu) možno prikazati srednjo vrednost, število meritev, ter standardno deviacijo.

Zaslon in tehnologija tekočih kristalov

Poenostavljena zgradba zaslona je prikazana na sliki 3.



Sl.3: Poenostavljena zgradba zaslona s tekočimi kristali in ponazoritev polarizacije svetlobe.

Zaslon instrumenta je pasivnega tipa, brez osvetlitve ozadja, ima le reflektivno plast, ki odbija vpadno svetlobo. Zato so najboljše pogoji osvetlitve če je v prostoru veliko razpršene svetlobe. Temu tudi pripomore tip tekočega kristala (*twisted nematic*, TN), ki nudi dokaj širok vidni kot, hitro odzivnost in zadovoljiv kontrast.

V elektrode zaslona vgrajena merilna mreža omogoča opazovanje signala brez napake zaradi optične paralakse (ki je neizogibna pri klasični katodni cevi). Slika na LCD zaslonu se nenehno obnavlja iz ločenega zaslonskega pomnilnika, zato kontrast ni odvisen od pogostosti vzorčenja, pogostosti ponavljanja signala, ali osvetlitve v prostoru (kot je to pri klasični katodni cevi), tudi enkratne dogodke lahko opazujemo poljubno dolgo.

Zaslon je matrični, ima 200 stolpčnih elektrod in 120 vrstičnih elektrod. Tako en slikovni element (*pixel*) na križišču dveh elektrod predstavlja izmerjeno napetost z natančnostjo 0.8% vertikalno in 0.5% horizontalno. Temu je terba dodati še neizogiben kvantizacijski šum 8-bitnega analogno-digitalnega pretvornika (ADC), ki je lako ± 1 bit, ter sistematsko napako do 1% zaradi tolerančnega odstopanja upornosti, ki določajo ojačanje in vertikalni premik signala vhodnemu ojačevalniku. Časovna os, oziroma frekvenca vzorčenja, je električno bolj natančno določena in temperaturno kompenzirana, zato je vsa časovna napaka zajeta znotraj horizontalne velikosti zaslonske točke.

Delovanje LCD zaslonov sloni na sukanju polarizacijskega kota svetlobe vzdolž molekul tekočega kristala. Besedna sintagma 'tekoči kristal' označuje družino snovi, ki hkrati kažejo lastnosti tekočin in kristalov. Tekočinske lastnosti se kažejo v visoki gibljivosti molekul, kristalne lastnosti pa v pravilni urejenosti položaja molekul, ter njihove zgradbe. Dimenzije molekul so primerljive z valovno dolžino vidne svetlobe, zato z spreminjanjem orientacije molekul pod vplivom električnega polja spreminjamo tudi optične lastnosti tekočih kristalov.

Vendar tenka plast tekočega kristala sama lahko spreminja le orientacijo polarizacijskega kota, ne more pa spreminjati intenzitete svetlobe. Človeško oko pa je razmeroma neobčutljivo na polarizacijo svetlobe, a zelo občutljivo na jakost. Da dosežemo ustrezen optični kontrast potrebujemo že polarizirano svetlobo. Fotoni (svetlobni energijski kvanti) izsevani iz naravnih in

večine umetnih svetlobnih virov nihajo pravokotno na smer razširjanja svetlobe v vse smeri enako (pravimo da so nepolarizirani). Če pa tako svetlobo presejemo skozi sicer prozorno snov, ki pa ima neko preferenčno prostorsko razporeditev molekul, se zgodi da fotoni, ki nihajo v enaki smeri, večinoma pridejo skozi, med tem ko tisti, ki nihajo pravokotno na to smer interagirajo s snovjo in ji oddajo svojo energijo, ki nato preide v toploto. Taka snov polarizira svetlobo, oziroma rečemo da se obnaša kot 'polarizator'.

Če dva polarizatorja postavimo enega za drugim pod enakim polarizacijskim kotom, gre del svetlobe v toploto že na prvem polarizatorju, del pa gre naprej skozi drugi polarizator, odkoder pride le še malekno oslabljen. Če pa enega od polarizatorjev zasučemo pravokotno na prvotni položaj, bo izgubljena tudi tista svetloba, ki je prišla skozi prvi polarizator. Če pa je kot med polarizatorjema med 0 in 90°, dobimo sorazmerno temu neko vmesno količino svetlobe.

Vendar, če želimo hitro spreminjati prozornost takega sistema, potrebujemo snov, ki jo lahko kontroliramo z električnim poljem. Tekoči kristali so kot nalašč za to. Polarizatorji so ponavadi iz snovi podobni plastični foliji, ki jo lahko nalepimo na površino steklene plošče. Na drugo stran steklene plošče pa nanese zelo tenko plast električno prevodne, a prozorne snovi, ki bo služila kot elektroda. Dve taki plošči zlepimo skupaj po robovih, z elektrodami na notranji strani, nato pa prostor med ploščami evakuiramo. Zračni pod-tlak nato z vleče tekoči kristal med obe plošči, tako da je debelina tekoče kristalne plasti le $\sim 10\mu\text{m}$. Pod delovanjem električnega polja med elektrodami se molekule tekočega kristala sučejo in glede na medsebojno orientacijo polarizatorja in analizatorja po potrebi prepuščajo svetlobo skozi zaslon. Če nimamo osvetlitve ozadja, potrebujemo zrcalo, svetlo kovinsko folijo, ki jo zalepimo na zadnjo stran zaslona.

S tem pa še nismo opravili vsega. Želimo namreč kontrolirati zelo veliko število točk na zaslonu, po možnosti med seboj neodvisno. Zato bi morali površino zaslona razdeliti na veliko število majhnih kvadratkov. Denimo, Iskrascope LCD ima 120×200 točk, skupno torej 24000. Če bi želeli kontrolirati vsako točko posebej, bi morali imeti vsaj po en tranzistor na vsaki točki, zraven pa še prevrtati ustrezno število majhnih lukenj v steklu za dostop do vsakega tranzistorja. Taka tehnologija sicer že obstaja (*thin-film transistor*, TFT), a je izredno draga in tehnološko zahtevna. Zato smo se raje odločili za matrični tip zaslona: spodnjo in zgornjo elektrodo razdelimo na ozke pasove, ene v vodoravni, druge v navpični smeri, tako da tvorijo mrežo. Skupno število elektrod je tako mnogo manjše, le 320 ($120+200$), kar je veliko lažje elektronsko krmiliti, pa še vse elektrode so električno dostopne z roba steklene plošče, ki je ni treba vrtati.

Žal ima tak način krmiljenja eno resno pomanjkljivost, namreč krmiljenje posameznih točk zaslona postane dokaj zapleteno. Posamezne točke niso več neodvisne, ker si delijo po stolpcih ali vrsticah isto napetost. To je mogoče rešiti z 'multipleksnim proti-faznim in so-faznim krmiljenjem', če, na primer, hkrati krmilimo vse stolpce, med tem ko vrstične elektrode aktiviramo eno po eno. To je mogoče le v primeru ko tekoči kristal ima take mehanske lastnosti, da se pod vplivom električnega polja hitro zasučje v zahtevani smeri, nato pa se počasi relaksira v prvotni položaj. To pa prinese za seboj tudi počasnejše osveževanje zaslona. Drugi način pa je da se sprijaznimo z možnostjo da en par elektrod aktivira le eno samo točko. Tak način krmiljenja ni uporaben za prikaz slik ali teksta, vendar je primeren za uporabo v osciloskopskih zaslonih.

LCD zasloni imajo še eno nerodno lastnost. Krmilne elektrode morajo biti hkrati električno prevodne in zelo tenke da so lahko prozorne. Če bi skozi spuščali le enosmerni tok, čeprav je tekoči kristal slabo prevoden, bi že tako majhen tok povzročil elektromigracijo molekul elektrod, ki potem čez čas izgubijo prozornost. Temu se izognemo če elektrode krmilimo z izmeničnim tokom. To je mogoče ker so molekule tekočega kristala zadosti počasne, da čutijo le efektivno vrednost polja.

Če je krmilna napetost digitalna (je torej bodisi 1 bodisi 0), mora biti časovno simetrična, torej mora vsebovati enako število ničel in enic, tako na eni elektrodi kot tudi na njej nasprotni. To dosežemo tako da neko poljubno izbrano bitno sekvenco časovno obrnemo in dodamo prvotni.

Obenem mora biti vsaka točka krmiljena z drugačno bitno sekvenco, če hočemo aktivirati le določeno točko in ne cele vrstice ali stolpca hkrati. Tako, če želimo aktivirati točko s parom koordinat (x, y) , moramo pripeljati isto digitalno funkcijo na vrstično elektrodo x in stolpčno elektrodo y .

Tam kjer se elektrodi križata bo efektivna napetost enaka nič, torej tekoči kristal ne zasuče polarizacije svetlobe in, ker sta polarizator in analizator pravokotna, nastane tam temna pika. Povsod drugod pa bo tekoči kristal čutil neko efektivno napetost, ki bo zadosti visoka, da se molekule zasučejo, če so vse digitalne funkcije med seboj za le nekaj bitov različne. Zato bo povsod drugod zaslon prozoren. Če je število elektrod veliko, morajo biti digitalne krmilne funkcije ustrezno dolge, da se čim bolj razlikujejo in da bo medsebojni vpliv čim manjši. Dolge funkcije pa potrebujejo več časa da se pravilno zvrstijo, zato je osveževanje zaslona razmeroma počasno.

Današnja LCD tehnologija omogoča visokofrekvenčni multipleks v razmerju do 256:1, kar pomeni da je ob ustrezni razdelitvi zaslona možno prikazovati polno TV sliko v visoki ločljivosti (HDTV) brez vidnega utripanja slike. Sredi 80tih let pa je že multipleks 8:1 predstavljal zgornjo mejo zmogljivosti tekočih kristalov. Seveda so zahteve slikovnih zaslonov še mnogo hujše zaradi prikaza barv in njihove podobnosti dejanskim naravnim barvam, ter enakomernosti prikaza na celotni površini zaslona. Doseči enakomerno debelino plasti tekočega kristala po vsej površini zaslona z diagonalo 1m in več, zahteva zelo ravna stekla in natančno določeno njuno medsebojno razdaljo. Zaradi vsega tega je razvoj ploskih slikovnih zaslonov potekal razmeroma počasi. Kot vedno, se tudi tu hudič skriva v podrobnostih.

Nauki za prihodnost

Ko je jeseni leta 1982 bil prvič predstavljen na Sejmu elektronike v Ljubljani je Iskrascope LCD pomenil pomembno novost in svojevrstno tehnološko revolucijo. Na istem sejmu je bil predstavljen podoben osciloskop nemškega podjetja Metrabyte, ki je na trg prišel le dva meseca prej, ni pa imel ne mikroprocesorske kontrole, ne možnosti povezave z zunanjimi računalniki, poleg tega pa je imel tudi slabše električne zmogljivosti ($10\times$ počasnejše vzorčenje).

Pred tem so tudi obstajali miniaturni baterijsko napajani osciloskopi, denimo Tektronix je imel en analogni model z 2-palčno katodno cevjo in 5MHz pasovno širino, na baterije pa je lahko delal le kakšne pol ure, predvsem zaradi gretja katode in generiranja visoke anodne napetosti. Iskrascope LCD pa je bil prvi instrument, ki je združil takrat najnaprednejše tehnologije: mikroprocesorsko kontrolo z zunanjo povezavo, LCD zaslon, membransko tipkovnico, 6-urno baterijsko delovanje, hitro digitalno vzorčenje in spomin, ter nenazadnje za tiste čase prav spodobne merilne zmogljivosti: 1MHz pasovne širine, vzorčenje v enakovrednem času do 10M vzorcev na sekundo ($2\mu\text{s/cm}$), občutljivosti od 5mV/cm do 20V/cm, ter hitrim osveževanjem zaslona do 10 slik na sekundo. Novost je presenetila tudi tehnološko napredne japonce, novinarji neke japonske tehnične revije so novico iz Ljubljane predstavili svojim bralcem kar samoiniciativno!

Vesetje žal ni trajalo dolgo. Če znaš narediti dober laboratoriski prototip, še ne pomeni da znaš narediti tudi izdelek na ravni zahtevnosti industrijske serije. Uvajanje v proizvodnjo se je zavleklo za več kot dve leti, stroški so rasli, sorazmerno temu tudi nesoglasja med razvojem in industrijo, finančna kriza in razkroj Jugoslavije na vseh ravneh pa so obremenjevali vsako nabavo materiala in vsako organizacijsko in poslovno odločitev. Ko pa je proizvodnja končno le stekla, novost že dolgo ni več bila novost, pa tudi konkurenca ni sedela križem rok. Japonski Sony je hitro pišel na trg s svojim manjšim, vendar dvokanalnim modelom s 50MHz vzorčenjem, in naše sanje o uspehu in hitrejšem razvoju so se razblinile kot ljubljanska megla spomladi.

Kljub temu smo na IJS na razvoju vztrajali, in proti koncu 80tih let je v sodelovanju z Iskro Elektrooptiko bil razvit nov instrument, optični časovni reflektometer (angl., *optical time-domain*

reflectometer, OTDR), ki je bil namenjen odkrivanju napak v povezavah optičnih kablov, slika 4. Instrument je ob 20MHz vzorčni uri bil zmožen lokalizirati napako na 50km dolgem optičnem kablu na 1m natančno. Kljub uspešni predstavitvi na Sejmu elektronike so se kmalu zatem v Elektrooptiki do izdelave optičnih vlaken ohladili in projekt je zamrl.



Sl.4: OTDR, razvit v sodelovanju z Elektrooptiko.

Iskrascope je doživel še eno razvojno predelavo, in sicer kot sistem namenjen slikanju majhnih vzorcev z metodo jedrske magnetne resonance (*magnetic resonance imaging*, MRI), slika 5. Slikanje z magnetno resonanco zahteva postavitev vzorca v zelo močno magnetno polje. Žarek elektronov v klasični katodni cevi je zelo občutljiv na magnetna polja, in se zato slika signala na klasičnem osciloskopu ob magnetu močno ukrivi in defokusira; LCD pa je na magnetno polje neobčutljiv, zato je njegova prednost v takih pogojih očitna. Izdelanih je bilo nekaj deset takih sistemov, in nekateri delujejo še danes. Žal za tovrstne sisteme domača industrija ni pokazala nobenega zanimanja.



Sl.5: MRI Spektrometer. Instrument na levi strani vsebuje magnet, ter RF oddajnik in sprejemnik.

Čeprav se ne spodobi javno kritizirati svojih sodelavcev, moram tukaj omeniti dogodek, ki ponazarja s kakšnim nezaupanjem, pomisleki in pomanjkanjem vizije smo se takrat srečevali pri nekaterih vodilnih ljudjih, pa tudi na nižjih ravneh podobnega nerazumevanja ni manjkalo. Nekoč na enem od sejmov elektronike mi je kolega inženir iz Iskra Comercea v pogovoru povedal kaj si misli o celi zadevi: „Tekočekristalni zasloni se nikoli ne bodo prijeli na trgu, prepočasni so, imajo ločljivost kot LEGO-kocke, pa še grdi in sivi so, brez barv!“, je slikovito dejal. Prav zanima me kaj bi o tem povedal danes, ko razen LCD tehnologije na trgu ni mogoče dobiti nič drugega: katodne cevi so na smetišču, plazemskih zaslonov ne izdelujejo več, zasloni z organskimi svetlečimi diodami pa so tehnološko oddaljeni vsaj še 15 let v prihodnost.

Ali bi Iskra ob drugačnih zgodovinskih pogojih lahko postala evropski Samsung? Dvomim. Pa ne zaradi Iskre same. Zgodovina samostojne Slovenije kaže kako smo, delno zaradi pohlepa pri lastninenju podjetij, delno zaradi medsebojnih političnih zdrah, ter delno zaradi pomanjkanja vizije in

poslovnega znanja, najprej razpustili vse razvojne oddelke v podjetjih, nato pa sistematično uničili vsa večja in potencialno propulzivna podjetja, če začnem pri Mikroelektroniki, pa vse do gradbenega sektorja in tekstilne industrije. V takih pogojih tudi veliki Samsung ne bi dolgo zdržal.

Ali se bo mlajši rod razvojnih inženirjev in tehnikov iz teh izkušenj kaj naučil?