

În cazul echipamentului prezentat se poate evidenția o defectare doar dacă se defectează în același mod sau în moduri diferite două module din cele două grupe. Dacă se defectează cele două unități ale unei grupe, iar semnalele de ieșire ale lor sunt identice și eronate, comparatorul nu va putea bloca trecerea semnalului eronat spre ieșire [2].

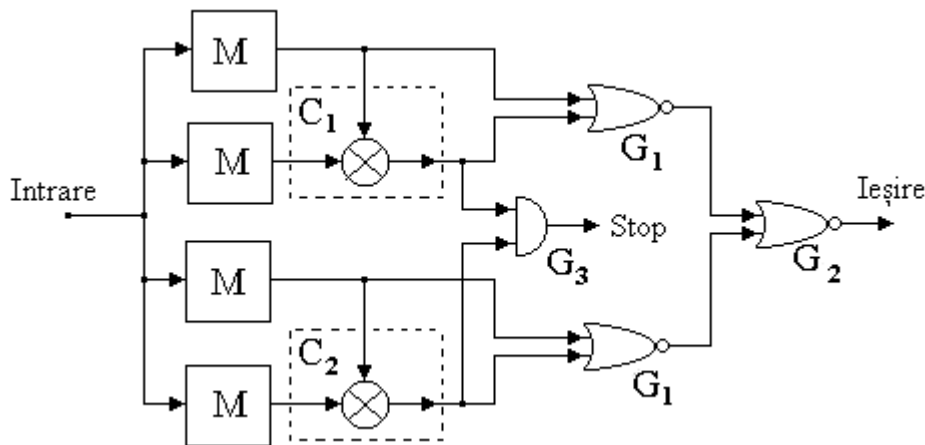


Fig.4.5. Structură tolerantă la defectări

Circuitele introduse suplimentar,  $C_1, C_2, G_1 \dots 3$  cu o structură simplă trebuie să aibă o fiabilitate foarte ridicată, astfel încât echipamentul obținut să fie de înaltă fiabilitate.

#### 4.3.1.1. Structura redundantă logică majoritară NMR –N Modular Redundancy

Această structură este implementată prin divizarea echipamentului neredundant în module funcționale, multiplicarea acestor module de  $N$  ori ( $N = 2 \cdot n - 1$ ,  $n=2, 3, \dots$ ) și introducerea între aceste module funcționale a unor module de decizie numite "votere", care funcționează după o logică majoritară.

Structura cea mai utilizată și cea mai simplă este structura redundantă logică majoritară de tip "2 din 3", cunoscută în literatura de specialitate sub numele de TMR (Triple Modular Redundancy), prezentată în figura 4.6.

Modulele  $M_1, M_2, M_3$  sunt identice din punct de vedere fizic și funcțional, având la intrare semnale identice  $I_1, I_2, I_3$ . Modulul de decizie format de voterul  $V$ , urmărește semnalele de ieșire  $E_1, E_2, E_3$  ale modulelor, ieșirea  $E_o$  fiind dată prin regula majorității. Dacă  $E_1 = E_2 = E_3$  atunci  $E_o$  va fi

egal cu acestea, iar pentru două semnale  $E_i, i = 1, 2, 3$  egale și al treilea diferit, semnalul de ieșire  $E_o$  va fi dat de cele două semnale identice.

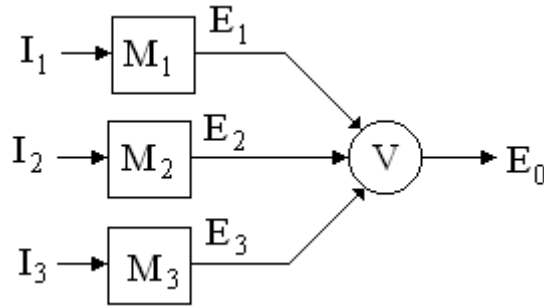


Fig. 4.6. Structura redundantă logică majoritară de tip "2 din 3".

Structura prezentată maschează defectarea unuia dintre modulele funcționale  $M$ , dar nu poate corecta mai mult de o eroare. Pentru a corecta două sau mai multe erori (defectări) este necesar să se crească gradul redundanței ("3 din 5", "4 din 7" etc).

Structura TMR asigură buna funcționare a echipamentului atât timp cât cel puțin două module funcționează corect. Generalizând pentru structura logică majoritară  $n$  din  $2 \cdot n - 1$ , se poate preciza că un astfel de echipament funcționează corect atât timp cât este asigurată buna funcționare a oricărei combinații de module cuprinsă între  $n$  și  $2 \cdot n - 1$ , celelalte module putând fi defecte. Este necesar, în plus, ca *blocul de decizie* (voterul) să fie în bună stare de funcționare. Funcția de fiabilitate pentru un astfel de echipament este dată de relația următoare:

$$R_{TMR}(t) = \left[ \sum_{j=n}^{2n-1} C_{2n-1}^j \cdot R(t)^j \cdot (1 - R(t))^{2n-1-j} \right] \cdot R_V(t) \quad (4.3)$$

unde  $R(t)$  este funcția de fiabilitate a unui modul funcțional, iar  $R_V(t)$  funcția de fiabilitate a voterului. Întrucât la nivelul voterului nu este tolerată nici o defectare, pentru îmbunătățirea performanțelor de fiabilitate se poate face o multiplicare a voterelor ca în figura 4.7.

Structura NMR se poate aplica global echipamentului sau la nivel de subsisteme / module funcționale.

O problemă deosebită în proiectarea echipamentelor ca structură redundantă logică majoritară este dimensiunea modulelor cărora li se aplică redundanța, aceasta putând varia de la un simplu circuit cu câteva

componente, până la întregul echipament. Complexitatea blocului de decizie (voter) este funcție de nivelul la care se aplică redundanța.

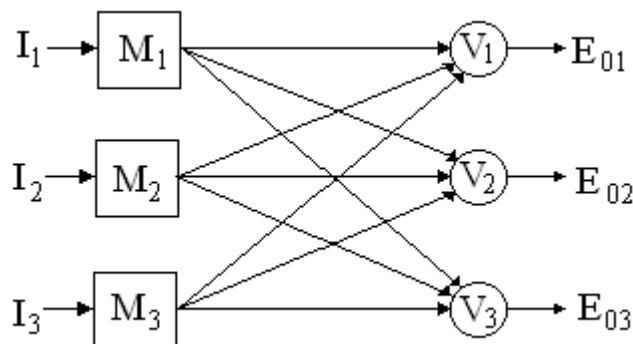


Fig.4.7.Structură redundantă cu multiplicarea voterelor.

O altă modalitate de creștere a fiabilității structurilor de tip TMR constă în introducerea unor detectoare de defecte ale modulelor, ceea ce permite identificarea automată a modulului defect și apoi înlocuirea acestuia cu un alt modul în stare de bună funcționare, echipamentul fiind readus la performanțele inițiale (figura 4.8).

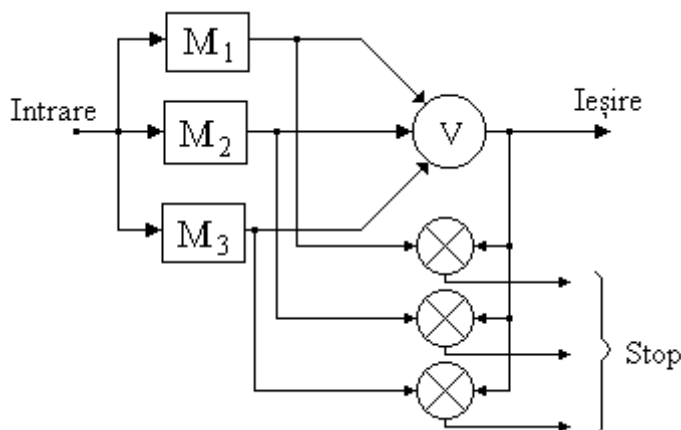


Figura 4.8. Structură TMR autotestabilă

O astfel de abordare este utilă pentru echipamentele ce permit acțiuni de mentenanță, oferind o disponibilitate foarte ridicată dacă remedierea primului defect se face în timp util, adică înaintea producerii unui nou defect care ar conduce la defectarea echipamentului.

În cazul echipamentelor de calcul reparabile, cu redundanță de tip logică majoritară, redundanța NMR se poate aplica la nivelul întregului calculator, voterul fiind introdus în sistemul de comunicații între calculatoare. O altă posibilitate constă în aplicarea redundanței la nivel de module mici - procesoare, unități de memorie, unități ce pot fi reparate individual, în acest caz voterul fiind situat pe traseul magistralelor interne ale echipamentului de calcul.



### 4.3.1.2. Structuri redundante statice cu logică cvadruplă

Acest tip de structură se aplică echipamentelor construite cu circuite logice și constă în multiplicarea de patru ori a circuitelor logice, conectate astfel încât semnalele eronate sunt mixate cu semnalele corecte provenite de la circuitele de rezervă, realizându-se astfel mascarea unui defect. Metoda se bazează pe proprietățile unor echipamente cu circuite logice de a masca intrinsec unele defectări de blocare în "1" sau "0".

Analizând schema din figura 4.11 se constată că o eroare la ieșirea porții  $SI_1$  se va propaga la ieșirea porții SAU dacă, combinațiile semnalelor la intrările porților  $SI_1$ ,  $SI_2$  nu sunt toate egale cu "1".

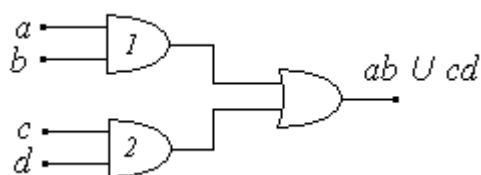


Fig. 4.11. Circuit logic neredundant care maschează unele defectări.

Dacă intrările sunt la "1" logic, atunci poarta  $SI_2$  maschează defectarea porții  $SI_1$ , semnalul de la ieșirea porții SAU apărând corect. Prin dublarea porților într-o rețea cu astfel de porți logice, după modelul din figura 4.11, se obține un echipament care tolerează defectările (figura 4.12). Eroarea apărută la ieșirea porții  $SI_1$  este corectată de poarta SAU prin mixarea semnalului eronat cu semnalul corect dat de poarta  $SI_2$ . Circuitul redundant cu logică cvadruplă este prezentat în figura 4.13.

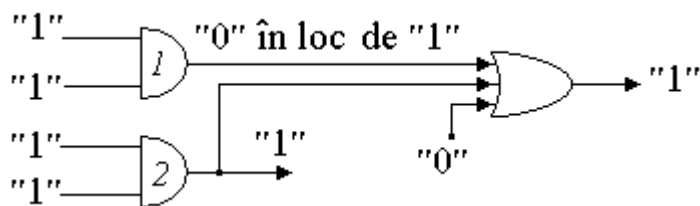


Fig. 4.12. Circuit logic redundant.

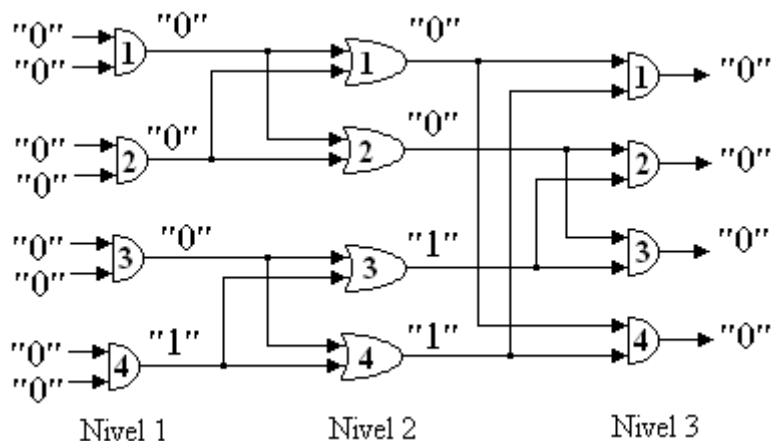


Fig. 4.13. Structură redundantă logică cvadruplă.

Erorile apărute la nivelul 1 sunt corectate instantaneu de logica circuitului la nivelul 2 pentru semnale "1" la intrare sau la nivelul 3 pentru semnale "0" la intrările porților  $SI_1 \dots SI_4$ .

#### 4.3.2. Structuri redundante dinamice

Aceste structuri redundante utilizează mai multe module identice din punct de vedere funcțional. Funcționarea echipamentului este asigurată utilizând numărul minim de module funcționale, celelalte module fiind în rezervă, dar urmând a fi conectate în structura echipamentului atunci când unul din modulele active se va defecta. Structurile de acest tip se mai numesc și *structuri redundante de comutație*.

Înlocuirea modului defect se face în mod automat cu unul de rezervă, decizia fiind luată de către un bloc de supraveghere care va comanda elementele de comutație după ce va identifica o defectare într-unul dintre modulele active. Prin înlocuirea automată a elementului defect cu unul bun, structura redundantă dinamică realizează un echipament autoreparabil. Acest tip de structură este indicat pentru echipamentele cu misiuni de lungă durată și la care intervenția operatorului uman pentru reparare nu este posibilă/permisă (ex. sateliți de telecomunicații, relee de transmisiuni izolate etc).

*Echipamentele reconfigurabile*, adică acelea care își modifică structura la apariția unei defectări, astfel încât echipamentul să poată funcționa în continuare dar cu o capacitate de operare redusă, prezintă tot o structură redundantă de tip dinamic (*Exemplu*: un sistem multiprocesor).

Cele două metode presupun existența unei proceduri automate de diagnoză, care va identifica o defectare în structura echipamentului urmată de localizarea acesteia la nivelul unui modul înlocuibil. De asemenea, este necesar să existe un comutator automat, care realizează înlocuirea modului defect cu unul în bună stare de funcționare sau efectuează reconfigurarea echipamentului.

Problema de bază pentru un echipament cu structură redundantă de comutație, constă în revenirea acestuia la starea de bună funcționare. Aceasta presupune detecția defectării și prevenirea propagării datelor eronate peste anumite limite geometrice și/sau controlul informațiilor obținute, autorepararea *hardware*-ului, dacă este necesar, reconstituirea informației afectate de eroare, reluarea funcționării la parametri nominali a echipamentului. Această structură se poate aplica cu ușurință

echipamentelor organizate modular. Modulele trebuie alese astfel încât să se poată diagnostica cu ușurință modulul defect.

În figura 4.14 este prezentat un echipament de calcul cu structură redundantă de comutație. Echipamentul format din unitățile *Procesor 1*, *Memorie 1* funcționează *on-line* iar cel format din *Procesor 2*, *Memorie 2* funcționează *off-line*. Utilizând aceleași resurse se poate realiza un echipament reconfigurabil, ca în figura 4.15. Inițial toate cele patru unități funcționează *on-line*, iar când una din unitățile *Procesor i* sau *Memorie i* ( $i=1,2$ ) se defectează, echipamentul își continuă funcționarea fără unitatea defectă, reconfigurându-se într-un echipament cu performanțe mai reduse, însă superioare unui echipament format dintr-un procesor și o memorie. Echipamentul se defectează dacă se defectează simultan două unități *Procesor i* sau *Memorie i* ( $i=1,2$ ). Acest tip de echipament necesită un *software* și un *hardware* complexe, dar prezintă performanțe de fiabilitate ridicate.

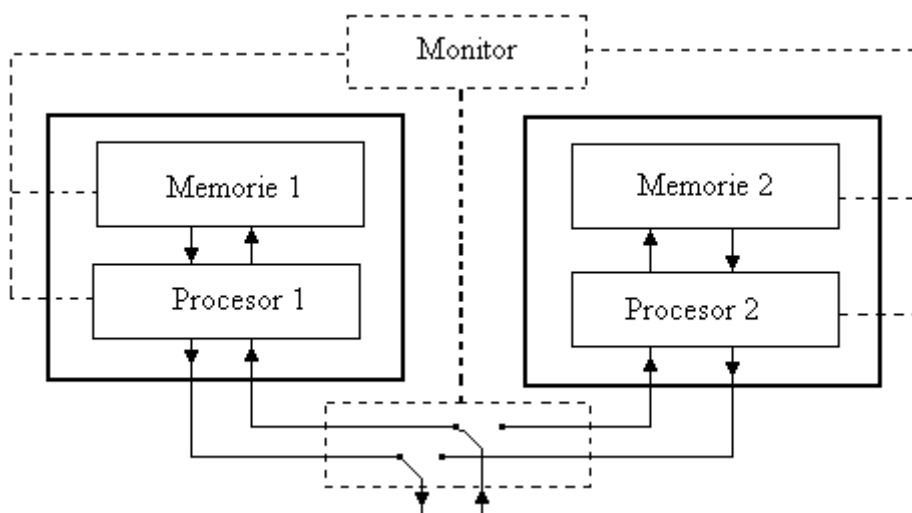


Fig. 4.14. Structură redundantă dinamică la nivel de echipament

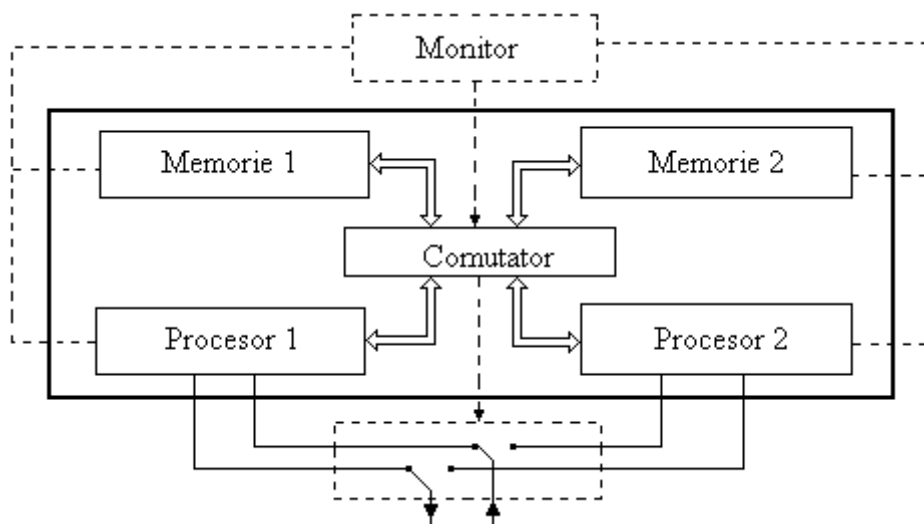


Fig. 4.15. Structură redundantă dinamică la nivel de modul.

### 4.3.2.1. Structuri redundante hibride

Aceste structuri îmbină caracteristicile structurilor redundante cu logică majoritară și cele ale structurilor de comutație. De la structura redundantă logică majoritară se preia mascarea instantanee a defectărilor, iar de la structura redundantă de comutație sunt preluate funcțiile de diagnosticare automată a defectărilor și de înlocuire a modului defect cu unul de rezervă. Schema reprezentativă a unei structuri de acest tip este prezentată în figura 4.16.

Structura are la bază un nucleu de  $2n-1$ ,  $n=2, 3, \dots$  module funcționale identice, conectate prin intermediul unei rețele de interconectare pentru a forma o structură logică majoritară de tip  $n$  din  $2n-1$  și un număr de  $r$  module de rezervă care urmează a fi conectate în momentul detecției unor defecțiuni la cele  $2n-1$  module funcționale.

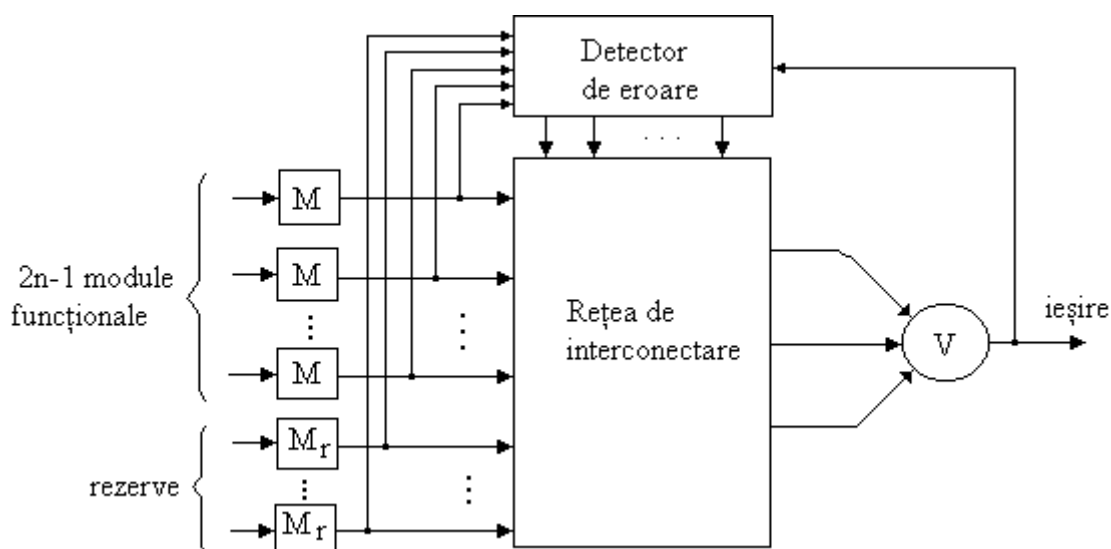


Fig. 4.16. Structură redundantă hibridă

Detectorul de eroare compară ieșirea voterului cu ieșirile celor  $2n-1$  module identice ale nucleului, evidențiind defectarea unui modul. Rețeaua de interconectare este astfel realizată încât deconectează modulul defect, introducând în locul acestuia o rezervă, atunci când una din cele  $2n-1$  ieșiri testate este eronată (este diferită de ieșirea voterului).

Această structură poate avea o fiabilitate foarte ridicată dacă echipamentul de interconectare, voterul și detectorul de eroare sunt foarte fiabile. Aceasta implică necesitatea implementării acestor componente utilizând structuri cât mai simple și cât mai fiabile.



#### 4.3.2.2. Structuri redundante pentru interconexiunile unui echipament

Pentru realizarea unui echipament de înaltă fiabilitate cu structură tolerantă la defectări, ale cărui elemente sunt protejate la apariția defectărilor prin tehnici de redundanță, este necesar ca și interconexiunile dintre elementele echipamentului să admită o toleranță la defectările posibile, chiar dacă, de regulă, ele sunt considerate mult mai fiabile decât celelalte elemente ale echipamentului. Acest lucru este în particular necesar pentru echipamentele care utilizează o *magistrală (bus)* comună de date între modulele sale [2].

Se pot distinge trei tipuri diferite, dar complementare, de structuri redundante ce pot fi utilizate în cazul *magistralelor* de date:

- *Structuri redundante de tip static*, când informația redundantă rezultată prin utilizarea codurilor detectoare și corectoare de erori este transmisă pe linii de date redundante. Redundanța apare ca intrinsecă, iar defectările sunt mascate prin utilizarea tehnicilor de corecție a erorilor.
- *Structuri redundante de tip dinamic*, care necesită utilizarea unor circuite de detecție a defectărilor pe linie, evidențiind liniile defecte și înlocuindu-le cu linii de rezervă, cu ajutorul unor circuite de comutație specifice. Se obține astfel autorepararea sau reconfigurarea echipamentului în vederea tolerării defectărilor.
- *Structura redundantă distribuită*, care este o redundanță topologică intrinsecă a sistemului de linii de informație, permițând o tolerare perfectă a defectărilor prin utilizarea unor rute alternante. Totuși, aceasta conduce la o oarecare reducere a performanțelor de operare ale echipamentului, prin introducerea unor întârzieri în propagarea informațiilor.

Primele două structuri sunt comune cu structurile redundante aplicate modulelor funcționale, iar a treia este tipică pentru sistemele de interconectare a echipamentelor/modulelor.

*Exemplu:* Structură redundantă dinamică aplicată BUS-urilor de date [2].

O abordare posibilă pentru implementarea acestei structuri redundante este considerarea celor  $l$  linii de informație a unui *bus* de date, ca  $l$  module funcționale, cărora li se aplică tehnicile clasice de redundanță pentru

protecție la defectări. Această abordare este incomodă din cauza numărului mare de linii cerute. Dacă se prevăd  $k$  linii de rezervă și se cere ca fiecare linie activă să fie înlocuită de oricare dintre cele  $k$  rezerve, atunci comutatoarele ce asigură reconfigurarea vor trebui să aibă caracteristici de *fan-in*, *fan-out* și de putere excesive. Dacă însă se cere celor  $l$  linii de informație  $l_j$  să fie conectate la una dintre liniile de bus  $B_j, B_{j+1}, B_{j+k}$ , va rezulta un sistem de comutație mai simplu.

Creșterea de fiabilitate în cele două cazuri este aceeași dar cerințele de *fan-in*, *fan-out* și putere sunt reduse de la  $l$  în primul caz, la  $k$  în cel de-al doilea, unde  $l$  este de regulă cu un ordin de mărime mai mare decât  $k$ .

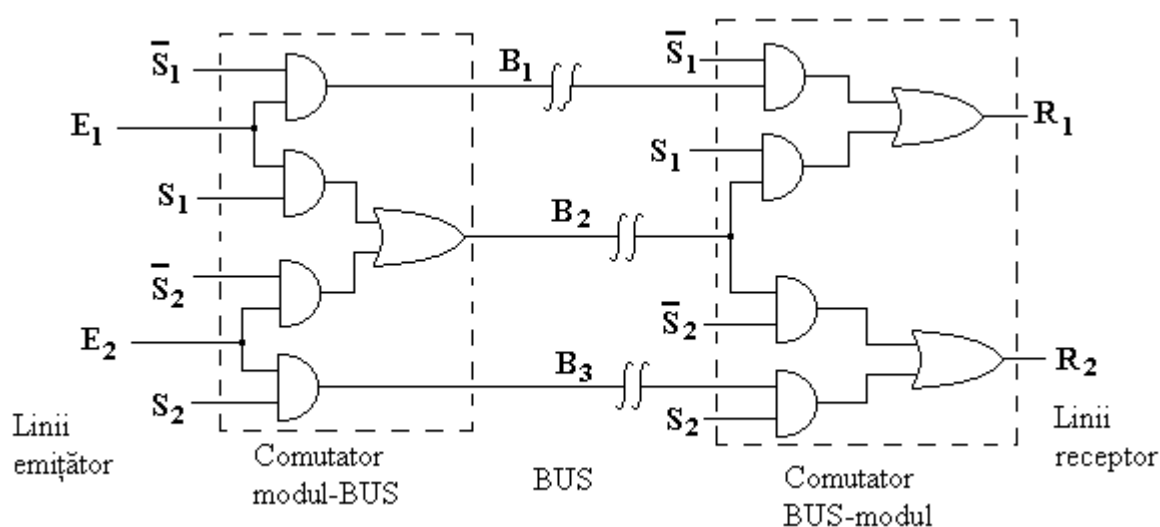


Fig. 4.17. Structură redundantă dinamică aplicată unui BUS de date

Informația este transmisă de la cele două linii  $E_1, E_2$  ale unui modul emițător la un modul receptor, cu liniile  $R_1, R_2$ . Conectarea liniilor emițătorului, respectiv receptorului la liniile magistralei de comunicație se face prin intermediul unor comutatoare (modul-BUS, BUS-modul). Pentru a se obține o structură tolerantă la defectări se prevede o linie de rezervă, astfel încât fiecare linie de informație va avea două stări.

Aceste două stări vor fi memorate de un registru al stărilor *bus-ului*, care în acest caz poate fi implementat cu un circuit basculant bistabil. Comutatorul modul-BUS va comuta linia de informație  $E_1$  la linia de bus  $B_1$  sau  $B_2$ , iar linia de informație  $E_2$  la bus  $B_2$  sau  $B_3$ , în funcție de starea de defect detectată.

Stări		Linie bus neconectată
$S_1$	$S_2$	
0	0	$B_3$
0	1	$B_2$
1	1	$B_1$

Un defect al circuitelor basculante bistabile poate conduce la defectarea întregului echipament. O soluție este aplicarea de redundanțe pentru aceste circuite, ceea ce conduce însă la o structură mai complicată și mai costisitoare, cu cerințe de *fan-in*, *fan-out* mai mari, dar cu o fiabilitate mai ridicată.

<http://electrokits.ro>