

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

Ing. Moh'd Ibrahim Khalil Ibrahim

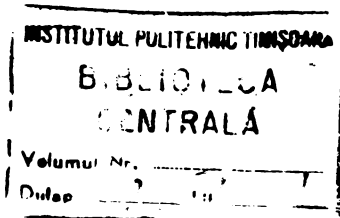
CONTRIBUTII PRIVIND IMBUNATATIREA METODELOR DE
INSPECTIE VIZUALA AUTOMATA A CABLAJELOR
IMPRIMATE

Teză de doctorat

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Conducător științific:
Prof.dr.ing. EUGEN POP

TIMIȘOARA
1987



C U P R I N S

	Pag.
INTRODUCERE	v
Cap.1. STADIUL ACTUAL PRIVIND APLICAREA IN INDUSTRIE A SISTEMELOR DE INSPECTIE VIZUALA AUTOMATA	1
1.1. Aplicații ale sistemelor de inspecție vizuală automată în industrie	1
1.2. Importanța și necesitatea inspecției vizuale automate	2
1.3. Observații generale privind sistemele de inspecție vizuală automată	3
1.4. Necesitatea inspecției vizuale automate a plăcilor cu cablaj imprimat	5
Cap.2. METODE SI ECHIPAMENTE PENTRU INSPECTIA VIZUALA AUTOMATA A CABLAJELOR IMPRIMATE	7
2.1. Definirea distanței dintre două conductoare.	7
2.2. Metode de inspecție vizuală automată a ca- blajelor imprimate (PWB)	8
2.2.1. Metoda scăderii imaginilor (Image Substraction)	8
2.2.2. Metoda de identificare a proprietă- ților (Feature Matching)	10
2.2.3. Metoda sintactică (Syntactic Approach).	11
2.2.4. Metoda de expansiune-contrație	12
2.2.5. Metoda de inspecție bazată pe măsurare (Dimensional Verification)	13
2.2.5.1. Algoritm de conectivitate (Algoritm C)	13
2.2.5.2. Algoritm U (The Euler Number Algorithm)	16
2.2.5.3. Algoritm P (The Periphery Algorithm)	17
2.2.5.4. Micsorarea unghiului minim de inspecție prin utilizarea pro- cedului cercului dublu	21
2.3. Concluzii privind metodele de inspecție vi- zuală automată a cablajelor imprimate	23
2.4. Structuri de sisteme de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate (PWB)	24

2.4.1.	Structura unui sistem de inspecție bazat pe metoda de identificare a proprietăților	24
2.4.2.	Structura unui sistem de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate bazat pe metode de măsurare	26
2.5.	Concluzii privind structura sistemelor de inspecție automată a cablajelor imprimate	29
Cap.3.	CREȘTEREA VITEZEI DE PRELUCRARE A UNUI SISTEM DE INSPECTIE VIZUALA AUTOMATA A CABLAJELOR IMPRIMATE . .	31
3.1.	Schema bloc a unui sistem de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate utilizând algoritmi bazați pe metoda de măsurare	31
3.2.	Factori de care depinde viteza de prelucrare . .	34
3.3.	Creșterea vitezei de prelucrare la valoarea maximă	37
3.4.	Aplicarea procedurii de memorare la algoritmul P	38
3.5.	Metodă de creștere a vitezei de prelucrare la forma primitivă a algoritmului P	40
Cap.4.	LIMITARI IN APLICAREA ALGORITMULUI P LA INSPECTIA PLACILOR CU CABLAJ IMPRIMAT	43
4.1.	Modalități de aproximare a unui cerc continuu printr-un cerc discret	45
4.1.1.	Modalități de aproximare a unui cerc cu diametrul un număr par de pixeli.	46
4.1.2.	Modalități de aproximare a unui cerc cu diametrul un număr impar de pixeli.	47
4.2.	Capacitatea algoritmului P la inspecția vizuală a cablajelor imprimate având conturul neted .	48
4.2.1.	Inspeția lățimii unui conductor orizontal	49
4.2.2.	Inspeția distanței dintre două conductoare orizontale	55
4.2.3.	Inspeția lățimii conductoarelor verticale și înclinate la 45°	56
4.2.4.	Influența discretizării cercului de test asupra valorii minime a unghiului în cazul algoritmului P	58
4.3.	Capacitatea de inspecție a algoritmului P în cazul conductoarelor având conturul cu neregularități	59

4.3.1. Efectul neregularităților asupra capacității de inspecție a algoritmului P în cazul conductoarelor orizontale și verticale	59
4.3.2. Efectul neregularităților asupra valorii minime a unghiului	61
4.4. Limitări în aplicarea procedeeilor de reducere a valorii minime a unghiului în cazul algoritmului P	62
Cap.5. ELABORAREA UNUI NOU ALGORITM DE INSPECȚIE VIZUALĂ AUTOMATĂ A CABLAJELOR IMPRIMATE	65
5.1. Formularea primei variante a algoritmului de conectivitate îmbunătățit	66
5.1.1. Cazul unei rezoluții infinite	66
5.1.2. Cazul rezoluției finite	67
5.2. Varianta a II-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit	69
5.2.1. Cazul unei rezoluții infinite	70
5.2.2. Cazul rezoluției finite	71
5.3. Limitări în aplicarea primelor două variante ale algoritmului de conectivitate îmbunătățit	73
5.3.1. Cazul unei rezoluții infinite	73
5.3.2. Cazul rezoluției finite	75
5.4. Varianta a III-e a algoritmului de conectivitate îmbunătățit	77
5.4.1. Prezentarea algoritmului	77
5.4.2. Extinderea capacității de inspecție la conductoare realizate cu un unghi /2 .	82
5.4.3. Implementarea variantei a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit	83
5.4.3.1. Unele precizări privind conectivitatea	83
5.4.3.2. Circuite pentru detecția pixelilor aflați pe conturul unui conductor și a zerourilor aferente conturului	85
5.4.3.3. Implementarea schemei combinatoriale	87

5.4.3.4. Elaborarea schemei dispozitivului de comandă	90
5.4.4. Determinarea duratei necesare pentru efectuarea unei operații de inspecție	94
5.4.4.1. Determinarea duratei unei operații de inspecție în cazul conectivității cu 8 pixeli	95
5.4.4.2. Determinarea duratei unei operații de prelucrare în cazul conectivității cu 4 pixeli	99
5.5. Comparație între varianta a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit și algoritmul C	102
Cap.6. REZULTATE EXPERIMENTALE	105
6.1. Precizări privind realizarea sistemului de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate bazat pe implementarea algoritmului P	105
6.2. Schema bloc a sistemului de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate realizat	106
6.3. Verificarea experimentală a rezultatelor stabilite în capitolul 4 și capitolul 3	111
CONCLUZII SI CONTRIBUTII	117
BIBLIOGRAFIE	121

I N T R O D U C E R E

O etapă importantă în procesul de fabricație al oricărui produs și mai cu seamă în cazul produselor de serie, o constituie operația de inspecție. Inspecția are drept scop determinarea caracteristicilor tehnice reale ale unui produs și compararea acestora cu caracteristicile impuse. Pe plan mondial se manifestă actualmente un interes crescând față de procesul de inspecție, ca mijloc eficient de creștere a competitivității produselor, iar calea urmată în marea majoritate a situațiilor o constituie inspecția automată.

Necesitatea automatizării procesului de inspecție apare firească dacă se are în vedere tendința, din ce în ce mai pregnantă în momentul de față, de inspecție în totalitate a produselor realizate în anumite ramuri ale tehnicii (inspecție 100%), imposibilitatea efectuării operației de inspecție - în anumite domenii - la nivelul de complexitate necesar utilizând "omul inspector", precum și eficiența economică sporită. Realizările tehnologice deosebite în domeniul microelectronicii precum și rezultatele teoretice obținute în prelucrarea numerică a semnalelor, au contribuit în mod hotărâtor la aplicarea în practică a ideii automatizării procesului de inspecție. În particular, pornind de la cercetările și rezultatele stabilite în prelucrarea imaginilor și recunoașterea formelor, au fost puse bazele unui nou domeniu de cercetare, inspecția vizuală automată.

Prezenta teză de doctorat aduce contribuții în acest domeniu de stringentă actualitate, abordând chestiuni legate de inspecția vizuală automată a plăcilor cu cablaj imprimat neechipate cu componente. Drept punct de plecare al cercetărilor l-au

constituit metodele și procedeele cunoscute în literatură de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, iar scopul urmărit a fost acela de a elabora algoritmi de inspecție cu viteză de prelucrare cât mai ridicată și a căror aplicare în practică să fie cât mai puțin restrictivă.

Problemele au fost tratate pe parcursul a cinci capitole, care se referă la:

1. Stadiul actual privind aplicarea în industria a sistemelor de inspecție vizuală automată. Studiul acestei probleme a permis fundamentarea necesității abordării cercetării în domeniul inspecției vizuale automate a cablajelor imprimate.

2. Studiul metodelor și echipamentelor pentru inspecția vizuală automată a cablajelor imprimate, cunoscute în literatură, ca punct de plecare al cercetărilor. În urma analizei întreprinse au rezultat trăsăturile caracteristice esențiale ale procesului de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate: necesitatea prelucrării unei cantități mari de informație într-un timp relativ scurt, adică o viteză de prelucrare ridicată precum și precizia deosebită impusă în prelucrare (de ordinul 1 pixel). A fost evidențiat de asemenea, faptul că, dintre metodele cunoscute de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, metodele bazate pe măsurare se dovedesc cele mai promițătoare sub aspectul perfecționării în direcția satisfacerii cerințelor menționate mai sus.

3. Elaborarea unui procedeu original de creștere a vitezei de prelucrare a sistemelor de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate bazate pe metoda măsurării. Aplicarea procedeului nou elaborat, în cazul unuia dintre algoritmi cunoscuți, (algoritmul P), a condus la creșterea cu 100% a vitezei de prelucrare.

4. Analiza algoritmului P, ca cel mai performant algoritm de inspecție vizuală automată a cablajelor cunoscut în literatură, din punctul de vedere al aplicabilității lui practice. Se demonstrează că, spre deosebire de cele afirmate pînă în prezent, utilizarea practică a algoritmului P impune restricții severe asupra geometriei cablajului imprimat iar în si-

tuațiile în care sînt prezente neregularități pe conturul conductoarelor acest algoritm nu poate fi utilizat.

5. Elaborarea unui nou algoritm de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, cu aplicabilitate practică puțin restrictivă și viteză de prelucrare cît mai ridicată. O comparație între algoritmul nou elaborat și algoritmul similar cunoscut în literatură, evidențiază avantajele pe care le prezintă primul, atît sub aspectul funcțional cît și din punctul de vedere al implementării hard.

Se subliniază că preocupările din cadrul tezei se înscriu în aria de cercetări efectuate de colective ale Catedrei de electronică aplicată din Institutul politehnic Timișoara, în domeniul prelucrării numerice a semnalelor, sub conducerea prof.dr. ing. Eugen Pop, șeful catedrei. Lucrarea de față constituie rezultatul unei activități susținute din partea autorului, concentrată mai cu seamă în ultimul an, sub îndrumarea competentă și plină de înțelegere a conducătorului științific, prof.dr.ing. Eugen Pop.

Pentru eforturile și îndrumările primite pe întreaga durată a pregătirii doctorandului, pentru sprijinul profesional și moral acordat cu prilejul elaborării tezei, autorul îi aduce calde mulțumiri și îi rămîne profund îndatorat.

În mod deosebit aduc mulțumirile mele șef lucrări dr.ing. Virgil Tiponuț, pentru discuțiile competente și sugestiile primite continuu pe întreaga perioadă a elaborării prezentei lucrări.

CAPITOLUL 1.

STADIUL ACTUAL PRIVIND APLICAREA IN INDUSTRIE A SISTEMELOR DE INSPECTIE VIZUALA AUTOMATA

1.1. Aplicații ale sistemelor de inspecție vizuală automată în industrie

Până în anul 1981, utilizarea sistemelor de inspecție automată la nivel comercial a fost limitată la recunoașterea caracterelor alfanumerice, recunoașterea imaginilor captate cu ajutorul sateliților precum și în probleme de diagnostic medical /13/. Aplicațiile cu caracter industrial au fost mai puțin răspândite. Astfel, din 93 de articole prezentate la conferința "IEE Computer Society Conference on Pattern Recognition and Image Processing" ce a avut loc în 1979 la Chicago, numai 6 articole tratează aplicații industriale. În 1977 sînt semnalate 18 articole publicate în acest domeniu /17/, cu aplicații la inspecția cablajelor imprimate (PCB), caracterizarea suprafețelor și identificarea obiectelor. Dintre acestea numai două tratează sisteme de inspecție vizuală complet automatizate.

Primul sistem de inspecție vizuală automată a fost realizat de firma General Motors /25/ cu scopul utilizării în procesul de testare și încapsulare a unui circuit integrat. Un al doilea sistem /28/, realizat de o firmă japoneză, a fost utilizat la testarea pe cale vizuală și realizarea automată a conexiunilor între structura internă și terminalele tranzistoarelor.

Actualmente, sistemele de inspecție vizuală automată sînt în pragul aplicării în industrie, la nivel comercial /33, 34, 37, 38, 39, 40, 44/. Industria electronică investighează în momentul de față o varietate de metode de inspecție vizuală computerizate, deoarece progresele tehnologice în proiectarea și producția com-

ponentelor și echipamentelor electronice industriale au determinat reducerea dimensiunilor fizice ale produselor simultan cu creșterea volumului producției, fapt ce complică procesul de testare calitativă. Pot fi enumerate, astfel, câteva aplicații industriale mai importante ale sistemelor de inspecție vizuală automată:

- inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate realizate pe plăci multistrat /1, 2, 3, 6, 7, 20, 21, 27, 32, 33, 35, 49, 51, 52/;

- inspecție vizuală automată a măștilor utilizate în procesul de fabricație al circuitelor integrate /41, 50, 56/;

- inspecția automată a cipurilor circuitelor integrate și alinierea lor în vederea realizării conexiunilor la terminalele capsulei /9, 21, 30, 48, 57/;

- inspecția unor subansambluri electrice și electronice utilizate în echipamentele industriale /5, 58, 57/;

- inspecția vizuală în industria constructoare de mașini și de prelucrare a metalelor /13, 15, 26, 42, 59/;

- alte aplicații ale inspecției vizuale automate (în industria textilă /53/, industria sticlei /18/, inspecția lipiturilor de pe plăcile echipate cu componente electronice /31/, măsurarea parametrilor aerosolilor /45/ etc.).

Un cuprinzătoare trecere în revistă a aplicațiilor posibile ale inspecției vizuale automate este prezentată în /47/. Aceeași problemă este tratată în mod exhaustiv, pînă la nivelul anilor '80, în /54/.

Se subliniază, în final, că implementarea în industrie a metodelor și echipamentelor de inspecție vizuală automată este condiționată - și nu în ultimul rînd - de receptivitatea viitorilor beneficiari la avantajele pe care le prezintă noile metode de testare. Unele rezerve în această privință sînt de așteptat, avînd în vedere că utilizarea inspecției vizuale automate impune reconsiderarea metodelor tradiționale de organizare a procesului de producție, în scopul obținerii unei eficiențe maxime /16/.

1.2. Importanța și necesitatea inspecției vizuale automate

Un loc principal în dezvoltarea rapidă a aplicațiilor industriale de prelucrare a imaginilor și recunoașterea formelor, îl

ocupă inspecția vizuală automată.

Calculul statistic prevăd că, în anul 1990, volumul de vânzare al sistemelor vizuale industriale va crește la 980 milioane dolari, de cca. 9 ori mai mare decât volumul de vânzare din anul 1985 /55/. Procentul de creștere anuală, a vânzărilor pînă la sfîrșitul acestui secol, se estimează a fi de 57%. Această creștere se datorează tendinței actuale de automatizare și robotizare, sistemele vizuale devenind o parte integrantă a roboților viitorului.

Un sistem vizual se definește ca fiind un echipament, ce conține un dispozitiv optic, un convertor analog-numeric și un procesor și care în mod automat captează imaginea obiectului supus studiului, o supune unei conversii, înmagazinează date, iar în final prelucrează datele pentru realizarea unei anumite operații.

Inspecția, reprezintă aria majoră de aplicație a unui sistem vizual. În această categorie se încadrează verificarea vizuală, analiza suprafețelor, detecția defectelor și măsurarea unor mărimi fizice.

Identificarea este o altă aplicație importantă a unui sistem vizual. Ea permite operația de sortare și manipulare automată a materialelor. Operația de sortare cu sisteme vizuale de identificare se realizează pe baza marcării obiectelor supuse studiului printr-o etichetă.

Beneficiarii majori de sisteme vizuale sînt industria electronică și cea constructoare de mașini.

Operația de inspecție este cea mai costisitoare din procesul de producție, automatizarea ei, conduce la facilitatea că se poate realiza o inspecție în proporție de 100%. Inspecția vizuală, permite identificarea atît a defectelor funcționale cît și a celor de aspect.

Înlocuirea "omului inspector", cu un sistem vizual automat conduce la creșterea productivității, îmbunătățirea calității produselor, reducerea prețului de cost și în același timp evită necesitatea utilizării de personal cu înaltă calificare.

1.3. Observații generale privind sisteme de inspecție vizuală automată

Utilizarea sistemelor de inspecție în industrie conduce

la înlocuirea "omului inspector" în sectorul de producție. Acest proces este impus de necesitatea de raționalizare a producției și de schimbare a tehnologiei de fabricație ca urmare a progreselor realizate în diferite ramuri ale tehnicii. Concurența în toate sectoarele de producție obligă fabricile și întreprinderile să-și minimizeze costurile de producție prin automatizarea, robotizarea și utilizarea materialelor la limita proprietăților lor fizice.

Amplasarea pe brațul unui robot a unui sistem vizual, permite ghidarea robotului pentru realizarea operațiilor de manipulare și asamblare. Efectuarea operațiilor de fabricație într-o întreprindere complet automatizată presupune existența unei instalații de inspecție deoarece în cele mai multe cazuri informațiile se obțin prin imagini optice de aceea, numeroase aplicații ale sistemelor de recunoaștere apar în acest domeniu. Sistemele de inspecție vizuală automată se utilizează în locurile unde se cere viteză, fiabilitate și precizie mare.

În esență, un sistem de inspecție vizuală automată conține o bandă transportoare, un dispozitiv pentru captarea imaginii (scanner) un calculator precum și un robot necesar realizării operațiilor de manipulare.

În fig.1.1 se prezintă schema simplificată a unui sistem de inspecție vizuală automată. Dispozitivul de captare a imaginii și calculatorul înlocuiesc omul inspector iar banda de transport depla-

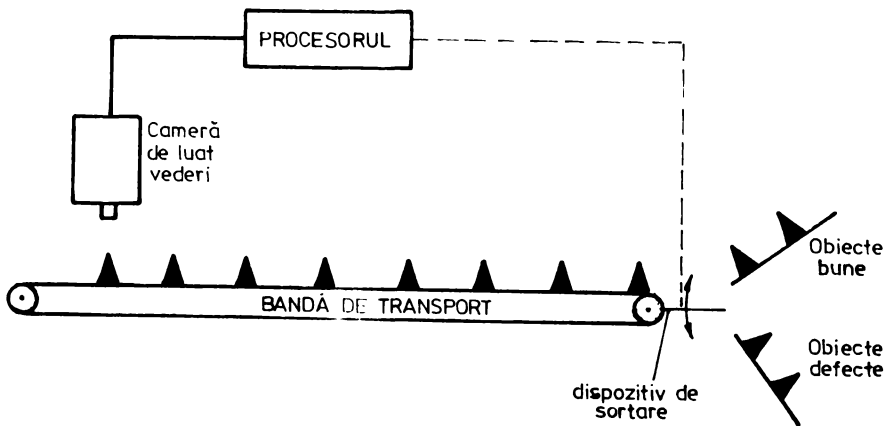


Fig.1.1. Schema simplificată a unui sistem de inspecție vizuală automată.

sează obiectele ce urmează a fi inspectate, sub dispozitivul de captare a imaginii. Dispozitivul de captare preia datele vizuale ce

descriu obiectele supuse inspecției și le transferă procesorului spre a fi analizate. După analiză se iau deciziile și procesorul comandă dispozitivul de sortare pentru rejecția componentelor defecte.

Înainte de proiectarea unui sistem de inspecție vizuală automată destinat unei anumite aplicații, trebuie efectuată o analiză în legătură cu următoarele aspecte /6/ :

- posibilitatea achiziției parametrilor optici din întreg spectrul obiectului supus prelucrării;
- definirea scopului inspecției și a condițiilor ei limită (spre exemplu tipul de prelucrare, gradul de precizie necesar etc.);
- evaluarea tendinței conform căreia este de așteptat să-și schimbe în viitor imaginea optică a obiectului supus testării, ca urmare a schimbărilor constructive sau tehnologice.

Toate aceste informații trebuie avute în vedere la elaborarea concepției de proiectare a unui sistem de inspecție vizuală automată. Stabilirea unei concepții generale în această direcție este destul de greu de realizat în aplicațiile industriale, deoarece intervine un număr mare de variabile. Pe lângă aspectele menționate mai sus, trebuie avute în vedere și următoarele cerințe:

- sistemul să fie flexibil;
- să existe posibilitatea testării independente a fiecărui bloc din sistem privind buna sa funcționare;
- în cazul în care apar schimbări dese ale obiectului testat sau a caracteristicilor acestuia, este de preferat ca modificarea parametrilor sistemului de inspecție să se poată realiza prin intermediul unui program.

1.4. Necesitatea inspecției vizuale automate a plăcilor cu cablaj imprimat

Utilizarea sistemelor de inspecție vizuală automată se impune cu necesitate în domeniul testării plăcilor cu cablaj imprimat multistrat /2/. Acest reper cunoaște în momentul de față o evoluție continuă, în sensul creșterii numărului de straturi (până la 22), /2/, precum și a densității traseelor cu cablaj imprimat. Ambele tendințe sînt determinate de miniaturizarea circuitelor integrate și hibride. Verificarea vizuală de către un operator uman a calității plăcilor cu cablaj imprimat, adică depistarea unor defecte ca:

lățimii insuficientă a conductoarelor respectiv a distanței dintre două conductoare, scurtcircuit între două conductoare, întreruperi, dimensiune necorespunzătoare a pastilei etc., constituie o operație dificilă și supusă riscurilor de eroare. Gradul de încredere al inspecției vizuale manuale a fost sub 90% în anul 1983, pentru plăci tipizate cu un singur strat și sub 70% pentru plăci cu 4 straturi /2/. Problema devine practic de nesoluționat fără o inspecție vizuală automată, în cazul plăcilor multistrat, când fiecare strat trebuie inspectat separat înainte de a fi laminat în viitoarea placă. Acest fapt limitează drastic durata de inspecție, încât soluția realizării controlului pe cale vizuală cu operatori umani devine nerațională. Creșterea densității traseelor cu cablaj imprimat prin reducerea lățimii conductoarelor respectiv a distanței dintre ele (se preconizează în viitorul apropiat utilizarea de lățimi și distanțe de ordinul 0,05 mm), complică și mai mult lucrurile, impunând în cele din urmă verificarea vizuală strict automată.

Necesitatea inspecției vizuale automate este determinată actualmente și de considerente de ordin economic. Astfel, din valoarea de 1500 dolari a unei plăci complexe cu 15 straturi, nepopulată cu componente electronice, cca.35% reprezintă costul operației de inspecție. Mai mult decât atât, se estimează ca în viitor, pe măsura creșterii gradului de complexitate a cablajului, acest procent va crește și mai mult. Avînd în vedere aceste aspecte, precum și tendința clară de trecere spre utilizare a cablajelor imprimate realizate pe plăci multistrat, ca urmare a necesității din industria calculatoarelor electronice mai ales (în anul 1982, 30% din cablajele fabricate în SUA erau multistrat), rezultă că singura soluție viabilă și din punct de vedere economic o reprezintă inspecția vizuală automată.

Numeroasele încercări efectuate în scopul realizării de sisteme pentru inspecția vizuală automată a plăcilor cu cablaj imprimat, nu au condus la rezultate pozitive decît de un timp foarte scurt. Această situație s-a datorat obstacolelor întîmpinate, ca urmare a diversității metodelor utilizate în proiectarea cablajelor imprimate precum și a lipsei unor criterii unice de verificare și testare a acestora. Prin introducerea proiectării cu calculatorul a cablajelor imprimate CAD(Computer Aided Design) și CAM(Computer Aided Manipulation) /56,57,58/, configurațiile cablajelor au devenit mai sistematizate simplificîndu-se și devenind posibil procesul de inspecție vizuală automată.

CAPITOLUL 2.

METODE SI ECHIPAMENTE PENTRU INSPECTIA VIZUALA AUTOMATA A CABLAJELOR IMPRIMATE

2.1. Definierea distanței dintre două conductoare

Înainte de prezentarea metodelor și algoritmilor de inspecție vizuală automată a plăcilor cu circuite imprimate, este utilă definirea mărimilor:

- lățimea conductorului dintr-un cablaj imprimat;
- distanța dintre două conductoare.

În fig.2.1 se prezintă diferite forme posibile de limite marginale ce delimitează un conductor în circuitele imprimate. Mărimea notată cu ω_A , reprezintă distanța dintre două margini și se definește ca segmentul de dreaptă ce este perpendicular în punctul A pe prima margine și intersectează cea de-a doua margine.

În fig.2.1.a este indicată distanța dintre două margini paralele aparținând la două conductoare; în fig.2.1.b este indicată aceeași distanță în diferite puncte B, C, D și E, marginile conductoarelor nefiind paralele. Se observă că ω_B este diferită de ω_C .

În fig.2.1.d se observă că distanțele în punctele A și B sînt infinite. În cazul în care marginea este reprezentată de linii drepte ce se întîlnesc făcînd un unghi ca în fig.2.1.e și f, distanța este infinită pentru unghiuri mai mari sau egale cu 90° , și finită pentru unghiuri mai mici decît 90° ; distanța tinde către zero pentru puncte foarte apropiate de vîrfurile unghiului.

În fig.2.1.g mărimea $\bar{\omega}_G$ reprezintă distanța perpendicularei la cel de-al doilea punct marginal. Deoarece distanța $\bar{\omega}_G$ nu este evaluată în întregime într-o arie deschisă ea se numește distanță în serpentină.

Acceptînd această definiție a distanței dintre două conductoare respectiv a lățimii conductorului, în algoritmi prezentați

în continuare, scopul este detectarea punctelor A pentru care $\omega_A < d$, unde d reprezintă lățimea conductorului, minim admisă sau distanța minim admisă dintre două conductoare (în general, cele două mărimi sînt proiectate de aceeași valoare).

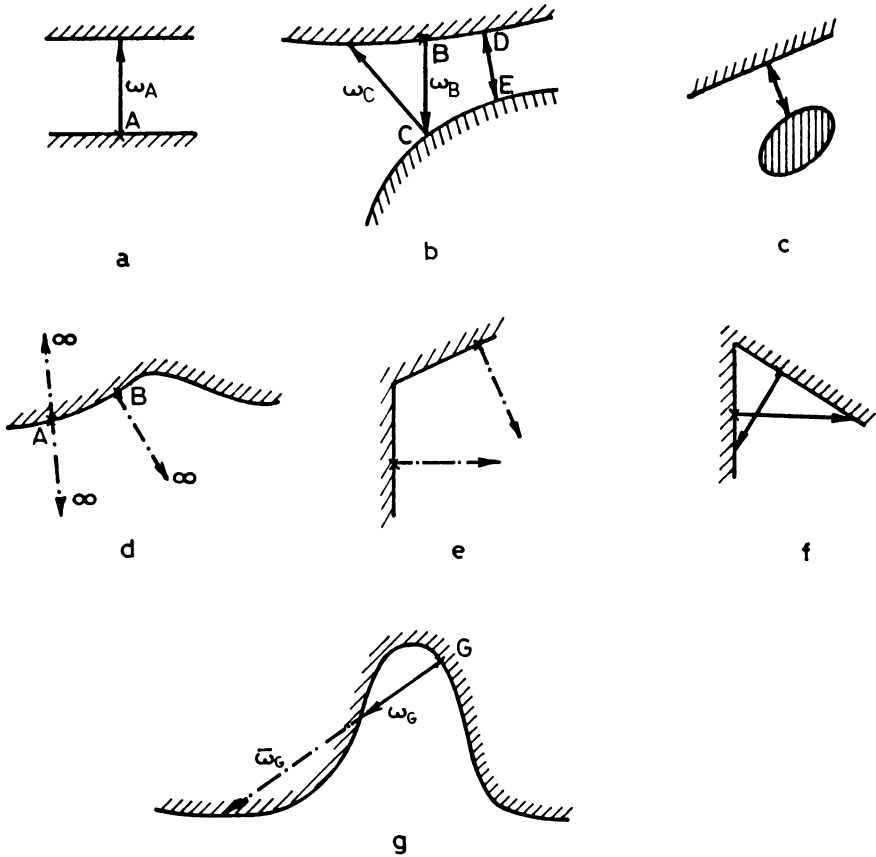


Fig.2.1. Definierea distanței dintre două conductoare în diverse situații.

2.2. Metode de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate (PWB)

2.2.1. Metoda scăderii imaginilor (Image Substraction) /54/

Metoda de scădere a imaginilor se consideră cea mai simplă metodă de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate și constă în explorarea imaginii plăcii cu cablaj imprimat și efectuarea

comparației cu o imagine originală (Master) a unei plăci lipsită de defecte. Diferențele ce apar în urma procesului de comparare (compararea se realizează cu circuite logice), reprezintă defecțiunile plăcii inspectate.

O schemă bloc a unui sistem care realizează inspecția prin operația de scădere este prezentată în fig.2.2.

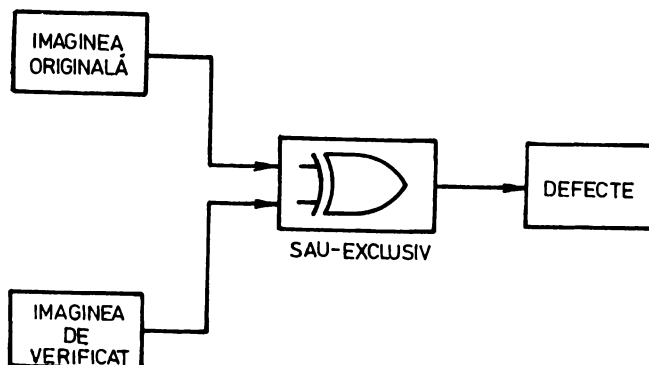


Fig.2.2. Schema principială a unui sistem de inspecție vizuală automată a plăcilor cu cablaj imprimat prin metoda scăderii.

Defectele pot fi monitorizate și prezentate utilizatorului prin indicarea coordonatelor zonelor găsite ca defecte.

Metoda de mai sus este cunoscută în literatură și sub denumirea de Databasing.

Această metodă a fost aplicată la început pentru inspecția vizuală automată a circuitelor integrate a căror tehnologie este mult mai precisă față de cazul cablajelor imprimate (care acceptă o anumită toleranță). Peterson /19/ a experimentat diferite tehnici de scădere utilizând două camere de luat vedere pentru explorarea imaginii master și a imaginii supusă verificării.

Olsen /20/ a folosit metoda de scădere într-un mod diferit. La început era preparată o mască optică dintr-o anumită culoare, mască ce reprezintă un cablaj imprimat lipsit de defecte. Cablajul supus testului era apoi iluminat prin mască cu un spot luminos de culoare complementară culorii măștii. În acest mod diferențele dintre mască și cablajul testat se proiectau ca zone luminoase pe un ecran negru, putând fi ușor identificate.

Dezavantajele metodei sînt următoarele:

- necesită memorarea unei mari cantități de informație reprezentînd datele de referință;
- necesită o aliniere foarte precisă a plăcii testate în raport cu imaginea master;
- sensibilitate mare de iluminare și la condițiile de exploatare;
- un ultim dezavantaj și cel mai important constă în faptul, că majoritatea cablajelor imprimate, corespunzătoare din punct de vedere funcțional nu sînt identice pixel cu pixel cu imaginea originală și prin urmare vor fi date defecte. Pentru eliminarea acestui dezavantaj se necesită utilizarea unor scheme de compensare și corecție care conduc la complicarea echipamentului încît metoda devine nepractică.

2.2.2. Metoda de identificare a proprietăților (Feature Matching)

Această metodă este o extindere a metodei de scădere. Se exploarează imaginea cablajului supus inspecției și se extrag proprietățile specifice. Astfel în loc de a efectua o operație de comparare directă între imaginea cablajului imprimat model, cu cel supus inspecției, se compară proprietățile lor specifice. Dacă aceste proprietăți sînt identice cablajul inspectat este acceptat.

Avantajele metodei prin identificarea proprietăților sînt următoarele:

- evită necesitatea înmagazinării unui volum mare de date față de cazul metodei precedente;
- se reduce sensibilitatea față de modificarea condițiilor de lucru;
- nu apare problema alinierii riguroase a plăcii supuse inspecției.

Jarvis /7/ a folosit metoda de mai sus pentru inspecția cablajelor imprimate utilizînd o procedură care include două operații de inspecție. Metoda constă în preselecția unei liste de proprietăți locale exprimate sub formă de matrice de cîte 5x5 pixeli care descriu marginile normale.

În prima etapă fiecare matrice de 5x5 pixeli obținută din cablajul supus inspecției, se identifică cu lista preselectată. Ma-

triciile care nu se găsesc în această listă, trec la cea de a doua etapă de inspecție, care realizează o testare suplimentară pentru depistarea defectelor.

Aceste teste suplimentare pot fi:

- calculul ariei conductorului;
- raportul dintre aria și lățimea conductorului.

S-a observat, experimental, că utilizând o listă de câteva sute de matrici de 5x5 pixeli pentru descrierea proprietăților locale ale cablajului original, numărul matricilor necesare a fi supuse celei de a doua etapă de verificare este foarte mic (de ordinul procentelor).

În scopul obținerii unei metode mai rapide, Pavliās și Krakauer /21/ au modificat tehnica de identificare a proprietăților locale, prin introducerea în cadrul acestui procedeu și a unor proprietăți geometrice ale conductorului.

În această situație numărul matricilor care descriu imaginea unui cablaj normal este substanțial mai redus, fapt ce conduce la scurtarea duratei de inspecție.

Ejiri /22/ a elaborat trei procedee de prelucrare locală pentru inspecția plăcilor cu cablaj imprimat utilizate în televizoarele color. Defectele erau definite ca mici porțiuni de cablaj a cărui lățime era mai mică decât lățimea minimă impusă.

Principalul dezavantaj al metodei bazate pe identificarea proprietăților constă în volumul mare de calcule, necesar a fi efectuate și în consecință o durată mare a procesului de inspecție.

2.2.3. Metoda sintactică (Syntactic Approach)

Această metodă de analiză sintactică sau structurală oferă posibilitatea descrierii unui număr mare de forme complexe printr-un număr mic de primitive, utilizând reguli structurale.

Conturul cablajului imprimat poate fi descompus într-un număr mic de elemente finite, numite primitive. Astfel de primitive pot fi colțuri sau linii de forma celor prezentate în fig.2.3.a.

Prin utilizarea unui grup de primitive, convenabil alese, orice formă de cablaj defect poate fi descrisă structural printr-o succesiune de caractere, ca în fig.2.3.b. Operația de inspecție se reduce în continuare la cercetarea șirului de caractere care descriu conturul cablajului imprimat supus testării /34/.

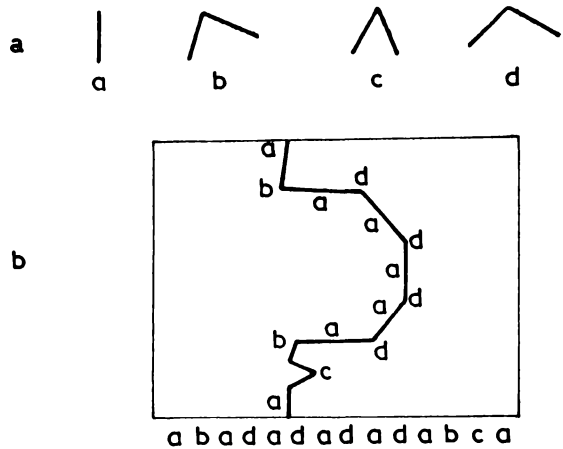


Fig.2.3. Ilustrarea modului de descriere a imaginii utilizând un grup de primitive: a-primitivele cablajului imprimat; b-reprezentarea conturului cablajului imprimat printr-o succesiune de caractere.

Diferite tehnici sintactice pentru analiza formelor și urmărirea conturului sînt prezentate în /23, 24/. Unele dintre acestea au fost utilizate pentru inspecția vizuală automată a cablajelor imprimate.

2.2.4. Metoda de expansiune-contrație /22/

Principiul acestei metode constă în extinderea ariei conductorului, uniform în toate direcțiile, cu o distanță egală cu lățimea minimă admisă a conductorului. Imaginea extinsă este apoi contractată cu aceeași cantitate și ceea ce rezultă se compară cu imaginea inițială. Diferențele care apar reprezintă erori ale ariei conductoare. Într-un mod similar sînt detectate erorile ariei izolatoare, prin extinderea și contractia acestei arii urmată de compararea rezultatului astfel obținut cu imaginea inițială.

Avantajul metodei expansiune-contrație constă în aceea că nu necesită o imagine originală (Master) a plăcii testate. Totodată, metoda prezintă dezavantajul că indică erori false ori de cîte ori raza de curbură a cablajului inspectat este mai mică ca $d/2$ (d reprezentînd lățimea maximă respectiv distanța minimă dintre două conductoare).

2.2.5. Metoda de inspecție bazată pe măsurare (Dimensional Verification) .

Această metodă necesită efectuarea unor operații de măsurare asupra produsului supus testării, pixel cu pixel. Sînt măsurate astfel lățimea conductorului, diametrul pastilei (Pad) și respectiv distanța între două conductoare învecinate.

Thissen /48/ a dezvoltat un sistem de inspecție vizuală a cablajelor imprimate bazat pe metoda așa-numită linii centrale. În această metodă placa inspectată este comparată cu un model, constînd din liniile centrale ale tuturor conductoarelor respectiv ariilor izolatoare existente în placa master. Pe durata inspecției, placa testată este aliniată în raport cu modelul și se determină dacă lățimea conductorului respectiv a ariei izolatoare, în jurul fiecărui punct de pe liniile centrale, corespunde dimensiunii minime admise.

Bentley /49, 52/ a dezvoltat Inspectorul, un echipament destinat inspecției vizuale automate a cablajelor imprimate realizate cu un singur strat respectiv cu mai multe straturi. Metoda de măsurare este axată pe utilizarea unui grup de 38 de detectoare, astfel aranjate încît permit detecția defectelor pe baza criteriului de lățime minimă a conductorului respectiv lățimea minimă a intervalului dintre conductoare. Semnalele generate de detectoare se prelucrează cu o viteză mare, cu ajutorul unor circuite logice.

Alte sisteme de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, bazate pe metode de măsurare, au fost realizate de Nakashima /50/ și Sterling /51/.

În cele ce urmează vor fi prezentați cei mai eficienți algoritmi bazați pe metoda măsurării. De fiecare dată se va presupune că imaginea cablajului imprimat supus testării a fost captată și convertită analog-numeric sub formă binară, pixelilor aferenți ariei conductoare atribuindu-li-se convențional valoarea "1" logic, iar pixelii din intervalul dintre conductoare luînd valoarea "0" logic.

2.2.5.1. Algoritmul de conectivitate (Algoritmul C)

Conform acestui algoritm, pentru a decide în legătură cu corectitudinea cablajului într-un anumit punct (pixel), se inspec-

tează o arie circulară din imagine, de rază d și avînd centrul în punctul supus verificării. Aria circulară baleiază întreaga imagine a cablajului, astfel încît fiecare pixel din imagine să devină succesiv centrul ariei de test.

Figura 2.4 ilustrează principiul de inspecție descris mai sus.

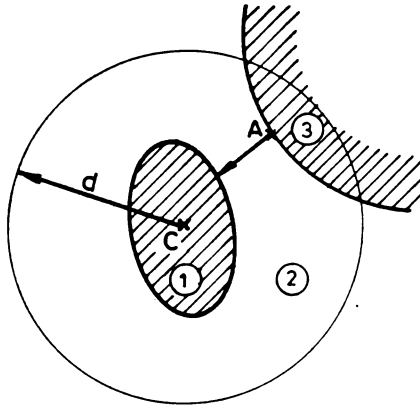


Fig.2.4. Ilustrarea pe un exemplu a principiului ce stă la baza algoritmului C.

Prima etapă impune ca suprafața 2 din fig.2.4 să fie neglijată în timp ce etapa a doua activează celelalte suprafețe 1 și 3. În etapa a treia se neglijează suprafața 1 iar în cea de-a patra etapă se dă semnalul de eroare.

În exemplul considerat (fig.2.4) va fi semnalată eroare, deoarece aria 3 din figură rămîne activă. Acest rezultat este corect fiindcă distanța între suprafețele 1 și 3 este mai mică decît distanța critică d .

Implementarea hardware a acestui algoritm este prezentată în fig.2.5. Circuitul de prelucrare efectivă a sistemului de inspecție vizuală constă dintr-un număr de celule logice, identice, egal cu numărul de pixeli care se aplică simultan ariei circulare de test. Celulele logice sînt dispuse uniform pe aria circulară, cu excepția locului pixelului din centru care rămîne gol. În această situație este posibilă aplicarea unui "1" logic la intrările celor patru celule logice învecinate centrului, așa cum este arătat în fig.2.5.

Fiecare celulă logică are o structură ca cea prezentată în fig.2.5.b. Se observă că valoarea pixelului din centrul cercului de test se aplică la fiecare celulă logică. Dacă la una din cele patru

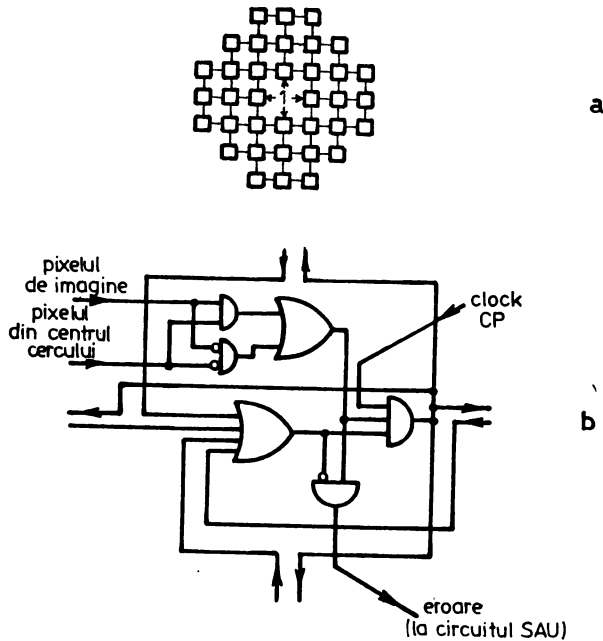


Fig.2.5. Implementarea hardware a algoritmului de conectivitate: a-amplasarea celulelor logice pe aria de test; b-schema unei celule logice.

intrări ale unei celule logice este aplicat un "1" logic și valoarea pixelului imagine existent la intrare este identică cu valoarea pixelului din centrul ariei de test, este programat un "1" logic spre fiecare din cele patru celule învecinate. Semnalul eroare este generat ori de câte ori valoarea pixelului imagine este egală cu valoarea pixelului din centrul ariei circulare și nici una dintre cele patru intrări nu se găsește pe "1" logic.

Datorită interconectării bilaterale, fiecare celulă logică se comportă ca un circuit basculant bistabil care memorează starea stabilită pe durata ultimului test. În vederea inițierii unei noi operații de testare, pentru pixelul următor, starea celulelor logice este inițializată prin întreruperea legăturii dintre ele, cu ajutorul unui impuls CP (fig.2.5.b).

Algoritmul prezentat mai sus se numește algoritmul de conectivitate, deoarece caracteristica lui esențială constă în a verifica dacă pixelii din aria circulară de aceeași valoare cu a pixelului din centru sînt în conectivitate cu acesta din urmă .

Dezavantajul acestui algoritm constă în imposibilitatea inspecției corecte a cablajelor care includ porțiuni delimitate de linii care se intersectează sub un unghi mai mic de $\pi/2$ precum și în timpul relativ mare pentru inspecția fiecărui pixel.

2.2.5.2. Algoritmul U (The Euler Number Algorithm)

Algoritmul U se aseamănă cu algoritmul C, deoarece se bazează tot pe concepția de conectivitate, acest algoritm, în loc să cerceteze legătura între pixelul din centrul ariei circulare și celelalte regiuni din această arie, utilizează o măsură specifică de topologie, numită numărul lui Euler /8/.

Pentru prezentarea formei primitive a acestui algoritm se introduc două numere F_0 și F_1 (numite numerele lui Euler) definite în felul următor:

F_0 - reprezintă numărul regiunilor din aria circulară de test, care include pixeli de valoare "0";

F_1 - numărul de regiuni din aria de test, care includ pixeli de valoare "1".

Semnalul eroare este generat ori de câte ori funcția booleană:

$$F_1 = A + B \quad (2.1)$$

ia valoarea logică "1". În relația de mai sus, variabilele logice A și B sînt definite după cum urmează:

$$A = \begin{cases} "1" & \text{pentru } F_0 > 1 \\ "0" & \text{în rest} \end{cases} \quad B = \begin{cases} "1" & \text{pentru } F_1 > 1 \\ "0" & \text{în rest} \end{cases} \quad (2.2)$$

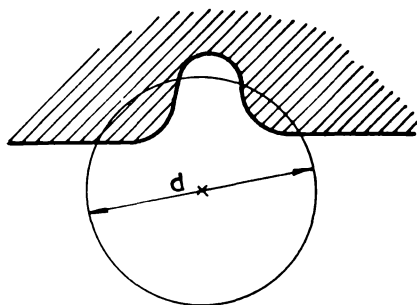


Fig.2.6. Comportarea necorespunzătoare a algoritmului U (forma primitivă) în situația în care conturul conductorului prezintă o rază de curbură mai mică ca $d/2$.

Este de menționat că algoritmul enunțat mai sus se comportă necorespunzător în situația în care conturul cablajului prezintă într-un anumit punct o rază de curbură mai mică decât $d/2$ (fig.2.6). Pentru remedierea acestui neajuns se utilizează o arie de test cu diametrul $2d$ și este semnalată existența unui defect ori de câte ori funcția booleană:

$$f_2 = \overline{p}A + pB \quad (2.3)$$

ia valoarea logică "1". Prin p a fost notată, mai sus, valoarea logică corespunzătoare pixelului din centrul ariei circulare de test.

Deoarece algoritmul U generează semnal eroare când există o a doua regiune (pe lângă cea care acoperă centrul ariei de test), la o distanță mai mică decât d față de centrul ariei, condiția ca aria de test să nu conțină goluri (regiunii de "1" dacă valoarea pixelului din centru este $p=1$, respectiv regiunii de "0" dacă $p=0$), determină ca algoritmul U să fie echivalent cu algoritmul C.

În fig.2.7.a se prezintă un exemplu de neechivalență între cei doi algoritmi. În cazul prezentat aici, algoritmul U nu generează semnal eroare, deoarece centrul ariei de test este situat în

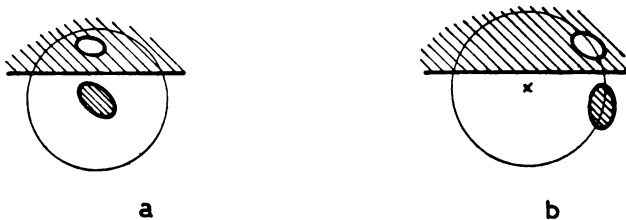


Fig.2.7. Exemplu care justifică echivalența algoritmului U cu algoritmul C.

aria considerată gol (adică nu este traversată de circumferința ariei de test) și prin urmare $F_1=1$. Acest defect ar fi fost indicat dacă s-ar fi utilizat algoritmul C. Prin fig.2.7.b se justifică că există, totuși, o altă poziție a ariei de test pentru care algoritmul U conduce la generarea semnalului eroare.

În concluzie, se poate spune că algoritmul U este echivalent cu algoritmul C, încât se mențin dezavantajele acestuia din urmă.

2.2.5.3. Algoritmul P (The Periphery Algorithm)

Algoritmul P, inspectează numai pixelii de pe circumferința cercului de test. În acest caz se utilizează un cerc de test cu diametru d și nu de rază d așa cum a fost cazul în algoritmul C, (d reprezintă distanța critică).

In timpul inspecției cercul de testare se deplasează în fiecare poziție posibilă din imaginea digitalizată pixel după pixel. In fig.2.8 se prezintă cercul de test care intersectează două margini de conductoare avînd o rază suficient de mare și aflate la o distanță mai mică decît d .

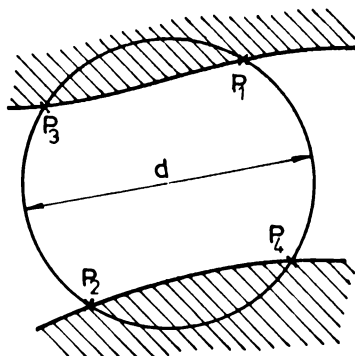


Fig.2.8. Ilustrarea principiului ce stă la baza formei primitive a algoritmului P.

Prezența a două sau mai multe treceri "0" → "1" în sens anti-orar respectiv două sau mai multe treceri "1" → "0" în sens orar așa cum este cazul din figură, impune generarea semnalului de eroare.

Dat fiind caracterul discret al imaginii, cercul de test este aproximat așa cum este arătat în fig.2.9.a. Mărimile $x_i, i=1, \dots, 24$ reprezintă valorile binare ale pixelilor situați pe circumferință și care sînt supuși la un moment dat testării. Pentru determinarea numărului de treceri "0" → "1" în sens antiorar, se poate utiliza schema logică reprezentată în fig.2.9.b. La fel ca și în cazul algoritmului U, f reprezintă funcția eroare.

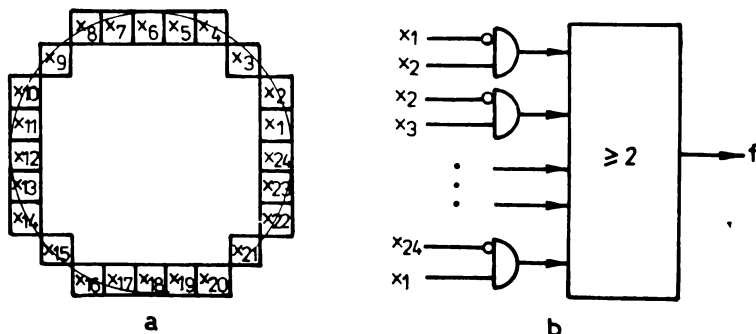


Fig.2.9. Implementarea hardware a formei primitive a algoritmului P; a-aproximarea discretă a cercului de test; b-schema logică a circuitului de prelucrare.

Deoarece cercul de test are raza egală cu $d/2$, algoritmul P va indica eroare și în situația în care o singură margine a unui conductor prezintă o curbă de rază mai mică decât $d/2$, așa cum este arătat în fig.2.10. Din acest punct de vedere, algoritmul P în forma sa primitivă se comportă ca și algoritmul de expansiune - contracție.

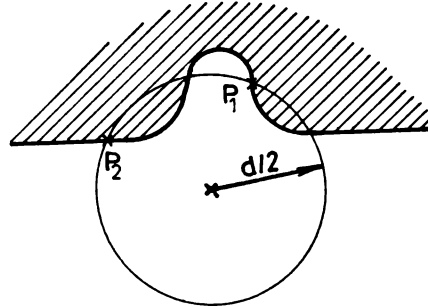


Fig.2.10. Comportarea eronată a algoritmului P, forma primitivă, în cazul unui contur cu o curbă de rază mai mică decât $d/2$.

Pentru evitarea acestui neajuns, algoritmul P se reformulează (algoritmul P propriu-zis), impunând existența a două treceri diametral opuse de la "1" → "0" /8/.

a) Cercul de test, avînd raza $d/2$ și valorile logice ale pixelilor de pe circumferință notate cu x_i , $i=1,2,\dots,n$, se deplasează astfel încît centrul său să ajungă succesiv în fiecare punct al imaginii binare.

b) Pentru fiecare poziție a cercului de test este generată următoarea funcție eroare:

$$f = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \bar{x}_{i+1} \cdot x_{id} \cdot \bar{x}_{id+1} \quad (2.4)$$

În expresia de mai sus x_{id} reprezintă valoarea binară corespunzătoare pixelului diametral opus cu pixelul de rang i .

c) Se generează semnal eroare dacă $f=1$.

În fig.2.11 este reprezentat modul de implementare a algoritmului cu circuite logice (hardware). Se observă că numărul de porți SI este dat de numărul pixelilor de pe circumferință ($n/2$) și că operația de testare a fiecărui pixel durează un interval de timp egal cu timpul de propagare prin două nivele logice.

În comparație cu algoritmul C, algoritmul P este avantajos sub aspectul costului echipamentului și al vitezei.

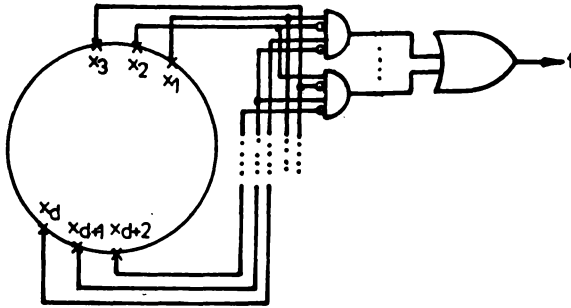


Fig.2.11. Implementarea hardware a algoritmului P.

În formularea algoritmului P s-a menționat că cele două puncte de trecere de la "1" → "0" trebuie să fie diametral opuse, pentru producerea semnalului de eroare, în caz că există două conductoare aflate la o distanță mai mică decât d .

Fig.2.12 ilustrează că dacă există asemenea două conductoare atunci există o poziție a cercului de test pentru care două treceri de la "1" → "0" sînt diametral opuse.

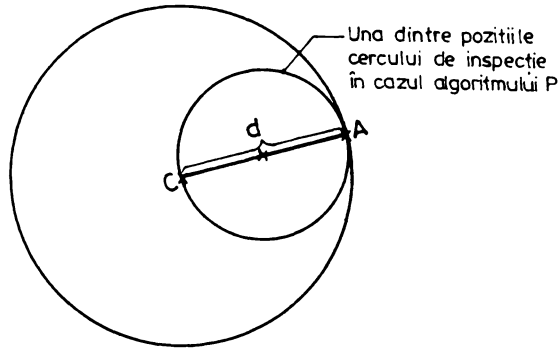


Fig.2.12. Modul de verificare al punctelor din imagine în raport cu un anumit punct C.

Considerînd punctul C, un punct marginal (pe conturul unui conductor), prin aplicarea algoritmului P, acest punct este testat față de punctul A pentru o anumită poziție a cercului de test.

Intr-un alt moment și o altă poziție a cercului de test, punctul C se va testa față de alt punct, care se află la distanța d în raport cu el. Deci locul geometric al punctelor care sînt verificate față de punctul C este un cerc de rază d , și al cărui centru este situat în punctul C. Această ultimă observație evidențiază apropierea ce există între algoritmul P și algoritmul C.

Algoritmul P nu permite inspecția unui conductor al cărui contur prezintă unghiuri $\varphi < \pi/2$, deoarece în toate situațiile respective va fi generat un semnal eroare/8/. În scopul extinderii capacității de inspecție și pentru unghiuri mai mici ca $\pi/2$, se utilizează o variantă a algoritmului P, bazată pe numărul de tranziții de la grupuri de k pixeli de valoare "0" ("1") la grupuri de k pixeli de valoare complementară (fig.2.13). Semnalul eroare va fi generat dacă există două asemenea tranziții diametral opuse la parcurgerea circumferinței într-un singur sens. Unghiul limită pînă la care procedeul asigură inspecția corectă este dat de relația /8/ :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{2k}{d}, \quad (2.5)$$

în care d reprezintă diametrul cercului de inspecție (fig.2.13).

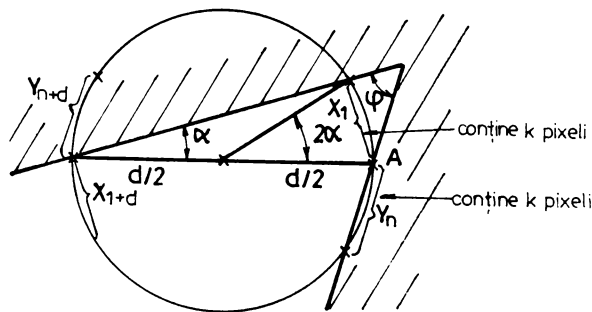


Fig.2.13. Determinarea unghiului limită φ sub care nu se poate efectua operația de inspecție.

2.2.5.4. Micșorarea unghiului minim de inspecție prin utilizarea procedurii cercului dublu

Procedeul cercului dublu /8/ a fost elaborat cu scopul extinderii capacității de inspecție a algoritmilor bazați pe metoda măsurării, (algoritmul C, algoritmul U, algoritmul P) și pentru cazurile în care conturul conductorului face unghiuri mai mici ca $\pi/2$. Pentru ilustrarea procedurii va fi prezentată, în cele ce urmează, aplicarea lui în cazul algoritmului de conectivitate.

În fig.2.14 cercul de rază d reprezintă circumferința ariei de inspecție conform algoritmului C, cunoscut. Pentru realizarea

inspecției corecte a unui conductor ca în figură, al cărui contur face un unghi $\varphi < \pi/2$, aria inițială se extinde pînă la un al doilea cerc, de rază $D > d$, concentric cu primul. Circuitele corespunzătoare ariei mărginite de cercul cu rază d generează semnalul eroare la fel ca și în cazul algoritmului C, în timp ce coroana circulară de-

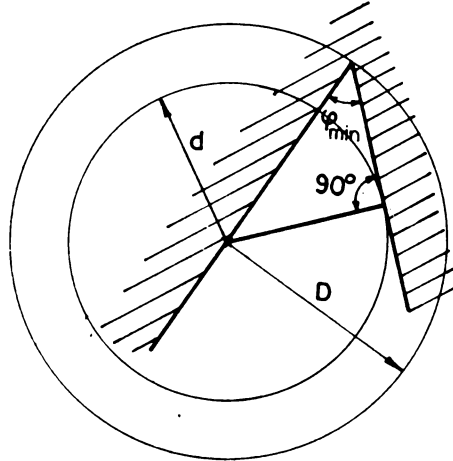


Fig.2.14. Determinarea unghiului limită sub care nu se poate efectua operația de inspecție utilizînd două cercuri concentrice.

limitată de cele două cercuri realizează numai propagarea conectivității între pixeli de aceeași valoare cu valoarea pixelului din centru. Unghiul minim φ_{\min} pentru care inspecția se mai realizează încă corect este cel corespunzător cazului limită reprezentat în fig.2.14. Se stabilește imediat că:

$$\varphi_{\min} = \arcsin \frac{d}{D} \quad (2.6)$$

Aplicarea procedurii cercului dublu conduce la creșterea duratei inspecției unui pixel și prin urmare reduce viteza de prelucrare.

În cazul algoritmului U, utilizarea procedurii cercului dublu constă în determinarea funcției eroare dată de relația /8/:

$$f = p \cdot A_d \cdot A_D + \bar{p} \cdot B_d \cdot B_D \quad (2.7)$$

unde A_d , A_D , B_d , B_D se calculează conform relației (2.2) pentru cele două cercuri, iar în cazul algoritmului P :

$$f = f_d \cdot f_D \quad (2.8)$$

În ultima expresie f_d și f_D reprezintă funcțiile eroare generate

conform algoritmului P de circuitele aferente cercurilor cu diametrul d respectiv D . Valoarea unghiului limită φ_{\min} este dată în ambele situații de relația (2.6).

2.3. Concluzii privind metodele de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate

1. În momentul actual se utilizează cablaje imprimate realizate cu conductoare foarte subțiri ceea ce face ca procesul de inspecție realizat de un operator uman să fie deosebit de dificil în condițiile de precizie și rezoluție. Rezultă de aici necesitatea de automatizare a procesului de inspecție, utilizând un sistem de inspecție vizuală automată.

2. Automatizarea procesului de inspecție a cablajelor imprimate, prin utilizarea sistemelor de inspecție vizuală automată, pretinde prelucrarea unei mari cantități de informație. Spre exemplu, considerând lățimea minimă admisă a conductorului egală cu distanța minimă admisă dintre două conductoare și egală cu 0,2 mm, rezultă că în scopul obținerii unei precizii acceptabile, dimensiunile limită ale unui pixel nu trebuie să depășească 0,02 x 0,02 mm. În aceste condiții, o placă cu dimensiunile de 320 x 320 mm, trebuie să fie digitizată în cel puțin 1600 x 1600 = 256 M pixeli. Această informație trebuie prelucrată în totalitate, pixel cu pixel.

3. Viteza este un factor foarte important și determinant în procesul de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, având în vedere că este de dorit o prelucrare în timp real. Din această cauză și datorită volumului mare de informații ce trebuie să fie prelucrate, rezultă că procesul de inspecție poate fi implementat numai prin circuite logice (hardware) și nu prin programe (software).

4. Din compararea metodelor de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, rezultă că metodele bazate pe măsurare sînt mai avantajoase decît celelalte metode ca urmare a posibilității implementării lor utilizînd circuite logice, de unde rezultă o viteză de lucru sporită. Totodată, deoarece metodele de inspecție bazate pe măsurare asigură realizarea procesului de inspecție printr-o verificare dimensională pixel cu pixel, rezultă că precizia obținută este foarte mare, putînd fi detectate defecte de dimensiunea unui singur pixel.

Ținînd cont de faptul că în momentul de față cablajele im-

primare se proiectează cu ajutorul calculatorului, și că un asemenea cablaj include numai segmente de dreaptă ce pot fi orizontale, verticale și la 45° , terminate sau nu cu o pastilă (pad), procesul de inspecție poate fi simplificat.

5. Analizând algoritmi de inspecție bazați pe metoda măsurării, algoritmul P este cel mai promițător și mai avantajos în raport cu ceilalți algoritmi atât din punctul de vedere al costului implementării cât și al vitezei de prelucrare.

2.4. Structuri de sisteme de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate (PWB)

2.4.1. Structura unui sistem de inspecție bazat pe metoda de identificare a proprietăților

Principiul ce stă la baza acestui sistem, elaborat de către J.F.Jarvis /7/, constă în construirea unei liste de modele unice (Unique Patterns) de 5×5 sau 7×7 elemente (pixeli), lipsite de erori, prelevate de pe un cablaj bun și efectuarea procesului de comparație dintre aceste modele (ferestre) și ferestrele prelevate din cablajul supus inspecției. Modelele ce nu se găsesc în lista pregătită sînt posibile a fi defecte. În scopul luării unei decizii finale, aceste modele sînt supuse unei a doua etapă de inspecție. În această etapă se efectuează un anumit număr de teste cum ar fi: mărimea ariei conductorului adică numărul de "1" din fereastra prelevată, lungimea conturului conductorului din fereastră, raportul dintre pătratul lungimii conturului și aria conductorului, numărul de regiuni distincte într-o fereastră (numărul de regiuni care conțin numai "o" respectiv numai "1") precum și numărul de margini ale ferestrei ce conține numai "o"-uri (această proprietate dă informații despre curbura segmentului de contur din fereastra respectivă). Toți acești parametri se evaluează pentru fiecare fereastră supusă testării. Dacă valorile determinate se încadrează în limitele stabilite, fereastra respectivă se consideră bună. În concluzie, concepția acestui sistem implică două etape: - prima etapă poate fi considerată ca un proces de filtrare prin care este redus numărul de ferestre ce trec la cea de-a doua etapă de analiză, mai detaliată; această primă etapă de inspecție se implementează prin circuite logice permițînd o prelucrare în timp real. Cea de-a doua etapă se efectuează cu ajutorul unui calculator condus de un program, deci

procesul de prelucrare în acest caz este relativ lent.

Sistemul de inspecție analizat mai sus permite detecția defectelor mici ce apar sub formă neregulată în cablajele imprimate. Principiul de elaborare a acestui sistem are la bază următoarea observație experimentală. Jarvis, a constatat că din numărul total de ferestre de câte 5x5 sau 7x7 pixeli, posibile, obținute din 80 de imagini de câte 512 x 512 de pixeli, numai un procent mic de 3,4% conțin informații de interes privind conturul conductorului (un punct se consideră pe contur dacă valoarea pixelului corespunzător este "1" și cel puțin un pixel din cei patru pixeli vecini este "0"). Mai mult decît atît din acest procent numai un număr foarte mic de ferestre sînt unice. S-a mai observat, apoi, că 36% din numărul total de ferestre unice sînt suficiente pentru ca plăcile cu defecte să fie injectate în proporție de 99%.

Schema bloc a sistemului de inspecție, incluzînd cele patru subsisteme componente, este reprezentată în fig.2.15.

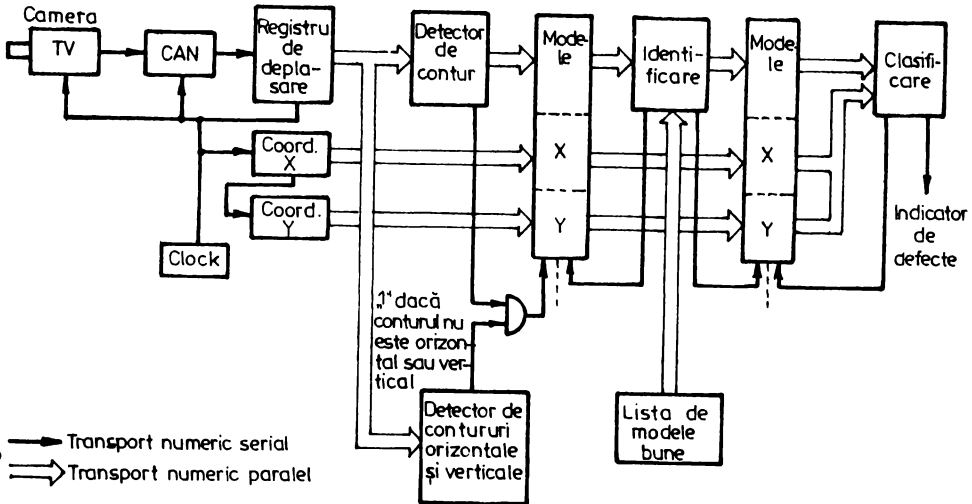


Fig.2.15. Schema bloc a sistemului de inspecție vizuală bazat pe metoda identificării proprietăților.

Primul subsistem include elementele de captare și conversie analog-numerică a imaginii, un registru de deplasare pentru generarea ferestrelor și un detector de contur.

Acest ultim element validează execuția operației de identificare numai asupra ferestrelor care conțin conturul unui conductor (sînt excluse operației de identificare ferestrele care includ numai "1" sau numai "0"). În acest fel este crescută viteza de inspecție.

Al doilea subsistem este destinat realizării operației de identificare a tuturor ferestrelor care trec prin detectorul de contur.

Al treilea subsistem execută operația de clasificare finală a ferestrelor, care, în urma operației de identificare nu s-au găsit în lista de ferestre lipsite de defecte. Această ultimă etapă se implementează cu ajutorul unui program pe un minicalculator sau microcalculator și constă în evaluarea și compararea celor cinci proprietăți prezentate anterior.

Al patrulea subsistem este un detector de segmente orizontale sau verticale. Acesta are rolul de a opri ferestrele ce conțin numai segmente orizontale sau verticale să ajungă la blocul de identificare, deoarece aceste ferestre nu prezintă interes din punctul de vedere al inspecției (scopul inspecției constituindu-l analiza marginilor neregulate).

Utilizarea acestui subsistem conduce la creșterea vitezei de lucru a blocului de identificare.

2.4.2. Structura unui sistem de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate bazat pe metoda de măsurare

Defectele ce pot fi detectate cu acest sistem sînt:

- scurtcircuite;
- întreruperi de circuite;
- lățime insuficientă a conductorului;
- distanță insuficientă între conductoare;
- formă necorespunzătoare a pastilei.

Aceste sisteme utilizează algoritmi sensibili la defecte ce pot fi implementați pe un calculator sau cu circuite logice. Regulele generale pe care se bazează sistemul menționat sînt următo-

rele /1/.

1. Partea terminală a unui conductor trebuie să aibe o formă bine precizată (spre exemplu, conductorul să înceapă și să se sfârșească cu câte o pastilă).

2. Conductoarele trebuie să aibă lățimi minime și maxime specificate.

3. Distanța dintre două conductoare nu trebuie să fie mai mică decît o anumită valoare impusă.

Sistemul are 4 senzori:

- senzorul pentru conductoare a căror parte terminală nu are o formă bine precizată;

- senzorul pentru lățimea minimă a conductorului respectiv distanța minimă între două conductoare;

- un senzor pentru detecția ariilor mici;

- un senzor pentru detecția conductorilor a căror lățime depășește o anumită valoare impusă.

Parametrii de inspecție se introduc inițial direct de către operator sau prin intermediul unui program înregistrat pe o casetă.

Reprezentarea schematică a acestui sistem de inspecție este prezentată în fig.2.16.

Procesul de inspecție (funcționarea) constă în următoarele operații:

1. Plăcile cu circuite imprimate ce urmează să fie inspectate, se așează în navete orientate în sus cu fața ce conține cablajul supus verificării.

2. Navetele cu plăcile de inspectat se aduc la nivelul inferior (nivelul 1) al stației de depozitare iar după golire vor fi depuse în celelalte două nivele superioare (nivelul 2 și 3).

3. Fiecare navetă încărcată cu plăci este prevăzută cu un descriptor, reprezentat printr-un cod cu bare, care conține informații privind lotul respectiv de plăci. Pe baza acestor informații operatorul introduce în sistem valorile limită ale parametrilor supuși inspecției.

4. Plăcile din navetă sînt separate între ele prin fișii de hîrtie protectoare. Pentru manipularea atît a plăcilor, în scopul transferării la locul unde urmează a fi inspectate, cît și a hîrtilor protectoare se utilizează un robot. Acesta este prevăzut cu senzori care îi permit să stabilească dacă obiectul apu-

cat este o placă de testat sau o fișie de hîrtie protectoare. Hîr-
tiile protectoare sînt depuse într-un coș de acumulare a hîrtiei,
iar plăcile sînt transportate la masa de poziționare.

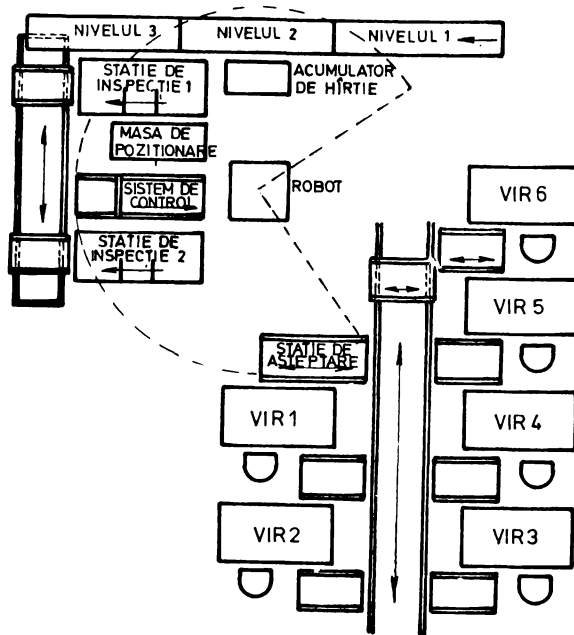


Fig.2.16. Schema de organizare a procesului de inspecție vizuală automată a plăcilor cu cablaj imprimat.

5. Masa de poziționare permite rotirea plăcii în poziție co-
rrespondentă pentru a fi transferată cu ajutorul robotului la masa
de inspecție. În același timp se asociază plăcii un cod pe baza că-
ruia aceasta poate fi lesne identificată.

6. Se transferă apoi placa la stația de inspecție numărul 1.

7. Cu ajutorul camerelor de luat vederi echipate cu circuite
de transfer de sarcină (CCD - Charge Complred Devices), în număr de
19, se efectuează procesul de inspecție vizuală. Acest proces per-

mite detecția defectelor și localizarea lor prin indicarea coordonatelor X - Y, datele despre defecte se transmit în continuare la baza de date a sistemului.

8. Plăcile cu cablaje pe o singură față se transferă direct la stația de verificare și reparație (V/R), iar cele cu două fețe sînt rotite cu 180° și retransmise prin intermediul unei benzi de transport la stația de poziționare, procesul de inspecție a celei de-a doua fețe este identic cu cel pentru o singură față cu precizarea că acesta este efectuat la stația de inspecție numărul 2.

9. Plăcile inspectate sînt transmise stației de verificare și reparare prin intermediul unei benzi de transport. Aici este decodificat codul plăcii și pe baza acestuia se extrage din baza de date informațiile privind defectele depistate. Utilizînd aceste informații operatorul decide dacă este posibilă repararea și în caz afirmativ execută operațiile necesare.

10. Banda de transport aduce în cele din urmă plăcile testate la stația de depozitare unde robotul le ambalează cu hîrtie de separare, după care le transferă la nivelul superior (nivelul 3) sau intermediar (nivelul 2), după cum plăcile respective au fost acceptate sau respinse.

Este de menționat că acest sistem a fost elaborat de către Itek Optical Systems of Lexington, Massachusetts, pentru firma Digital Equipment Corporation din Greenville în 1986 și că este în curs de realizare.

2.5. Concluzii privind structura sistemelor de inspecție vizuală automată a cablajelor imprintate

Un sistem de inspecție vizuală automată a cablajelor imprintate trebuie să conțină următoarele subsisteme:

- Un subsistem pentru captarea imaginii prevăzut cu o cameră de luat vederi de regulă liniară, echipată cu senzor vizual de tipul circuitelor cu transfer de sarcină (CCD). Utilizarea senzorilor vizuali cu transfer de sarcină se impune datorită avantajelor pe care le prezintă față de dispozitivele clasice de

captare a imaginii /60, 54/.

Cea de-a doua dimensiune se obține fie prin deplasarea obiectului sub camera liniară de luat vederi, fie prin deplasarea camerei deasupra obiectului. Prima variantă este cea mai des folosită mai ales în situația în care imaginea este captată utilizând simultan mai multe camere de luat vederi, cum este cazul sistemului prezentat la paragraful 2.4.2.

- Un robot pentru realizarea operației de manipulare și ambalare.

- Un subsistem de inspecție vizuală automată specific aplicației respective.

- O unitate centrală care realizează operațiile de comandă și decizie.

CAPITOLUL 3.

CREȘTEREA VITEZEI DE PRELUCRARE A UNUI SISTEM DE INSPECȚIE VIZUALĂ AUTOMATĂ A CABLAJELOR IMPRIMATE

Din cele prezentate în cap.2 se desprinde limpede concluzia că metodele de inspecție bazate pe măsurare sînt cele mai avantajoase, mai cu seamă din punctul de vedere al vitezei de prelucrare. Datorită acestui fapt, în aplicațiile practice se recomandă implementarea algoritmilor de inspecție bazați pe măsurare. Această recomandare este confirmată de altfel și de singura realizare industrială menționată în literatură de sistem de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate /1/, care are la bază algoritmi menționați anterior.

Avînd în vedere cele de mai sus, problema creșterii vitezei de prelucrare va fi tratată numai în cazul algoritmilor de inspecție bazați pe metode de măsurare.

3.1. Schema bloc a unui sistem de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate utilizînd algoritmi bazați pe metode de măsurare

Schema bloc a unui astfel de sistem este prezentată în figura 3.1 și cuprinde:

- o cameră de luat vederi, formată dintr-un sistem optic pentru captarea imaginii cablajului imprimat și un dispozitiv videocaptor, împreună cu circuitele de comandă aferente. Dispozitivul videocaptor poate fi un senzor liniar cu transfer de sarcină (CCD) ce permite exploatarea simultană a pixelilor de pe o linie de imagine sau un senzor bidimensional cu transfer de sarcină sub forma unei matrice, care permite explorarea simultană a pixelilor dintr-un cadru. Amplitudinile impulsurilor de la ieșirea

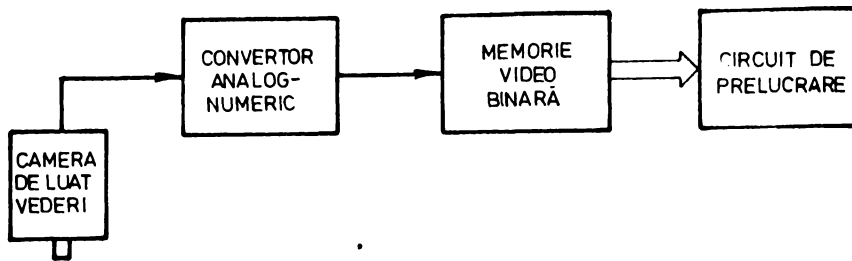


Fig.3.1. Schema bloc a unui sistem de inspecție vizuală automată bazat pe metode de măsurare.

dispozitivului videocaptor au valori proporționale cu lumina reflectată de pixelii din imaginea cablajului imprimat.

- Un convertor analog-numeric CAN care realizează conversia impulsurilor obținute la ieșirea dispozitivului videocaptor. Având în vedere că imaginea unui cablaj imprimat poate fi suficient de bine reprezentată prin numai 2 nivele de gri, CAN este de regulă cu un singur bit (un comparator care furnizează la ieșire "1" sau "0" logic, după cum amplitudinea impulsurilor de intrare depășește sau nu un nivel de referință prestabilit). Informația rezultată în urma conversiei este transmisă unei memorii video binare (MVB).

- Memoria video binară se poate realiza în două variante. Prima variantă constă din utilizarea unei memorii RAM obișnuită, care are dezavantajul necesității împachetării biților ce provin de la CAN în octeți, ce se depun la adrese succesive. Memoria RAM necesită, totodată, un circuit complicat de adresare, în vederea extragerii informației pentru prelucrare. Cea de a doua variantă constă în utilizarea unor registre de deplasare, această variantă nu necesită împachetarea biților și se pot efectua simultan operațiile de captare a imaginilor și de prelucrare a semnalului numeric.

În fig.3.2 se prezintă un exemplu de realizare a memoriei video binare cu registre de deplasare de 256 de biți. Memoria furnizează simultan următorului bloc din schemă (circuitul de prelucrare a semnalului (CP)) m pixeli situați pe m linii succesive și în aceeași coloană a imaginii.

- Circuitul de prelucrare (CP), permite prelucrarea pixelilor de imagine conform algoritmului de inspecție pe care îl implementează. Schema bloc a circuitului de prelucrare este prezentată în fig.3.3 și se constituie din:

- Memoria circuitului de prelucrare (MCP), formată dintr-o

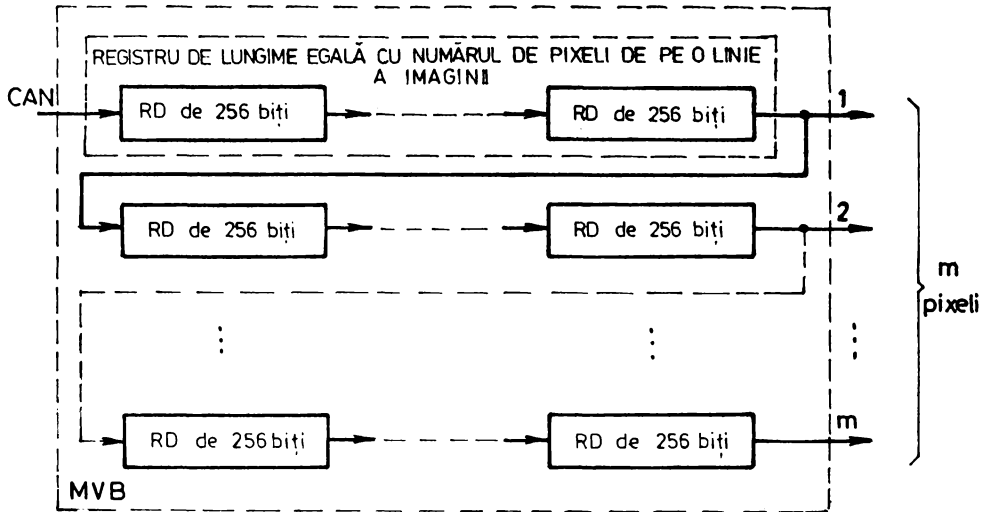


Fig.3.2. Memorie video binară realizată cu registre de deplasare.

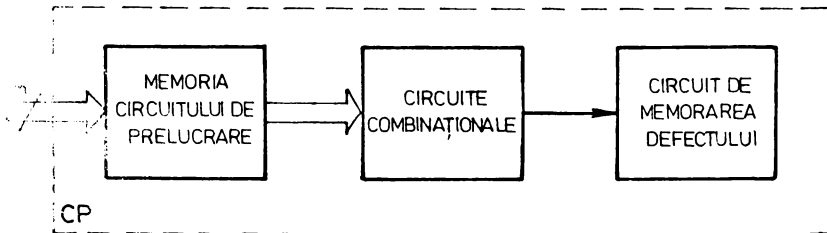


Fig.3.3. Schema bloc a circuitului de prelucrare.

matrice de circuite basculante bistabile $X(m,n)$, de dimensiune m , n , unde m reprezintă numărul liniilor imaginii ce se aplică simultan la intrarea circuitului de prelucrare, iar n reprezintă numărul de coloane.

Circuitele basculante bistabile de pe o linie alcătuiesc de fapt un registru de deplasare cu n rânguri binare, care la fiecare impuls de tact deplasează informația conținută spre dreapta cu o poziție binară.

Schema bloc a memoriei circuitului de prelucrare este prezentată în fig.3.4.

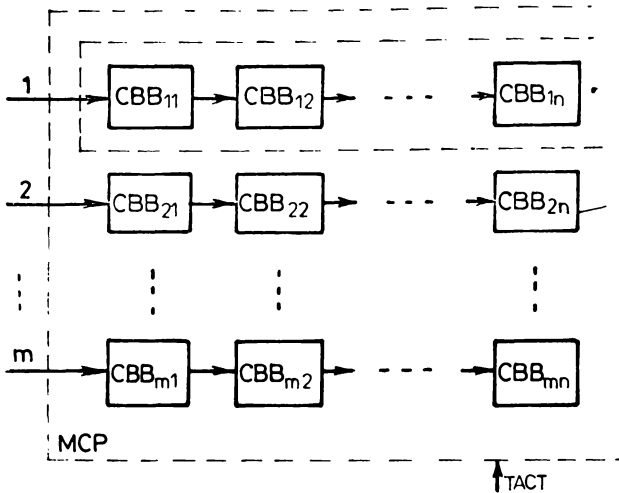


Fig.3.4. Schema bloc a memoriei circuitului de prelucrare.

Parametrii m și n sînt impuși de algoritmul de prelucrare utilizat. În cazul algoritmului P , de exemplu, se prelucrează valorile pixelilor de pe circumferința unui cerc de inspecție de rază $d/2$ și în acest caz MCP se ia de dimensiune $m=n=d$.

La fiecare tact MCP i se aplică cîte un pachet de biți sub forma unei matrici unidimensionale $X(m,1)$.

- Circuitele combinaționale, care realizează prelucrarea efectivă a informației din MCP conform algoritmului de prelucrare utilizat. Circuitele combinaționale furnizează la ieșire un semnal de decizie logică privind acceptarea respectiv respingerea cablajului inspectat.

- Circuitul de memorare a defectului. Se memorează coordonatele pixelului defect într-o memorie, în scopul transmiterii ulterioare la un dispozitiv de verificare pentru informarea operatorului.

3.2. Factorii de care depinde viteza de prelucrare

1. Modul de prelucrare a informației.

În general există două posibilități de prelucrare a informației video. O primă posibilitate constă în prelucrarea informației sub controlul unui program (soft) ce implementează algoritmul

de inspecție utilizat. Această variantă este dezavantajoasă din punct de vedere al vitezei de prelucrare, care este limitată de unitatea centrală a calculatorului (microsistemul utilizat).

Cea de a doua variantă, avută în vedere de fapt și în cazul schemei din fig.3.1, constă în prelucrarea informației prin circuite logice (hard). În acest caz la fiecare tact, memoria video binară (fig.3.1) transferă (deplasează) câte un pachet de biți (matricea $X(m,1)$) spre memoria circuitului de prelucrare, iar circuitele combinaționale efectuează operația de prelucrare propriuzisă. Această variantă permite obținerea unei viteze mari de prelucrare, dependentă exclusiv de numărul de nivele logice ce intervin în schema combinațională precum și de timpul de propagare pe un nivel logic.

2. Factori tehnologici.

Timpul de propagare sau de răspuns al unei porți logice sau al unui circuit digital care influențează durata prelucrării este dependent de tehnologia de fabricație utilizată, de asemenea, în cazul prelucrării informației prin program, cu cât frecvența de lucru a microprocesorului utilizat este de valoare mai mare, cu atât viteza de prelucrare rezultă mai mare.

3. Algoritmul utilizat și modul de implementare a lui.

S-a arătat anterior, că durata de prelucrare în cazul unei implementări hard este dependentă de numărul de nivele logice parcurse de semnal în schema combinațională precum și de timpul de propagare pe un nivel logic. Prin urmare, durata de prelucrare este dependentă de lungimea lanțului cel mai lung de operații aritmetice și logice ce se efectuează în serie. De aceea, o cale de micșorare a duratei de prelucrare constă în reducerea lungimii lanțului de operații aritmetice și logice la minimum posibil. Acest lucru este ușor de observat analizând forma primitivă a algoritmului P, care se bazează pe numărarea tranzițiilor (de la "0" \rightarrow "1" sau de la "1" \rightarrow "0") de pe circumferința cercului de inspecție și cea de a doua variantă a aceluiași algoritm (vezi pct.2.2.5.3). În cazul formei primitive, durata de prelucrare este dată de timpul de propagare printr-o poartă și de timpul necesar numărării unui număr de impulsuri de tact egale cu numărul pixelilor de pe circumferința cercului de inspecție; în cea de a doua variantă lanțul de prelucrare cel mai lung este dat de două nivele logice, ceea ce permite obținerea unei viteze de prelucrare mult sporite față de cazul anterior.

Comparând cele două variante, se observă că principiul de funcționare este în esență același, însă modul de implementare este diferit. Raportul între cele două frecvențe de prelucrare, considerând cazul unei imagini cu o rezoluție infinită, este dat de următoarea relație:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{(\pi d + 1) \Delta t_p}{2 \Delta t_p} \quad (3.1)$$

unde f_2 este frecvența de prelucrare în cea de a doua variantă, f_1 este frecvența de prelucrare în cazul formei primitive, Δt_p este timpul de propagare printr-o poartă iar $d/2$ este raza cercului de inspecție.

În concluzie, se poate afirma că, cu cât numărul de operații aritmetice și logice succesive dintr-un lanț de propagare (prelucrare) sînt mai puține, cu atît crește viteza de prelucrare. Frecvența maximă de prelucrare se obține atunci cînd lanțul de propagare nu conține decît o singură operație logică.

Din analiza celor trei factori ce influențează viteza de prelucrare rezultă următoarele concluzii:

- O sporire semnificativă a vitezei de prelucrare nu se poate obține decît prin prelucrarea informației prin metode hard. Ținînd cont de acest fapt, cercetările în cadrul tezei au fost îndreptate în această direcție, motiv pentru care prin termenul "prelucrare" ce se va întîlni în continuare, se înțelege în exclusivitate o prelucrare hard.

- În ceea ce privește factorii tehnologici, adică timpul de propagare al unui circuit digital, acesta este dependent de tehnologia utilizată, fiind impus de fabricantul de circuite.

- Referitor la cel de al treilea factor, se observă că viteza de prelucrare depinde de algoritmul utilizat și de modul de implementare a lui.

Ținînd cont de aceste concluzii și de necesitatea creșterii vitezei de prelucrare la maximum posibil, a fost elaborată în cadrul tezei o nouă modalitate de implementare a algoritmilor de prelucrare bazați pe măsurare, prezentată la punctul 3.3. Noua metodă permite obținerea vitezei maxime de prelucrare, corespunzătoare timpului de propagare printr-o singură poartă logică.

3.3. Creșterea vitezei de prelucrare la valoarea maximă

S-a arătat anterior că timpul de propagare al circuitului de prelucrare este dependent de numărul de nivele logice conectate în serie. Totodată, introducerea unui pachet nou de date în memoria circuitului de prelucrare este condiționată de prelucrarea pachetului anterior. În aceste condiții, pentru a realiza viteza maximă de prelucrare, corespunzătoare timpului de propagare printr-o singură poartă este necesară utilizarea unei etape de memorare intermediară, care constă din conectarea câte unui circuit de memorare (bistabil) la ieșirea fiecărei porți logice. Justificarea procedurii rezidă din faptul că, în cadrul circuitului de prelucrare se utilizează porți logice ce se conectează în serie conform algoritmului de prelucrare utilizat, astfel încât pachetul de date introdus în memoria circuitului de prelucrare trebuie să rămână neschimbat pînă cînd răspunde și ultimul circuit poartă din lanțul de prelucrare a informației. În situația în care se conectează însă la ieșirea fiecărui circuit poartă câte un bistabil, dispăre necesitatea de așteptare a propagării informației în întreg circuitul de prelucrare. Prin urmare, la fiecare tact (tactul reprezintă frecvența de prelucrare) se introduce câte un pachet nou de date și simultan se deplasează rezultatele intermediare ale circuitului de prelucrare cu un nivel logic. În acest caz, introducerea datelor în memoria circuitului de prelucrare precum și prelucrarea informației se efectuează în paralel, ceea ce permite obținerea frecvenței maxime de prelucrare, corespunzătoare timpului de propagare printr-un nivel logic.

Referitor la această modalitate de implementare a algoritmilor de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, se fac următoarele observații:

1. Decizia logică a circuitului de prelucrare, în urma prelucrării unui pachet de date introdus în memoria acestuia apare cu o întârziere față de momentul aplicării datelor la intrare. Valoarea acestei întârzieri este dată de numărul porților logice înseriate (efectiv timpul de propagare al circuitului de prelucrare înainte de aplicarea procedurii de memorare). Această întârziere în răspuns nu deranjează avînd în vedere că durata ei este de ordinul câtorva tacte.

2. Cu toate că creșterea vitezei de prelucrare necesită utilizarea unor circuite logice suplimentare, ceea ce conduce la creșterea complexității schemei respectiv a prețului de cost, o procedură de memorare prezintă eficiență în toate cazurile unde viteza de prelucrare este un factor hotărâtor (cum este cazul inspecției vizuale automate a cablajelor imprimate).

3. Procedura de memorare este aplicabilă la oricare algoritm de inspecție, cu condiția ca prelucrarea informației să se efectueze într-un singur sens (să nu prezinte o reacție de la ieșire spre intrare). De exemplu, această procedură nu se poate aplica la algoritmul C sau la algoritmul de expansiune-contrație, la care semnalele logice furnizate de circuitele de la sfârșitul lanțului de prelucrare pot ajunge la intrările unor circuite logice de la începutul lanțului de prelucrare. În această situație se ia o decizie corectă numai dacă valorile logice corespunzătoare pixelilor inspectați la un anumit moment se aplică schemei combinaționale pe întreaga durată a unei prelucrări.

3.4. Aplicarea procedurii de memorare la algoritmul P

Conform principiului de funcționare și a modului de implementare a algoritmului P, prezentat la punctul 2.2.5.3, se observă că decizia logică în urma procesului de prelucrare este dată de o schemă combinațională cu două nivele logice (circuite SI urmate de un circuit SAU). Frecvența de prelucrare este dată de timpul Δt_b necesar introducerii informației în bistabilele din memoria circuitului de prelucrare, timpul de propagare Δt_p în circuitele combinaționale ce efectuează operația de prelucrare propriu-zisă (două nivele logice) și timpul de memorare a deciziei (intervalul Δt_b). Cu notațiile de mai sus, durata de prelucrare a unui pachet de date este dată de relația:

$$T_{pr} = 2 \Delta t_p + 2 \Delta t_b \quad (3.2)$$

respectiv frecvența de prelucrare rezultă sub forma:

$$f_{pr} = \frac{1}{T_{pr}} = \frac{1}{2 \Delta t_p + 2 \Delta t_b} \quad (3.3)$$

Aplicînd acestui algoritm procedura de memorare prezentată la punctul 3.3, rezultă o nouă variantă, denumită în cele ce urmează varianta îmbunătățită a algoritmului P. Implementarea logică a metodei îmbunătățite se face conform schemei din fig.3.5.

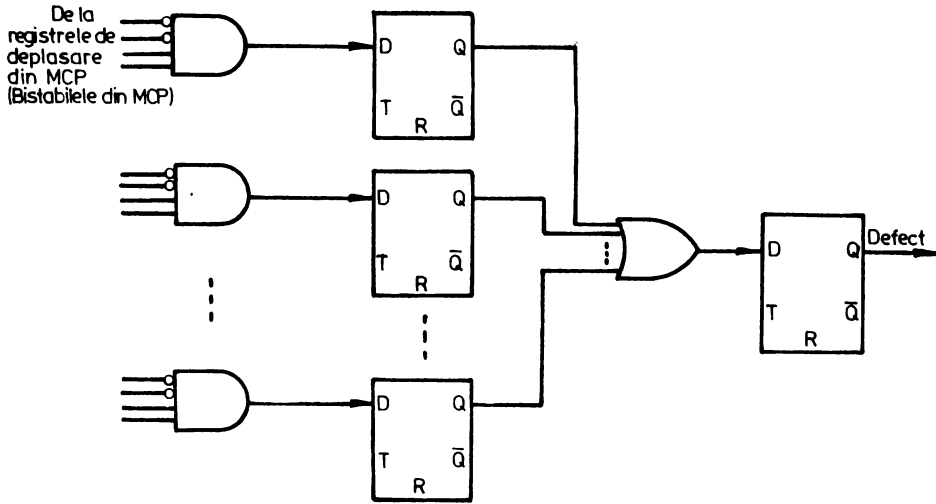


Fig.3.5. Schema circuitelor de prelucrare conform algoritmului P îmbunătățite.

Pe baza figurii se stabilește că frecvența de prelucrare este dependentă de timpul de comutare al unui bistabil însumat cu timpul de propagare printr-o poartă.

Rezultă că durata de prelucrare în noua situație este dată de relațiile:

$$T'_{pr} = \Delta t_p + \Delta t_b \quad (3.4)$$

$$f'_{pr} = \frac{1}{\Delta t_p + \Delta t_b} \quad (3.5)$$

Trebuie subliniat, totodată, că înserierea informației în bistabilele nou incluse în schema circuitului de prelucrare (fig. 3.5) se face simultan cu înserierea datelor în bistabilele ce alcătuiesc memoria circuitului de prelucrare. Datorită acestui fapt, se poate spune că operația de prelucrare propriu-zisă, în vederea stabilirii deciziei logice, durează un timp egal cu timpul de propagare Δt_p printr-o singură poartă. În această situație perioada de repetiție a impulsurilor de tact, în cazul variantei îmbunătățite este evident mai mică decât în cazul algoritmului P original, respectiv raportul frecvențelor de tact este dat de relația:

$$\frac{f'_{pr}}{f_{pr}} = \frac{\frac{1}{2\Delta t_p + 2\Delta t_b}}{\frac{1}{\Delta t_p + \Delta t_b}} = 2 \quad (3.6)$$

Dacă se consideră acum procesul de prelucrare a unui cadru de imagine ce conține N pixel, timpul de prelucrare total conform algoritmului P original este dat de relația:

$$T_{\text{prt}N} = N \cdot T_{\text{pr}} = 2N(\Delta t_p + \Delta t_b) \quad (3.7)$$

În cazul prelucrării aceluiași număr N de pixeli cu algoritmul P îmbunătățit, timpul de prelucrare total rezultă conform egalității:

$$T'_{\text{prt}N} = N \cdot T'_{\text{pr}} = N(\Delta t_p + \Delta t_b) \quad (3.8)$$

Prin urmare, raportul $T'_{\text{prt}N}/T_{\text{prt}N}$ are valoarea:

$$\frac{T'_{\text{prt}N}}{T_{\text{prt}N}} = \frac{1}{2} \quad (3.9)$$

iar reducerea procentuală a timpului total de prelucrare este:

$$t_r [\%] = \frac{T_{\text{prt}N} - T'_{\text{prt}N}}{T_{\text{prt}N}} \cdot 100 [\%] = 50 \% \quad (3.10)$$

Această reducere de 50% a timpului total de prelucrare prezintă o importanță deosebită, avînd în vedere cantitatea mare de date ce trebuie prelucrată într-un timp relativ scurt (vezi pct.2.3).

3.5. Metodă de creștere a vitezei de prelucrare la forma primitivă a algoritmului P

Forma primitivă a algoritmului P este prezentată principial la punctul 2.2.5.3. Dezavantajul acestei metode constă în viteza mică de prelucrare. Aplicarea procedurii de memorare, cu scopul creșterii vitezei de prelucrare, necesită modificarea schemei prezentată în fig.2.9.b. Conform schemei din fig.3.6, care include:

- porți logice,
- circuite de memorare (CM) de un bit ce pot fi realizate cu circuite basculante bistabile,
- semisumatoare de două numere binare, de câte un bit fiecare (SUM), la ieșirea cărora se obține un semnal sumă (S) și un semnal transport (C),
- registre de deplasare (RD) folosite ca linii de întârziere și memorare și a căror lungime depinde de întârzierea necesară,
- un circuit pentru memorarea coordonatelor pixelului defect (MD).

Din fig.3.6 se observă că operația de numărare a tranzițiilor, ce intervine în cazul formei primitive a algoritmului P , ope-

rație ce consumă mult timp, este înlocuită cu însumarea a câte două numere binare de un bit utilizând semisumatoare. Circuitul de prelucrare generează un semnal eroare (f) în momentul în care, în urma operațiilor de însumare, apare un semnal de transport (C). Apariția semnalului de transport la oricare dintre semisumatoare semnifică existența a două tranziții pe cerul de test, respectiv existența unui defect. În această situație, semnalul eroare comandă memorare în memoria MD a coordonatelor x,y a pixelului care a generat eroarea.

În fig.3.6 rezultă că numărul de semisumatoare se divide cu 2 la trecerea de la un nivel logic inferior la un nivel logic superior.

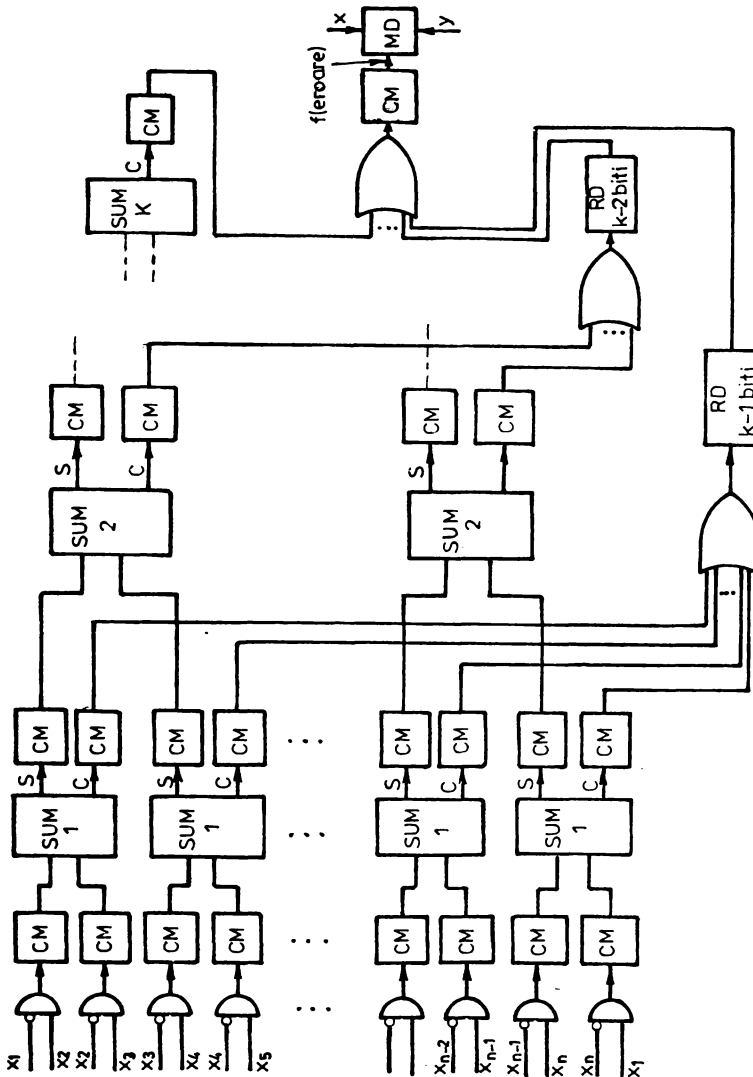


Fig.3.6. Schema de implementare.

Ca urmare, numărul K de coloane de semisumatoare din fig.3.6 este dat de relațiile:

$$K = \begin{cases} \log_2 n & , \text{ pentru } n = 2^K \\ \lceil \log_2 n \rceil + 1 & , \text{ pentru } n = 2^K \end{cases} \quad (3.11)$$

unde prin $\lceil \log_2 n \rceil$ se înțelege partea integrată a numărului real $\log_2 n$.

Perioada minimă a impulsurilor de tact ce poate fi folosită în acest caz este determinată de suma dintre timpul de înscriere a informației în bistabile (Δt_b) și timpul de propagare prin semisumatoare respectiv porțile logice, egal cu Δt_p . Se obține că:

$$T_1^i = \Delta t_p + \Delta t_b \quad (3.12)$$

Perioada minimă a impulsurilor de tact (T_1) ce poate fi folosită în cazul fig.2.10.b (înainte de aplicarea procedurii de memorare) este dependentă de timpul de propagare printr-o poartă (Δt_p), de timpul necesar numărării tranzițiilor date de porțile logice conectate direct pe circumferința cercului de inspecție (în cazul cel mai favorabil $n \Delta t_p$), de timpul necesar efectuării operației de comparare cu numărul zecimal 2 (Δt_p), de timpul necesar memorării defectului (Δt_b), și de timpul de propagare al bistabilelor din memoria circuitului de prelucrare (Δt_b). Prin însumarea acestor timpi rezultă:

$$T_1 = (n+2) \Delta t_p + 2 \Delta t_b \quad (3.13)$$

În cele de mai sus n semnifică numărul de pixeli de pe circumferința cercului de test.

Raportul dintre frecvența de prelucrare a formei primitive îmbunătățită a algoritmului P (f_1^i) și forma primitivă originală a aceluiași algoritm, este dat de relația:

$$\frac{f_1^i}{f_1} = \frac{(n+2) \Delta t_p + \Delta t_b}{\Delta t_p + \Delta t_b} \quad (3.14)$$

Comparînd relația (3.12) cu relația (3.4) se observă că din punct de vedere al vitezei cei doi algoritmi sînt identici.

În concluzie, rezultă că cele două procedee nou propuse permit obținerea frecvenței maxime de prelucrare, limitată exclusiv de timpul de propagare printr-un circuit poartă și timpul de răspuns al unui circuit basculant bistabil.

CAPITOLUL 4.

LIMITARI IN APLICAREA ALGORITMULUI P LA INSPECTIA
PLACILOR CU CABLAJ IMPRIMAT

In momentul de față plăcile cu cablaj imprimat se proiectează cu ajutorul calculatorului, situație în care poziția conductoarelor de pe placă poate fi orizontală, verticală și înclinată la 45° . Unghiul φ dintre porțiunile drepte ale conturului conductoarelor este realizat, de asemenea, la 90° și 135° /6, 1, 61/, (fig.4.1).

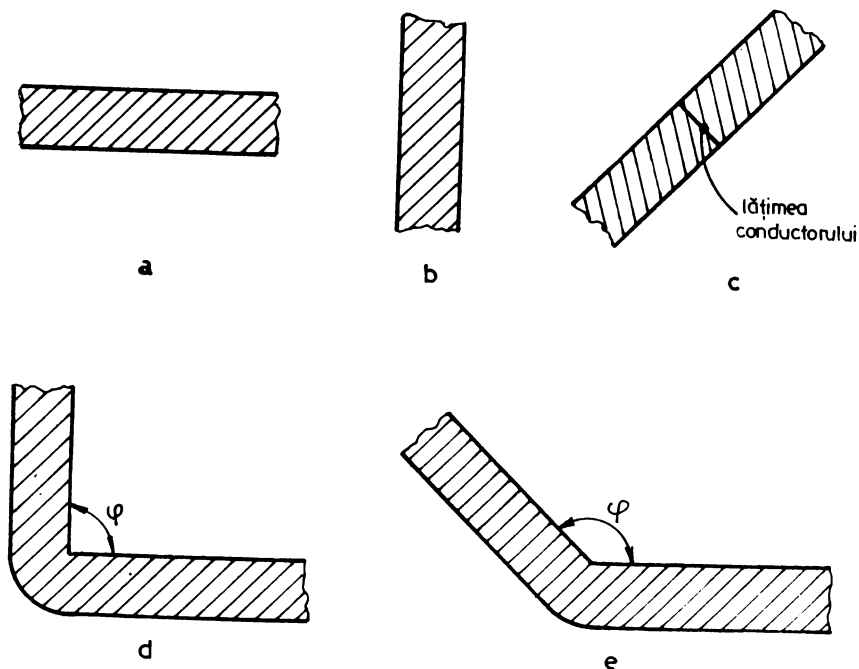
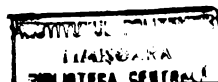


Fig.4.1. Forme de conductoare proiectate cu ajutorul calculatorului; a-conductor orizontal; b - conductor vertical; c-conductor înclinat la 45° ; d-conductor realizat cu un unghi $\varphi=90^\circ$; e-conductor realizat cu un unghi $\varphi=135^\circ$.



Procesul tehnologic de proiectare a plăcilor cu cablaj imprimat se bazează pe utilizarea unui spot luminos, de regulă circular și de diametru egal cu lățimea nominală a conductorului, cu ajutorul căruia este descris pe suprafața unui clișeu fotosensibil traseul viitoarelor conductoare. Clișeul astfel realizat se utilizează în continuare la fabricarea plăcii cu circuite imprimate /5/.

În urma procesului tehnologic de mai sus există posibilitatea apariției unor defecte cum ar fi conductorii obținuți să nu aibe contururile netede, conductoare cu lățime sub valoarea minimă admisibilă, distanță insuficientă între două conductoare, scurtcircuite, intreruperi etc.

Neregularitățile ce pot apărea pe conturul unui conductor nu se consideră defecte dacă lățimea respectiv intervalul dintre conductoare satisfac condițiile impuse.

Un algoritm de inspecție vizuală automată a plăcilor cu cablaje imprimate trebuie să fie insensibil la aceste neregularități (adică să nu le sesizeze ca defecte) și trebuie să fie sensibil la celelalte defecte, de asemenea, trebuie să aibe o capacitate de inspecție independentă de unghiul φ dintre porțiunile drepte ale conturului conductoarelor sau cel puțin să funcționeze corect la un unghi $\varphi \geq \pi/2$.

Până în momentul actual nu s-a realizat nici un algoritm care că prezinte o capacitate de inspecție independentă de unghiul φ și de neregularitățile conturului rezultate în urma procesului tehnologic de fabricație /8/.

În literatura de specialitate /8/ este evidențiat faptul că algoritmul P este cel mai avantajos din punct de vedere al capacității de inspecție, vitezei de prelucrare și a prețului de cost. Sub aspectul capacității de inspecție se menționează că algoritmul P este independent de neregularitățile conturului și de unghiul φ , dacă $\varphi \geq \pi/2$.

O analiză mai aprofundată a algoritmului P conduce la următoarele observații, neșemnalate încă în literatura de specialitate, și care vor fi prezentate în detaliu în acest capitol.

1. Demonstrațiile matematice legate de prezentarea algoritmului P se bazează pe utilizarea unui cerc continuu (fig.2.12), ceea ce înseamnă utilizarea unei rezoluții infinite.

În prelucrările numerice rezoluția fiind însă finită, capacitatea de inspecție a algoritmului P trebuie analizată pe baza

unui cerc discret, care aproximează cercul continuu.

2. Algoritmul P este insensibil la neregularitățile de pe conturul conductoarelor dacă acestea se presupun infinit lungi. În cazul conductoarelor de lungime finită, și care prezintă neregularități pe contur, aplicarea algoritmului P conduce la semnala-rea de erori false la capetele conductoarelor.

3. În literatură se menționează /8/ că algoritmul P este insensibil la valori ale unghiului φ mai mari sau egale cu $\pi/2$. Cercetările în cadrul tezei validează această afirmație numai în situația în care conturul conductorului este lipsit de neregularități pe distanțe cel puțin egale cu diametrul cercului de inspecție, față de vârful unghiului φ .

Înainte de prezentarea în detaliu a limitelor algoritmului P, vor fi analizate modalitățile de aproximare a unui cerc continuu printr-un cerc discret, având în vedere că aplicarea algoritmului P este dependentă de modul de aproximare, așa cum se va vedea în continuare.

4.1. Modalități de aproximare a unui cerc continuu printr-un cerc discret

S-a arătat în cap.2 că metodele de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate bazate pe măsurare, utilizează o arie respectiv un cerc de test, approximate printr-un număr finit de pixeli. Pentru obținerea cercului discret, se are în vedere faptul că pixelii intersecțiați de conturul cercului continuu vor aparține cercului discret numai dacă cel puțin 50% din aria pixelului se găsește situată în interiorul cercului continuu. Se subliniază, totodată, că la aproximarea cercului continuu printr-un cerc discret, trebuie analizate atât variantele în care diametrul cercului continuu este un număr par respectiv impar de pixeli precum și variantele posibile ce rezultă din poziționarea centrului cercului continuu:

- centrul cercului situat în punctul comun a 4 pixeli adiacenți;
- centrul cercului amplasat în centrul unui pixel;
- centrul cercului situat la mijlocul laturii comune verticale sau orizontale a doi pixeli adiacenți.

4.1.1. Modalități de aproximare a unui cerc cu diametrul un număr par de pixeli

Considerațiile care urmează vor fi expuse pe baza unui exemplu concret în care cercul continuu are diametrul egal cu 8 pixeli. Se precizează, însă, că acest fapt nu restrânge gradul de valabilitate al concluziilor stabilite, care se mențin pentru orice alt număr finit, par, de pixeli.

Variantele posibile de aproximare corespunzătoare celor 4 modalități de plasare a centrului cercului continuu, sînt prezentate în fig.4.2.

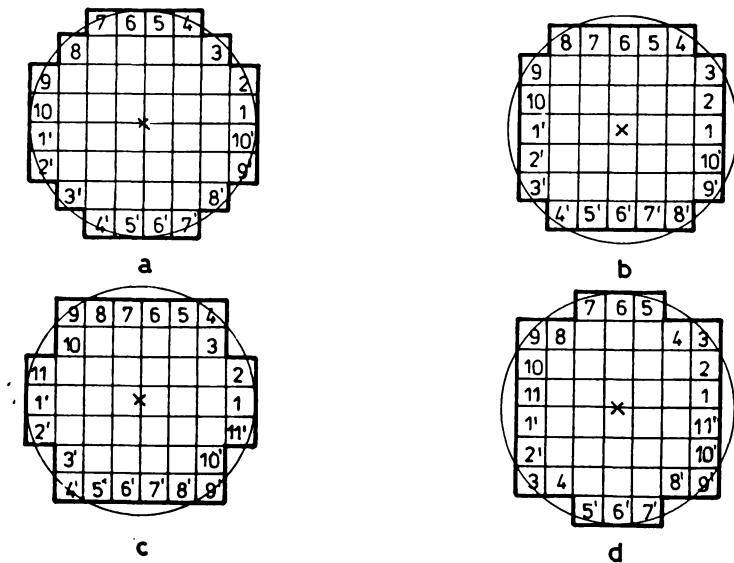


Fig.4.2. Aproximarea unui cerc continuu de diametru egal cu un număr par (8 pixeli) de pixeli, printr-un cerc discret cu centrul în: a-punctul comun a 4 pixeli adiacenți; b-centrul unui pixel; c-mijlocul laturii verticale comune a 2 pixeli adiacenți; d-mijlocul laturii orizontale comune a 2 pixeli adiacenți.

În fig.4.2.a, în care centrul cercului continuu se găsește în punctul comun a 4 pixeli adiacenți, diametrele pe orizontală și verticală ale cercului discret sînt egale și de lungime egală cu 8 pixeli. Spre deosebire de această situație, în fig.4.2.b, în care s-a considerat centrul cercului plasat în centrul unui pixel, diametrele pe orizontală și verticală sînt egale cu 7 pixeli. În fig.

4.2.c și 4.2.d, care se referă la situația în care centrul cercului se găsește în mijlocul laturii comune verticale respectiv orizontale a 2 pixeli, diametrele după cele două direcții vor diferi. Astfel, în cazul reprezentat în fig.4.2.c, diametrele vor fi egale cu 8 pixeli (pe orizontală) și 7 pixeli (pe verticală), iar în cazul fig.4.2.d, diametrele vor fi egale cu 7 respectiv 8 pixeli.

Din analiza figurilor prezentate rezultă că aproximarea cea mai adecvată a unui cerc continuu avînd diametrul egal cu un număr par de pixeli este cea ilustrată în fig.4.2.a, în care centrul cercului s-a considerat plasat în punctul comun a 4 pixeli adiacenți. Se subliniază că spre deosebire de cazul prezentat în fig.4.2.b, la care de asemenea cele două diametre sînt egale și egale cu 7 pixeli, în situația din fig.4.2.a diametrele pe orizontală și verticală ale cercului discret respectiv continuu sînt egale (deci aproximarea este mai bună).

4.1.2. Modalități de aproximare a unui cerc cu diametrul un număr impar de pixeli

Se va considera, pentru cele ce urmează, un cerc continuu cu diametrul egal cu 9 pixeli. La fel ca și în cazul anterior vor fi avute în vedere cele 4 situații posibile de amplasare a centrului cercului continuu.

În cazul fig.4.3.a, se observă că diametrul pe orizontală a cercului discret este egal cu diametrul pe verticală și egal cu 8 pixeli. Pentru cazul prezentat în fig.4.3.b, se observă ușor că și aici diametrele după cele două direcții sînt egale și egale cu 9 pixeli. În fine, din fig.4.3.c și 4.3.d rezultă că în cazurile corespunzătoare, diametrele pe orizontală și verticală vor diferi, fiind egale cu 8 pixeli și 9 pixeli (fig.4.3.c) respectiv 9 pixeli și 8 pixeli (fig.4.3.d).

În concluzie, se poate afirma că aproximarea cea mai adecvată a unui cerc de diametru egal cu un număr impar de pixeli printr-un cerc discret este cea prezentată în fig.4.3.b, în care centrul cercurilor este situat în centrul unui pixel.

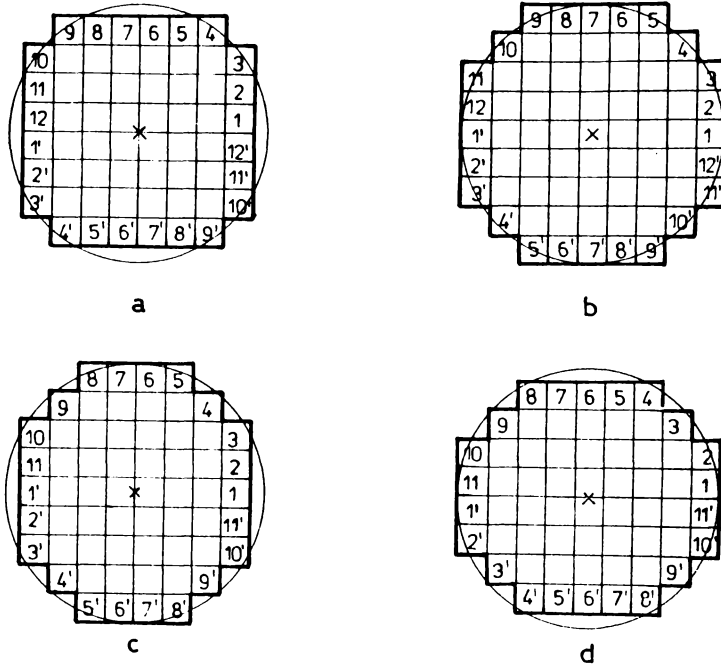


Fig.4.3. Aproximarea unui cerc continuu de diametru egal cu un număr impar de pixeli (9 pixeli) printr-un cerc discret cu centrul în; a-punctul comun a 4 pixeli adiacenți; b-centrul unui pixel; c-mijlocul laturii verticale comune a 2 pixeli adiacenți; d-mijlocul laturii orizontale comune a 2 pixeli adiacenți.

4.2. Capacitatea algoritmului P la inspecția vizuală a cablajelor imprimate avînd conturul neted

Prin contur neted se înțelege, în cele ce urmează, un contur lipsit de neregularități. Exemple de conductoare avînd conturul neted sînt prezentate în fig.4.4.a și 4.4.b. Este de remarcat, în cazul conductorului înclinat la 45° (fig.4.4.b), că drept urmare a procesului de discretizare conturul prezintă abateri de la forma ideală reprezentată de o linie dreaptă. Cu toate acestea, în cazul acestor conductoare, un contur de forma celui reprezentat în fig. 4.4.b va fi considerat un contur neted. Se precizează, totodată că, datorită discretizării, diametrul cercului de inspecție trebuie luat cu un pixel mai mare decît lățimea minimă admisibilă.

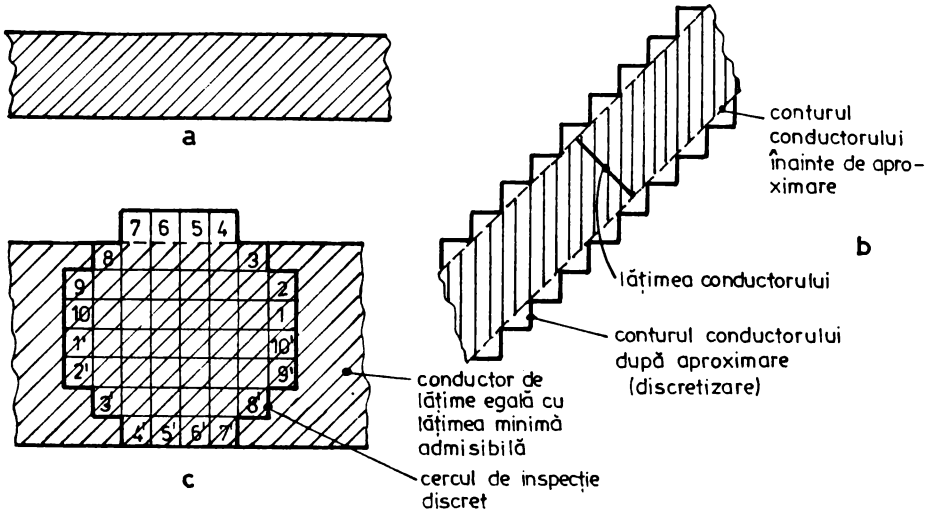


Fig.4.4. Exemple de conductoare netede: a-oriizontale; b-încălnate la 45°. Ilustrarea necesității creșterii diametrului cercului de inspecție cu 1 pixel față de lățimea minimă admisibilă a conductorului.

Pentru justificarea acestei afirmații s-a reprezentat în fig.4.4.c un conductor orizontal de lățime egală cu lățimea minimă admisibilă (7 pixeli) și cercul de inspecție discret, ce aproximează cercul continuu de diametru egal cu 8 pixeli.

Din figură rezultă că poate fi generat un semnal eroare conform algoritmului P numai dacă lățimea conductorului este mai mică decât 7 pixeli, deoarece numai în această situație cercul de inspecție intersectează conductorul, făcând posibilă stabilirea numărului de tranziții diametral opuse "0" → "1" (sau "1" → "0") la parcurgerea circumferinței într-un singur sens.

4.2.1. Inspecția lățimii unui conductor orizontal

a) Cazul unui conductor de lățime minimă admisibilă egală cu un număr impar de pixeli.

Conform celor de mai sus, diametrul cercului de inspecție se ia egal cu lățimea minimă admisibilă a conductorului plus un pixel, rezultând deci că diametrul are un număr par de pixeli. Ca modalitate de aproximare a cercului de inspecție se alege cea

prezentată în fig.4.2.a. De exemplu, considerînd lăţimea minimă admisibilă egală cu 7 pixeli, rezultă că diametrul cercului de inspecţie trebuie să fie egal cu 8 pixeli (se va observa că în această situaţie cercul de inspecţie este chiar cel reprezentat în fig.4.2a).

În fig.4.5 este prezentat cercul de inspecţie discret precum şi situaţiile ce apar la inspecţia unor conductoare de lăţime 1, 3 şi 5 pixeli, care ar trebui să fie indicate ca defecte.

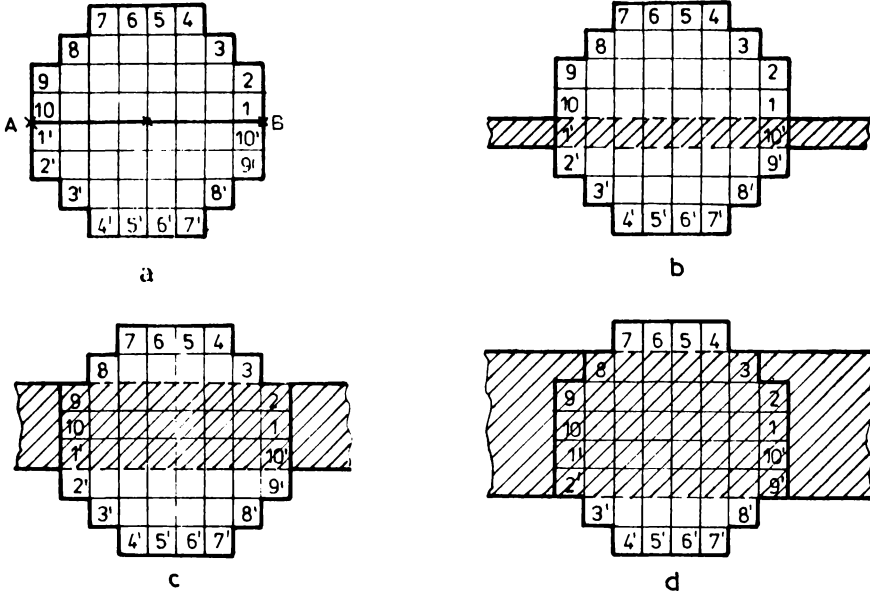


Fig.4.5. Ilustrarea procesului de inspecţie a unor conductoare orizontale cu lăţime mai mică decît valoarea minimă admisibilă (1 pixel (b), 3 pixeli (c), 5 pixeli (d)), utilizînd cercul de inspecţie cu diametrul egal cu 8 pixeli, şi fără să indice defectul.

Se observă din figură că nu există nici o poziţie a cercului de inspecţie care să conducă la semnalarea defectului, deoarece în nici una dintre situaţii nu există două tranziţii diametral opuse "o" → "1" (sau "1" → "o") la parcurgerea cercului într-un singur sens. Acest lucru se datoreşte erorilor cu care cercul discret aproximează cercul continuu.

Dacă în locul cercului de inspecţie discret, prezentat în fig.4.5.a se utilizează un cerc discret conform fig.4.2.b, procesul de inspecţie se desfăşoară corect, conducînd la indicarea defectului (fig.4.6).

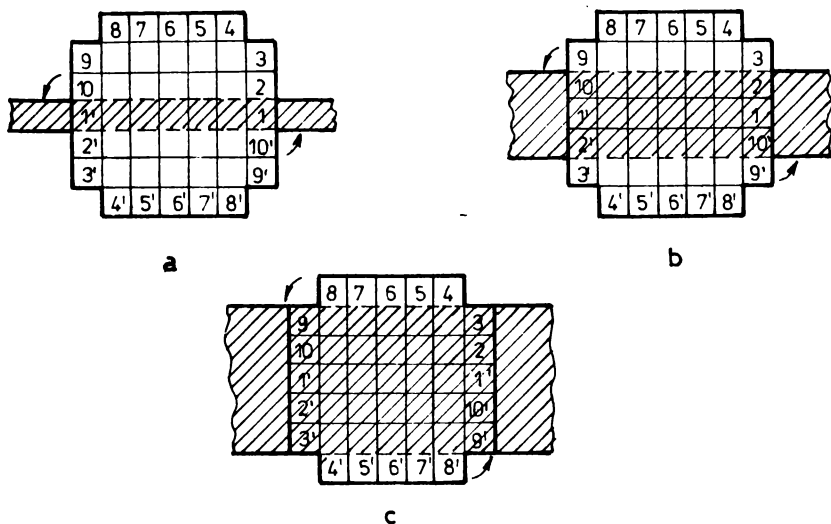


Fig.4.6. Ilustrarea procesului de inspecție a conductoarelor prezentate în fig.4.5 utilizând cercul de inspecție din fig. 4.2.b, cu indicarea defectului.

În fig.4.7 se prezintă modalitățile de inspecție utilizând același cerc discret, reprezentate în fig.4.5.a, în cazul unor conductoare a căror lățime este egală cu un număr par de pixeli și care este sub valoarea minimă admisibilă. Au fost avute în vedere situațiile în care lățimea conductoarelor este de 2, 4 și respectiv 6 pixeli.

Circuitul de prelucrare implementat conform algoritmului P va genera semnalul eroare deoarece există câte două tranziții "0" → "1" la parcurgerea în sens antiorar a cercului de inspecție (sau două tranziții "1" → "0" la parcurgerea cercului în sens orar). Deplasând cercul la stînga sau dreapta cu cîte un pixel, va fi semnalată de fiecare dată existența defectului.

În mod similar celor de mai sus, se poate stabili pe baza fig.4.8; că cercul discret reprezentat în fig.4.2.b nu asigură inspecția corectă a cablajelor de lățime egală cu un număr par de pixeli.

Sintetizînd cele de mai sus, se poate afirma că cercul discret reprezentat în fig.4.2.a, care asigură inspecția unor conductoare cu lățime minimă $k=7$ pixeli, semnalează corect defectele în cazul conductoarelor cu lățimi de 2, 4 și 6 pixeli, adică conduc-

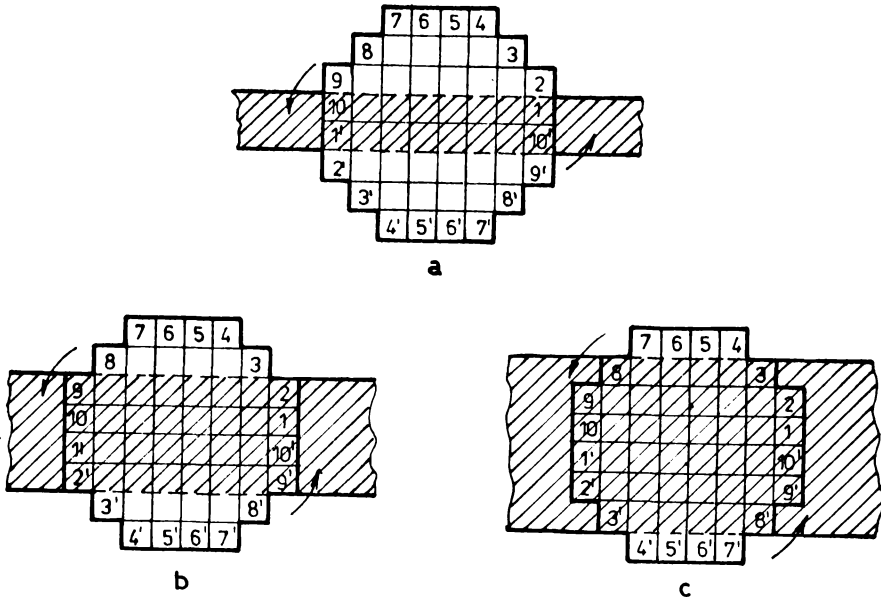


Fig.4.7. Procesul de inspecție al unor conductoare de lățime mai mică decât valoarea minimă admisibilă și egală cu un număr par de pixeli: 2 pixeli (a); 4 pixeli (b); și 6 pixeli (c).

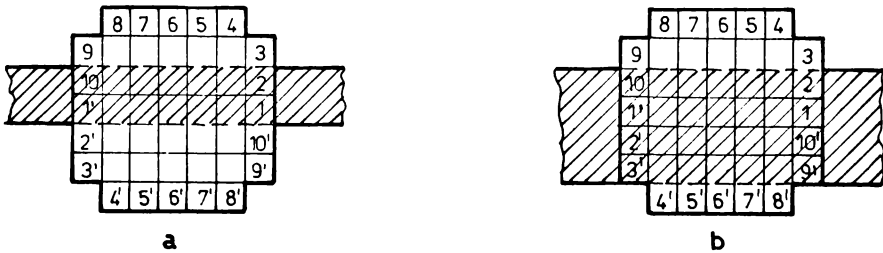


Fig.4.8. Procesul de inspecție al unor conductoare de lățime mai mică decât valoarea minimă admisibilă și egală cu un număr par de pixeli, utilizând cercul de inspecție prezentat în fig. 4.2.b și fără indicarea defectului: a-inspecția unui conductor de lățime egală cu 2 pixeli; b-inspecția unui conductor de lățime egală cu 4 pixeli.

toate defecte și avînd lățimea un număr par de pixeli. Același cerc ne indică defectul în cazul conductoarelor cu lățimi de 1, 3 și 5 pixeli (adică un număr impar de pixeli). Totodată, cercul de inspecție aproximat ca în fig.4.2.b, realizează inspecția corectă

pentru lățimi de 1, 3 și 5 pixeli, funcționând însă eronat în cazul conductoarelor cu lățimea un număr par de pixeli (2, 4 și 6 pixeli).

În concluzie, pentru inspecția corectă a conductoarelor a căror lățime minimă admisibilă este un număr impar de pixeli (în cazul analizat 7 pixeli), se necesită utilizarea simultană a două cercuri de test, approximate ca în fig.4.2.a și fig.4.2.b. Este de remarcat că, cercul reprezentat în fig.4.2.b realizează corect procesul de inspecție cu toate că are diametrul mai mic cu 1 pixel decât diametrul corespunzător lățimii minime admisibile a conductoarelor testate (7 pixeli în loc de 8 pixeli).

b) Procesul de inspecție al conductoarelor de lățime minimă admisibilă egală cu un număr par de pixeli.

Ca și în cazul anterior, cercul de inspecție se consideră de un diametru egal cu lățimea minimă admisibilă a conductorului plus 1 pixel (rezultând deci un cerc cu diametrul un număr impar de pixeli).

Conform celor arătate la pct.4.1.2, se va considera pentru început cercul de inspecție aproximat ca în fig.4.3.b.

Luând lățimea minimă admisibilă a conductorului egală cu 8 pixeli, cercul discret se va prezenta așa cum este arătat în fig. 4.9.

Se observă, pe baza figurii, că cercul de inspecție avut în vedere este sensibil la conductoare orizontale de lățime un număr impar de pixeli și sub valoarea minimă admisibilă (fig.4.9.b, c, d și e). Totodată, cercul este insensibil la conductoare de lățime un număr par de pixeli și sub valoarea minimă admisibilă (fig.4.9.f).

Comportarea cercului de inspecție discret reprezentat în fig.4.9.a, așa cum s-a arătat mai sus, se datorește faptului că el prezintă o simetrie față de o axă A'B' ce trece prin centrul cercului și centrele unor pixeli situați pe o linie orizontală. Spre deosebire de această situație, în cazul cercului de inspecție discret din fig.4.5.a, axa de simetrie AB trece prin centrul cercului și laturile comune a două rânduri de pixeli adiacenți.

Pentru sesizarea defectelor în cazul conductoarelor de lățime egală cu un număr par de pixeli, în cazul în care lățimea minimă admisibilă este de asemenea un număr par de pixeli, poate fi utilizat cercul discret reprezentat în fig.4.3.a (vezi fig.4.10).

Din aceeași figură rezultă că, cercul considerat mai sus nu realizează inspecția corectă a conductoarelor de lățime egală cu un număr impar de pixeli.

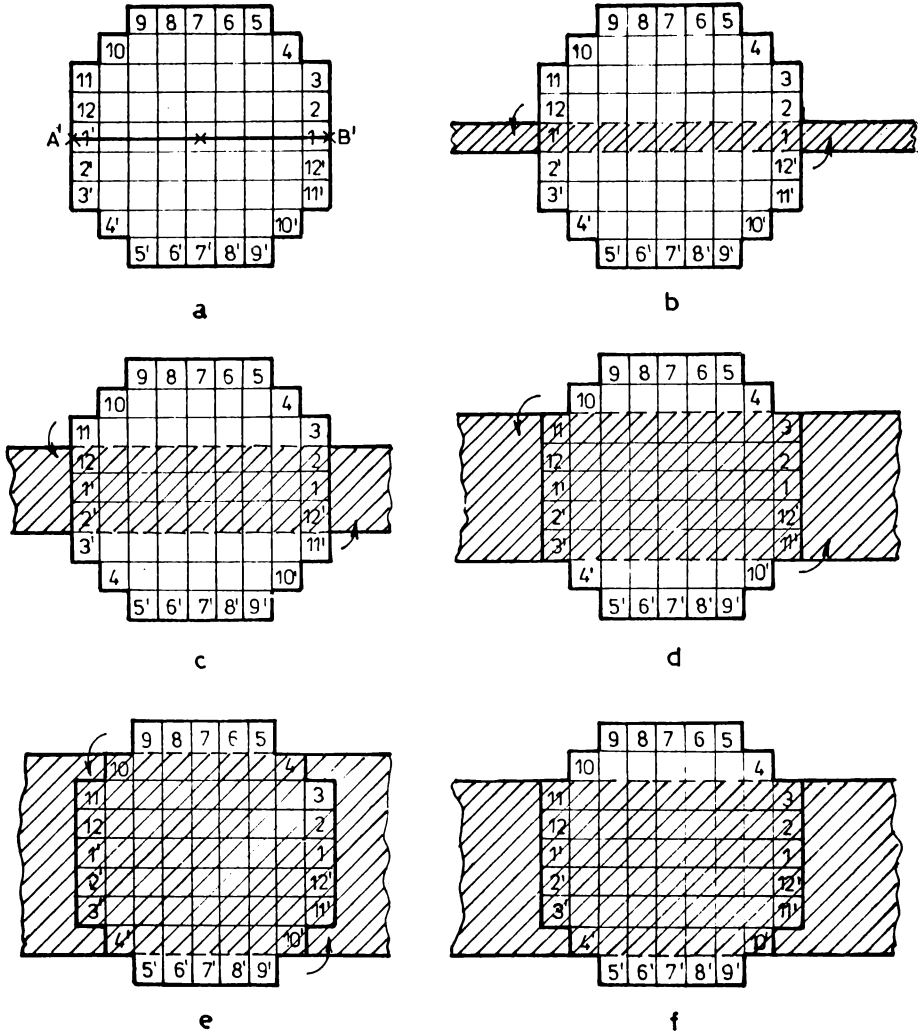


Fig.4.9. Procesul de inspecție al unor conductoare orizontale de lățimea sub valoarea minimă admisibilă. Cercul de inspecție (a) și inspecția unor conductoare de lățime un număr impar de pixeli: 1 pixel (b), 3 pixeli (c), 5 pixeli (d) și 7 pixeli (e). Inspecția unui conductor de lățime un număr par de pixeli, 6 pixeli (f).

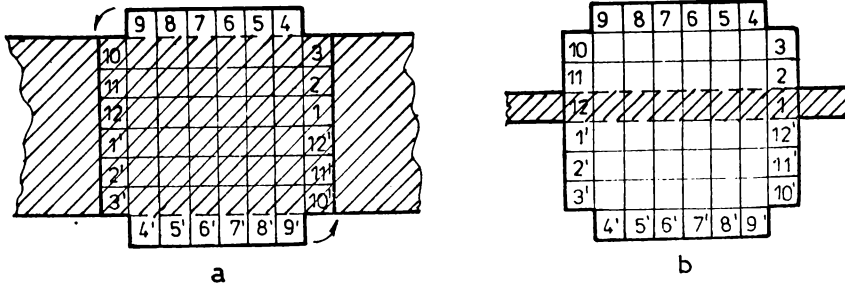


Fig.4.10. Procesul de inspecție a unor conductoare orizontale de lățime sub valoarea minimă admisibilă utilizând cercul de inspecție prezentat în fig.4.3.a: a-inspecția unui conductor de lățime egală cu 6 pixeli (se indică defect); b-inspecția unui conductor de lățime egală cu 1 pixel (nu se indică defect).

În concluzie, la fel ca și în cazul inspecției unor conductoare cu lățime minimă admisibilă egală cu un număr impar de pixeli, în cazul în care numărul de pixeli este par, algoritmul P funcționează corect numai dacă este implementat utilizând două cercuri discrete care aproximează cercul continuu ca în fig.4.3.b respectiv 4.3.a.

4.2.2. Inspecția distanței dintre două conductoare orizontale

Procesul de verificare al distanței dintre două conductoare se desfășoară în mod identic cu inspecția lățimii conductoarelor, având în vedere că decizia de eroare, în cazul algoritmului P, se ia funcție de numărul de tranziții "o" → "1" sau "1" → "o". În consecință, observațiile și concluziile stabilite la pct.4.2.1 își mențin valabilitatea și în cazul inspecției distanței dintre două conductoare orizontale. Pentru edificare, sînt prezentate în fig.4.11 cîteva exemple de inspecție a distanțelor dintre două conductoare orizontale, de lățimi minime admisibile egale cu un număr impar respectiv un număr par de pixeli, utilizînd cercurile discrete reprezentate în fig.4.2.a, fig.4.2.b și fig.4.3.a, 4.3.b.

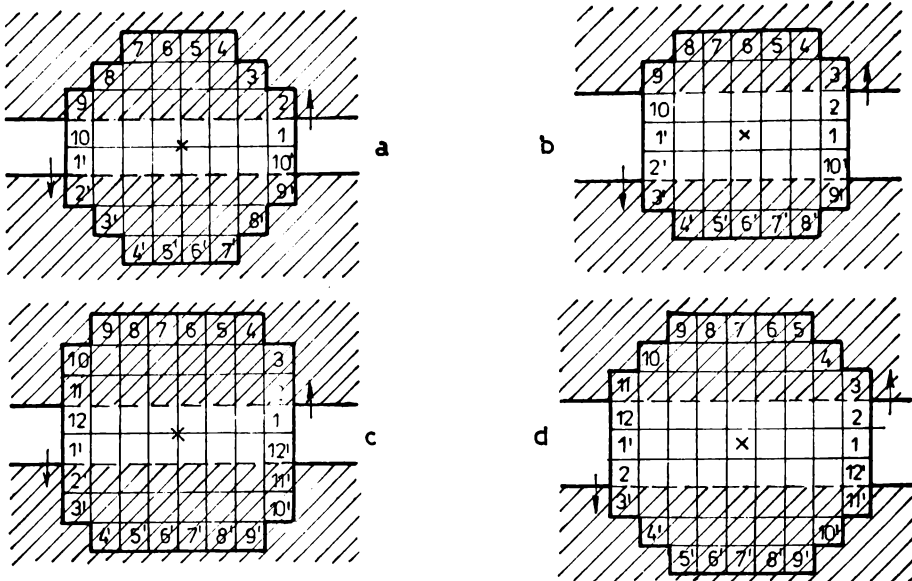


Fig.4.11. Procesul de inspecție a distanței dintre 2 conductoare. Inspecția distanței de valoare minimă admisibilă egală cu un număr impar de pixeli; centrul cercului în punctul comun a 4 pixeli adiacenți (a); centrul cercului în centrul unui pixel (b). Inspecția distanței de valoare minimă admisibilă egală cu un număr par de pixeli; centrul cercului în punctul comun a 4 pixeli alăturați (c); centrul cercului în centrul unui pixel (d).

4.3.2. Inspecția lățimii conductoarelor verticale și înclinate la 45°

Avînd în vedere simetria oricăruia dintre cercurile de inspecție reprezentate în fig.4.2.a și b respectiv 4.3.b și a, în raport cu o pereche de axe perpendiculare, problema inspecției unui conductor vertical poate fi redusă la inspecția unui conductor orizontal. În consecință, toate observațiile și concluziile stabilite la pct.4.2.1 și pct.4.2.2, își păstrează valabilitatea și în cazul conductoarelor verticale.

Pentru analiza procesului de inspecție a conductoarelor înclinate la 45°, se necesită definirea în prealabil a lățimii unui asemenea conductor, în cazul discret. În cele ce urmează se va

considera acest parametru definit ca în fig.4.4.b. Cu această precizare, studiul procesului de inspecție se poate face la fel ca și în cazul conductorului orizontal, rezultând însă că de această dată, procesul de inspecție nu mai poate fi realizat corect nici chiar utilizând cele două cercuri de inspecție. O situație ilustrativă din acest punct de vedere este reprezentată în fig.4.12. Aici s-a presupus că două conductoare de lățime egală cu 2 respectiv 5 pixeli, mai mică decât lățimea minimă admisibilă (7 pixeli) sînt inspectate utilizând cercurile discrete din fig.4.2.a și fig. 4.2.b. Se constată din figură că nu există nici o poziție a cercurilor de inspecție pentru care să fie generat un semnal eroare. Această situație se datorește aproximării cercului continuu prin cercuri discrete.

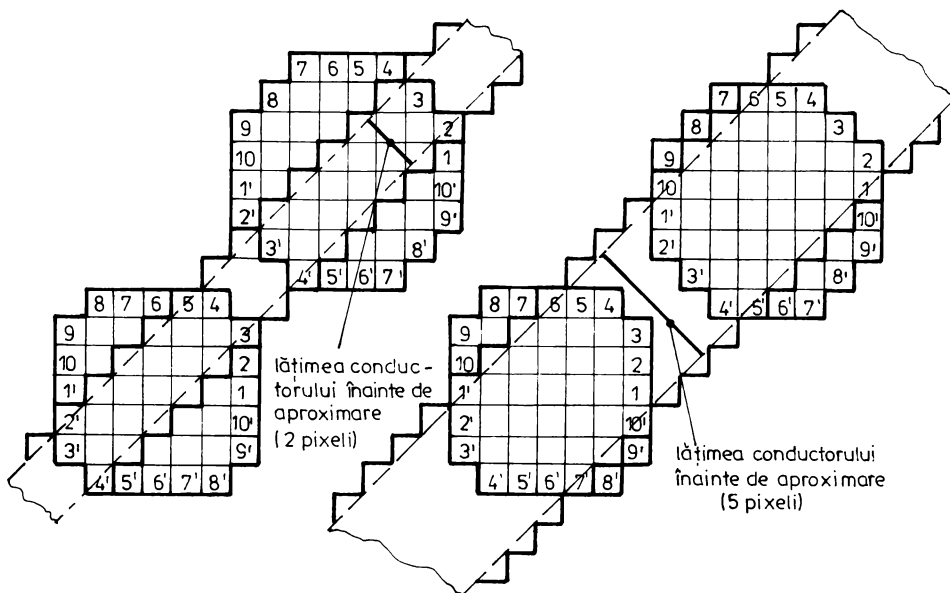


Fig.4.12. Două situații ce intervin la inspecția unor conductoare înclinate la 45° și care evidențiază faptul că algoritmul P nu prezintă o comportare corespunzătoare în aceste cazuri.

In concluzie, se poate afirma că algoritmul P nu poate fi practic utilizat pentru inspecția conductoarelor înclinate la 45° .

4.2.4. Influența discretizării cercului de test asupra valorii minime a unghiului φ în cazul algoritmului P

Este cunoscut că în cazul unui cerc de test continuu (corespunzător unei rezoluții infinite), algoritmul P funcționează corect pînă la valori minime ale unghiului φ , definit ca în fig.4.1, egale cu $\pi/2$ /8/. Pentru $\varphi < \pi/2$ va exista întotdeauna o distanță ω_A mai mică decît diametrul cercului de inspecție, încît la parcurgerea acestui cerc într-un singur sens se înregistrează două tranziții. "0" \rightarrow "1" (sau "1" \rightarrow "0") (fig.4.13.a). În consecință, circuitul de prelucrare va genera un semnal de eroare falsă.

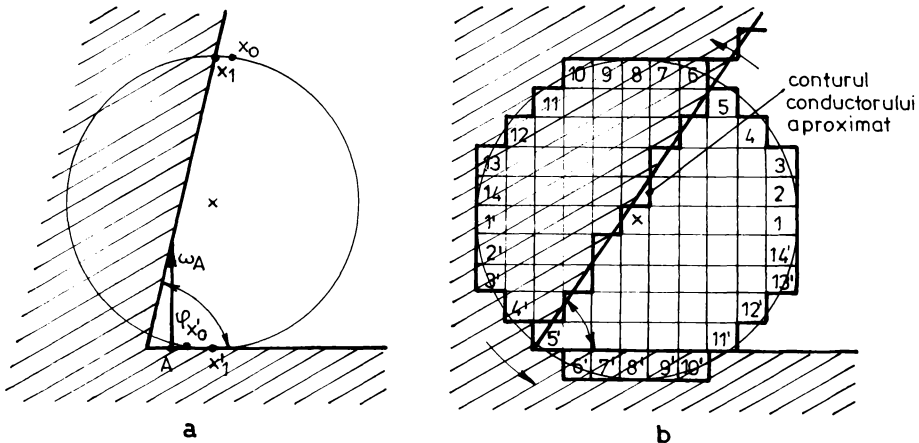


Fig.4.13. Indicarea unei erori false în cazul unui conductor al cărui contur prezintă un unghi $\varphi < \pi/2$ (a). Reducerea valorii minime a unghiului φ în cazul utilizării cercului de test discret (b).

Situația se prezintă îmbunătățită, din punctul de vedere al valorii minime a unghiului φ , în cazul în care cercul continuu este aproximat printr-un cerc discret. Acest lucru este lesne de constatat pe baza figurii 4.13.b, în care s-a considerat procesul de inspecție a unui conductor utilizînd un cerc discret cu diametrul de 11 pixeli. Se observă că valoarea limită a unghiului φ pînă la care nu este generat un semnal de eroare falsă este dependentă de diametrul cercului discret precum și de modul în care acesta aproximează cercul continuu (vezi fig.4.2.a și b respectiv fig.4.3.a și b).

4.3. Capacitatea de inspecție a algoritmului P în cazul conductoarelor avînd conturul cu neregularități

În situațiile practice, datorită impreciziilor inerente tehnologice de fabricație a cablajelor imprimate, conturul unui conductor real va prezenta întotdeauna abateri față de conturul neted al unui conductor ideal. La impreciziile menționate, se mai adaugă apoi erorile cauzate de partea de achiziție a imaginii din sistemul de inspecție vizuală automată. Drept urmare a factorilor menționați mai sus, în situațiile reale imaginea cablajelor imprimate supuse testării va prezenta contururi cu neregularități. Aceste neregularități constau din pixeli sau grupuri de pixeli care se adună sau se scad din aria conductorului cu contur neted.

În cele ce urmează analiza procesului de inspecție va fi efectuată considerînd neregularități de 1 sau 2 pixeli. Aceste valori apar rezonabile dacă se are în vedere faptul că, în cazurile practice, lățimea minimă a conductoarelor respectiv distanța minimă dintre ele este suficient să fie reprezentată prin 10 pixeli /1, 8/.

4.3.1. Efectul neregularităților asupra capacității de inspecție a algoritmului P în cazul conductoarelor orizontale și verticale

Se va considera pentru început cazul unui conductor orizontal de lungime infinită și al cărui contur prezintă o neregularitate ca în fig.4.14.a. Se constată ușor că în această situație este generat un semnal eroare numai dacă mărimea neregularității depășește 4 pixeli (cazul din figură). În cazul general, abaterea de la conturul ideal pentru care nu este încă generat semnalul eroare depinde de diametrul și modalitatea de aproximare a cercului de inspecție. Algoritmul prezintă o comportare identică în cazul conductoarelor verticale și de lungime infinită.

Trebuie menționat totodată că, în situația în care distanța dintre neregularitatea conturului și conturul unui, eventual, conductor vecin este mai mare decît distanța minimă admisă, de asemenea nu este generat semnalul eroare. O asemenea comportare a algoritmului P este de dorit, deoarece în aplicațiile practice ne-

regularității de forma celei date în fig.4.14.a sînt frecvente, fără a deranja însă din punct de vedere funcțional (și prin urmare pot fi omise ca defecte).

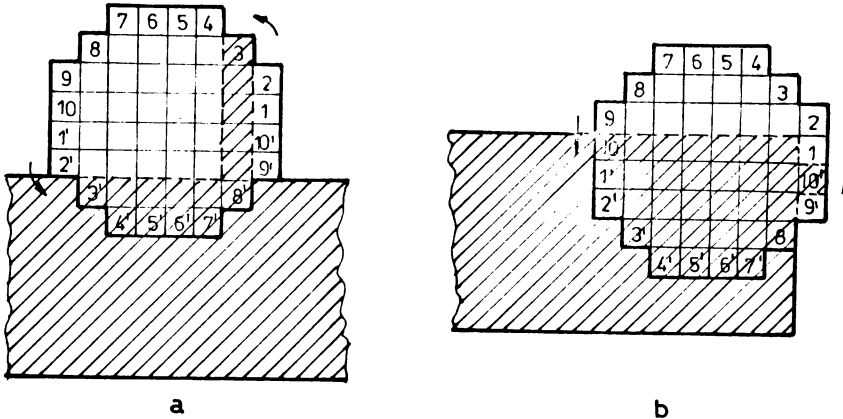


Fig.4.14. Procesul de inspecție al unui conductor orizontal avînd conturul cu neregularități. Cazul unui conductor de lungime infinită (a) respectiv cazul unui conductor de lungime finită (b).

Această comportare favorabilă nu se păstrează în cazul conductoarelor de lungime finită. Considerînd, spre exemplu, situația în care un conductor de lungime finită prezintă o neregularitate de 1 pixel, ca în fig.4.14.b, se constată imediat că va fi generat un semnal eroare, cu toate că un asemenea defect ar trebui în mod normal să nu fie semnalat.

Algoritmul P prezintă o comportare similară în cazul conductoarelor verticale. În ce privește capacitatea de inspecție a conductoarelor înclinate la 45° (fig.4.15), este ușor de observat că algoritmul P prezintă o comportare satisfăcătoare, neglijînd neregularitățile de circa 2 - 3 pixeli.

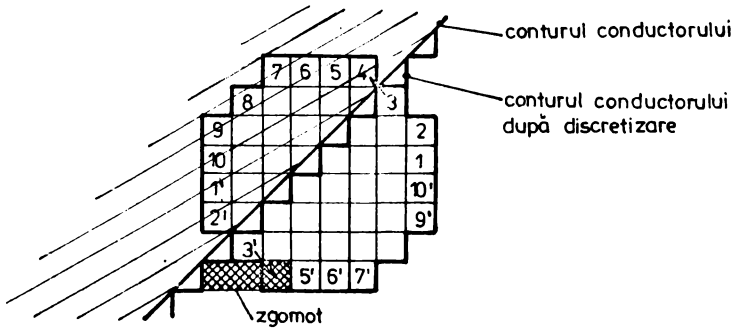


Fig.4.15. Cazul limită în care este generat semnalul eroare ca urmare a prezenței unei neregularități pe conturul unui conductor înclinat la 45° .

4.3.2. Efectul neregularităților asupra valorii minime a unghiului φ

Apariția unei neregularități pe un contur care prezintă un unghi $\varphi = \pi/2$ (fig.4.16), la o distanță față de vârful unghiului mai mică sau egală cu diametrul cercului de inspecție, determină generarea unui semnal eroare. Rezultă de aici că, spre deosebire

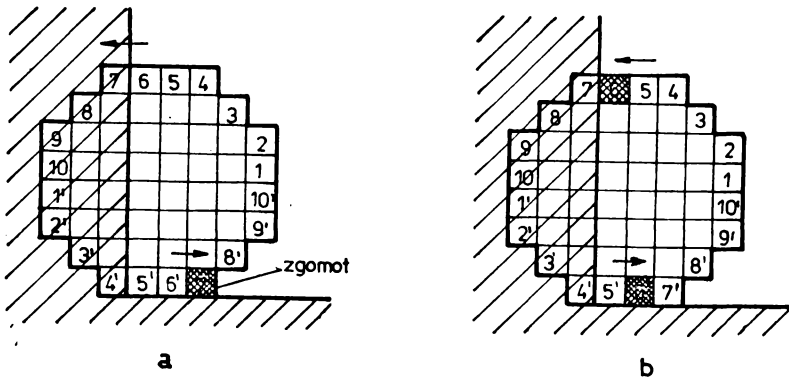


Fig.4.16. Exemple de indicare a unei erori false ca urmare a prezenței pe contur a unei neregularități de pixel, în cazul conductoarelor cu $\varphi = \pi/2$.

de cele afirmate în literatură /8/, aplicarea algoritmului P la inspecția conductoarelor ce prezintă porțiuni în unghi drept (situație frecventă în practică), nu este în realitate posibilă.

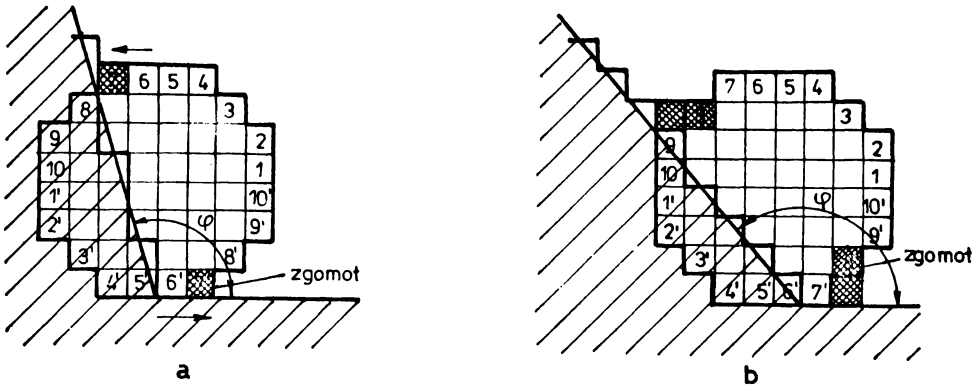


Fig.4.17. Exemple care ilustrează limitarea capacității de inspecție a algoritmului P la unghiuri $\varphi > \pi/2$ ca urmare a prezenței pe contur a unor neregularități de 1 pixel (a) respectiv 2 pixeli (b).

Mai mult decât atât, dependent de mărimea neregularității, capacitatea de inspecție a algoritmului P este limitată la unghiuri $\varphi > \pi/2$. Două exemple edificatoare în acest sens sînt prezentate în fig.4.17.

4.4. Limitări în aplicarea procedeeelor de reducere a valorii minime a unghiului φ în cazul algoritmului P

Așa cum s-a arătat în cap.2, pentru extinderea capacității de inspecție a algoritmului P la conductoare al căror contur prezintă unghiuri φ mai mici decât $\pi/2$, sînt cunoscute din literatură /8/ două procedee.

Referindune la primul procedeu, bazat pe tranzițiile unor grupuri de k pixeli de aceeași valoare (fig.2.14), este de menționat că acesta nu realizează inspecția conductoarelor respectiv a distanțelor de lățime mai mică decât k pixeli. Această afirmație este lesne de verificat pe baza fig.4.9.b, în care considerînd tranzițiile unor grupuri de k=2 pixeli, la inspecția unui conductor de lățime 1 pixel, mai mică decât lățimea admisibilă, se constată că nu este generat semnalul eroare.

Prin urmare, pentru a sesiza defecte a căror lățime este de 1 pixel și care pot apărea în situațiile practice, s-ar necesita la aplicarea procedurii de mai sus ca valoarea lui k să fie $k=1$. În această situație procedura în discuție se reduce de fapt la algoritmul P propriu-zis. Rezultă de aici că, spre deosebire de cele afirmate în literatură, procedura de reducere a unghiului φ prin considerarea tranzițiilor unor grupuri de k pixeli de aceeași valoare nu prezintă utilitate practică.

Într-o situație analogă se găsește procedura cercului dublu prezentat la pct.2.2.5.4. Aplicarea acestui procedeu în cazul algoritmului P, la inspecția conductoarelor al căror contur prezintă neregularități este imposibilă, așa cum rezultă din fig. 4.18. S-a considerat aici cazul inspecției prin procedeu de cerc dublu a zonei dintre două conductoare aflate la o distanță mai mare decât distanța minimă admisibilă, dar care sînt scurt-circuitate printr-o punte conductoare de lățime mai mică decât lățimea admisibilă (egală cu 7 pixeli). În figură s-a avut în vedere situația în care cele două cercuri ar putea indica defect în conformitate cu algoritmul P, dacă se face abstracție de prezența neregularității de 1 pixel (pixelul 12 reprezentat hașurat). Prezența acestei neregularități determină să nu fie generat un semnal eroare de către cercul mare simultan cu semnalul eroare al cercului de inspecție mic și prin urmare defectul nu va fi sesizat (vezi cap.2, rel.(2.7)).

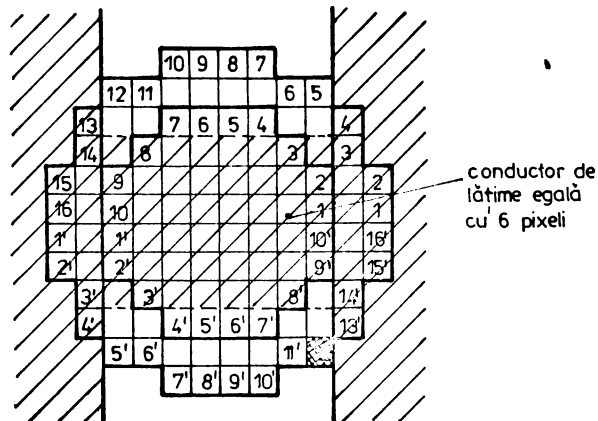


Fig.4.18. Ilustrarea imposibilității aplicării procedurii cercului dublu la inspecția cablajelor avînd conturul cu neregularități.

Se precizează că în raționamentele anterioare au fost avute în vedere tranzițiile "o" → "1" la parcurgerea circumferinței în sens antiorar. În aceleași condiții, se obține un rezultat similar dacă neregularitatea corespunde pixelului 12' (în loc de pixelul 12). Totodată, considerând tranzițiile "1" → "o" la parcurgerea circumferinței în sens orar, prezența unor neregularități în pozițiile corespunzătoare pixelilor 5 respectiv 5' (fig.4.18) conduce la același rezultat.

Pe baza celor de mai sus se poate afirma că aplicarea în practică a procedurii de reducere a valorii unghiului φ utilizând dublul cerc nu este posibilă, având în vedere că orice cablaj real prezintă contururi cu neregularități.

Concluzii

Studiul efectuat relevă faptul că spre deosebire de cele afirmate pînă în prezent în literatură /8/, algoritmul P nu poate fi utilizat în situațiile practice, cînd se operează cu cercuri de inspecție discrete. Astfel, deși în cazul conductoarelor orizontale și verticale netede procedeul de inspecție ar fi posibil utilizînd două cercuri, prezența unor neregularități, frecvente în situațiile practice, face de fapt metoda inaplicabilă. În cazul conductoarelor înclinate la 45° , utilizarea algoritmului P nu este posibilă nici chiar în absența neregularităților. Totodată, în prezența unor neregularități, nu poate fi aplicată nici metoda cercului dublu.

CAPITOLUL 5.

ELABORAREA UNUI NOU ALGORITM DE INSPECTIE VIZUALA AUTOMATA A CABLAJELOR IMPRIMATE

Din analiza prezentată în cap.4 a rezultat că algoritmul P, cel mai performant sub aspectul vitezei și al ușurinței implementării, are limitări în aplicarea lui practică. Totodată, algoritmul de conectivitate respectiv algoritmul lui Euler, prezentați în cap.2, necesită pentru implementare circuite electronice laborioase și în același timp permit o viteză redusă a procesului de inspecție. Rezultă de aici necesitatea elaborării unui nou algoritm, care să asigure o viteză mai ridicată simultan cu ușurința implementării hard.

În capitolul de față va fi prezentat un nou algoritm de inspecție, care se aseamănă cu algoritmul C din punctul de vedere al modului de generare a semnalului eroare. De aceea noul algoritm a fost denumit algoritm de conectivitate îmbunătățit. Sînt studiate trei variante de elaborare a noului algoritm - mai performant - dintre care numai varianta a III-a se dovedește aplicabilă și în cazul cablajelor avînd conturul cu neregularități (situație reală). Ideea centrală ce stă la baza algoritmului nou elaborat o constituie faptul că nu sînt inspectați decît pixeli situați pe conturul conductoarelor respectiv pixelii adiacenți acestui contur. Avînd în vedere ponderea relativ mică a acestor pixeli în numărul total de pixeli ce alcătuiesc imaginea testată, rezultă o reducere considerabilă a duratei totale de inspecție. Totodată, în scopul reducerii circuitelor hard necesare în cazul noului algoritm se utilizează o arie de inspecție semicirculară în locul ariei circulare folosită în algoritmi clasici.

Se menționează că, la fel ca și în capitolele anterioare, lățimea minimă admisibilă a conductoarelor va fi considerată ega-

lă cu intervalul minim admisibil dintre conductoare. Totodată, punctele (pixelii) aferenți ariei conductoarelor vor fi reprezentați prin "1" logic iar punctele (pixelii) corespunzători ariei izolatoare vor fi reprezentați prin "0" logic.

5.1. Formularea primei variante a algoritmului de conectivitate îmbunătățit

5.1.1. Cazul unei rezoluții infinite

Prima variantă a algoritmului de conectivitate îmbunătățit se bazează pe utilizarea unei arie circulare de inspecție de rază d , egală cu lățimea minimă admisibilă a conductoarelor. Centrul ariei circulare își are originea numai în puncte aflate pe conturul conductoarelor și pe zerourile adiacente acestui contur. Generarea unui semnal eroare are loc ori de câte ori există un punct aflat la o distanță mai mică sau egală cu d , de aceeași valoare logică cu punctul din centrul ariei și care nu este în conectivitate cu acest punct (prin conectivitate cu punctul din centrul ariei se înțelege o conectivitate limitată numai în interiorul ariei circulare).

Se consideră în continuare două conductoare orizontale și paralele, de lățime și distanță între ele egală cu valoarea minimă admisibilă d , (fig.5.1). Conform algoritmului de inspecție prezentat anterior, raza ariei cercului de inspecție se ia de o valoare egală cu lățimea minimă admisibilă a conductorului. Ope-

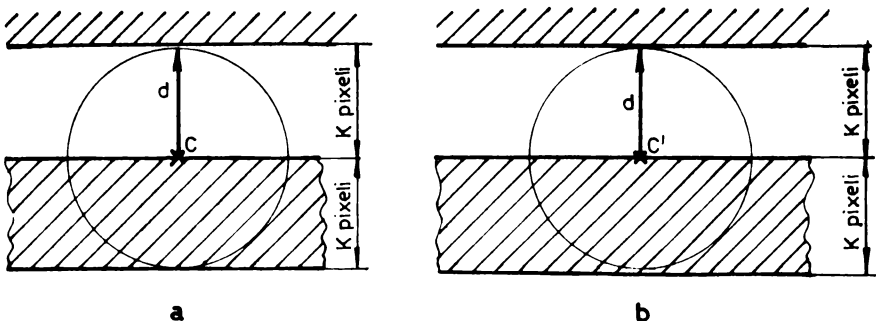


Fig.5.1. Reprezentarea ariei circulare de inspecție în cazul unei rezoluții infinite, cu centrul pe conturul unui conductor (a), respectiv cu centrul într-un punct al suprafeței izolatoare, adiacent conturului (b).

rația de inspecție se efectuează numai cînd centrul ariei se situează într-un punct de pe conturul unui conductor (fig.5.1.a) sau într-un punct al suprafeței izolatoare, adiacent conturului (fig.5.1.b).

În cazul fig.5.1.a se inspectează distanța între cele două conductoare, adică se caută existența unui alt punct, aflat la o distanță mai mică sau egală cu d , de aceeași valoare logică cu punctul C ("1") și care nu este în conectivitate cu acest punct. Se observă din figură că circumferința ariei circulare este tangentă la conturul conductorului de jos (conturul inferior) și la limita de tangentă cu conturul conductorului de sus. Deoarece în interiorul ariei circulare nu există nici un punct de aceeași valoare cu punctul C ("1" logic) și care să nu fie în conectivitate cu acest punct, nu va fi generat semnalul eroare.

În cazul fig.5.1.b, în care s-a considerat centrul ariei de inspecție (C') situat într-un punct adiacent conturului conductorului de jos, se inspectează lățimea minimă admisibilă a acestui conductor. Se va observa că în acest caz circumferința ariei de inspecție este tangentă la conturul conductorului de sus respectiv la limita de tangentă cu conturul conductorului de jos. Deoarece nu există nici un punct în interiorul ariei circulare de aceeași valoare cu centrul C' și care să nu fie în conectivitate cu punctul C' , nu va fi generat semnalul eroare. În același timp este lesne de observat că presupunînd cazul în care lățimea respectiv distanța dintre conductoare sînt mai mici decît d , va fi generat semnalul eroare corespunzător.

5.1.2. Cazul rezoluției finite

În această situație se consideră că centrul ariei circulare de inspecție este un pixel, avînd în vedere că operația de inspecție este declanșată numai dacă centrul acestei ariei se situează pe conturul unui conductor respectiv într-un pixel al suprafeței izolatoare (de valoare "0" logic), adiacent conturului. Algoritmul presupune inspectarea pixelului din centrul ariei față de toți pixelii aflați la o distanță mai mică sau egală cu lățimea minimă admisibilă a conductorului. Ca urmare este necesară utilizarea unei arie circulare discrete ce aproximează o arie circulară continuă de rază d' , dată de relația:

$$d' = d + \frac{1}{2} \Delta h = (K + \frac{1}{2}) \Delta h \quad (5.1)$$

și al cărui centru să se situeze în centrul unui pixel. În expresia de mai sus Δh reprezintă dimensiunile unui pixel iar K lățimea minimă admisibilă a unui conductor (exprimată în pixeli).

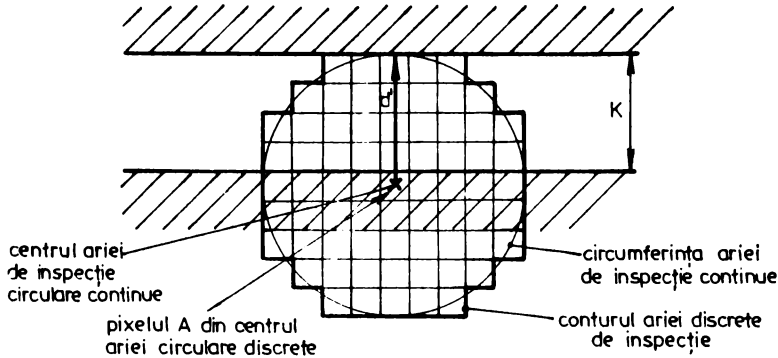


Fig.5.2. Aproximarea ariei circulare de rază d' prin aria discretă de inspecție.

În fig.5.2 s-au reprezentat două conductoare orizontale de lățime suficient de mare și aflate la o distanță egală cu distanța minimă admisibilă de K pixeli. Pentru inspecția pixelului A , aflat pe conturul conductorului de jos în raport cu toți pixelii situați la o distanță mai mică sau egală cu distanța minimă admisibilă între două conductoare (K pixeli), se utilizează aria discretă de inspecție ce aproximează aria de rază d' . Centrul ariei discrete se găsește în pixelul A .

În condițiile de mai sus, algoritmul de inspecție constă în următoarele:

- Se validează operația de inspecție numai când centrul ariei circulare se află pe conturul unui conductor sau în pixeli de pe suprafața izolatoare, adiacenți conturului;

- Semnalul eroare este generat ori de câte ori există un pixel în aria circulară discretă de aceeași valoare cu pixelul din centrul ariei și care nu este în conectivitate cu acesta din urmă.

Intr-un mod asemănător cu cazul rezoluției infinite, când centrul ariei discrete de inspecție se află pe conturul unui conductor este inspectată distanța între două conductoare (fig.5.3.a)

iar cînd centrul ariei se află în pixeli de pe suprafața izolatoare, adiacentă conturului se inspectează lățimea conductorului respectiv (fig.5.3.b).

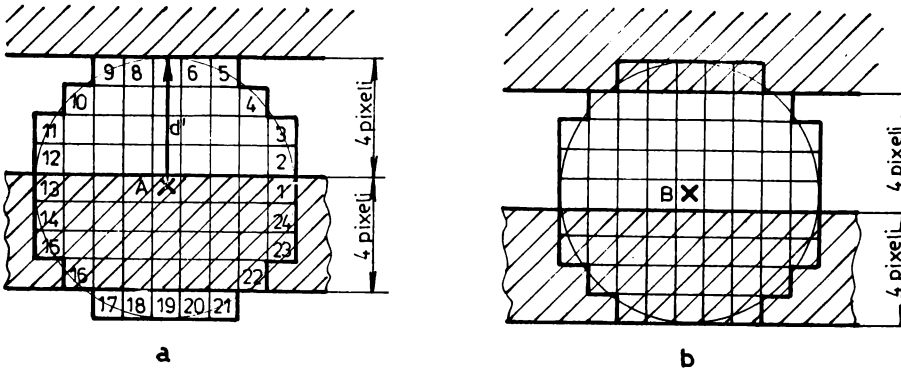


Fig.5.3. Procesul de inspecție al intervalului dintre două conductoare (a) respectiv a lățimii unui conductor (b). S-a considerat $K=4$ pixeli.

În fig.5.3.a s-a reprezentat un conductor orizontal de lățime egală cu lățimea minimă admisibilă (4 pixeli) și aflat la distanță minimă admisibilă (4 pixeli) în raport cu un al doilea conductor presupus de lățime suficient de mare. Considerînd centrul ariei discrete de inspecție situat într-un pixel pe conturul conductorului de jos (pixelul A), se inspectează distanța dintre cele două conductoare, adică se caută existența unui pixel în aria discretă, de aceeași valoare cu pixelul din centrul și care nu este în conectivitate cu acesta. Avînd în vedere că pentru cazul din figură un asemenea pixel nu există, nu va fi generat semnalul eroare. Presupunînd însă că distanța dintre cele două conductoare ar deveni cu 1 pixel mai mică (3 pixeli) atunci ar fi indicată prezența defectului.

În mod similar celor de mai sus are loc inspecția lățimii unui conductor utilizînd algoritmul îmbunătățit. Un asemenea exemplu este prezentat în fig.5.3.b, în care este inspectată lățimea conductorului inferior din cazul analizat anterior.

5.2. Varianta a II-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit

Această variantă este identică cu prima din punct de vedere al principiului de inspecție și generare a semnalului de eroare

re. În același timp, varianta a II-a diferă de prima variantă în sensul că în loc de a se utiliza o arie circulară de inspecție, de rază d , este folosită o arie semicirculară. În cele ce urmează se va justifica că utilizarea unei arii semicirculare de rază d este suficientă pentru efectuarea operației de inspecție.

5.2.1. Cazul unei rezoluții infinite

La fel ca și în cazul primei variante a algoritmului de conectivitate îmbunătățit, prezentată la pct.5.1.1, operația de inspecție este validată numai când centrul ariei de inspecție se află pe conturul unui conductor sau într-un punct de pe suprafața izolatoare, adiacent conturului conductorului. Deoarece cele două procese sînt identice și utilizează aceeași arie circulară, în cele ce urmează se va considera numai un singur caz, și anume acela în care operația de inspecție este validată când centrul ariei se află pe conturul conductorului. Așa cum este cunoscut, în această situație este inspectată distanța dintre două conductoare.

Considerînd distanța minimă admisibilă între conductoare egală cu d , rezultă că și raza ariei semicirculare va fi egală tot cu d .

În fig.5.4.a, s-a reprezentat cazul limită în care centrul ariei circulară de inspecție (punctul C) se află situat pe conturul conductorului inferior, iar conturul conductorului superior este tangent la circumferința ariei de inspecție (în punctul B).

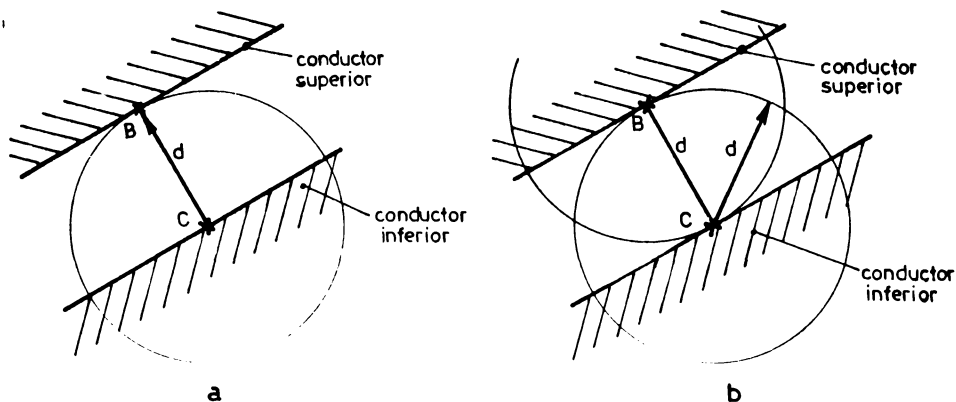


Fig.5.4. Evidențierea dublei indicări a unui defect: a) semnalarea defectului în situația în care centrul ariei circulare este situat pe conturul conductorului inferior; b) semnalarea aceluiași defect atunci când centrul ariei circulare se găsește pe conturul conductorului superior.

În această situație, conform principiului de inspecție al algoritmului de conectivitate îmbunătățit, se va genera un semnal eroare datorită existenței punctului B la o distanță egală cu d în raport cu punctul C. De asemenea, la un alt moment dat centrul ariei de inspecție va fi situat în punctul B, pe conturul conductorului superior, în timp ce punctul C va fi tangent la circumferința ariei (fig.5.4.b). Evident, și de această dată va fi generat semnalul eroare. Rezultă că pentru fiecare defect se generează semnalul eroare de două ori. Acest lucru este o consecință a utilizării unei arie circulare în care centrul ariei se inspectează în raport cu toate punctele aflate la o distanță mai mică sau egală cu d .

Observațiile de mai sus au condus la ideea realizării procesului de inspecție utilizând o arie semicirculară în locul ariei circulare.

Pentru justificarea noului procedeu se are în vedere fig. 5.5, în care este reprezentată ariea semicirculară de test (traseată cu linie îngroșată) iar în fig.5.5.b este ilustrat un procedeu de inspecție utilizând această arie. Se constată ușor că, în situația în care centrul ariei semicirculare se găsește pe conturul conductorului 1 (în punctul C_1), nu este semnalat nici un defect, cu toate că punctul C_2 se găsește situat la o distanță egală cu d față de C_1 . Este de menționat că acest defect ar fi fost indicat în cazul utilizării unei arie de test circulare. Omisiunea evidențiată mai sus nu înseamnă o funcționare incorectă a algoritmului

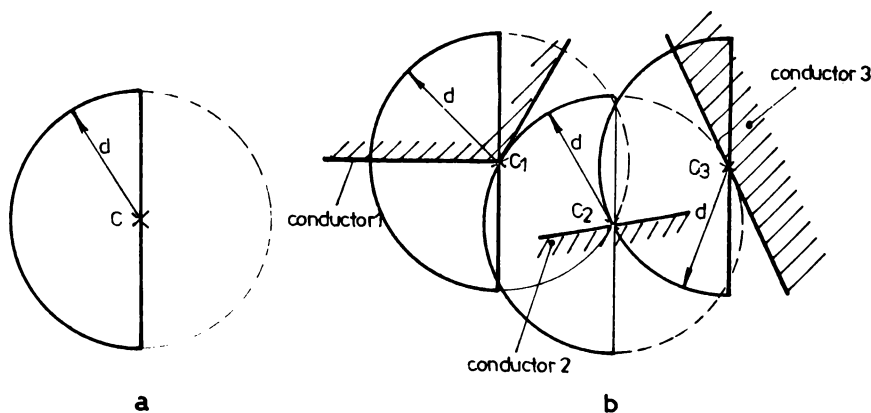


Fig.5.5. Reprezentarea ariei semicirculare de inspecție (a) și exemplificarea procesului de inspecție utilizând această arie (b).

de inspecție utilizând o arie semicirculară, deoarece defectul nesemnalat inițial va fi indicat în situația în care centrul ariei de test se va găsi în punctul C_2 .

În mod similar are loc semnalarea defectului existent între punctele C_2 și C_3 . Dacă acest defect nu va fi sesizat atunci când centrul ariei de test se găsește în C_2 , el va fi indicat în situația în care centrul ariei de test este plasat în C_3 .

Din exemplul prezentat mai sus rezultă funcționarea corectă a algoritmului de conectivitate îmbunătățit utilizând o arie de test semicirculară. Procesul de inspecție, conform acestui algoritm, decurge după cum urmează:

- Validarea operației de inspecție are loc ori de câte ori centrul ariei semicirculare de test se găsește pe conturul unui conductor respectiv într-un punct aparținând suprafeței izolatoare, adiacent conturului.

- Este generat un semnal eroare ori de câte ori se constată existența în interiorul ariei de test a unui punct de aceeași valoare logică cu centrul ariei și care nu se găsește în conectivitate cu acest centru.

5.2.2. Cazul rezoluției finite

În acest caz procesul de inspecție se realizează utilizând o arie de test semicirculară discretă, rezultată prin aproximarea jumătății unei arii circulare continue de rază d' , dată de relația (5.1). Centrul ariei continue se presupune situat în centrul unui pixel. Aria discretă rezultă prin aproximare așa cum este arătat în fig.5.6, în care s-a considerat $K=4$ pixeli.

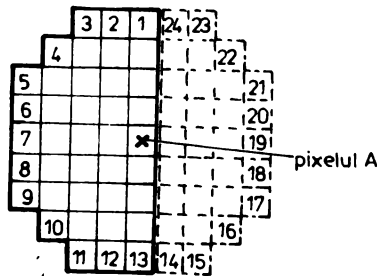


Fig.5.6. Determinarea ariei semicirculare discrete prin aproximarea jumătății unei arii circulare continue de rază egală cu d' .

Se observă că alegînd raza d' în conformitate cu relația (5.1), diametrul ariei continue va fi întotdeauna un număr impar de pixeli. În această situație, și a vînd în vedere că aria semicirculară trebuie să conțină un număr întreg de pixeli, suprafața ei nu poate fi riguros egală cu jumătate din suprafața ariei circulare discrete din care provine. Pe de altă parte, ținînd seama de faptul că pixelul A trebuie să aparțină ariei semicirculare de test, se impune aproximarea acestei arii cu în fig.5.6.

Utilizînd aria de test din figură menționată mai sus, varianta a doua a algoritmului de conectivitate îmbunătățit poate fi enunțată astfel:

- Operația de inspecție este validată ori de cîte ori centrul ariei semicirculare de test se găsește situat pe conturul unui conductor respectiv într-un punct ce aparține suprafeței izolatoare, adiacent conturului.

- Este generat semnalul eroare ori de cîte ori se constată existența în interiorul ariei de test a unui pixel de aceeași valoare logică cu centrul ariei și care nu este în conectivitate cu pixelul din centru.

5.3. Limitări în aplicarea primelor două variante ale algoritmului de conectivitate îmbunătățit

Variantele algoritmului de conectivitate îmbunătățit, prezentate la pct.5.1 și 5.2, se comportă în mod asemănător din punctul de vedere al capacității de inspecție. Drept urmare a acestui fapt, vor fi analizate în continuare limitele pe care le prezintă algoritmul bazat pe utilizarea unei arii de test semicirculare. Se precizează însă, că observațiile și concluziile stabilite rămîn valabile și în cazul primei variante a algoritmului de conectivitate îmbunătățit.

5.3.1. Cazul unei rezoluții infinite

Este ușor de observat, pe baza fig.5.7, că în acest caz valoarea minimă a unghiului φ , sub care nu se mai efectuează corect operația de inspecție, este limitată la $\pi/2$. În figură s-a presupus cazul unui conductor al cărui contur prezintă două porțiuni drepte ce fac un unghi $\varphi < \pi/2$. Considerînd aria de test situată cu centrul în punctul C, aflat pe porțiunea orizonta-

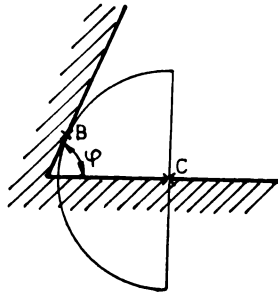


Fig.5.7. Ilustrarea limitării unghiului minim φ la $\pi/2$.

lă a conturului, conform algoritmului de conectivitate va fi generat - în această situație - un semnal eroare (eroare falsă), deoarece poate exista un punct B, aparținând celei de a doua porțiuni a conturului conductorului, și deci de aceeași valoare logică cu punctul C, fără a fi însă în conectivitate cu el.

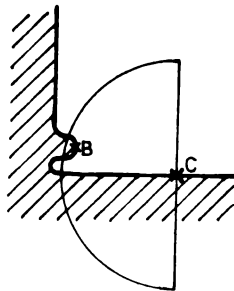


Fig.5.8. Efectul unei neregularități de pe un contur realizat la un unghi egal cu $\pi/2$.

În mod asemănător poate fi studiat efectul unei neregularități prezentă pe un contur realizat la $\pi/2$ (fig.5.8). Se observă din figură că, funcție de mărimea neregularității și de depărtarea acesteia față de vârful unghiului (în limitele razei ariei semicirculare), poate fi generat un semnal de eroare falsă. Acest fapt se datorește prezenței cel puțin a unui punct B, având aceeași valoare logică cu punctul C, dar față de care nu se găsește în conectivitate.

5.3.2. Cazul rezoluției finite

Se are în vedere, în acest caz, utilizarea unei arii discrete de inspecție de forma celei reprezentate în fig.5.6. Problema care interesează constă în studiul valorii minime a unghiului φ pînă la care inspecția se efectuează corect. În acest scop s-a considerat cazul unui conductor al cărui contur prezintă un unghi $\varphi < \pi/2$ și care după discretizare se prezintă ca în fig.5.9.

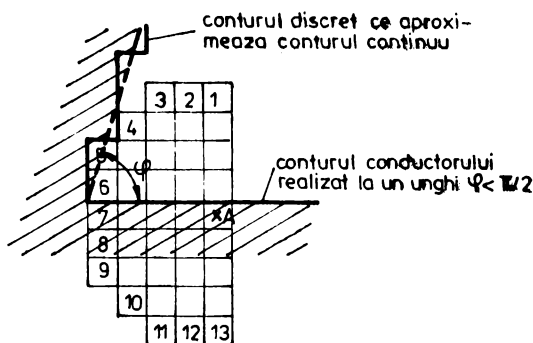


Fig.5.9. Exemplu de inspecție corectă a unui conductor al cărui contur prezintă un unghi $\varphi < \pi/2$, utilizând o arie semicirculară discretă ($d'=4, 5$ pixeli).

Poziția ariei de test avută în vedere mai sus este o poziție limită, pe baza căreia se poate stabili că, în cazul concret considerat, unghiul φ nu poate fi de valoare mai mică decât cea reprezentată în figură. Într-adevăr, presupunând un unghi φ mai mic, pixelul 5 devine de valoare "1" logic iar pixelul 6 rămîne în continuare de valoare "0" logic, fapt ce determină generarea semnalului eroare (deoarece pixelul 5 va avea aceeași valoare logică cu pixelul A, fără a fi în conectivitate cu el). Este evident că, valoarea minimă a unghiului φ este dependentă de raza ariei de inspecție și de modul în care a fost discretizat conturul conductorului respectiv aria de inspecție.

Se subliniază totodată că, posibilitatea inspecției unor contururi avînd unghiuri $\varphi < \pi/2$, prezintă un interes deosebit din punct de vedere aplicativ. Acest lucru se datorește frecvenței cu care intervin în cablajele practice conductoarele realizate în unghi drept dar care, datorită imperfecțiunii procesului

tehnologic prezintă contururi cu unghiuri $\varphi < \pi/2$.

Pentru studiul efectului neregularităților ce apar pe conturul unui conductor realizat la un unghi $\varphi = \pi/2$, se au în vedere cele două cazuri reprezentate în fig.5.10. În fig.5.10.a prezența neregularității reprezentată de pixelul 5 determină generarea unui semnal eroare, avînd în vedere că acest pixel are aceeași valoare logică "1" cu pixelul A din centru, fără a fi în conectivitate cu acesta. Printr-un raționament similar se stabilește că,

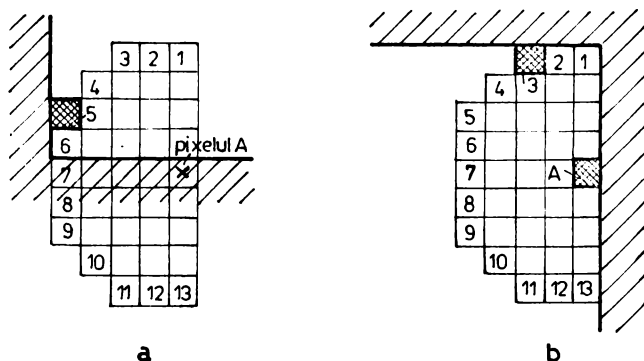


Fig.5.10. Exemplificarea efectului unei neregularități de 1 pixel situată pe conturul unui conductor realizat cu un unghi $\varphi = \pi/2$.

existența perturbațiilor reprezentate de pixelii 3 și A va determina generarea unui semnal eroare (pixelul 3 are aceeași valoare logică cu pixelul A, care constituie centrul ariei de test, fără a fi însă în conectivitate cu acest pixel).

În concluzie se poate afirma că, la fel ca și în cazul rezoluției infinite, prezența neregularităților pe conturul unui conductor realizat cu un unghi $\varphi = \pi/2$ poate determina, dependent de mărimea neregularităților și de depărtarea acestora față de vârful unghiului (în limitele razei ariei semicirculare) generarea unui semnal de eroare falsă.

Erori false pot fi indicate și în situația în care centrul ariei de test este situat într-un pixel de valoare "0" logic. Dacă acest pixel este adiacent conturului unui conductor, ca în fig.5.11, prezența unei neregularități de un pixel (pixelul 15 în figură), determină generarea unui semnal de eroare falsă. Într-adevăr, prezența neregularității reprezentată de pixelul 15, împiedică conectivitatea pixelilor 13 și 14, de valoare "0" logic,

cu pixelul A din centrul ariei, care are aceeași valoare "o" logic.

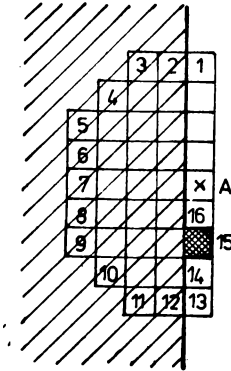


Fig.5.11. Generarea unui semnal de eroare falsă ca urmare a unei neregularități de 1 pixel (pixelul 15) în cazul în care centru ariei de test se găsește într-un pixel de valoare "o" logic adiacent conturului conductorului.

5.4. Varianta a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit

Această nouă variantă a algoritmului de conectivitate a fost elaborată în ideea evitării indicării unor erori false ca urmare a prezenței unor neregularități pe conturul conductoarelor (vezi pct.5.3).

5.4.1. Prezentarea algoritmului

a) Cazul unei rezoluții infinite. Se analizează, pentru început, procedura de evitare a indicării unei erori false în cazul unui conductor realizat la un unghi $\varphi = \pi/2$ și care prezintă pe conturul vertical neregularități (fig.5.12).

Valoarea limită a neregularităților ce apar pe conturul conductoarelor și care trebuie să fie ignorate, reprezintă un parametru caracteristic al sistemului de inspecție. Fie această valoare egală cu δ . Algoritmul de inspecție trebuie să fie astfel conceput, încât să nu se genereze semnal eroare la apariția unor neregularități mai mici sau egale cu δ , dacă lățimea conductoa-

relor respectiv distanța dintre ele este mai mare sau egală cu valoarea minimă admisibilă.

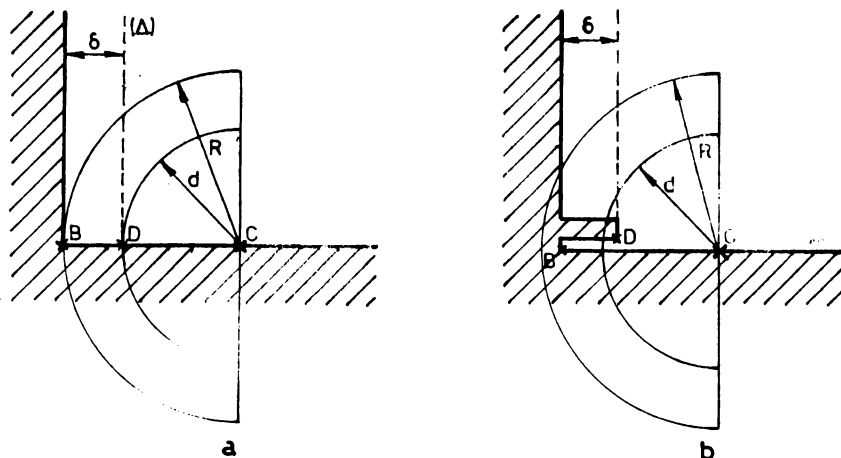


Fig.5.12. Determinarea razei R a ariei semicirculare de propagare în scopul evitării indicării de erori false ca urmare a existenței unor neregularități de valoare mai mică sau egală cu δ , pe conturul vertical al unui conductor realizat la un unghi $\varphi = \pi/2$ (a). Exemplu care ilustrează valabilitatea algoritmului (b).

În fig.5.12.a s-a reprezentat un conductor realizat la un unghi $\varphi = \pi/2$ și a cărui porțiune orizontală a conturului este lipsită de neregularități. S-a presupus, de asemenea, că neregularitățile pot apărea în orice punct al conturului vertical, mărimea lor nedeșăind valoarea δ . Prin urmare, în această situație algoritmul nu trebuie să indice eroare.

În fig.5.12.b s-a reprezentat cu o linie întreruptă (Δ), locul geometric al conturului cu neregularități de valoare maximă δ , ce apar pe porțiunea verticală a conturului. S-a considerat, de asemenea, situația în care aria de test este tangentă în punctul D la (Δ), punctul C fiind totodată pe porțiunea orizontală a centrului. Această poziție este o poziție limită a ariei de test, pentru care prezența neregularităților nu determină încă generarea semnalului eroare. O mică deplasare la stînga a ariei de test în prezența neregularităților de valoare δ , va conduce la indicarea unei erori false (vezi fig.5.12.b).

Această eroare falsă poate fi evitată a fi indicată, dacă la aria de test se adaugă o coroană semicirculară de propagare, avînd raza exterioară R mai mare sau egală cu distanța BC (fig. 5.12.a). Această coroană circulară asigură numai propagarea conectivității fără a genera semnal eroare, motiv pentru care se numește arie de propagare. În această situație, așa cum rezultă din fig.5.12.b, se asigură conectivitatea dintre centrul C , al ariei de test și punctele de aceeași valoare logică cu centrul C , situate în interiorul ariei de test, încît nu este generat semnalul eroare.

Pe baza fig.5.12.a se stabilește ușor că, pentru evitarea indicării unei erori false, este necesar și suficient ca:

$$R \geq d + \delta \quad (5.2)$$

Un al doilea caz ce se are în vedere îl constituie prezența neregularităților atît pe porțiunea verticală cît și pe porțiunea orizontală a conturului conductorului (fig.5.13). Prin semidreptele (Δ) respectiv (Δ') a fost indicat locul geometric al conturului cu neregularități de valoare δ . Rețînînd în mod similar cazurilor deja analizate, se stabilește că raza R' a ariei de propagare care asigură evitarea indicării unei erori false, es-

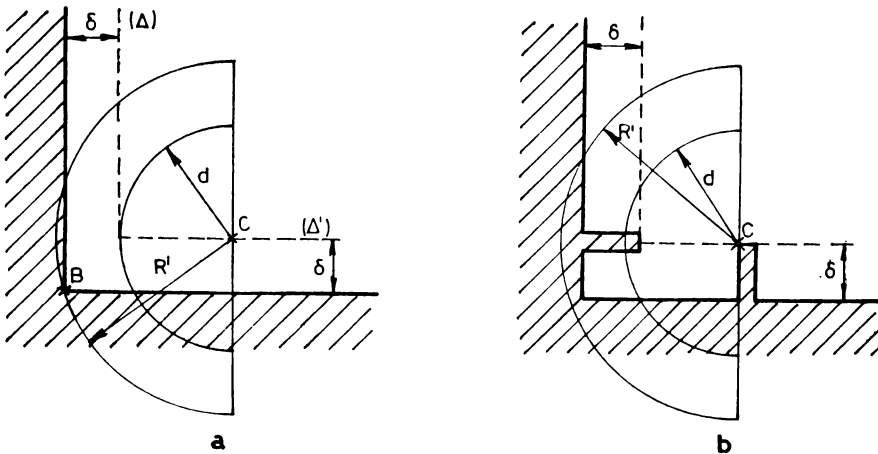


Fig.5.13. Determinarea razei R' a ariei de propagare necesară evitării indicării unei erori false, ca urmare a prezenței unor neregularități de valoare δ pe conturul conductorului realizat la un unghi $\varphi = \pi/2$ (a). Exemplu din care rezultă funcționarea corectă a algoritmului (b).

te dată de relația (fig.5.13.a) :

$$R' \geq \sqrt{\delta^2 + (d + \delta)^2} \quad (5.3)$$

În fig.5.13.b este prezentat un exemplu concret, similar celui din fig.5.12.b, din care rezultă funcționarea corectă a noului procedeu.

O ultimă situație analizată o constituie cea în care se necesită evitarea influenței unor neregularități de forma celei prezentate în fig.5.11. Pentru exemplificare se consideră cazul reprezentat în fig.5.14. În scopul evitării indicării unei erori false, se necesită asigurarea conectivității între centrul C al ariei de test, situat într-un punct cu valoare "0" logic și punctele cu aceeași valoare "0" logic din interiorul ariei de test, zona dublu hașurată. Pentru a realiza acest lucru, se observă că este suficient ca la aria de propagare semicirculară de raza R' să se adauge o fișie de lățime δ , ca în fig.5.14. Această fișie asigură conectivitatea necesară.

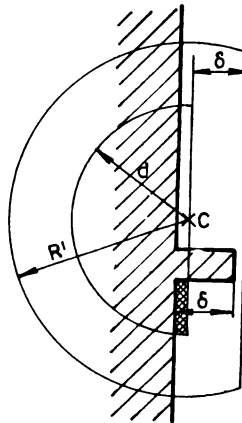


Fig.5.14. Suplimentarea ariei semicirculară de propagare de rază R' cu o fișie de lățime δ , în scopul evitării indicării erorilor false.

Drept concluzie la analiza efectuată mai sus se afirmă că, efectul negativ al prezenței unor neregularități pe conturul conductoarelor, de valoare mai mică sau egală cu δ , poate fi evitat prin utilizarea pe lângă aria de test semicirculară a unei arie semicirculară de propagare, concentrică cu prima, la care se mai adaugă încă o fișie de lățime egală cu δ (fig.5.14).

b) Cazul rezoluției finite. Spre deosebire de cazul precedent, în cazul rezoluției finite atât lățimea minimă admisibilă a conductorului respectiv distanța minimă între conductoare cât și valoarea maximă admisă a neregularităților vor fi exprimate în pixeli. Fie K respectiv L numărul de pixeli corespunzători celor două valori limită admisibile menționate anterior. Conform celor prezentate la pct.5.1.2, raza ariei semicirculare ce urmează a fi aproximată prin discretizare, pentru determinarea ariei semicirculare de inspecție, este dată de relația (5.1). În mod similar, raza R'' a ariei de propagare din care rezultă prin aproximare aria discretă de propagare, este dată de relația:

$$R'' \geq R' + \frac{1}{2} \Delta h \quad (5.4)$$

respectiv (relația (5.3)) :

$$R'' \geq \sqrt{\delta^2 + (d + \delta)^2} + \frac{1}{2} \Delta h \quad (5.5)$$

Prin împărțire cu Δh , din relația de mai sus rezultă:

$$R'' \geq \sqrt{L^2 + (K+L)^2} + \frac{1}{2} [\text{pixeli}] \quad (5.6)$$

Se menționează că deoarece în urma evaluării radicalului, valoarea acestuia poate diferi de un număr întreg, această valoare se va rotunji la întregul imediat superior.

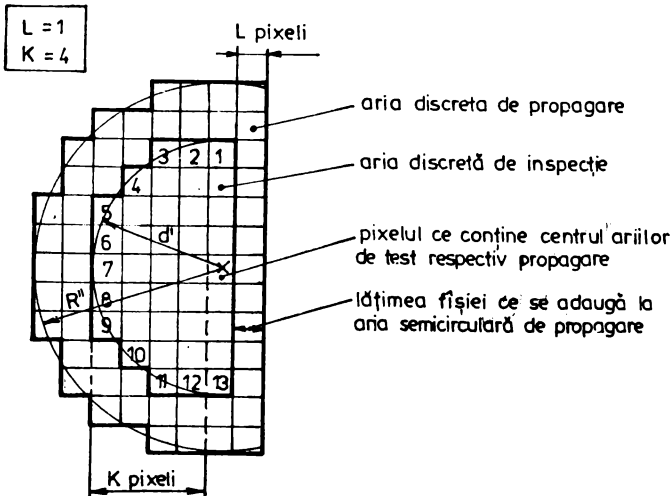


Fig.5.15. Ilustrarea modului de determinare a ariilor discrete de test respectiv de propagare (K=4, L=1).

La aria discretă rezultată prin aproximarea ariei semicirculare de raza R'' mai trebuie adăugată o fișie de lățime egală cu L pixeli. Un exemplu de determinare a ariei de test precum și a ariei de propagare în cazul concret $K=4$ pixeli, $L=1$ pixel, este prezentat în fig.5.15.

5.4.2. Extinderea capacității de inspecție la conductoare realizate cu un unghi $\varphi < \pi/2$

Intr-un mod similar celor prezentate la punctul anterior, în cele ce urmează se va demonstra posibilitatea extinderii capacității algoritmului la inspecția conductoarelor realizate cu un unghi φ sub $\pi/2$.

a) Cazul unei rezoluții infinite. În fig.5.16 s-a reprezentat un conductor realizat la un unghi $\varphi = \varphi_{\min}$ mai mic decât $\pi/2$. Prin linii punctate a fost figurat locul geometric al conturului neregularităților de valoare maximă admisă δ și care nu trebuie să fie indicate ca defecte. În mod similar celor expuse la pct. 5.4.1.a, aria de inspecție cu centrul în C s-a considerat în situația limită pentru care o mică deplasare a centrului spre stînga determină generarea semnalului eroare (în absența neregularităților). Dacă se au în vedere și neregularitățile, o poziție li-

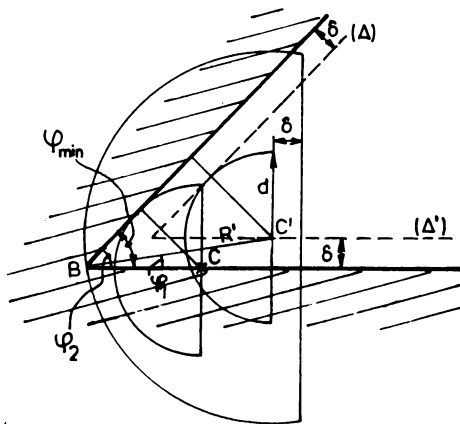


Fig.5.16. Determinarea razei R' a ariei de propagare în scopul extinderii capacității de inspecție la unghiuri $\varphi < \pi/2$ (în prezența neregularităților).

mită similară este cea în care aria de test se situează cu centrul în punctul C'.

Deoarece în procesul de inspecție, aria de test cu centrul în C' se deplasează spre stînga față de imaginea cablajului presupusă fixă, pentru ca în această situație să nu fie semnalată o eroare falsă este necesar să se utilizeze o arie de propagare avînd o rază egală cu BC' (fig.5.16). Pe baza fig.5.16 se poate scrie că:

$$\varphi_1 = \text{arc sin } \frac{\delta}{R'}$$

$$\varphi_2 = \text{arc sin } \frac{d+\delta}{R'}$$

respectiv:

$$\varphi_{\min} = \varphi_1 + \varphi_2 = \text{arc sin } \frac{\delta}{R'} + \text{arc sin } \frac{d+\delta}{R'} \quad (5.7)$$

Din ultima egalitate poate fi determinată mărimea razei R' pentru care este inspectat corect un conductor realizat cu un unghi $\varphi > \varphi_{\min}$ în prezența unor neregularități de valoare maximă admisă δ .

b) Cazul rezoluției finite. Presupunînd determinată valoarea lui R' din relația (5.7), aproximarea razei ariei de propagare se face pe baza relației (5.4). Înainte de aplicarea acestei relații, valoarea lui R' va fi rotunjită - dacă este cazul - la întregul imediat superior.

5.4.3. Implementarea variantei a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit

5.4.3.1. Unele precizări privind conectivitatea

În cele prezentate anterior, prin conectivitate s-a înțeles proprietatea unui grup de doi sau mai mulți pixeli, cu o aceeași valoare logică, de a avea anumite elemente comune (în cazul discret, vîrfuri sau laturi comune). Două exemple de grupuri de pixeli aflați în conectivitate sînt prezentate în fig.5.17. În primul caz (fig.5.17.a) pixelii notați cu 1, 2, 3, 4 sînt în conectivitate cu pixelul B, de aceeași valoare logică cu ei, avînd cîte o latură comună. În cel de al doilea caz, pixelul B este în conectivitate cu pixelii 1, 2, 3 și 4 - ca avînd cîte o latură comună - dar în același timp se găsește în conectivitate și cu pixelii 5, 6, 7, 8,

cu care are câte un vîrf comun. In cele ce urmează, cele două tipuri de conectivități prezentate mai sus, vor fi numite conectivități cu 4 respectiv conectivitate cu 8 pixeli.



Fig.5.17. Exemple de pixeli aflați în conectivitate. Conectivitatea cu 4 pixeli (a) respectiv conectivitatea cu 8 pixeli (b).

Conform celor arătate în literatură /8/, pentru implementarea hard a algoritmilor cunoscuți de conectivitate era specificată considerarea unei conectivități cu 4 pixeli. Se va demonstra în cele ce urmează că, prezența neregularităților pe conturul conductoarelor impune la implementarea hard a algoritmilor de conectivitate nou elaborați, luarea în considerare și a conectivității cu 8 pixeli.

Pentru justificarea afirmației de mai sus se are în vedere fig.5.18.a, în care este prezentat cazul unui conductor înclinat care are pe contur o neregularitate de 1 pixel (pixelul B) în conectivitate cu un pixel de pe contur (conectivitatea de tipul cu 8 pixeli). Este lesne de observat că, în situația menționată, con-

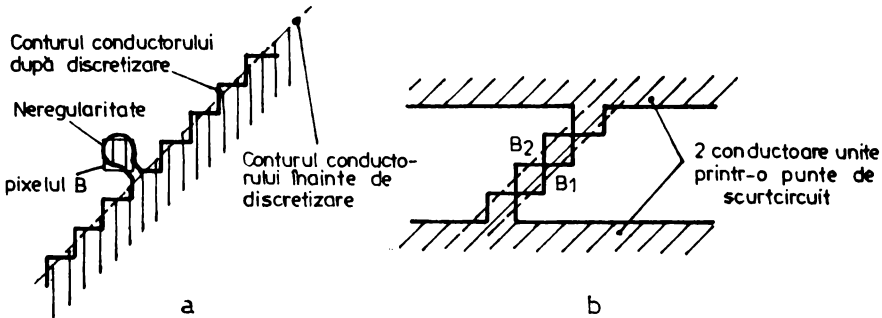


Fig.5.18. Justificarea necesității luării în considerare la implementare atât a conectivității cu 8 pixeli (a) cât și a conectivității cu 4 pixeli (b).

siderînd numai o conectivitate cu 4 pixeli, pixelul B nu apare în conectivitate cu pixelii ariei conductoare. Ca urmare, atunci cînd aria de test se va găsi cu centrul pe conturul conductorului, pixelul B va fi indicat ca defect, el avînd aceeași valoare logică cu

pixelul din centru, fără a fi însă în conectivitate cu acesta din urmă.

Este important de subliniat că, luarea în considerare la implementare numai a conectivității cu 8 pixeli nu este suficientă. Din exemplul prezentat în fig.5.18.b, în care două conductoare sînt scurtcircuitate printr-un conductor de lățime egală cu 1 pixel rezultă că prezența defectului este cu certitudine semnalată numai dacă se are în vedere și conectivitatea cu 4 pixeli. Astfel, presupunînd că este inspectată lățimea conductorului de scurtcircuit, situația în care centrul ariei de test se găsește succesiv în pixeli de valoare logică "0" adiacenți conturului, spre exemplu în B_1 , nu este indicată prezența defectului deoarece toți pixeli de valoare "0" logic din interiorul ariei de test se vor găsi în conectivitate prin intermediul pixelilor B_1 și B_2 (în conectivitate de tipul cu 8 pixeli). Dimpotrivă, considerînd în aceeași situație numai conectivitatea de tipul cu 4 pixeli, defectul va fi sigur semnalat.

Din cele de mai sus, se poate conchide că la inspecția distanței dintre conductoare (cînd centrul ariei de test se găsește în pixeli de valoare "1" logic) este necesară implementarea hard luînd în considerare conectivitatea cu 8 pixeli, după cum pentru inspecția lățimii conductoarelor (centrul ariei în pixeli de valoare "0" logic) trebuie luată în considerare la implementarea conectivității cu 4 pixeli

Este important de observat ca, prezența simultană a celor două tipuri de conectivitate într-o implementare hard, așa cum s-a arătat mai sus, este posibilă.

5.4.3.2. Circuite pentru detecția pixelilor aflați pe conturul unui conductor și a zerourilor aferente conturului

Așa cum s-a arătat la prezentarea algoritmilor de conectivitate îmbunătățiți, procesul de inspecție trebuie să fie validat numai în situația în care centrul ariei de test se găsește fie într-un pixel situat pe conturul conductorului (de valoare "1" logic), fie într-un pixel adiacent acestui contur (de valoare "0" logic). Sesizarea celor două situații de mai sus se realizează cu ajutorul unor circuite specifice, care vor fi prezentate în cele ce urmează.

a) Detectorul de pixeli aflați pe conturul unui conductor.
Schema acestui circuit se prezintă ca în fig.5.19. Pentru explicarea funcționării se va presupune că pixelul B este situat pe conturul unui conductor (are valoare "1" logic), situație în care circuitul trebuie să furnizeze la ieșire un nivel "1" logic. Situația pixelu-

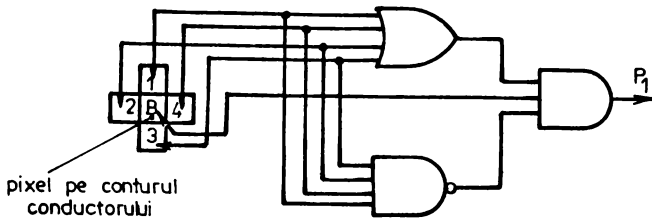


Fig.6.19.Schema logică a circuitului pentru detecția pixelilor aflați pe conturul unui conductor.

lui B pe contur presupune ca cel puțin unul din cei 4 pixeli adiacenți să fie de valoare "1" logic și în același timp cel puțin unul dintre aceiași pixeli să fie de valoare "0" logic. Se constată că în situația în care sînt îndeplinite cele două condiții precizate anterior semnalul P_1 de la ieșirea circuitului de detecție va avea valoarea "1" logic (așa cum este necesar).

b) Detecția pixelilor de valoare "0" logic adiacenți conturului. Schema detectorului utilizat în acest scop este reprezentată în fig.5.20. De această dată se presupune că pixelul B are valoarea "0" logic și că este adiacent conturului conductorului. Acest fapt presupune că cel puțin unul dintre cei 4 pixeli adiacenți lui să fie de

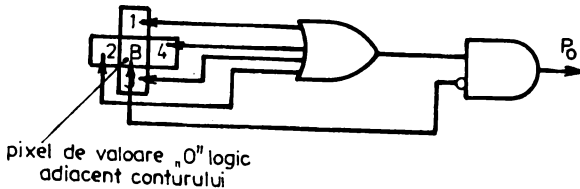


Fig.5.20.Schema detectorului de pixeli adiacenți conturului și avînd valoarea "0" logic.

valoare "1" logic, situație în care semnalul de decizie P_0 trebuie să fie asemenea de valoare "1" logic. Se constată ușor că schema din fig.5.20 satisface condiția menționată anterior.

Utilizînd și P_0 este generat semnalul P de validarea a procesului de inspecție conform relației logice:

$$P = P_1 + P_0 \quad (5.8)$$

valabilitatea relației de mai sus este evidentă, avînd în vedere că procesul de inspecție trebuie declanșat atît în situația în care centrul ariei de test se găsește pe conturul conductorului cît și în situația în care centrul se găsește în pixeli de valoare "0" logic, adiacent conturului.

5.4.3.3. Implementarea schemei combinaționale

Circuitele combinaționale aparținând circuitului de prelucrare trebuie să fie astfel concepute încît să genereze un semnal eroare numai dacă există în aria de inspecție cel puțin un pixel de aceeași valoare logică cu pixelul din centrul ariei și nu este în conectivitate cu acesta din urmă. Trebuie avute, totodată, în vedere și următoarele observații:

- O operație de inspecție este validată numai cînd pixelul din centrul ariei de test se situează pe conturul conductoarelor respectiv în zerourile adiacente acestui contur;

- Fiecare celulă logică aferentă unui pixel din aria de test și aria de propagare trebuie să includă circuite de prelucrare bazate pe conectivitatea cu 4 pixeli și 8 pixeli, care sînt activate după cum pixelul din centrul ariei de test are valoarea logică "0" respectiv "1";

- Celulele logice din aria de propagare vor avea o structură similară cu celulele din aria de test cu deosebirea că nu generează semnalul eroare;

- După fiecare operație de prelucrare este necesară aducerea celulelor logice în stare inițială nulă /0/.

Schema unei celule logice din aria de test se prezintă ca în fig.5.2.1. Se observă că semnalele aplicate unei celule de rang i sînt următoarele:

- valoarea logică aferentă pixelului A din centrul ariei de inspecție;

- valoarea logică v_i corespunzătoare pixelului imagine aferent celulei de rang i ;

- valorile logice $U_{di}, U_{si}, U_{li}, U_{ji}$, care reprezintă ieșirile celulelor logice situate în conectivitate cu 4 pixeli în raport cu celula de rang i ;

- valorile logice $U_{dsi}, U_{sli}, U_{lji}, U_{jdi}$, reprezentînd ieșirile celulelor logice care adăugate la celulele precedente, conduc la o conectivitate cu 8 pixeli față de celula de rang i ;

- semnalul logic P care validează realizarea efectivă a operațiilor de inspecție respectiv aducerea în condiții inițiale nule a celulelor logice.

În același timp, fiecare celulă logică din aria de test furnizează la ieșire semnalele:

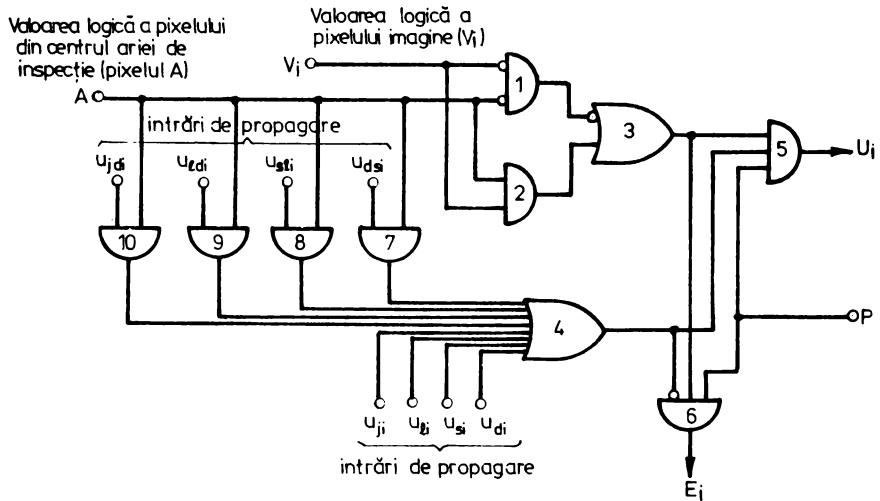


Fig.5.2.1. Schema logică a unei celule din aria de test.

- Semnalul logic U_i a cărui valoare logică "1" semnifică faptul că pixelul aferent celulei de rang i este în conectivitate cu pixelul din centru. Acest semnal urmează a fi aplicat celulelor care se găsesc față de celula de rang i în conectivitate cu 4 pixeli respectiv la celulele suplimentare care asigură conectivitatea cu 8 pixeli.

- Semnalul eroare care semnifică prin valoarea logică "1" faptul că pixelul aferent celulei de rang i este de aceeași valoare a pixelului A și nu este în conectivitate cu acesta.

Funcționarea unei celule logice, pe baza fig.5.21, este evidentă. Se precizează, totuși că, în cazul în care $A=1$ logic, situație care necesită efectuarea operației de inspecție utilizând conectivitatea cu 8 pixeli, sînt activate porțile 7, 8, 9 și 10, care permit accesul semnalelor corespunzătoare la intrarea circuitului SAU (notat cu 4). Pe baza figurii rezultă că valorile E_i și U_i sînt date de funcțiile booleene:

$$E_i = \overline{U_{di} + U_{si} + U_{li} + U_{ji} + A(U_{dsi} + U_{sli} + U_{lji} + U_{jdi})} \cdot (\overline{A} \cdot \overline{v}_1 + A \cdot v_1) \cdot P \quad (5.9)$$

$$U_i = [U_{di} + U_{si} + U_{li} + U_{ji} + A(U_{dsi} + U_{sli} + U_{lji} + U_{jdi})] \cdot (\overline{A} \cdot \overline{v}_1 + A \cdot v_1) \cdot P \quad (5.10)$$

Prin urmare, va fi propagată conectivitatea spre celulele

învecinate (adică $U_i=1$), ori de câte ori cel puțin o intrare ($U_{di} \dots U_{ji}; U_{dsi} \dots U_{jdi}$) este comandată cu "1" logic și pixelul imagine V_i este de aceeași valoare logică cu pixelul A din centrul arării de test. Dacă nici una dintre intrările de propagare nu este activată ("1" logic) în situația în care pixelii V_i și A sînt de aceeași valoare, este generat semnalul eroare ($E_i=1$).

Operațiile de mai sus au loc numai pe durata cît semnalul P de validare efectivă are valoarea "1" logic. Înainte de validarea efectivă, cînd $P=0$, are loc aducerea ieșirilor de la fiecare celulă la nivelul "0" logic.

Celulele logice din aria de propagare au o schemă similară cu cea reprezentată în fig.5.21, cu deosebirea că nu au prevăzută ieșirea pentru semnalul eroare E_i .

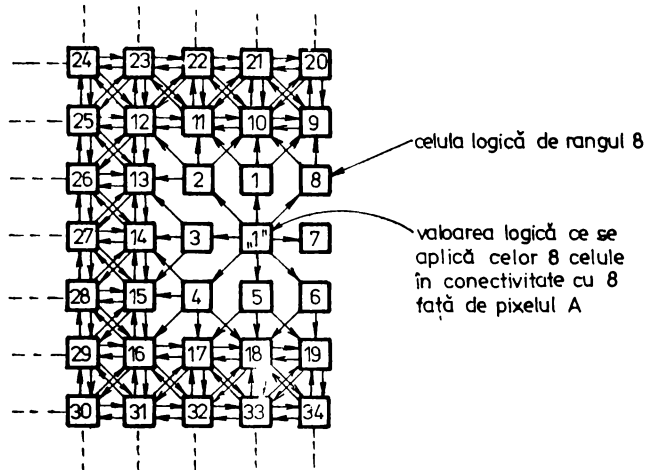


Fig.5.22. Modul de interconectare al primelor 34 de celule logice din aria de test prezentată în fig.5.15.

Modul de conectare între ele al celulelor logice din interiorul ariei de test respectiv propagare este ilustrat în fig. 5.22. Se observă că, exceptînd celulele învecinate pixelului A (aflate în conectivitate de 8 pixeli în raport cu acesta), toate celelalte celule se interconectează după o schemă identică. Adică, ieșirea unei celule este legată la cîte o intrare de propagare de la 8 celule învecinate. În ceea ce privește celulele învecinate pixe-

lului A, cîte una dintre intrările de propagare de la fiecare celulă, este comandată cu "1" logic. Acest semnal poate fi considerat ca fiind furnizat de celula logică aferentă pixelului A din centrul ariei de test. Folosirea acestei celule nu este necesară însă, avînd în vedere că semnalul U_1 furnizat de aceasta este întotdeauna "1" logic (pixelul din centru fiind întotdeauna în conectivitate cu el însăși și avînd o aceeași valoare logică cu el însăși).

Din cele prezentate rezultă că propagarea conectivității se face simultan în toate direcțiile pornînd din centrul ariei de test. Este de menționat că intrările de propagare neconectate ale celulelor logice corespunzătoare pixelilor situați pe conturul ariei de propagare trebuie conectate la valoarea logică "0".

5.4.3.4. Elaborarea schemei dispozitivului de comandă

Dispozitivul de comandă are rolul de a genera semnalul P, de validare efectivă a unei operații de inspecție și forțarea pe "0" logic a ieșirilor celulelor logice precum și un semnal ϕ' , care realizează extragerea informației din memoria video binară (MVB) respectiv inscrierea acestei informații în memoria circuitului de prelucrare (MCP).

Schema dispozitivului de comandă precum și modul de interconectare a MVB, circuitul de prelucrare CP și detectoarele de contur și zero adiacent, este reprezentată în fig.5.23. În fig. 5.24 sînt prezentate diagramele de timp pe baza cărora va fi prezentată funcționarea dispozitivului. Se precizează că va fi analizată funcționarea dispozitivului de comandă în situația în care operațiile de inspecție sînt declanșate ca urmare a detecției unor pixeli situați pe conturul conductoarelor. Funcționarea schemei este similară în situația cînd operațiile de inspecție sînt declanșate de detectarea unor pixeli de valoare "0", adiacenți conturului.

Se presupune, pentru început, că ieșirile circuitelor basculante monostabile CBM_1 , CBM_0 sînt de nivel "0" logic. În această situație semnalul ϕ' urmărește, cu o întârziere Δt_p dată de circuitul SAU 3, semnalul de tact ϕ . În consecință, la apariția fiecărui impuls ϕ' , informația din MVB și MCP este deplasată spre dreapta cu un rang (MVB și MCP se presupun realizate conform schemelor date în fig.3.2 și fig.3.4).

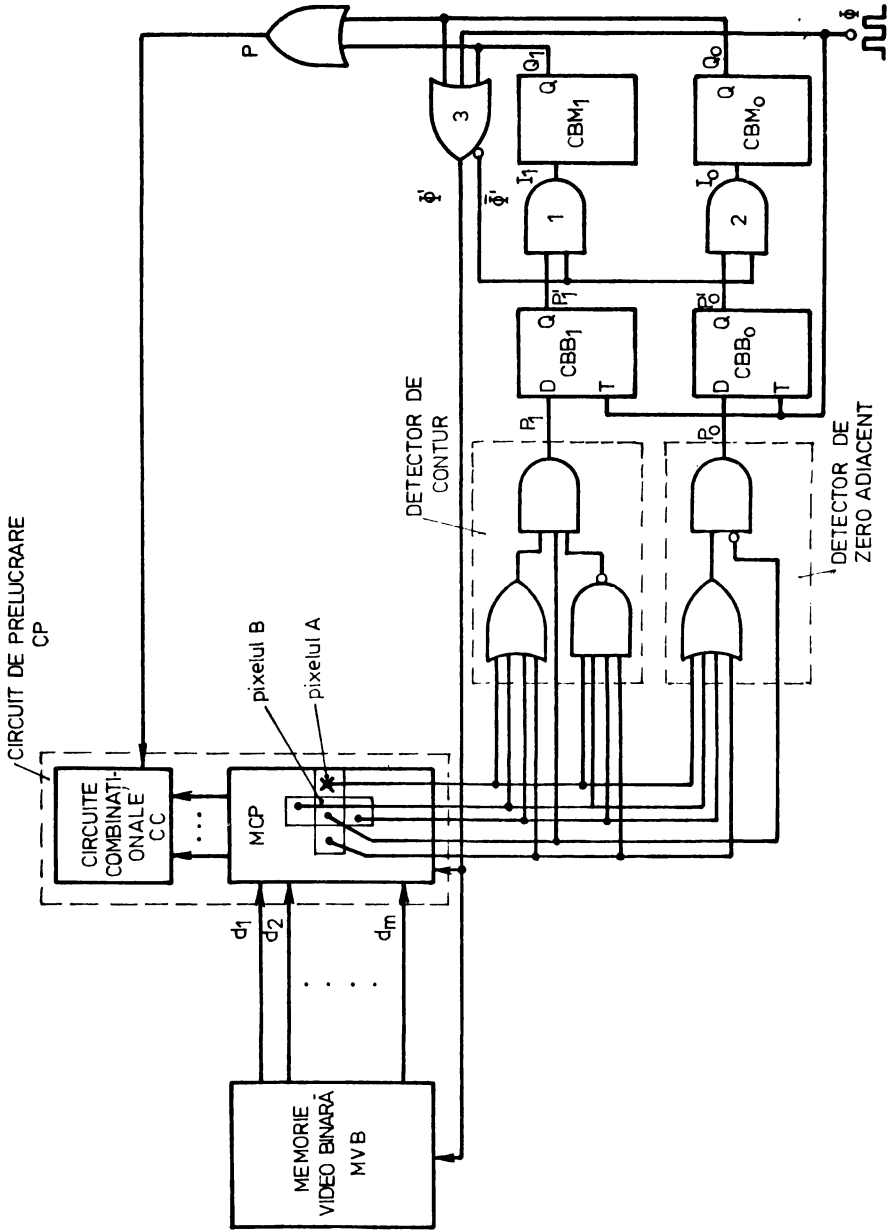


Fig.5.23. Schema dispozitivului de comandă și interconectarea acestuia cu MVB, CP și detectorul de contur respectiv detectorul de zero adiacent.

La detecția unui pixel situat pe contur (pixelul B în figură), semnalul P_1 de la ieșirea detectorului de contur capătă valoarea "1" logic (cu o întârziere de $2 \Delta t_p$ determinată de circuitele detectorului). Tranziția lui P_1 are loc după primul front de cădere a lui ϕ' , cînd informația corespunzătoare pixelului B este aplicată la intrarea detectorului. Apariția celui de-al doilea impuls de tact ϕ , determină înscrierea în bistabilul CBB_1 a noii valori ("1" logic) a semnalului P_1 .

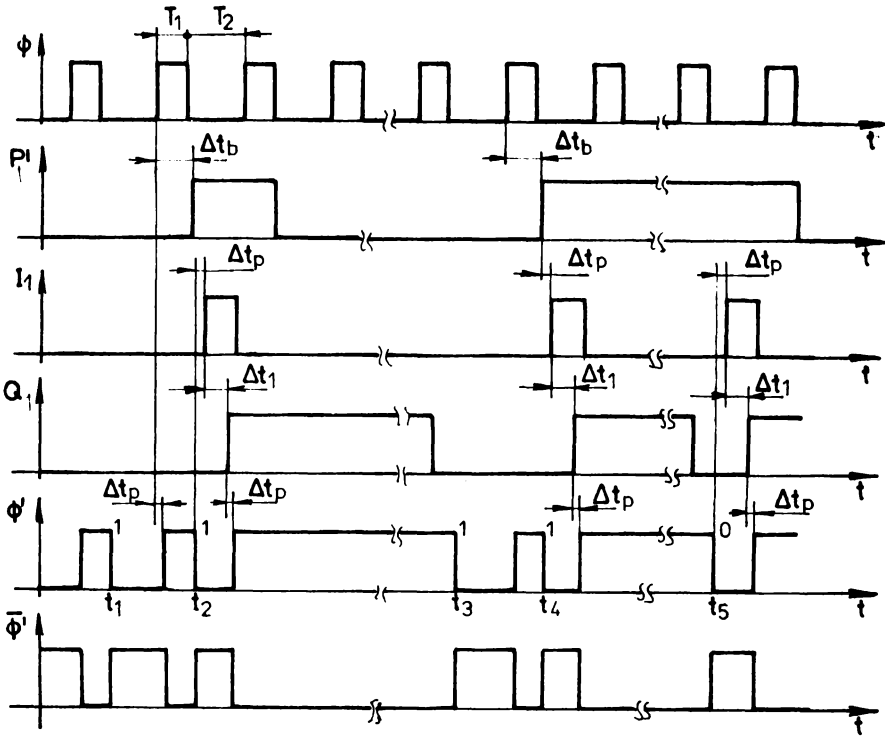


Fig.5.24. Diagramele de timp ale tensiunilor în principalele puncte ale dispozitivului de comandă.

Comutarea semnalului P_1 are loc cu întârzierea Δt_p față de frontul de cădere al impulsului de tact ϕ . Din cele de mai sus rezultă că, drept urmare a conectării intrărilor detectoarelor de contur la pixelul B, situat cu o poziție înaintea pixelului A din centrul ariei de test, în situația în care pixelul situat pe contur ajunge în centrul A (după momentul t_2), semnalul furnizat de detectorul de contur se va găsi deja memorat în Bistabilul CBB_1 . Se

constată din prezentarea anterioară că pentru a evita dezavantajele legate de întârzierile introduse de cele două detectoare (cîte $2 \Delta t_p$ la fiecare impuls de tact ϕ), s-a aplicat procedura de memorare prezentată la pct.3.3 și implementată aici cu ajutorul bistabilelor CBB_1 (CBB_0).

Comutarea în "1" logic a semnalului P_1' , ca urmare a detecției prezentei unui pixel situat pe contur, declanșează procesul de inspecție. În acest scop, în intervalul dintre două impulsuri ϕ' , cînd $\overline{\phi}'=1$, este basculat prin intermediul circuitului SI 1, monostabilul CBM_1 . Impulsul la ieșirea acestuia apare cu întârzierea $\Delta t_p + \Delta t_1$ față de frontul ridicător al semnalului de declanșare P_1' (Δt_1 reprezentînd întârzierea la declanșare a monostabilului CBM_1).

Procesul de inspecție are loc pe durata impulsului Q_1 furnizat de monostabil și a cărui durată este egală sau mai mare cu durata necesară efectuării unei operații de inspecție. (vezi pct. 5.4.4). Se va observa totodată că, pe durata efectuării operației de inspecție, semnalul $\phi'=1$, încît este sistată aducerea unei noi informații din M^*B în MCP . Deoarece în fig.5.24 s-a considerat că pixelul următor pixelului situat pe contur este un pixel cu valoare logică "1" care nu se găsește însă pe contur, acest pixel nu va declanșa o nouă operație de inspecție.

După revenirea monostabilului CBM_1 în starea inițială "0", lucru care are loc pe durata pauzei unui impuls ϕ (satisfacerea acestei condiții este asigurată prin alegerea corespunzătoare a duratei impulsului Q_1), are loc comutarea în "0" logic și a semnalului ϕ' . Acest fapt ce determină o nouă deplasare spre dreapta a informației din M^*B și MCP .

Pentru a explica funcționarea circuitului în cazul detecției succesive a doi pixeli situați pe contur, s-a presupus că după pixelul neinspectat, următorii doi pixeli sînt ambii situați pe contur. În consecință, la momentul t_3 (fig.5.24) are loc înscrisura primului pixel de pe contur în celula de memorie aferentă pixelului B. În continuare, la momentul t_4 , pixelul din B este transferat în A și totodată cel de al doilea pixel de pe contur este înscris în B. Operațiile de inspecție au loc apoi așa cum s-a arătat mai sus cu diferența că, revenirea în "0" logic a semnalului P_1' nu mai are loc pe durata primei operații de inspecție, ca și în cazul anterior, permițînd astfel inițierea celei de a doua operație de inspecție.

Din prezentarea dată mai sus, rezultă că pentru o funcționare corectă a dispozitivului se impune satisfacerea următoarelor condiții (vezi fig.5.24):

1. Se necesită, de asemenea, ca semnalele P_1 și P_0 furnizate de detectoare, să fie disponibile înainte de apariția frontului de ridicare a impulsului ϕ care realizează înscrierea acestor semnale în bistabilele CBB_1 respectiv CBB_0 . Adică:

$$T_2 \geq 2 \Delta t_p \quad (5.11)$$

2. $T_1 + T_2 \geq \Delta t_b + \Delta t_p + \Delta t_1$, condiție care asigură ca bascularea monostabilelor CBM_1 , CBM_0 să aibă loc înainte de apariția următorului front de cădere al impulsurilor ϕ după cel care a determinat comutarea în "1" logic a semnalului P_1 . Se evită în acest fel deplasarea unei noi informații în celula de memorie din centrul ariei de test, în locul informației care de fapt trebuie inspectată.

Având în vedere inegalitatea (5.11) ultima condiție poate fi scrisă și sub forma:

$$T_1 \geq \Delta t_b + \Delta t_1 - \Delta t_p \quad (5.12)$$

Evident, durata T_1 trebuie să satisfacă și valoarea minimă necesară care asigură funcționarea corectă a bistabilelor din MVB , MCP și CBB_1 respectiv CBB_0 .

5.4.4. Determinarea duratei necesare pentru efectuarea unei operații de inspecție

Conform celor prezentate anterior, rezultă că începerea efectivă a unei operații de inspecție este determinată de comutarea semnalului P (fig.5.23) la valoarea "1" logic. Acest semnal trebuie să-și mențină valoarea logică "1" până ce răspund corect toate celulele logice corespunzătoare pixelilor din aria de test și de propagare și se ia decizia logică. Notînd durata necesară efectuării unei operații de inspecție (respectiv intervalul de timp în care semnalul P trebuie să aibă valoarea logică "1") cu t_{pr} , acest interval de timp este dependent de:

- tipul de conectivitate utilizată (conectivitate cu 4 pixeli sau conectivitate cu 8 pixeli);

- timpul de propagare necesar unei celule logice. Acest timp de propagare este egal cu $2\Delta t_p$ în cazul unei conectivități cu 4 pixeli și egal cu $3\Delta t_p$ în cazul conectivității cu 8 pixeli

(fig.5.21). Afirmația anterioară poate fi lesne verificată dacă se are în vedere faptul că în cazul unei conectivități cu 4 pixeli, circuitele logice notate cu 7, 8, 9 și 10 sînt inactive deoarece în acest caz valoarea pixelului A este "0" logic. De asemenea circuitele logice notate cu 1 și 2 nu influențează mărimea lui Δt_{pr} , deoarece semnalul la ieșirea lor se obține chiar înainte de validarea efectivă a operației de inspecție;

- raza exterioară R' a ariei de propagare;
- forma cablajului supus inspecției.

În cele ce urmează se va determina durata Δt_{pr} ținînd cont de factorii de influență menționați anterior, în situația în care se utilizează ca arie de test și propagare aria prezentată în fig. 5.15. Se reamintește, totodată, că o conectivitate cu 8 pixeli presupune ca procesul de inspecție să aibe loc în situația în care centrul ariei de test se situează pe conturul conductorului, după cum în cazul conectivității cu 4 pixeli, validarea unei operații de inspecție are loc cînd centrul se găsește într-un zero adiacent conturului.

5.4.4.1. Determinarea duratei unei operații de inspecție în cazul conectivității cu 8 pixeli

a) Cazul conductoarelor orizontale, verticale și înclinate.

Așa cum s-a menționat anterior, se consideră drept arie de test și de propagare aria prezentată în fig.5.15. Pentru început se determină durata Δt_{pr} în cazul în care centrul ariei (pixelul A) este situat pe conturul unui conductor orizontal și neted (fig.5.25).

În starea inițială, cînd $P=0$, ieșirile U_i ale tuturor celulelor logice vor fi de nivel "0" logic (fig.5.21). După comutarea semnalului P din "0" în "1" logic, celulele aferente pixelilor din suprafața izolatoare își vor menține starea inițială, avînd în vedere că pentru toate $A=1$ și $V_1=0$. În același timp, ieșirile U_1 ale celulelor corespunzătoare pixelilor 4, ..., 8, vor comuta în starea "1" logic, după un interval Δt_p de la comutarea semnalului P. Semnalele $U_i=1$ ale celulelor menționate anterior și care semnifică conectivitatea pixelilor aferenți lor cu pixelul A, determină, cu o întârziere egală cu $3\Delta t_p$, comutarea în "1" logic a ieșirilor celulelor corespunzătoare pixelilor 14, ..., 19. Conecti-

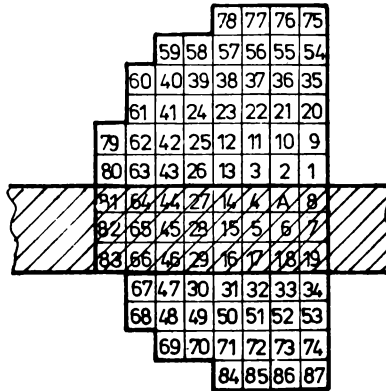


Fig.5.25. Evaluarea duratei Δt_{pr} în situația în care centrul ariei de test se situează pe conturul unui conductor orizontal și neted.

vitata se propagă în continuare în mod asemănător, în toate direcțiile cu întârzierile menționate în tabelul 5.1.

Tabelul 5.1.

Celule logice în care conectivitatea se propagă simultan	4,5,...,8	14,15,...,19	27,28,29	44,45,46,64,65,66	81,82,83
Intervalul de timp necesar propagării conectivității	Δt_p	$\Delta t_p + 3\Delta t_p$	$\Delta t_p + 2 \cdot 3\Delta t_p$	$\Delta t_p + 3 \cdot 3\Delta t_p$	$\Delta t_p + 4 \cdot 3\Delta t_p$
				$\Delta t_p + 5 \cdot 3\Delta t_p$	

Din tabel rezultă că după intervalul de timp $\Delta t_p + 5 \cdot 3\Delta t_p$ conectivitatea a fost propagată pînă la limita ariei de propagare și prin urmare după acest interval poate fi luată decizia logică corectă. În cazul general, durata operației de prelucrare a unui pixel situat pe conturul unui conductor orizontal și neted, este dată de expresia:

$$\Delta t_{prl} = \Delta t_p + \{ [R'] - 1 \} 3 \Delta t_p \quad (5.13)$$

unde prin $[R']$ a fost notată valoarea razei exterioare a ariei de propagare, determinată de relația (5.7) și rotunjită la valoarea întreagă imediat superioară.

Observațiile de mai sus rămân valabile și în cazul conductoarelor netede, verticale respectiv înclinate.

În cazul conductoarelor avînd conturul cu neregularități, aceste neregularități nu măresc durata operației de prelucrare dacă sînt situate în apropierea pixelului din centru (propagarea conectivității prin celulele aferente acestor neregularități se termină înainte să se fi încheiat procesul de propagare a conectivității în întreaga arie de test și propagare). Spre exemplu, dacă în cazul conductorului din fig.5.25, este prezentă o neregularitate sub forma pixelilor 12 și 13, de valoare logică "1", durata operației de inspecție rămîne neafectată, deoarece propagarea conectivității prin celulele logice aferente se încheie după intervalul de timp $\Delta t_p + 2.3 \Delta t_p$. Dimpotrivă, considerînd o neregularitate reprezentată de pixelii 79 și 80, propagarea conectivității prin celulele corespunzătoare necesită un interval de timp mai mare cu $3 \Delta t_p$ față de cazul conductorului neted. Se menționează că în cazul unei neregularități de 1 pixel, spre exemplu pixelul 80, durata operației de inspecție rămîne neafectată, deoarece conectivitatea spre acest pixel se transmite simultan cu transmiterea conectivității spre pixelul 81 (pixelul 80 fiind în conectivitate cu 8 față de pixelul 64).

Considerînd o neregularitate de δ pixeli, durata Δt_{pr2} a operației de inspecție în situația cea mai dezavantajoasă este dată de relația:

$$\Delta t_{pr2} = \Delta t_{pr1} + (\delta - 1) \cdot 3 \Delta t_p \quad (5.14)$$

b) Cazul conductoarelor realizate cu un unghi $\varphi < \pi/2$.

Se consideră pentru început cazul unui conductor neted, realizat cu un unghi $\varphi = \pi/2$ și se presupune că centrul ariei de inspecție se situează, la fel ca și în cazul precedent, pe conturul conductorului (fig.5.26).

Se observă ușor că la început conectivitatea se propagă în mod similar cazului anterior cu deosebirea că propagarea are loc pe verticală (în sus și în jos) și nu pe orizontală (la stînga). După un interval de timp egal cu $\Delta t_p + 3.3 \Delta t_p$ vor răspunde celulele logice 35 și 36 iar după încă o întîrziere de $3 \Delta t_p$ conectivitatea va fi propagată și prin celulele 54, 55 și 56. În continuare are loc propagarea conectivității prin celulele 57, 58 și 59, procesul încheindu-se după încă $3.3 \Delta t_p$. Rezultă, deci, că în si-

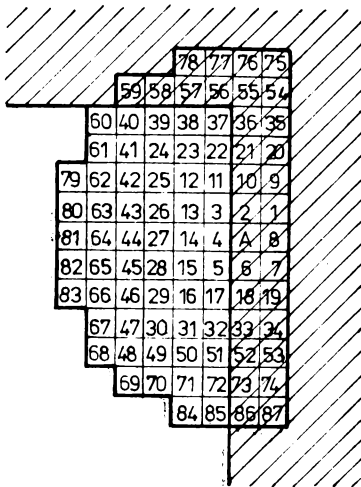


Fig.5.26. Exemplu pentru determinarea duratei de propagare în cazul conductoarelor realizate cu un unghi $\varphi = \pi/2$.

tuăția considerată și care corespunde timpului maxim de propagare a conectivității în cazul unei arii de forma celei din figură și a unui cablaj realizat cu un unghi $\varphi = \pi/2$, durata unei operații de prelucrare este egală cu $\Delta t_p + 7.3 \Delta t_p$. Adică mai mare decât în cazul unui conductor orizontal neted.

Dacă conturul conductorului prezintă neregularități, lucrurile se analizează la fel ca și în cazul (a). Având în vedere că raza ariei de test se ia, de regulă, egală cu cel puțin cu 10 pixeli; se ajunge la concluzia că în cazul unor neregularități limitate în mod obișnuit la 2 pixeli, durata unei operații de prelucrare poate fi estimată acoperitor conform relației:

$$\Delta t_{pr3} \leq 1,5 \Delta t_{pr1} \tag{5.15}$$

Pentru conductoarele realizate cu un unghi $\varphi < \pi/2$, situația poate fi analizată pe baza fig.5.27. Se stabilește imediat că, în situația cea mai dezavantajoasă, propagarea conectivității are loc pe un traseu de lungime mai mică decât $R' + 2R'$, respectiv (vezi relația (5.13)) :

$$\begin{aligned} \Delta t_{pr4} &\leq \Delta t_{pr1} + 2[R'] \cdot 3 \Delta t_p \\ \Delta t_{pr4} &\leq \Delta t_p + \{ [R'] - 1 \} 3 \Delta t_p + 2[R'] 3 \Delta t_p \end{aligned} \tag{5.16}$$

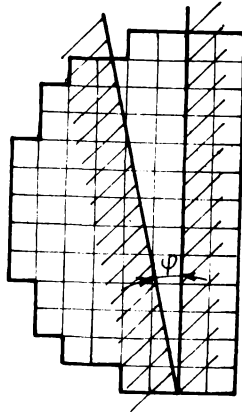


Fig.5.27. Analiza propagării conectivității în cazul unui conductor realizat cu un unghi $\varphi < \pi/2$.

5.4.4.2. Determinarea duratei unei operații de prelucrare în cazul conectivității cu 4 pixeli

După cum s-a prezentat la pct.5.4.4 conectivitatea cu 4 pixeli se utilizează la efectuarea operației de inspecție în situația în care centrul ariei de test se situează într-un pixel de valoare logică "0", adiacent conturului. Totodată, timpul de propagare al unei celule logice este, în acest caz, egal cu $2\Delta t_p$.

a) Cazul conductoarelor orizontale, verticale și înclinate.

Pentru analiza problemei se consideră din nou o arie de test de forma celei din fig.5.17. Presupunînd pentru început cazul unei suprafețe izolatoare mărginită de un conductor orizontal (fig.5.28), propagarea conectivității are loc conform tabelului 5.2. Adică, după intervalul Δt_p , conectivitatea s-a propagat prin celulele 1, 2, 3, 4, 8 la fel ca și în cazul conectivității cu 8 pixeli. Celulele corespunzătoare pixelilor din suprafața conductoare își mențin nivelul "0" logic la ieșire. În continuare, deoarece pixelul A are valoarea "0" logic, propagarea are loc numai prin celulele aferente pixelilor din suprafața izolatoare și aflate în conectivitate cu 4 pixeli una în raport cu cealaltă (vezi fig.5.21).

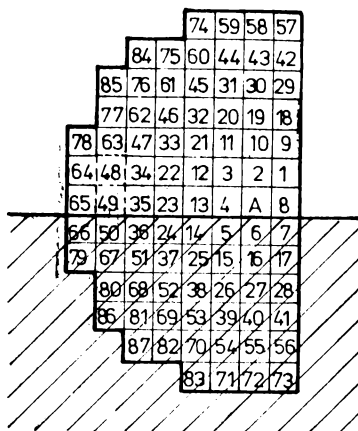


Fig.5.28. Analiza propagării conectivității în cazul unei suprafețe izolatoare mărginită de un conductor orizontal.

Tabelul 5.2.

Celule logice în care conectivitatea se propagă simultan	1, 2, 3, 4, 8	9, ..., 13	18, ..., 23	29, ..., 35		
		42, ..., 49	57, ..., 65	74, ..., 78	84, 85	
Interval de timp necesar propagării conectivității	Δt_p	$\Delta t_p + 2\Delta t_p$	$\Delta t_p + 2 \cdot 2\Delta t_p$	$\Delta t_p + 3 \cdot 2\Delta t_p$	$t_p + 6 \cdot 2\Delta t_p$	$\Delta t_p + 7 \cdot 2\Delta t_p$
		$\Delta t_p + 4 \cdot 2\Delta t_p$	$\Delta t_p + 5 \cdot 2\Delta t_p$			

Procesul descris mai sus are loc în mod similar în cazul suprafețelor izolatoare mărginite de conductoare netede, verticale respectiv înclinate. De asemenea, efectul unor neregularități prezente pe conturul conductorului este similar celor prezentate la pct.5.4.4.1.a. Avînd în vedere că mărimea neregularităților este mult mai mică decît raza exterioară a ariei de propagare, prin generalizarea rezultatelor date în tabelul 5.2, durata unei operații de prelucrare în cazul considerat (suprafețe izolatoare mărginite de conductoare orizontale, verticale sau înclinate, cu neregularități) poate fi estimată conform expresiei:

$$\Delta t_{pr5} \leq 1,5 [R^i] \cdot 2 \Delta t_p \tag{5.17}$$

b) Cazul conductoarelor realizate cu un unghi $\varphi < \pi/2$.

Se presupune o arie izolatoare mărginită de un conductor al cărui contur prezintă un unghi $\varphi = \pi/2$ (fig.5.29). Se constată ușor că și de această dată, la fel ca și în cazul conductorului orizontal (tabelul 5.2), ultima propagare de conectivitate are loc

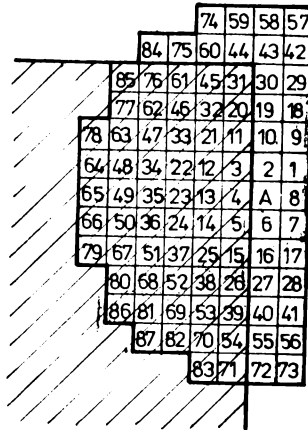


Fig.5.29. Propagarea conectivității printr-o suprafață izolatoare limitată de un conductor avînd $\varphi = \pi/2$.

prin celula logică 84. În consecință, durata unei operații de prelucrare poate fi estimată cu relația (5.17). Din considerentele expuse la punctul anterior, relația (5.17) își păstrează valabilitatea și în cazul în care conturul conductorului prezintă neregularități.

Pentru analiza situației în care conductorul prezintă un unghi $\varphi < \pi/2$, se consideră situația reprezentată în fig.5.30. Se poate afirma că propagarea conectivității prin celulele din suprafața izolatoare situată în jumătatea superioară a ariei de test are loc conform tabelului 5.2. Drept urmare, relația (5.17) își păstrează și de această dată valabilitatea, inclusiv în prezența neregularităților situate pe contur.

Propagarea conectivității în suprafața izolatoare din jumătatea inferioară a ariei de test are loc simultan cu propagarea în jumătatea superioară, necesitînd însă un interval de timp mai mic.

Analizînd rezultatele obținute mai sus, se poate trage concluzia că în cazul în care centrul ariei de test se situează pe

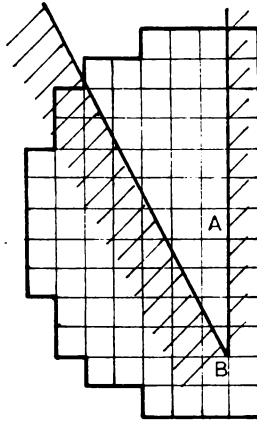


Fig.5.30. Propagarea conectivității printr-o suprafață izolatoare mărginită de un conductor avînd $\varphi < \pi/2$.

pe contur, durata unei operații de prelucrare este dată de relația (5.16), după cum în situația în care centrul arsei se găsește într-un pixel de valoare "0" logic, adiacent conturului, trebuie avută în vedere relația (5.17).

În cazul cablajelor imprimate proiectate cu ajutorul calculatorului, cînd unghiul $\varphi \geq \pi/2$, durata unei operații de prelucrare este dată, în cele două situații menționate mai sus, de relația (5.15) respectiv relația (5.17).

5.5. Comparație între varianta a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit și algoritmul C

1. Algoritmul C, cunoscut în literatură, se bazează pe inspecția succesivă a fiecărui pixel din imagine, în timp ce algoritmul de conectivitate îmbunătățit inspectează numai pixelii situați pe conturul conductorului respectiv pixelii de valoare "0" logic și adiacenți conturului. Ca urmare a acestei particularități, procesul de inspecție utilizînd varianta îmbunătățită a algoritmului de conectivitate, propusă în teză, necesită un timp de prelucrare considerabil mai scurt.

Această afirmație va fi ilustrată pe următorul exemplu, cel mai dezavantajos din punctul de vedere al scurtării duratei

de prelucrare în cazul noului algoritm. Se consideră astfel o placă cu cablaj imprimat realizat cu densitatea maximă a traseelor și constând din conductoare orizontale de lățime și distanță între ele egale cu lățimea minimă admisibilă (10 pixeli). În condițiile de mai sus, rezultă că la câte 20 pixeli din imagine, în cazul noului algoritm vor fi inspectați numai 4 pixeli, adică în situația cea mai dezavantajeasă de inspectează 20% din numărul total de pixeli din imagine. Acest fapt conduce în mod evident la scurtarea duratei procesului de inspecție.

2. Implementarea algoritmului C presupune utilizarea unui singur tip de conectivitate (conectivitatea cu 4 pixeli). În aceste condiții, prezența neregularităților pe conturul conductoarelor poate determina generarea unor semnale de eroare falsă. Acest neajuns nu apare în cazul variantei a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit, ca urmare a utilizării a două tipuri de conectivitate (conectivitatea cu 8 respectiv cu 4 pixeli).

3. În cazul algoritmului C, când se inspectează succesiv pixel după pixel și se utilizează numai un singur tip de conectivitate (cu 4 pixeli), perioada impulsurilor de tact care declanșează câte o operație de prelucrare se determină cu o relație similară cu relația (5.16), la care se adaugă timpul Δt_b necesar înscrierii informației în memoria circuitului de prelucrare. Dacă imaginea conține N pixeli, durata totală a procesului de inspecție va fi:

$$\Delta t_{prN} = N(\Delta t'_{pr4} + \Delta t_b) = N \left\{ \Delta t_p + ([R'] - 1) 2\Delta t_p + 2[R'] 2\Delta t_p + \Delta t_b \right\} \quad (5.18)$$

unde prin $\Delta t'_{pr4}$ s-a notat timpul necesar efectuării unei operații de inspecție în cazul utilizării unei conectivități cu 4 pixeli.

Referindu-ne acum la a III-a variantă a algoritmului de conectivitate îmbunătățit, când durata unei operații de prelucrare este dată de relația (5.17), în cazul inspecției pixelilor de valoare "o" logic adiacenți conturului respectiv de relația (5.16) în cazul inspecției pixelilor de pe contur, durata procesului de inspecție rezultă conform expresiei:

$$\Delta t'_{prN} \leq 0,1 N \Delta t_{pr5} + 0,1 N \Delta t_{pr4} + N \cdot T$$

sau (rel.(5.17), rel.(5.16)) :

$$\Delta t'_{prN} \leq 0,1 N + 1,5 [R'] \cdot 2 \Delta t_p + 0,1 N \left\{ \Delta t_p + ([R'] - 1) \cdot 3 \Delta t_p + 2 [R'] \cdot 3 \Delta t_p \right\} + N(\Delta t_1 + \Delta t_p + \Delta t_b) \quad (5.19)$$

În expresiile de mai sus T este perioada de tact a impulsurilor reprezentate în fig.5.24. Raportînd relația (5.19) la relația (5.18) este ușor de observat că:

$$\frac{\Delta t'_{prN}}{\Delta t_{prN}} \leq 0,05 + 0,15 + \frac{\Delta t_1 + \Delta t_p + \Delta t_b}{\Delta t_p + ([R'] - 1) 2 \Delta t_p + 2 [R'] \cdot 2 \Delta t_p + \Delta t_b} \approx 0,2 \quad (5.20)$$

De aici rezultă că timpul de prelucrare total a N pixeli de imagine în cazul cel mai defavorabil, utilizînd varianta a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit nu depășește 20% din timpul necesar inspecției a N pixeli utilizînd algoritmul C.

4. Varianta a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit utilizează o arie semicirculară discretă de inspecție, în timp ce algoritmul C folosește o arie circulară. Ca urmare a acestui fapt, complexitatea circuitului de prelucrare în cazul variantei îmbunătățite este mai redusă cu cca.50% față de circuitele corespunzătoare în cazul algoritmului C.

5. A III-a variantă a algoritmului de conectivitate îmbunătățit asigură o inspecție corectă și în cazul prezenței unor neregularități pe conturul conductoarelor. O asemenea afirmație nu poate fi făcută în cazul algoritmului C, la care nu a fost studiată încă influența prezenței neregularităților pe contur, în cazul discret ce intervine în aplicațiile practice.

CAPITOLUL 6.

REZULTATE EXPERIMENTALE

În scopul verificării experimentale a observațiilor și concluziilor stabilite, privind limitările în aplicarea algoritmului P (vezi cap.4), s-a realizat un model experimental de sistem de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate bazat pe implementarea acestui algoritm. Pentru a obține cu mai multă ușurință imaginea cablajelor imprimate cu forme dorită, acestea au fost generate cu ajutorul microcalculatorului MADS-80.

Înainte de prezentarea schemei bloc a sistemului de inspecție vizuală construit, se vor face unele precizări de care s-a ținut cont la realizarea dispozitivului.

6.1. Precizări privind realizarea sistemului de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate bazat pe implementarea algoritmului P

La realizarea sistemului de inspecție s-au avut în vedere următoarele:

1. Lățimea minimă admisibilă a unui conductor respectiv distanța minimă dintre două conductoare a fost considerată egală cu 7 pixeli.

2. Conform celor prezentate la punctul 4.2, diametrul cercului de inspecție trebuie luat cu 1 pixel mai mare decât lățimea minimă admisibilă, adică 8 pixeli.

3. Pentru inspecția corectă a conductoarelor a căror lățime minimă admisibilă este un număr impar de pixeli se necesită utilizarea simultană a două cercuri de test de același diametru și aproximative ca în fig.4.2.a și fig.4.2.b (vezi pct.4.2.1.a).

Din cele prezentate mai sus rezultă că cele două cercuri de test, necesare a fi implementate, sînt chiar cercurile discrete din fig.4.2.a și fig.4.2.b.

4. Cablajul simulat cu ajutorul calculatorului va avea

dimensiunile de 256x256 pixeli, încît pentru memorarea lui se necesită o memorie de 8 Kocteți.

5. Deoarece diametrul cercului de inspecție se ia de 8 pixeli, memoria circuitului de prelucrare va avea dimensiunile de 8x8 biți (adică 8x8 bistabile). La fiecare impuls de tact trebuie să se încarce în memorie cîte 8 biți, ce corespund la 8 pixeli de imagine aflați în aceeași coloană și buclă de pe 8 linii succesive de imagine (vezi fig.3.4).

6.2. Schema bloc a sistemului de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate realizat

În fig.6.1 este prezentată schema bloc a sistemului de inspecție realizat.

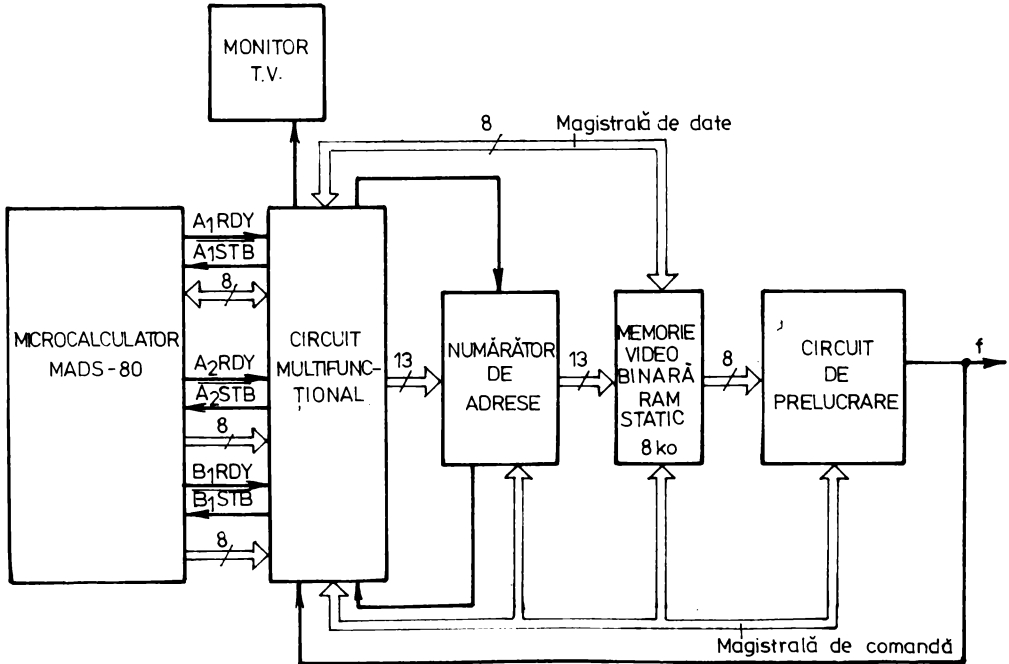


Fig.6.1. Schema bloc a sistemului de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate realizat.

a) Microcalculatorul MADS-80

Microcalculatorul realizează în principal conducerea procesului de inspecție prin intermediul unor programe, microcalculatorul permite realizarea următoarelor funcții:

1. Generarea formei dorite a unui cablaj imprimat. Este de menționat că, în urma lansării în execuție a unor subrutine specifice acestui scop, valorile binare "1" și "0" logic corespundătoare pixelilor din suprafața conductoare respectiv izolatoare a cablajului simulat, se înmagazinează în memoria RAM dinamică a microcalculatorului.

2. Selecția regimului de funcționare dorit. Au fost utilizate următoarele regimuri de funcționare:

- regim de înscrisere 1. Acest regim permite transferul unui octet de date din acumulatorul microprocesorului în locații de memorie din memoria externă (memoria video binară) ale căror adrese sînt specificate în programul utilizat;

- regimul de înscrisere 2. Se transferă un pachet de date din memoria microcalculatorului în memoria externă;

- regimul de citire. Se transferă un pachet de date din memoria externă în memoria microcalculatorului;

- regimul de vizualizare. Permite vizualizarea conținutului memoriei externe;

- regimul de prelucrare. Asigură prelucrarea informațiilor din memoria externă de către circuitul de prelucrare;

Transferul de date dintre microcalculatorul MADS-80 și circuitul multifuncțional din fig.6.1 se realizează prin intermediul a două porturi programabile de intrare-ieșire paralel P101 și P102, de tipul P10-80, incluse în microcalculator. Fiecare port conține două canale independente (canalul A și canalul B). Fiecare canal are 8 linii de date bidirecționale și 2 linii de dialog (ARDY și ASTB respectiv BRDY și BSTB). Canalele pot fi programate independent, conform unuia dintre cele 4 moduri de programare posibile /62/.

În cazul de față, canalul A₁ din P101 a microcalculatorului a fost programat pe modul bidirecțional (modul 2), iar canalul A₂ și B₂ din P102 au fost programate pe modul ieșire (modul 0). Aceste moduri de programare au fost stabilite cu scopul efectuării operațiilor menționate la punctul 2 de mai sus.

b) Circuitul multifuncțional.

Așa cum s-a arătat mai sus, cele două canale A_2 și B_2 ale portului PIO2 au fost programate pe modul ieșire. Trei biți din cei 16 biți de date ce se aplică circuitului multifuncțional de către portul PIO2, permit selecția cu ajutorul microcalculatorului a regimului de funcționare dorit. Totodată ceilalți 13 biți reprezintă adresa de început a locației de memorie din memoria externă de la care se înscrie sau se citește date de câte un octet. Circuitul multifuncțional decodifică cei 13 biți și generează în consecință semnale de comandă aferente regimului selectat. Transferul de date dintre microcalculator și circuitul multifuncțional se realizează prin canalul A_1 al portului PIO1, așa cum se vede în schema bloc.

c) Numărătorul de adrese.

Acest numărător permite stabilirea adresei locației de memorie din memoria externă (memoria video binară) la care se înscrie sau se citește câte un octet. Deoarece memoria externă are o capacitate de 3 Kocteți, numărătorul are 13 ranguri binare. În toate regimurile de funcționare, cu excepția regimului de prelucrare, conținutul numărătorului de adrese este incrementat ca urmare a impulsurilor aplicate la intrarea lui serie (după ce a fost inițial stabilită adresa de început).

d) Memoria video binară.

Această memorie, permite înmagazinarea sub formă de octeți depuși la adrese succesive a biților "1" și "0" logic corespunzători pixelilor cablajului simulat cu ajutorul microcalculatorului. Memoria utilizată este de tipul RAM static și are capacitatea de 8 Kocteți.

e) Monitorul TV.

Circuitul multifuncțional include și o interfață de interconectare a sistemului de inspecție cu un monitor TV. În urma decodificării codului aferent regimului de vizualizare, de către circuitul multifuncțional, acesta din urmă generează semnalele de co-

mandă necesare vizualizării conținutului memoriei video binare pe ecranul monitorului.

f) Circuitul de prelucrare.

Circuitul de prelucrare este activat numai când este selectat regimul de prelucrare. Acest circuit permite prelucrarea valorilor logice ale pixelilor corespunzătoare imaginii unui cablaj imprimat de dimensiune 256x256 pixeli (vezi pct.6.1). În acest scop, numărătorul de adrese este astfel structurat, încât asigură extragerea informației din memoria video binară la început din primele 8 linii de imagine, apoi din liniile 2...9, 3... ..10, ș.m.d.

Schema bloc a circuitului de prelucrare este prezentată în fig.6.2, conține:

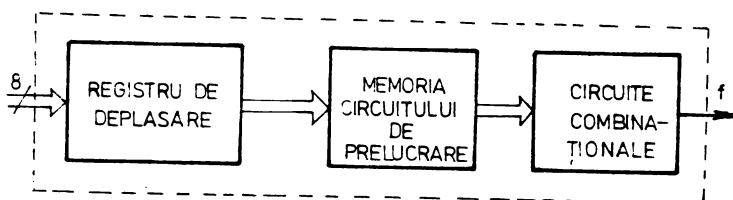


Fig.6.2. Schema bloc a circuitului de prelucrare.

- Registre de deplasare. Acest bloc este alcătuit din 8 registre de deplasare de câte 8 biți fiecare, de tipul intrare paralel-ieșire serie. Registrele se utilizează cu scopul extragerii octeților din memoria video și transferul serie al acestora la memoria circuitului de prelucrare. În acest scop pe durata a 8 impulsuri de tact registrele se încarcă paralel, cu octeți situați pe aceeași coloană și în 8 linii succesive. Adresele locațiilor de memorie se stabilesc cu ajutorul numărătorului de adrese, care este astfel conceput încât la regimul de prelucrare să selecteze într-un mod automat adresele necesare. Pe durata următoarelor 8 impulsuri de tact registrele de deplasare vor scoate serie la ieșire octeții înmagazinați, aplicându-i memoriei circuitului de prelucrare;

- Memoria circuitului de prelucrare. Se utilizează cu scopul implementării celor două cercuri de test discrete (vezi pct.3 din paragraful 6.1). Această memorie se realizează într-un mod

identic cu schema bloc prezentată în fig.3.4. Deoarece în cazul sistemului realizat, cercul de inspecție are diametrul egal cu 8 pixeli, memoria conține 8 registre de deplasare a câte 8 ranguri fiecare, de tipul intrare serie-ieșire serie. La fiecare impuls de tact are loc transferul serie al informației din registrele de deplasare în memoria circuitului aplicat memoriei de prelucrare precum și deplasarea spre dreapta cu o poziție a informației conținute în această memorie;

- Circuitele combinaționale. Permit implementarea algoritmului P, adică prelucrează conform algoritmului P, valorile logice ale semnalelor de la ieșirile bistabilelor din memoria circuitului de prelucrare, situate pe conturul celor două cercuri de test discrete prezentate în fig.4.2.a și fig.4.2.b. Este de menționat că la realizarea circuitelor combinaționale a fost aplicată procedura de memorare prezentată la pct.3.3. Astfel, conform acestei proceduri, circuitele combinaționale prezentate în fig.2.12 se conectează ca în fig.3.5. În această situație, bistabilele din memoria circuitului de prelucrare respectiv din circuitele combinaționale poate fi comandată cu o frecvență de tact dată de relația (3.4). La fiecare impuls de tact ce se aplică acestor bistabile, circuitele combinaționale generează un semnal de decizie logică, semnalul f. În cazul sistemului realizat, la depistarea unui defect, când $f=1$, este sistat automat procesul de inspecție, reluarea lui din punctul unde s-a întrerupt putînd fi comandată manual.

În practică, imaginea video a tablajului imprimat supus inspecției, este achiziționată cu ajutorul unor dispozitive videoaptoare cu transfer de sarcină CCD (Charge Coupled Devices). Atît dispozitivele videoaptoare liniare cît și cele bidimensionale realizează captarea simultană a mai multor pixeli aflați pe o linie, respectiv toți pixelii dintr-un cadru. Informația se obține apoi la ieșirea acestor dispozitive în serie. Acest mod de funcționare a determinat autorul să elaboreze schema bloc a memoriei video binară ca în fig.3.2. Concepția adoptată asigură efectuarea operației de inspecție în paralel cu procesul de conversie analog-numeric a informației obținute la ieșirea dispozitivului videoaptoare, fapt care permite pe lîngă alte avantaje, și renunțarea la utilizarea unui numărător de adrese. O prezentare detaliată a circuitelor cu transfer de sarcină se găsește în /60, 63, 64, 65, 66/.

6.3. Verificarea experimentală a rezultatelor stabilite în cap.3 și cap.4

În cadrul sistemului de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, prezentat la pct.6.2, circuitul de prelucrare a fost realizat pe baza algoritmului P îmbunătățit, în scopul verificării procedurii de creștere a vitezei de prelucrare prin memorare. Constatându-se funcționarea dispozitivului în conformitate cu cele stabilite în cap.3, s-a trecut în continuare - utilizând dispozitivul astfel realizat - la verificarea unora dintre concluziile rezultate în urma analizei din cap.4.

a) Exemple de inspecție a unor conductoare orizontale netede și având lățimea egală cu un număr impar de pixeli. În fig.6.3 sînt prezentate imaginile conductoarelor de lățime egală cu 1, 3,

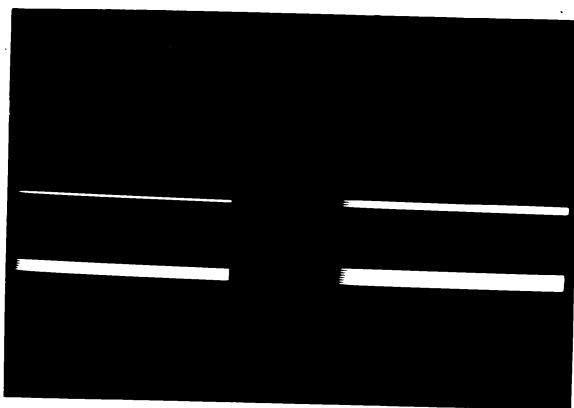


Fig.6.3.

5 și 7 pixeli supuse inspecției. Conductoarele de lățime 1, 3 și 5 pixeli au fost indicate defecte utilizînd cercul de inspecție prezentat în fig.4.2.b, în timp ce utilizînd cercul de inspecție din fig.4.2.a defectele nu au fost sesizate. În cazul conductorului avînd lățimea egală cu lățimea minimă admisibilă (7 pixeli), aceleași tehnici de verificare nu au semnalat prezența nici unui defect.

b) Exemple de inspecție a unor conductoare orizontale netede și de lățime egală cu un număr par de pixeli. În fig.6.4 sînt prezentate imaginile unor conductoare orizontale de lățime 2, 4 și 6 pixeli. Aceste conductoare au fost indicate ca defecte,

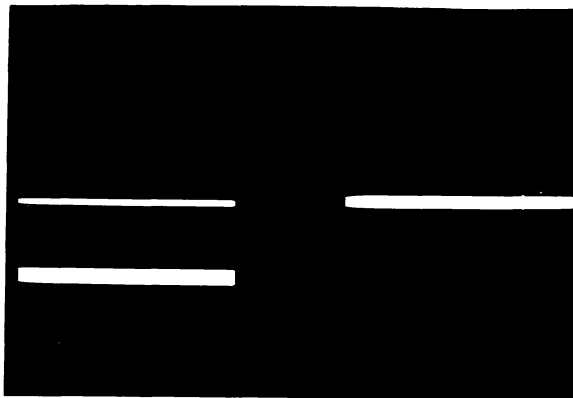


Fig.6.4.

utilizând cercul de test prezentat în fig.4.2.a și n-au fost semnalate defecte în cazul folosirii cercului de test din fig. 4.2.b.

c) Exemple de inspecție a unor conductoare înclinate la 45° . Conductoarele s-au considerat de lățime 2 respectiv 5 pixeli, așa cum au fost prezentate în fig.4.12 (fig.6.5). Utilizând cer-

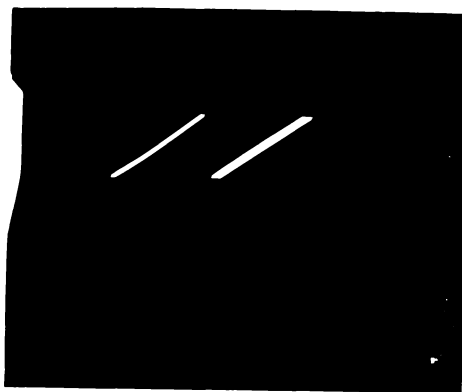


Fig.6.5.

curile de inspecție din fig.4.2.a și 4.2.b, conductoarele nu au fost indicate ca defecte cu toate că au lățimea mai mică decât lățimea minimă admisibilă.

10/10/10
10/10/10
10/10/10

d) Exemplu de inspecție a unui conductor de lungime finită și avînd o neregularitate de 1 pixel la capăt. În fig.6.6, este prezentată imaginea conductorului inspectat, aceeași cu a conductorului reprezentat în fig.4.14.b. Acest conductor a fost indicat în mod eronat defect, datorită prezenței neregularității de 1 pixel la capătul conductorului.

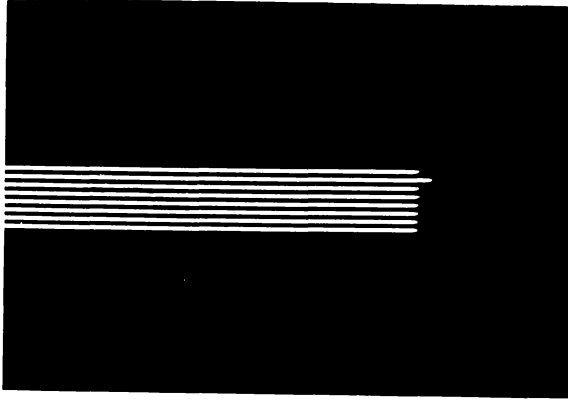


Fig.6.6.

e) Exemple de inspecție a distanței dintre două conductoare orizontale. În fig.6.7.a sînt prezentate imaginile aferente procesului de inspecție a distanței (de valoare 1, 3, 5 și 7 pixeli) dintre două conductoare orizontale avînd lățimea de 8 pixeli. Distanțele de valoare egală cu 1, 3 și 5 pixeli au fost indicate ca defecte utilizînd cercul de test prezentat în fig.4.2.b,

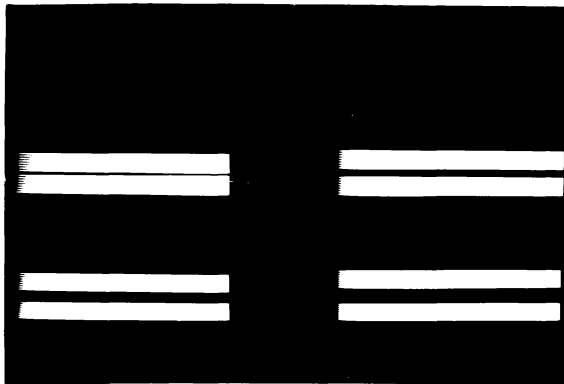


Fig.6.7.a.

În timp ce distanța egală cu 7 pixeli (egală cu distanța minimă admisibilă) nu a condus la semnalarea unui defect.

În cazul imaginii prezentate în fig.6.7.b, s-a realizat inspecția distanței dintre două conductoare horizontale și de valoare egală cu 2, 4 și 6 pixeli. În toate cele trei situații considerate, sistemul a indicat starea defectă prin utilizarea cercului de inspecție din fig.4.2.a.

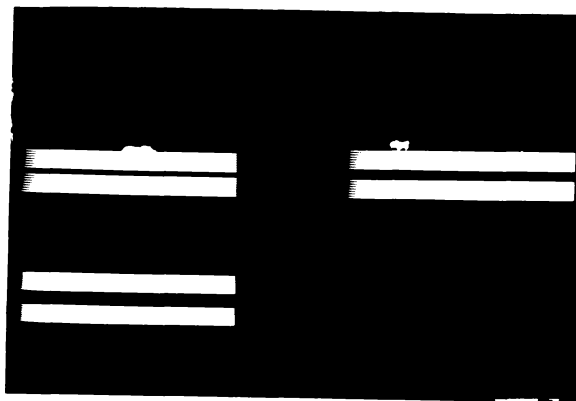


Fig.6.7.b.

f) Exemple de inspecție a unor conductoare realizate cu un unghi $\psi = 90^\circ$ și având neregularități pe contur de 1 pixel. În fig. 6.8.a și fig.6.8.b sînt reprezentate imaginile conductoarelor inspectate și care sînt aceleași cu conductoarele reprezentate în fig.4.16.a respectiv 4.16.b. Cele două conductoare au fost indicate defecte, datorită neregularității de 1 pixel prezentă pe conturul conductoarelor.

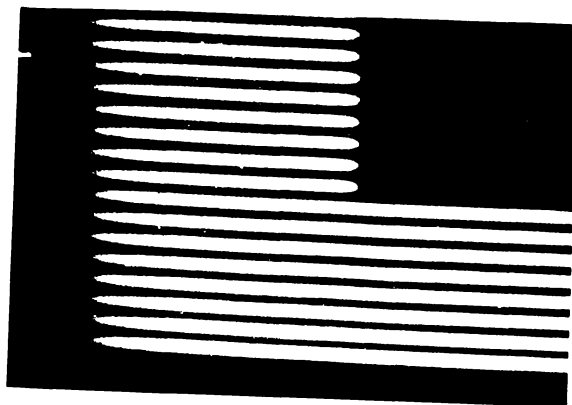


Fig.6.8.a.

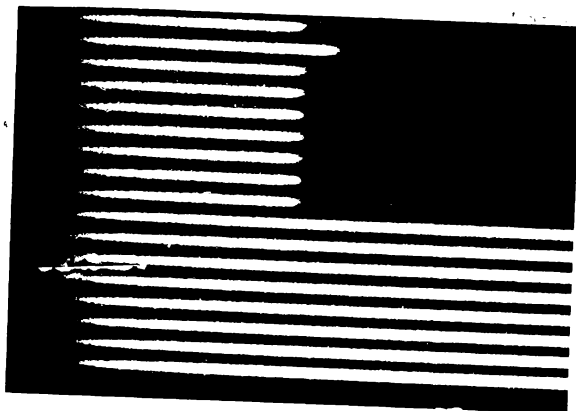


Fig.6.8.b.

g) Exemplu de inspecție a unui conductor realizat cu un unghi $\varphi = 135^\circ$ și avînd o neregularitate de 2 pixeli. În fig.6.9 este prezentată imaginea conductorului testat. Acest conductor a

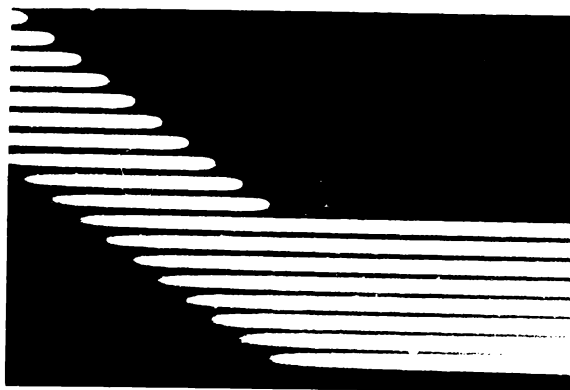


Fig.6.9.

fost indicat defect, datorită neregularității de 2 pixeli, existentă pe conturul conductorului.

h) Exemplu de inspecție a lățimii minime admisibile a suprafeței conductoare din jurul pastilei (p_{ad}). Lățimea minimă admisibilă a acestei suprafețe se inspectează la fel ca și lățimea minimă admisibilă a unui conductor. În fig.6.10 este prezentat un exemplu de inspecție a unei pastile avînd diametrul interior și

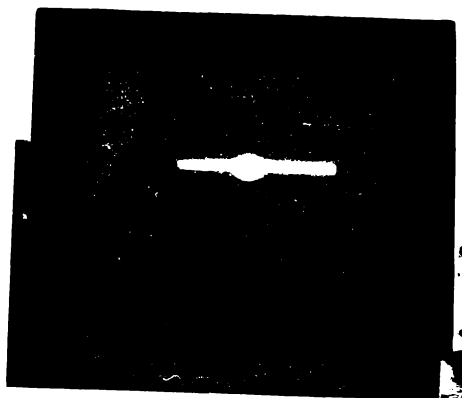


Fig.6.10.

exterior egal cu 7 pixeli. In urma procesului de inspectie nu a fost generat semnalul eroare.

In fig.6.11 se prezintă o imagine de ansamblu a dispozitivului experimental de inspectie vizuală automată a ceblajelor imprimate realizat de autor.

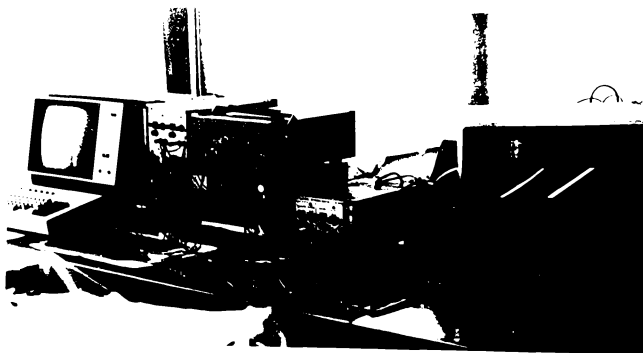


Fig.6.11.

CONCLUZII SI CONTRIBUTII

Algoritmii de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, cunoscuți în literatura de specialitate, prezintă o serie de limitări și neajunsuri la aplicarea lor în practică.

Prezenta lucrare urmărește rezolvarea acestor probleme, elaborînd algoritmi noi, care asigură o mai mare generalitate și flexibilitate în utilizarea lor practică, la inspecția vizuală automată a cablajelor imprimate.

Teza prezintă, pentru prima dată, o tratare unitară a tuturor problemelor procesului de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, cu luarea în considerare a efectului diferitelor defecte posibile rezultate în urma procesului tehnologic de fabricație precum și a prezenței neregularităților pe conturul conductoarelor. Aceste neregularități, existente în orice situație practică, sînt cauzate atît de procesul de fabricație cît și de procesul de discretizare al imaginii cablajului supus inspecției.

Problemele abordate în cadrul tezei de doctorat reprezintă în totalitate contribuții originale ale autorului, după cum urmează:

1. În paragrafele 2.2 și 2.3 s-a făcut o sinteză critică a principalelor metode de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate, evidențindu-se cele două trăsături dominante impuse acestor metode: precizia deosebită și viteza mare de prelucrare.

2. În paragraful 3.3 este prezentată o procedură nouă, numită procedură de memorare, elaborată cu scopul creșterii vitezei de prelucrare a algoritmilor bazați pe metoda măsurării.

3. Un exemplu de aplicare a procedurii de memorare, în cazul algoritmului P, este prezentat în paragraful 3.4. Se demonstrează că raportul dintre frecvențele de prelucrare în cazul algoritmului P îmbunătățit și algoritmul P original, este dat de relația (3.6). Conform acestei relații, aplicarea procedurii de memorare determină o creștere cu 100% a vitezei de prelucrare.

4. În paragraful 3.5 se prezintă o modalitate originală de implementare a formei primitive a algoritmului P, care asigură o reducere considerabilă a duratei necesare pentru numărarea tranzițiilor pe baza cărora este generat semnalul eroare (rel.(3.14)). Noua modalitate de implementare face uz, de asemenea, de procedura de memorare, astfel încât dispozitivul nou elaborat asigură o viteză de prelucrare utilizând forma primitivă a algoritmului P, la fel de ridicată ca și în cazul algoritmului P îmbunătățit (pct.3.4).

5. Noua modalitate de implementare a formei primitive a algoritmului P nu înlătură dezavantajele specifice acestui algoritm din punctul de vedere al capacității de inspecție, acesta rămânând - prin urmare - inferior algoritmului P propriu-zis. Dacă în locul unui cerc de diametru d (d fiind lățimea minimă admisibilă a unui conductor), se utilizează un cerc de rază d și sînt inspectați numai pixelii situați pe conturul conductoarelor, forma primitivă a algoritmului P prezintă o comportare chiar mai bună decît algoritmul P propriu-zis, din punctul de vedere al capacității de inspecție. Astfel forma primitivă a algoritmului P, modificată conform celor de mai sus și implementată așa cum s-a arătat la pct.3.5, asigură inspecția corectă chiar și a conductoarelor înclinate, situație în care algoritmul P nu prezintă o comportare corespunzătoare.

6. În cap.4 se prezintă o analiză critică a capacității de inspecție a algoritmului P, cunoscut actualmente în literatură ca fiind cel mai performant algoritm de inspecție vizuală automată a cablajelor imprimate. Analiza pornește de la modalitățile de aproximare ale unui cerc de inspecție continuu printr-un cerc discret și efectele discretizării cercului continuu. Pe baza rezultatelor astfel obținute, se demonstrează că, spre deosebire de cele afirmate în literatură, pentru inspecția corectă a cablajelor ce includ conductoare orizontale și verticale, netede, și necesită utilizarea simultană a două cercuri discrete. Aceste cercuri se obțin prin aproximarea cercului continuu de inspecție conform celor două modalități de aproximare prezentate în fig.4.2.a și 4.2.b. Se subliniază însă că și prin utilizarea simultană a celor două cercuri discrete de inspecție, menționate anterior, nu este asigurată inspecția corectă în cazul cablajelor cu conductoare înclinate (vezi fig.4.12).

7. Teza abordează pentru prima dată, în cadrul paragrafului 4.3, problema efectului neregularităților de mărime 1 sau 2 pixeli, situate pe conturul conductoarelor, asupra capacității de inspecție. Se demonstrează, astfel, că apariția neregularităților chiar de mărime 1 pixel, situație des întâlnită în practică, poate conduce în cazul algoritmului P - avut în vedere - la generarea unui semnal de eroare falsă. În baza acestui fapt se afirmă că algoritmul P, cel mai performant algoritm de inspecție cunoscut actualmente, nu poate fi practic utilizat.

8. În literatura de specialitate sînt prezentate două procedee de extindere a capacității de inspecție a algoritmului P în cazul conductoarelor realizate cu un unghi $\varphi < \pi/2$. Se demonstrează însă (paragraful 4.4), că există situații în care aceste procedee nu sesizează anumite defecte, motiv pentru care nu pot fi utilizate în practică.

9. Avînd în vedere dezavantajele algoritmilor de inspecție cunoscuți în literatură, în cap.5 se propune un nou algoritm de inspecție automată a cablajelor imprimate, denumit algoritm de conectivitate îmbunătățit. Noul algoritm, similar din punctul de vedere al generării semnalului eroare cu algoritmul de conectivitate (de unde și denumirea adoptată), a fost elaborat pe baza studiului a trei variante posibile. Se justifică că numai varianta a III-a a algoritmului propus este utilizabilă în practică, deoarece aceasta asigură inspecția chiar și a conductoarelor realizate cu un unghi $\varphi < \pi/2$, inclusiv în prezența unor neregularități de mărime δ pixeli, impusă la proiectarea sistemului. Este de menționat că, spre deosebire de algoritmi de inspecție clasici, algoritmul nou elaborat utilizează o arie semicirculară de inspecție asociată cu o coroană semicirculară de propagare.

10. În paragraful 5.5 este prezentată o comparație între varianta a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit și algoritmul de conectivitate cunoscut în literatură, evidențiindu-se avantajele pe care le prezintă noul algoritm față de acesta din urmă. Se justifică astfel că:

- Algoritm de conectivitate îmbunătățit, prin faptul că utilizează la implementare două tipuri de conectivități, cu 4 respectiv 8 pixeli, realizează inspecția corectă a cablajelor și în prezența neregularităților situate pe contur. Spre deosebire de aceasta, algoritmul clasic de conectivitate poate genera în prezența anumitor neregularități, un semnal de eroare falsă. Parametrii a-

riei de inspecție și de propagare, în cazul algoritmului îmbunătățit, se determină funcție de mărimea admisă a perturbațiilor pe contur și valoarea minimă a unghiului φ la care sînt realizate conductoarele.

- Algoritmul de conectivitate îmbunătățit necesită pentru implementarea circuitului de prelucrare circuite hard substanțial mai reduse, cu cca. 50% comparativ cu algoritmul de conectivitate clasic.

- Durata procesului de inspecție a N pixeli, în cazul variantei a III-a a algoritmului de conectivitate îmbunătățit, reprezintă în situația cea mai dezavantajoasă cca.20% din durata procesului de inspecție a aceluiași număr de pixeli, utilizînd algoritmul de conectivitate clasic. Cu alte cuvinte, algoritmul nou elaborat prezintă o viteză de prelucrare de cel puțin 5 ori mai mare comparativ cu algoritmul de conectivitate cunoscut.

11. Algoritmul de conectivitate îmbunătățit prezintă și avantajul major, comparativ cu algoritmi de inspecție cunoscuți, că permite inspecția cablajelor la care lățimea minimă a conductoarelor este diferită de distanța minimă dintre conductoare. În cazul algoritmilor prezentați în literatură, cei doi parametri menționați anterior au fost presupuși de valori egale.

12. A fost elaborat și realizat un sistem de inspecție vizuală automată a unor cablaje imprimate generate cu ajutorul unui microcalculator. Implementarea circuitului de prelucrare s-a făcut utilizînd algoritmul P îmbunătățit. Utilizînd acest sistem au fost verificate principalele observații și concluzii stabilite cu privire la algoritmul P respectiv algoritmul P îmbunătățit.

*

*

*

Drept încheiere la prezenta lucrare, se subliniază faptul că rezultatele originale menționate, permit abordarea practică a problemei inspecției vizuale automate a cablajelor imprimate. Este de menționat că aplicabilitatea practică în condiții cît mai puțin restrictive, a constituit, în cadrul prezentei teze, criteriul principal de apreciere atît al algoritmilor de inspecție cunoscuți cît și a algoritmilor nou propuși. Rămîne deschisă problema creșterii vitezei de inspecție, pentru a cărei soluționare sînt necesare cercetări în continuare.

B I B L I O G R A F I E

1. Kochan, A., "Automatic inspection detects PCB faults", Sensor Review, ianuarie 1986, pg.29-32.
2. Domres, M.D., Mac Farlane, J., "Automatic optical inspection techniques for PWBs - Image Acquisition and Analysis remain areas of challenge", Test and Measurement World, mai 1983, pg.71-77.
3. Corman, S., "Optical inspection technology for multilayer printed wiring boards", Test and Measurement World, mai 1983, pg.78-83.
4. Coyle, D.F., "Automating image inspection technology", Test and Measurement World, decembrie 1983, pg.104-107.
5. Starks, N.V., "Robotics and machine vision in the electronics industry", Test and Measurement World, octombrie 1982, pg.26-32.
6. Zeller, H., Doemens, G., "Applications of pattern recognition in Semiconductor and printed circuit board production", Signal processing vol.5, nr.5, sept.1983, pg.399-412.
7. Jarvis, J.F., "A method for automating the vizual inspection of printed wiring boards", IEEE transaction on pattern analysis and machine intelligence, vol.PAMI-2, nr.1, ianuarie 1980, pg.77-82.
8. Danielsson, P.E., Kruse, B., "Distance checking algorithms", Computer graphics and image processing 11, 1979, pg. 349-376.
9. * * * "Proceedings of the IEEE", decembrie 1981.
10. Julius, T.Tou, "Pattern recognition, principles", 1974.
11. Lareen, K., "Patterns in pattern recognition", IEEE transaction on information theory, vol.II-20, nr.6, noiembrie 1974, pg.697-717.
12. King-Sun Fu, "Recent developments in pattern recognition", IEEE transaction on computers, vol.C-29, nr.10, octombrie, 1980, pg.845-854.
13. Agin, G.J., "Computer vision system for industrial inspection and assembly", Computers, IEEE, mai 1980, pg.11-20.
14. Myers, W., "Industry begins to use visual pattern recognition", Computer, IEEE, mai 1980, pg.21-31.

15. Allon, R., "Robotics Comes into its own with improved vision, sense perception, teaching languages", Electronic design, nr.29 aprilie 1982, pg.87-100.
16. Savir, D., Laurer, G.J., "The characteristics and decodability of the universal product Code Symbol", Universal Product Code, nr.1, 1975, pg.17-34.
17. Jarvis, J.F., "Automated visual inspection of Western Electric Serries 700 Connectors", Proc.PRI, P77-IEEE Computer Soc.Conf.on pattern recognition and image processing, Tray, N.y, 1977, pg.153-159.
18. Batchelor, B.G., Marlow, B.K., "Automated visual inspection of bottles, Jars and tumblers", Sensor Review, februarie 1982, pg.84-89.
19. Peterson, C., "Automated visual inspection", Proc.The Second. Int.Joint Conf.Pattern Recognition, Copenhagen, decembrie, 1974.
20. Olsen, O.A., "visual method of locating faults in printed circuit boards", U.S. patent 3976383, Aug.24, 1976.
21. Krakauer, L., Pavlidis, T., "visual printed wiring board fault detection by geometrical method", Tach.Raport 248, Computer science lab., Princeton Univ., 1978.
22. Esiri, M., Uno, T., s.a., "A proces for detecting defects in complicated patterns", Computer Graphics and Image Processing, 2, 1973, pg.326-339.
23. Pavlidis, T., "Syntactic pattern recognition of shape", Proc. IEEE Computer Society Pattern Recognition and Image Processing Conf., 1977, pg.98-107.
24. Jarvis, J.F., "Feature recognition in line chrawing using regular expression", Proc.the Thard Int.Conf.Pattern Recognition, noiembrie 1976, pg.189-192.
25. Baird, M.L., "Sight-1: A Computer vision sistem for automated IC Chip manufacture", IEEE Trans.Syst.Man Cybern, vol.SMC8, 1978.
26. Perkins, W.A., "Amodel based vision system for industrial parts", IEEE Trans.Comput., vol.C-27, 1978.
27. Chen, R.T., Harlow, C.A., "Automatic visual inspection of printed circuit boards", Proc.SPIE, vol.155, Image Understanding Systems and Industrial Applications, aug.1978, pag.199-213.

28. Kashioka, S., s.a., "A transistor wire bonding system utilizing multiple local pattern machine", IEEE Trans.Syst. Man.Cybern., vol.SMC-6, 1976.
29. Hsieh, Y.Y., s.a., "An automatic visual inspection system for integrated circuit chips", Comput.Graph.Image Processing, vol.14, 1980, pg.293-343.
30. Hsieh, Y.Y., Fu, F.S., "A method for automatic IC chip alignment and wire bonding", Proc.IEEE Computer Soc.Conf. Pattern Recognition and Image Processing, 1979.
31. Besl, P.J., s.a., "Automatic visual solder joint inspection", IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.RA-1, nr. 1, martie 1985, pg.42-56.
32. Sterling, W.M., "Automatic non-reference inspection of printed wiring boards", Proc.IEEE Conf.Pattern Recognition and Image Processing, aug.1979, pg.93-100.
33. McIntosh, W.F., "Automating the inspection of printed circuit boards", Robot Today, iunie 1983, pg.75-78.
34. Chin, R.T., Harlow, C.A., "Automated visual inspection: A survey", IEEE Trans.Patt.Anal.Machine Intelligence, vol. PAMI-4, nr.6, noiembrie 1982, pg.557-573.
35. Skaggs, F.L., "Machine vision system PCB inspection and increases measurement efficiency", Test and Measurement World, iunie 1984, pg.94-104.
36. Beuter, K., Weiss, R., "Sound pattern recognition supports automatic inspection", Sensor Review, ianuarie 1985, pg.13-17.
37. King, T.G., s.a., "Low cost, high speed sensing of knitted fabrics", Sensor Review, iulie 1985, pg.119-123.
38. Weatherall, D., "Automated inspection of surface texture", Sensor Review, ianuarie 1986, pg.27-28.
39. Ahlers, I., "Robot-guided image sensors for quality testing", Sensor Review, ianuarie 1986, pg.36-41.
40. Chouinard, S., "Emerging imaging technology promises automation for electronics inspection", Test and Measurement World, mai 1983, pg.8-12.
41. Nakashima, M., "Automatic mask inspection for printed circuits based on pattern width measurement", Proc.SPIE; vol.182, 1979, pg.38-47.
42. Hollingum, J., "The shape of things to come", Sensor Review, ianuarie 1986, pg.19-24.

43. Parks, J.R., "Industrial sensory devices", *Industrial Inspection Ideas in Practice*, Plenum Press, New York, 1977, pag.253-286.
44. Rossel, L., "Computer vision in industry", *Robot Vision*, IFS Publications, U.K., 1983, pg.11-16.
45. Batchelor, B.G., Cotter, S.M., "Parameter measurement on aerosol sprays by image processing", *Sensor Review*, nr.3, martie 1983, pg.12-16.
46. Purll, D.J., "Automated surface inspection with solid-state image sensors", *Proc.SPIE*, nr.145, martie 1978, pg.18-25.
47. Batchelor, B.G., s.a., "Automated Visual Inspection, IFS (Publications) Ltd, UK, North-Holland, 1985.
48. Thissen, F.L.A.M., "An equipment for automatic optical inspection of connecting-lead patterns for integrated circuit", *Philips technical review*, vol.37, nr.2, 1977, pg.77-88.
49. Bentley, W.A., "The Inspection: An automatic optical printed circuit board (PCB) inspector", *Proc.SPIE*, vol.201, *Optical Pattern Recognition*, aug.1979, pg.37-47.
50. Hara, Y., Hamade, T., s.a., "Automatic inspection of LSI photomasks", *Proc.5 th.Int.Conf.on Pattern Recognition*, Miami Beach, FL, noiembrie 1980.
51. Restrick, R.C., "An automatic optical printed circuit inspection system", *Proc.SPIE*, vol.116, *Solide State Imaging Devices*, 1977, pg.76-81.
52. Bentley, W.A., "Automated optical inspection of multilayer printed circuit board", *Proc.SPIE*, vol.220, *Optics in Metrology and Quality Assurance*, februarie 1980.
53. Wolf, W.F., s.a., "On-line inspection for nonwoven fabrics", *Proc.SPIE*, vol.220, *Optics in Metrology and Quality Assurance*, februarie 1980.
54. Chin, R.T., Harlow, C.A., "Automated visual inspection: A survey", *Electrical and Computer Engineering*, University of Wisconsin, Madison, WI 53706, ianuarie 1981.
55. * * * *Sensor Review*, ianuarie 1986.
56. Axelrod, N.N., "Intensity spatial filtering applied to defect detection in integrated circuit photomasks", *Proc. IEEE*, vol.60, 1972, pg.447-448.

57. . . A problem in computer vision: orienting silicon integrated circuit chips for lead bonding", Computer Graphics and Image Processing, nr.4, 1975, pg.294-303.
58. Lin,W.C., Chan,C.F., "Feasibility study of automatic assembly and inspection of light bulb filaments", Proc.IEEE, vol.63, nr.10, 1975, pg.1437-1445.
59. Mundy,J.L., "visual inspection of metal surfaces", Proc. AFIPS National Computer Conf., iunie 1979, New York, pg. 227-231.
60. Radu,M., Bărsan, "Dispozitive și circuite integrate cu transfer de sarcină. Editura tehnică, București, 1981.
61. Belarteva,A.T., Mnogosloinîi peceatnîi montoj v priborostroenii, avtomatike n vîcislitelnoi tehnike, Moscova, "Masinostroenie", 1978.
62. Joseph,C.N., Elizabeth A.N., "Z-80 Microprocessor programming and interfacing", USA, 1979.
63. Walter,F.K., "Charge coupled devices - An overview", Princeton, Newjersey 08540, 1974, pg.28-47.
64. Purll,D.J., "Automated surface inspection with the Solid-State Image sensors", Proc.SPIE, 145, martie, 1978, pg.18-25.
65. Brook,R.A., Purll,D.J., "on-line image acquisition and analysis for automatic product inspection", Inst.Phys.Conf. Ser., nr.44, 4, 1979, pg.137-150.
66. Beynon,J.D.F., Lamb,D.R., "Charge Coupled Devices and their Applications". Mc.Graw-Hill, Maidenhead, 1980, UK.