

$$I_y(x, y, t) = - \left( R \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} \right)^{-1} \cdot [U(x, y + \Delta y, t) - U(x, y, t)] \quad (5.10)$$

$$[I_x(x, y, t) - I_x(x - \Delta x, y, t)] + [I_y(x, y, t) - I_y(x, y - \Delta y, t)] = - \frac{\delta Q}{\delta t} \quad (5.11)$$

Prin substituirea relațiilor (5.8) – (5.10) în (5.11) și ținând cont că  $\Delta x \cdot \Delta y \rightarrow 0$ , se obține ecuația:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = R \cdot C \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \quad (5.12)$$

Această ecuație descrie dinamica senzorului tactil pelicular piezoelectric, condițiile de contur fiind:

$$U(x, y, t) = 0 \quad \therefore \frac{\partial U(\pm x, y, t)}{\partial y} = 0 \quad (5.13)$$

#### 5.3.4 Senzori tactili binari

Senzorii tactili binari (STB) prezintă ce mai simplă variantă de senzori tactili pentru determinarea prezenței piesei sau a formei acesteia.

Unele variante de (STB) utilizează drept elemente sensibile microîntrerupătoare pentru forțe de comutație reduse. Microîntrerupătoarele sunt comercializate independent astfel că utilizatorul poate obține matrici senzoriale după dorințe.

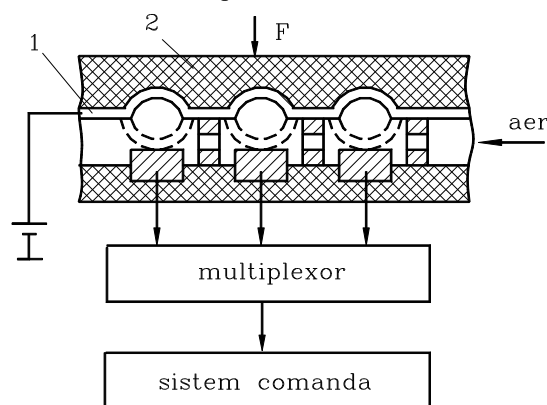


Fig.5.16 Senzor tactil binar (1 – membrană metalică; 2-material elastic)

semnalizând un punct de contact, piesă – bac. Forțele necesare pentru acționarea membranei sunt extrem de reduse ( $< 1\text{N}$ ) [5.4].

În figura 5.17 se prezintă o variantă a unei matrici senzoriale 8x8 bazată pe traductoare de proximitate optice [5.12].

În figura 5.16 se prezintă varianta unei matrici senzoriale. Distanța între contactele electrice este de 2.5 mm.

Membrana metalică 1 prezintă o serie de calote sferice cu pasul de 2.5 mm având 2 poziții de echilibru (convex și concav). În lipsa unui contact între bac și piesă, presiunea aerului introdus în sens axial în bacul efectorului, menține membrana în poziție convexă. Când se realizează contactul piesă – bac, membrana se deformează sub acțiunea forței locale F, trecând în noua poziție stabilă concavă. În acest mod, se închide un contact electric (“1” – “3”),

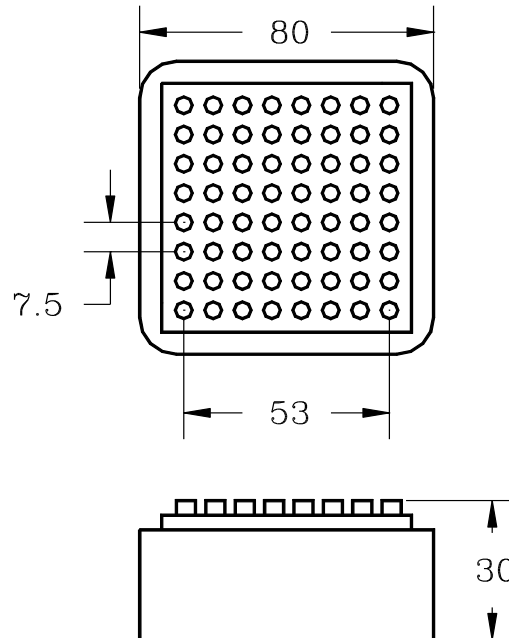


Fig.5.17 Dimensiuni de gabarit a unui senzor tactil matricial binar optic

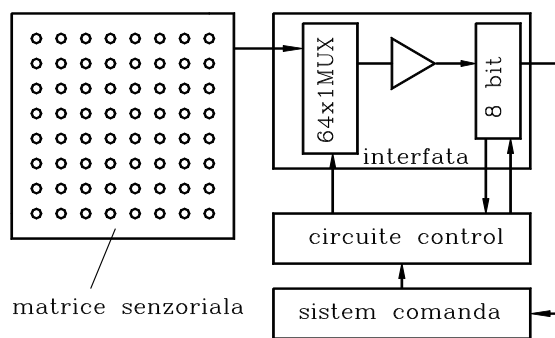


Fig.5.18 Arhitectura sistemului informațional al senzorului tactil

Arhitectura sistemului de control este prezentată în figura 5.18. În figura 5.19 se prezintă o secțiune prin acest senzor. Un “ac” din elastomer este fixat, sau face parte integrantă din stratul elastic protector care acoperă senzorul, în zona prevăzută pentru contact cu piesele de prehsat. Sub acțiunea unei forțe  $F$  punctuale în zona de contact, “acul” din elastomer are o mișcare axială reducând sau întrerupând fluxul luminos emis de emițătorul (E) (de ex. LED).

Receptorul ( R ) (de ex. fototranzistor) își modifică astfel curentul de ieșire, de la o valoare maximă (deformație zero) până la o valoare minimă (deformație maximă 20.5 mm) .

O variantă asemănătoare cu cea anterioară are schema principială prezentată în figura 5.20 [5.13]. Varianta prezintă  $n^2$  puncte de detecție ( $n$  emițătoare și  $n$  receptoare) fără contact. Funcționarea se bazează pe senzori de proximitate cu fibre optice fig.5.21[5.10].

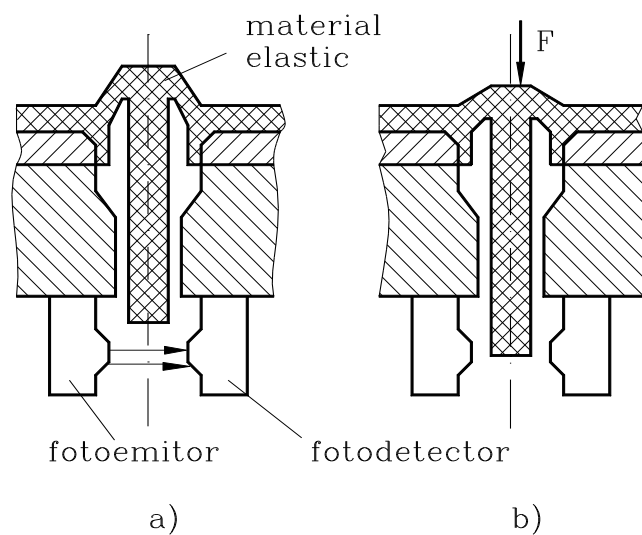


Fig.5.19 Aspect constructiv al elementului tactil: a) fără solicitare; b) cu solicitare exterioară

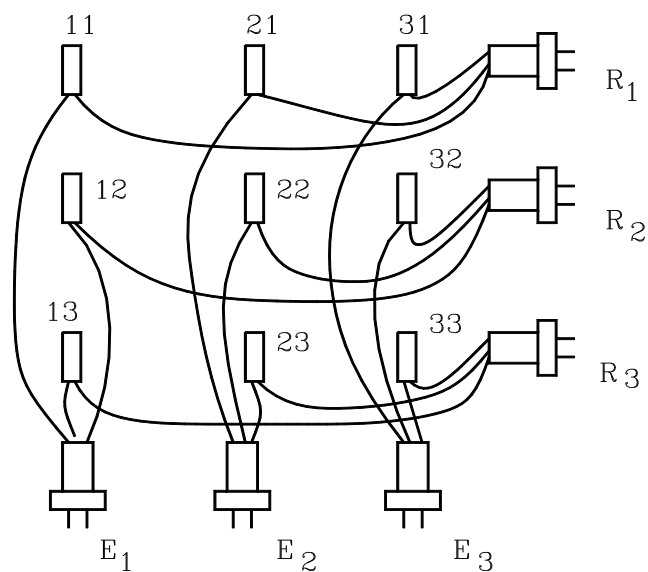


Fig.5.20 Matrice senzorială pe bază de senzori de proximitate optici

Dimensiunile reduse ale fibrelor optice permit montarea acestora într-o suprafață redusă existând posibilitatea realizării unui număr mare de puncte de detecție.

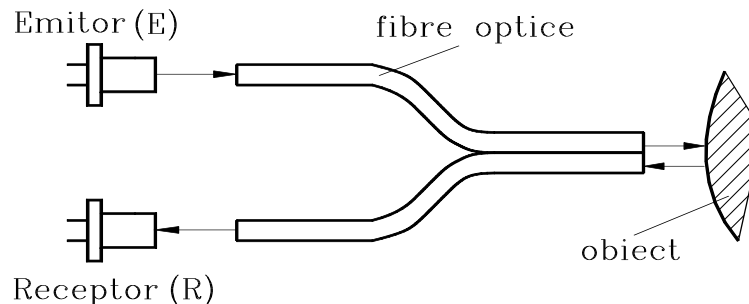
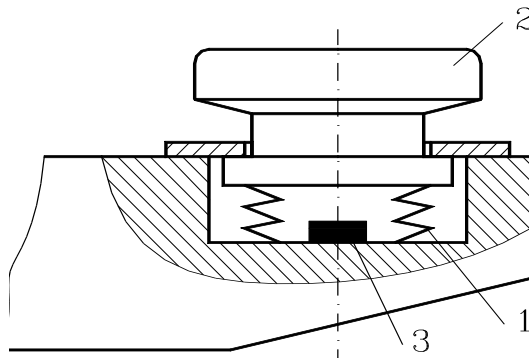


Fig.5.21 Principiul de funcționare al senzorului de proximitate optic

### 5.3.5 Senzori tactili inductivi

Fig.5.22 “Punct” sensibil într-o matrice tactilă  
(1–arc; 2 – buton; 3 – traductor inductiv)

Realizarea unor matrici senzoriale tactile, cu determinarea forței, se bazează și pe măsurarea forței de prehensare prin metode nespecifice: măsurarea unei deplasări pe cale inductivă, rezistivă sau capacitivă.

În figura 5.22 se prezintă o vedere a unui element sensibil din cadrul matricii [5.14]. Arcurile 1 au rolul de a prelua forțele de contact dintre obiect și bacul efectorului și a unui etalon, în același timp, pentru forța măsurată. Efectul acestei forțe  $F$  se regăsește într-o deplasare a butonului 2. Această deplasare este sesizată prin intermediul traductorului de deplasare

inductiv (fără contact) 3.

### 5.3.6 Senzori tactili piezorezistivi

O metodă de sesizare a forței de contact este cea bazată pe *fenomenul piezorezistiv*: schimbarea conductivității electrice a unui material ca urmare a presiunii care se exercită asupra sa.

Avantajul principal al metodei rezistive constă în existența unui număr mare de materiale care posedă proprietățile necesare. În plus proiectarea circuitelor electronice de explorare a fiecărui element al matricii nu prezintă dificultăți. În acest scop, se folosesc în special elastomeri conductivi electric. Alte avantaje ale folosirii acestor materiale sunt: posibilitatea de a se obține sub forma de folii relativ flexibile, prețul de cost redus, permit măsurarea atât dinamică cât și statică.

Există elastomeri conductori izotropi din punct de vedere al conductivității electrice, dar există și alții la care conductivitatea electrică, în direcție perpendiculară pe folie, diferă de cea în direcție paralelă cu planul foliei. Izotropia sau anizotropia elastomerului condiționează plasarea electrozilor fie pe ambele părți ale foliei, fie numai pe o parte.

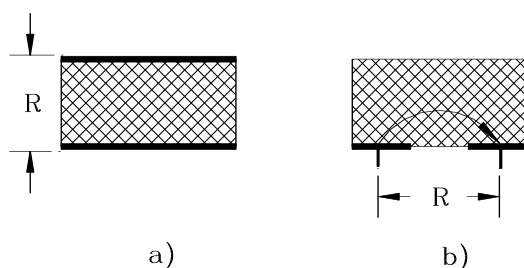


Fig.5.23 Tipuri de conductivitate transversală (a) și longitudinală (b)

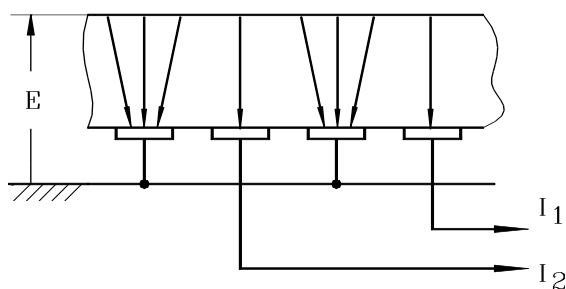


Fig.5.24 Conductivitatea transversală: repartizarea liniilor de curent

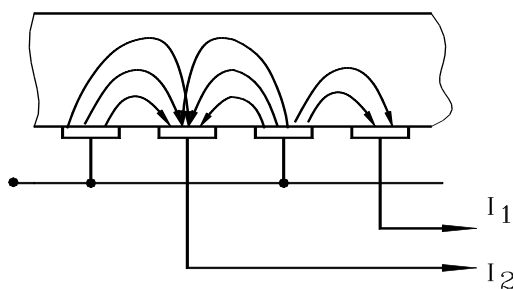


Fig.5.25 Repartizarea liniilor de curent pentru conductivitatea longitudinală

conductorii. Materialul utilizat trebuie să asigure o rezoluție tactilă mare pentru fiecare element al matricii. Rezistența minimă a stratului conductor trebuie să fie suficient de mare pentru a evita suprasarcina circuitelor alăturate. Această rezistență este de la  $5 \Omega$ /element la

Variația conductivității se determină prin măsurarea variației rezistenței electrice transversale sau longitudinale. Măsurarea

conductivității transversale oferă un plus de precizie și o dinamică mai ridicată (fig.5.23).

Problema realizării sensorului tactil constă în discretizarea presiunii pe suprafața superioară. Elementul senzorial este constituit pe baza unui elastomer sau șnur din fibre de carbon metalizate pe o singură față. Ansamblul este aplicat pe un suport conductor conectat la masă și în care sunt izolați electrozii de măsură. O sursă de tensiune alimentează elementul senzorial prin suprafața metalizată.

O parte din curentul rezultat prin modificarea rezistenței locale este preluat prin suportul conductor care prezintă o impedanță redusă în raport cu electrozii (fig.5.24).

Un rezultat identic de discretizare este obținut prin alimentarea suportului conductor în loc de suprafața metalizată ca în cazul precedent (fig.5.25).

În figura 5.26 se prezintă principiul pentru realizarea unei matrici senzoriale prin această metodă [5.15]. Principalul dezavantaj al metodei constă în necesitatea unui număr mare de conductori. De exemplu, pentru o matrice compusă din 256 elemente, sunt necesari 32

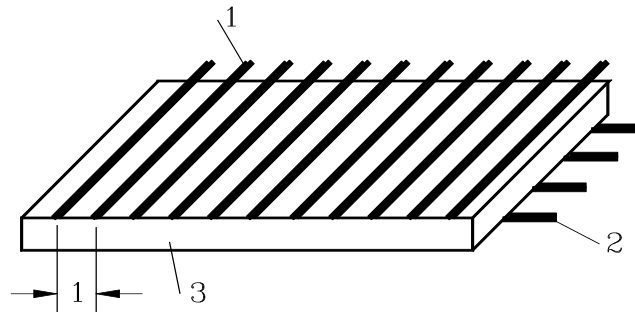


Fig.5.26 Matrice tactilă: 1- electrozi superiori; 2- electrozi inferiori; 3 – material piezorezistiv

100  $\Omega$ /element. În același timp această rezistență trebuie să admită folosirea unui semnal de mărime suficientă (de ordinul 1V) pentru realizarea unei filtrări suficiente a paraziților industriali. Materialul trebuie să fie suficient de flexibil pentru a putea fi montat pe suprafețe ondulate și să permită supraîncărcări accidentale.

Principalele dezavantaje ale materialului sunt: ciclul de histereză larg, neliniaritate pronunțată, timp de răspuns mare, sensibilitate relativ redusă, fenomenul de oboseală este accentuat.

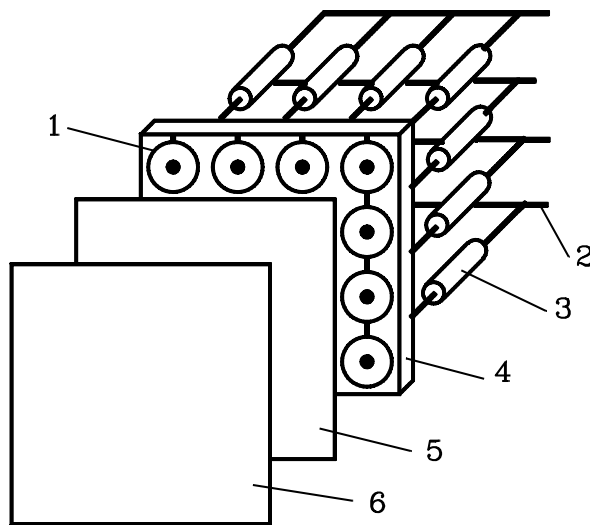


Fig.5.27. Matrice senzorială: 1-inel conductor; 2-linie matriceală; 3-dioda; 4-circuit imprimat; 5-material piezorezistiv; 6- material de protecție

conectat la catodul diodei (3). Anozii diodelor sunt conectați în patru coloane, cu câte patru diode pe fiecare coloană.

O altă variantă de matrice senzorială tactilă este prezentată în figura 5.27. Elastomerul utilizat este cauciucul siliconic. Matricea senzorială este 4 x 4 [5.16]. Un driver multiplexor, sub controlul calculatorului, selectează ieșirea ori căruia dintre elementele senzoriale. În componența sistemului informațional mai intră un convertor analog-digital și o interfață cu sistemul de calcul.

Elastomerul (5) este dispus peste circuitul imprimat (4) care prezintă 16 perechi de inele concentrice. Fiecare pereche împreună cu porțiunea de cauciuc conductor de deasupra lor formează elementul tactil. Inelele exterioare (1) sunt înseriate câte patru și formează cele patru linii ale matricii. Inelul central este

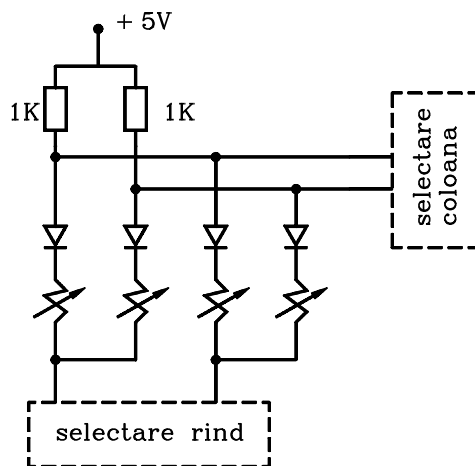


Fig.5.28.Schema electrică a circuitului de măsurare

Elastomerul conductiv este protejat față de mediul exterior prin stratul de protecție (din plastic) (6).

Circuitul electric al matricii senzoriale este prezentat în figura 5.28. Senzorul operează astfel: în primul moment este selectat un rând prin legarea la masă a unuia din seturile de inele exterioare. Celelalte trei seturi de inele exterioare sunt lăsate libere (deconectate). Curentul trece de la  $V_{cc}$  prin patru rezistoare fixe pe multiplexor, prin elastomer și în final prin inelele exterioare puse la masă. Elastomerul conductiv este echivalent cu un rezistor variabil care este înseriat cu un altul de valoare constantă. Împreună formează un divizor de tensiune al cărui semnal de ieșire variază cu presiunea exercitată asupra elastomerului. Coloana este selectată prin legarea ieșirii unuia dintre acești divizori la convertorul analog - numeric printr-un driver multiplexor.

### 5.3.7. Variante de senzori tactili pe bază de elastomeri

Elementul senzorial se bazează în general pe utilizarea cauciucului siliconic. Principiul de funcționare utilizează modificarea suprafeței de contact între doi electrozi supuși unei presiuni. Un electrod este din cauciuc siliconic iar celălalt este metalic. Variația rezistenței este o funcție logaritmică de presiune. Matricea senzorială este realizată sub forma unei rețele rectangulare din mai multe fire conductoare peste firele metalice. Fiecare punct de contact rezultat va fi analizat secvențial. Alimentarea este realizată coloană după coloană prin intermediul unei rezistențe (fig.5.29). Liniile sunt puse succesiv la masă pentru a forma o punte pontențiometrică. Problema principală este determinarea presiunii într-un punct de contact fără ca celelalte să influențeze procesul de măsurare.

Alte variante de senzori tactili au la bază principiul enunțat anterior.

Un suport (circuit imprimat) în rețea, pe bază de conductoare rectangulare, este ascuns de o rețea izolantă care poate fi realizată cu un pas extrem de fin (chiar sutimi de mm).

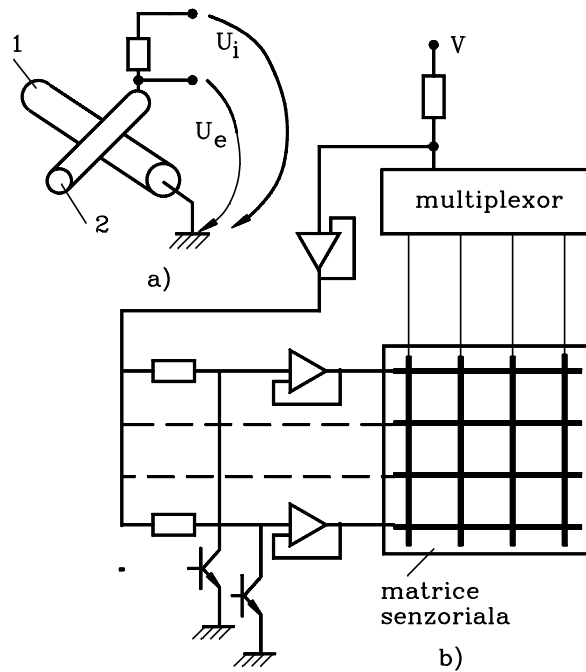


Fig.5.29. Matrice senzorială (1- electrod metalic; 2 – electrod din cauciuc siliconic): a) principiul de funcționare; b) schema de măsurare

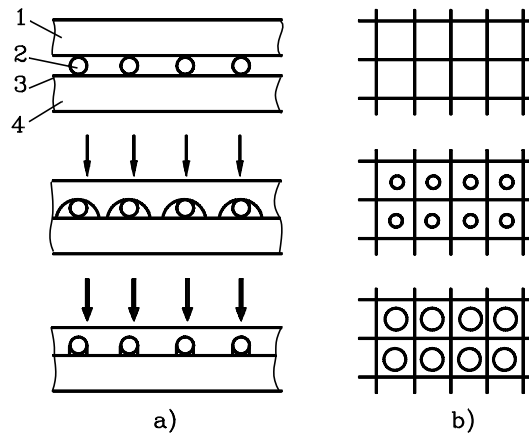


Fig.5.30 Principiul matricii senzoriale (1- elastomer conductor; 2- izolator; 3- suprafața conductoare; 4 - suport izolator): a) structura și comportamentul în lipsa și prezența forței exterioare; b) suprafață de contact 1-3



Peste structura astfel formată este dispus un elastomer conductor foarte elastic. O presiune aplicată pe elastomer modifică suprafața în contact a acestuia cu electrodul conductor. Rezultă o diminuare a rezistenței electrice (fig.5.30).

### 5.3.8. Matrice senzorială tensometrică.

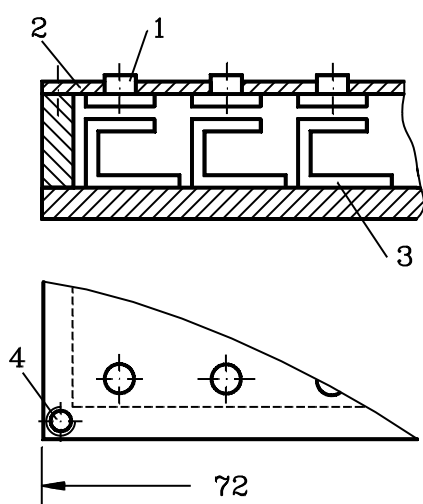


Fig.5.31 Matrice senzorială (1- buton; 2 - membrană elastică; 3- element elastic primar; 4 - șurub)

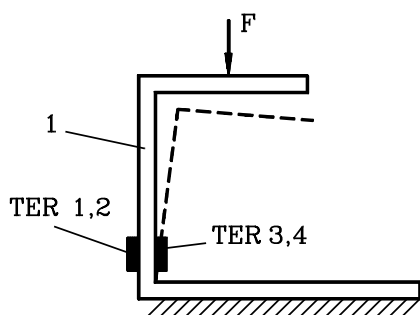


Fig.5.32 Elementul sensibil primar (1) și traductoarele TER

Informații cu privire la forța de contact bac-piesă se pot obține cu matricea senzorială din figura 5.31. Elementul senzorial este de tip tensometric. Elementul sensibil primar este sub forma unei bare cotite (în formă de C). Pe pereții verticali sunt lipite traductoare tensometrice (TER): două pe fața interioară și două pe fața exterioară (fig.5.32). Cele patru traductoare sunt conectate în punte completă [5.10].

Prin testarea fiecărui punct senzorial se obține imaginea distribuției presiunii de contact pe întreaga matrice.

Prin asigurarea unei rezoluții adecvate se pot obține informații cu privire la forma obiectului prehensat. Matricea are avantajul unei siguranțe în funcționare, oferită de traductoarele tensometrice rezistive.

### 5.3.9. Senzori tactili optici.

Optica ocupă un loc extrem de important în conceperea unor elemente senzoriale tactile. Principiul de lucru se bazează pe modelarea luminii între un emitor (E) și un receptor (R) prin intermediul unui ecran sau direct și prin modificarea caracteristicilor de reflexie.

#### 5.3.9.1. Senzori tactili optici cu ecran.

În figura 5.33 se prezintă o vedere a unui bac pentru efectorul unui robot industrial. "Punctele" sensibile sunt materializate prin butoane.

Fiecare element senzorial este constituit dintr-un emitor (E) (LED), un receptor (R)

(fototranzistor) și butonul (4) solidar cu ecranul (5). Forța dezvoltată pe butonul aflat în contact cu piesa de prehsat are ca efect obturarea fascicolului luminos între emitor și receptor. Semnalul obținut de la receptor este astfel funcție de forța aplicată.

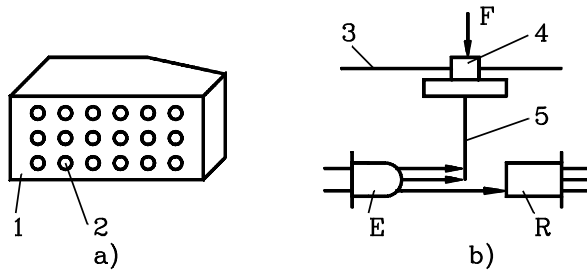


Fig.5.33 Matrice senzorială (1 - bac; 2 – element sensibil; 3- membrană elastică; 4 - buton; 5- ecran): a) aspect general; b) structura unui element sensibil

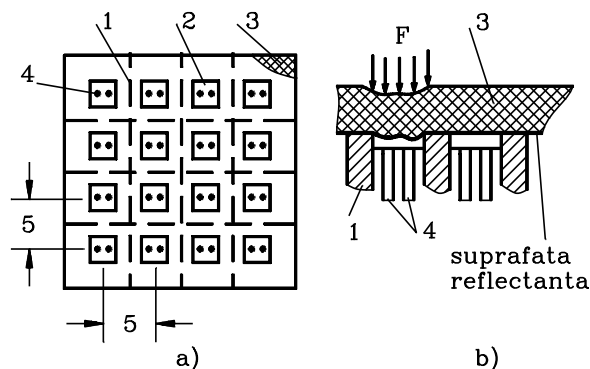


Fig.5.34 Matrice tactilă (1- perete intermediar; 2-punct tactil; 3 - membrană elastică; 4 - fibre optice): a) vedere generală; b) secțiune printr-un punct sensibil

luminoase pentru raza receptată. Dependența forță - intensitate luminoasă nu este perfect liniară impunându-se o prelucrare electronică.

Performanțele matricii senzoriale sunt influențate de o serie de parametri: unghiul dintre fibra optică emițătoare și cea receptoare, distanța dintre fibră și membrana elastică, culoarea suprafeței reflectante, calitatea suprafeței reflectante, elasticitatea materialului, tipul deformației.

Această tehnologie permite o rezoluție de 5 mm în raport cu centrul celulei senzoriale.

Alte versiuni ale principiului de funcționare prezentat anterior utilizează un fascicul luminos incident care este tangent la elementele receptoare. Fluxul luminos este ghidat în

### 5.3.9.2 Senzori tactili optici cu unde reflectate.

Principiul senzorilor tactili cu unde reflectate se bazează pe variația reflexiei luminii la modificarea geometriei unei suprafețe reflectante.

La Jet Propulsion Laboratory (Pasadena-California) s-a realizat o matrice senzorială bazată pe acest principiu și a cărei vedere principială este prezentată în figura 5.34 [5.17].

Matricea senzorială este compusă din "celule" tactile independente constituite din două fibre optice și un material elastic (membrană) cu o față reflectantă fixate pe o ramă nedeformabilă. Raza de lumină este transmisă printr-o fibră optică pe fiecare "celulă". O distanța de aprox. 2 mm între fibrele optice și membrană permite deformația acestora la o solicitare exterioară. Deformația membranei generează variații ale intensității luminoase receptate de cea de-a doua fibră optică, în urma reflexiei suferite. Creșterea forței de contact conduce și la creșterea intensității

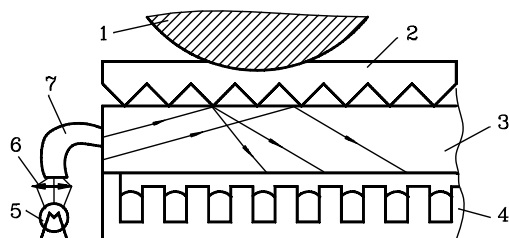


Fig.5.35 Matrice senzorială (1 - obiect; 2- membrană elastică; 3 - material transparent; 4 - matrice cu fototranzistoare; 5 - sursă luminoasă; 6 – lentilă colimatoare; 7 - fibre optice)

interiorul unui material transparent (rășină acrilică). Un material elastic (de ex. cauciuc siliconic) montat pe una din fețele materialului transparent provoacă o modificare a modului de reflexie a luminii în zona deformată. Fluxul luminos reflectat este recepționat de o rețea de fototranzistoare. Varianta principală este prezentată în figura 5.35 [5.17]. Membrana elastică are suprafața neregulată pentru partea de contact cu suprafața acrilică. Neregularitatea suprafeței este de forma unui con cu o

înălțime de aprox. 1 mm și un unghi la vîrf de  $118^{\circ}$ . Ca sursă luminoasă se utilizează o lampă cu halogen. Aranjarea fototranzistoarelor (diametrul suprafeței sensitive este de 3 mm) se face într-o matrice 16 x 32 cu un pas de aprox. 3.5 mm.

Schema electronică de prelucrare a informației este asemănătoare celor de la variantele prezentate anterior.

La Massachusetts Institute of Technology (Cambridge) s-a realizat un senzor optic, bazat pe modulația mecanică a luminii reflectate (fig.5.36a). Rezoluția spațială a senzorului este foarte mare deoarece pe fiecare  $\text{cm}^2$  de suprafață senzorială au fost plasate 330 de puncte de sesizare.

În principiu senzorul funcționează astfel: raza de lumină care pornește de la sursă este divizată în două, o parte fiind trimisă către o cameră TV și cealaltă parte, prin intermediul fibrelor optice, spre suprafața reflectantă a senzorului. După reflexie razele luminoase tot prin intermediul fibrelor optice sunt transmise la senzorul video. Cele două raze captate de senzorul video sunt analizate prin intermediul microprocesorului atașat sistemului informațional. În cazul în care asupra senzorului acționează o forță, suprafața reflectantă se deplasează și produce modificări în intensitatea luminii reflectate. Aceste modificări sunt sesizate de complexul de

prelucrare a informației senzor video - microprocesor.

O variantă asemănătoare precedentelor utilizează drept receptor pentru razele luminoase un senzor de imagine CCD.

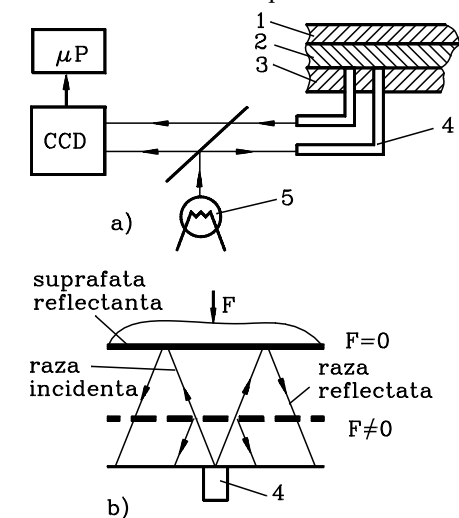


Fig.5.36 Senzor tactil optic (1-cauciuc siliconic; 2-cauciuc transparent; 3-rașină epoxidică; 4-fibra optică; 5-sursă de lumină): a) elementele componente; b) principiul de funcționare