T S C
CURSUL 8

Generarea automata a testelor independent de defecte.

8.0 Introducere.

Scopul algoritmilor orientati pe defecte este generarea unui test specific unui defect precizat. Pentru a genera un set de defecte pentru un circuit, un astfel de algoritm trebuie utilizat în contextul utilizarii unor proceduri de:
-determinare a setului initial de defecte (de interes);
-selectie a unui defect tinta;
-actualizare a setului curent de defecte înca nerezolvate;

In cele ce urmeaza ne vom concentra atentia asupra descrierii unor algoritmi care, independent de defecte sa calculeze un set de vectori de test capabili sa detecteze o multime larga de DBS fara sa nominalizeze individual vreun defect.

8.1 Testarea prin vectori generati aleator (TVGA) a circuitelor combinationale.

Aspecte fundamentale.

TVGA nu este un proces pur aleator de generare a vectorilor de intrare pentru circuitul aflat în test ci mai degraba un proces pseudoaleator. Aceasta înseamna ca vectorii sunt generati printr-un proces deterministic (algoritmic) astfel încât acestia sa continue sa aiba proprietati statistice similare celor generati (teoretic) aleator.

Principalul avantaj al TVGA este usurinta de generare a vectorilor. Principalul dezavantaj al metodei este lungimea mult mai mare (de regula de 10 ori mai mare decât în cazul procedeelor algoritmice) a secventei de test, daca se pastreaza parametrii de testare constanti (acelasi circuit, acelasi set de defecte considerate, aceeasi acoperire a setului de defecte etc). Se naste problema fireasca a evaluarii calitatii unui set de teste obtinut prin generare aleatoare a vectorilor, deoarece metodele de evaluare clasica - prin simulare - devin prea costisitoare pentru circuite de complexitate si volum ridicat, aceeasi ratiune pentru care dealtfel s-a apelat la procedeul aleator de generare a testelor. In cele ce urmeaza vom analiza metodele statistice de estimare a calitatii unui set de teste în baza probabilitatilor de detectie a defectelor fata de vectorii aleatori de test aplicati. O problema conexa, celei deja enuntate, este determinarea numarului de vectori generati aleator astfel încât sa se atinga o anumita calitate (precizata) a testului.

Initial vom presupune ca *vectorii de intrare sunt uniform distribuiti*, adica fiecare dintre cei 2^n vectori posibili de intrare într-un circuit combinational (CC) cu n linii primare de intrare (LPI) au aceeasi probabilitate de generare. Aceasta înseamna ca fiecare LPI are probabilitate egala de a lua valoarea 1 sau 0. Vom presupune deasemenea ca *vectorii de intrare sunt independent generati*. Aceasta înseamna ca acelasi vector poate apare de mai multe ori într-o secventa generata aleator. Totusi cele mai multe generatoare de vectori, practic folosite ca generatoare aleatoare, functioneaza astfel încât un vector o data generat nu se mai repeta în secventa. Aceasta proprietate conduce la seturi de test cu lungime mai mica decât cele calculate în ipoteza de independenta a vectorilor.

8.2 Calitatea unui test aleator.

Calitatea unui set de teste generate aleator va exprima *nivelul de încredere* pe care-l putem acorda interpretarii rezultatelor obtinute în urma aplicarii respectivului set de teste. In mod evident, daca cel putin un test aplicat dovedeste o proasta functionare a circuitului testat, atunci circuitul respectiv este defect, fara nici un dubiu. Dar daca toate testele trec, cât de încrezatori putem fi ca în adevar circuitul este liber de defecte? (Prin circuit liber de defecte se întelege ca respectivul circuit nu prezinta nici un defect singular de tip blocaj (DSTB) detectabil.) Acest nivel de încredere poate fi masurat prin probabilitatea ca testele aplicate sa detecteze orice DSTB detectabil. Astfel pentru o secventa de test de lungime L, definim *calitatea testarii* t_L ca fiind probabilitatea ca toate DSTB detectabile sa fie detectate prin aplicarea a L vectori generati aleator. Cu alte cuvinte, t_L este probabilitatea ca L vectori generati aleator sa contina un set complet de teste pentru DSTB detectabile.

O maniera diferita de masurare a nivelului de încredere în rezultatul unei testari aleatoare este considerarea individuala a defectelor. Anume, daca toate cele L teste trec, cât de încrezatori putem fi ca respectivul circuit nu contine un anumit defect d ? Aceasta se poate masura prin probabilitatea p^d_L ca d sa fie detectat (cel putin odata) prin aplicarea celor L vectori aleatori; p^d_L se numeste *probabilitatea de detectie, în L încercari, a defectului d* . Calitatea detectiei p_L a unei secvente de test de lungime L este *probabilitatea de detectie, în L incercari, cea mai mica printre DSTB* :

$$p_L = min\ (\ p^d_L\ ) \qquad (81)$$

Diferenta dintre calitatea testarii t_L si calitatea detectiei p_L unei secvente de test de lungime L este ca t_L este probabilitatea detectarii oricarui defect, în timp ce p_L este probabilitatea detectarii defectului cel mai dificil de detectat. De remarcat faptul ca: $t_L < p_L$.

8.3. Lungimea unui test aleator.

In continuare vom considera problema determinarii lungimii L a unui test astfel încât sa se atinga un nivel de încredere cel putin egal cu c. De regula c se coreleaza cu calitatea detectiei, asa ca L este ales astfel încât sa satisfaca conditia:

$$p_L > c \qquad (82)$$

Aceasta se justifica prin aceea ca o secventa de test suficient de lunga ca sa detecteze cu probabilitatea c cel mai dificil defect din circuit, va detecta orice alt defect cu o probabilitate:

$$p^d_L > c. \qquad (83)$$

Probabilitatea e^d_L *de scapare dupa L incercari* a defectului d este probabilitatea ca defectul d sa ramâna nedetectat dupa aplicarea celor L vectori aleator generati. Evident:

$$p^d_L + e^d_L = 1 \qquad (84)$$

Fie T_d multimea tuturor vectorilor de test ce detecteaza defectul d într-un circuit combinational C cu n LPI. Atunci probabilitatea

p_d ca un vector aleator sa detecteze d este data de relatia:

$$p_d = | T_d | / 2^n \qquad (8.5)$$

Aceasta este p^d_1 probabilitatea de detectie într-o încercare a defectului d; vom numi aceasta probabilitate ca fiind *probabilitatea de detectie* a defectului d. Probabilitatea ca d sa ramâna nedetectat dupa aplicarea unui unic vector este:

$$e^d_1 = 1 - p_d. \qquad (8.6)$$

Din cauza faptului ca vectorii sunt generati independent probabilitatea de scapare a defectului d dupa L încercari este

$$e^d_L = (1 - p_d)^L \qquad (8.7)$$

Fie p_{min} cea mai mica probabilitate de detectie printre DSTB detectabile din circuit. Atunci, pentru a atinge o calitate a testului cel putin egala cu c, trebuie un test cu o lungime L care sa satisfaca relatia:

$$1 - (1 - p_{min})^L > c. \qquad (8.8)$$

Cea mai mica valoare a lui L care satisface aceasta inegalitate este data de :

$$L_d = E[\, ln(1-c) \, / \, ln(1-p_{min}) \,] + 1. \qquad (8.9)$$

(E[x] reprezinta notatia pentru partea întreaga a lui x.)
Pentru valori $p_{min} << 1$, $ln(1-p_{min})$ se poate aproxima prin $-p_{min}$. Acest calcul al lungimii secventei aleatoare de test presupune cunoscuta probabilitatea de detectie p_{min} a celui mai dificil defect din circuit. In paragraful urmator vor fi discutate metode de calcul a probabilitatilor de detectie a defectelor.

Daca nivelul cerut de încredere c este corelat calitatii testarii (în loc sa fie corelat calitatii detectiei), atunci L este ales astfel încât :

$$t_L > c. \qquad (8.10)$$

A fost dedusa urmatoarea formula pentru estimarea unei margini superioare a celei mai mici valori a lungimii testului L ce satisface o calitate a testarii cu valoare cel putin c:

$$L_t = E[\, (ln(1-c) - ln(k) \,) / ln(1-p_{min}) \,] \qquad (8.11)$$

unde k este numarul de defecte a caror probabilitate este în intervalul $[d_{min}, 2d_{min}]$. Defectele a caror probabilitate de detectie este $2d_{min}$ sau mai mare nu afecteaza în mod semnificativ lungimea testului.

Exemplul 8.1. In tabelul 8.1 sunt listate câteva valori pentru L_d si L_t pentru diferite valori ale parametrilor c si k pentru un circuit în care p_{min} = 0,01 . Spre exemplu, pentru a detecta orice defect cu o probabilitate de cel putin 0,95 este necesar sa se aplice cel putin L_d=300 vectori generati aleator. Daca circuitul are numai k=2 defecte dificil de detectat (adica au o probabilitate de detectie în intervalul [0,01 , 0,02]), simultan prezente, atunci sunt necesari sa fie aplicati cel putin L_t=369 vectori pentru a atinge o probabilitate minima de 0,95 de detectie a oricarui defect. Pentru p_{min}=0,001 toate valorile pentru L_d si L_t din tabelul 8.1 se multiplica cu 10.

c	L_d	k	L_t
0,95	300	2	369
0,95	300	10	530
0,98	392	2	461
0,98	392	10	622

Tabelul 8.1

8.3 Determinarea probabilitatilor de detectie.

Asa cum am vazut pentru a estima lungimea unei secvente de test generat aleator care sa atinga o calitate specificata a calitatii detectiei, este necesara cunoasterea probabilitatii de de detectie minime corespunzatoare defectului cel mai dificil de detectat din circuit. In plus, pentru a estima lungimea necesara pentru satisfacerea unei calitati precizate a testarii, este necesar sa cunoastem numarul k al defectelor a caror probabilitate de detectie este apropiata de p_{min}. In acest paragraf vom examina problema determinarii probabilitatii de detectie a defectelor.

O margine inferioara a probabilitatii p_{min}

Lema 8.1. Intr-un CC cu iesiri multiple, fie n' cel mai mare numar de LPI ce alimenteaza o LPE. Atunci :

$$p_{min} > 1/2^{n'}. \qquad \text{(~~7.12~~) 8.12}$$

Demonstratie: Fie d un DSTB detectabil dintr-un CC cu n LPI. Exista cel putin un test ce detecteaza d astfel încât o LPE, sa zicem, Z_k sa fie în eroare. Fie n_k numarul de LPI ce alimenteaza Z_k. Deoarece valorile celorlalte $n - n_k$ LPI sunt irelevante pentru detectia defectului d la LPE Z_k, atunci exista cel putin 2^j vectori ce detecteaza d (unde s-a notat $j = n - n_k$). Rezulta ca probabilitatea de detectie a defectului d este cel putin $2^j/2^n$. Limita inferioara se obtine pentru LPE cu cele mai multe LPI.

Din nefericire limita inferioara data de lema enuntata an-terior este de cele mai multe ori prea joasa; prin folosirea acestei valori pentru p_{min} se obtine de regula o lungime a sec-ventei de test $L_d > 2^n$, ceea ce înseamna ca sunt necesari pentru testarea aleatoare mai multi vectori decât pentru testarea exhaustiva.

Probabilitati de detectie bazate pe probabilitatile liniilor de semnal.

Probabilitatea unei linii de semnal w sau pe scurt probabilitatea unui semnal w notata prin p_w este definita ca fiind probabilitatea ca linia w sa ia valoare 1 în cazul aplicarii unui vector aleator:

$$p_w = Pr(w = 1). \qquad (8.1\cancel{4}) \ 8.13$$

Exista o relatie evidenta între probabilitatea semnalului unei LPE si probabilitatile de detectie a DSTB asociate acestei linii. Mai exact, probabilitatea de detectie a unui defect b-l-c situat pe o LPE Z este p_z pentru $c = 0$ si $1 - p_z$ pentru $c = 1$. Vom ilustra relatia generala dintre probabilitatile semnalelor si probabilitatile de detectie referitor la Figura 8.1. Sa presupunem ca într-un CC cu iesire unica exista numai o singura cale între linia w si LPE. Fie d defectul w b-l-0. Un vector ce detecteaza d trebuie sa aduca $w = 1$ si deasemenea sa pozitioneze toate celelalte linii la valorile necesare pentru a senzitiviza calea de propagare a erorii (A=1, B=0 etc). Pentru a lua în consideratie acest set de conditii vom introduce o poarta auxiliara de tip SI numita G astfel încât G = 1 daca si numai daca toate conditiile de detectie a defectului d sunt îndeplinite. Astfel daca $x = v$ este o conditie necesara pentru detectia defectului d, atunci x este direct conectat la G daca

$v=1$ sau printr-un circuit NU daca $v=0$. In consecinta probabilitatea de detectie a defectului d este data de probabilitatea semnalului de la iesirea portii G din circuitul suplimentat:

$$p_d = p_G. \qquad (8.1\cancel{5})\ 4$$

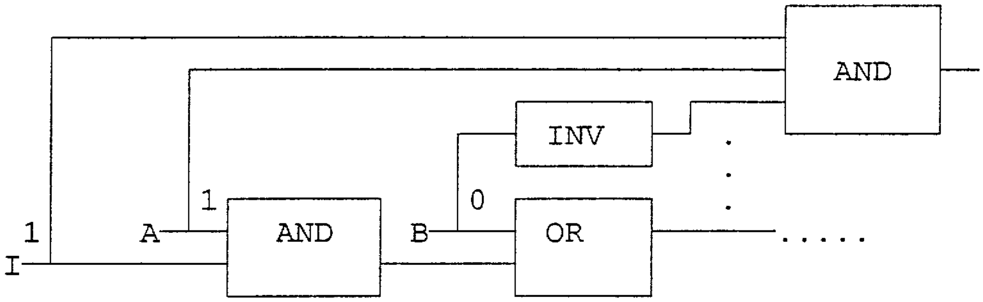

Figura 8.1.

In general pot exista mai multe cai pe care se poate propaga catre o LPE, o eroare cauzata de un defect d. Atunci probabilitatea detectarii defectului d propagând o eroare numai pe una din aceste cai este evident o limita inferioara a probabilitatii de detectie a respectivului defect. Notând cu G(k) poarta auxiliara asociata celei de-a k-a cai de propagare, avem relatia:

$$p_d > p_{G(k)}. \qquad (8.\cancel{16})\ 8.15$$

Astfel probabilitatile semnalelor pot fi utilizate pentru calculul probabilitatilor de detectie sau pentru calculul unor limite inferioare ale acestor probabilitati. Deoarece probabilitatile LPI sunt în general cunoscute (pâna în prezent s-a presupus ca fiecare LPI i, are valoarea p_i=1/2), sa consideram problema calcularii p_Z pentru o LPE Z a unei porti, atunci când se cunosc probabilitatile p_X asociate oricarei LPI X a portii.

Lema 8.2. Pentru un circuit inversor (NU) cu iesirea Z si intrarea X:

$$p_Z = 1 - p_X. \qquad (8.\cancel{17})\ 16$$

Demonstratie:

$$p_Z = Pr(Z=1) = Pr(X=0) = 1-p_X.$$

Lema 8.3. Pentru o poarta SI cu iesirea Z si intrarile X si Y, daca X si Y nu depind de LPI comune (adica X si Y sunt independente probabilistic), atunci:

$$p_Z = p_X \cdot p_Y . \qquad (8.\cancel{18})\ 17$$

Demonstratie:

$$p_Z = Pr(Z=1) = Pr(X=1 \ \&\ Y=1)$$

Deoarece X si Y nu depind de LPI comune, atunci evenimentele X=1 si Y=1 sunt independente probabilistic. Astfel :

$$p_Z = Pr(X=1)Pr(y=1) = p_X p_Y .$$

Lema 8.4. Pentru o poarta SAU cu iesirea Z si intrarile X,Y, daca X si Y nu depind de LPI comune, atunci:

$$p_Z = p_X + p_Y - p_X p_Y . \qquad (8.18)$$

Demonstratie:

$$p_Z = 1 - Pr(Z=0) = 1 - Pr(X=0 \ \&\ Y=0)$$

Deoarece evenimentele X = 0 si y=0 sunt independente:

$$p_Z = 1 - Pr(X=0)Pr(Y=0) = 1 - (1 - p_X)(1 - p_Y) =$$
$$= p_X + p_Y - p_X p_Y .$$

Se observa ca formulele 8.18 - 8.19 se pot generaliza pentru porti cu mai mult decât doua intrari. Deasemenea o poarta SI-NU (SAU-NU) poate fi tratata ca o poarta SI (SAU) urmata de un inversor. In concluzie putem calcula probabilitatile semnalelor în orice circuit în care intrarile aceleiasi porti nu depind de LPI comune; acestea sunt circuitele fara ramificatii si circuitele fara ramificatii reconvergente. Timpul necesar pentru calculul tuturor probabilitatilor semnalelor în astfel de circuite creste liniar cu numarul de porti din circuit.

Sa consideram un circuit C ce contine o linie de circuit, notata A, ramificata reconvergent. Fie Z un semnal ce depinde de A. Folosind probabilitatile conditionate, putem exprima p_Z astfel:

$$Pr(Z=1) = Pr(Z=1 \mid A=0)\,Pr(A=0)+Pr(Z=1 \mid A=1)\,Pr(a=0)$$

sau $p_Z = Pr(Z=1 \mid A=0)(1-p_A)+Pr(Z=1 \mid A=1)p_A$ (8.~~20~~ 10)

Ultima formula pote fi interpretata astfel:

Sa construim doua circuite, C^0 si C^1 obtinute din circuitul original C prin pozitionarea permanenta a liniei A în valoarea 0 respectiv în 1. Atunci $Pr(Z=1 \mid A=0)$ este evident p_Z calculat în circuitul C_0 iar $Pr(Z=1 \mid A=1)$ este clar p_Z calculat în circuitul C^1. Rezultatul acestei interpretari este acela ca atât C^0 cât si C^1 sunt circuite fara ramificatie reconvergenta asa ca acestora li se pot aplica rezultatele lemelor enuntate anterior.

De remarcat ca daca generalizam abordarea anterioara pentru un circuit continând j linii ramificate reconvergent, atunci pentru fiecare linie ramificata reconvergent avem de calculat si memorat 2^j probabilitati semnal. Aceasta crestere exponentiala face acest tip de abordare nepractica pentru circuite cu complexitate mare. In literatura de specialitate sunt descrise si alte metode de calcul exact al probabilitatilor semnalelor dar toate ridica aceeasi problema a cresterii exponentiale a complexitatii calculului.

Algoritmul *taieturilor* reduce complexitatea calculului prin calculul unui interval $[p_w^I\ ,\ p_w^S]$ în locul unei valori exacte a valorii probabilitatii semnalului p_w, astfel încât p_w apartine intervalului mai înainte mentionat. Procedeul de baza al acestui algoritm consta din taierea a k-1 ramuri ale unei linii ramificate cu k bransari; ramurile taiate devin LPI cu probabilitati de semnal necunoscute si asociate intervalului [0, 1].

Taieturile sunt practicate numai asupra liniilor ramificate reconvergente. Circuitul rezultat este lipsit de ramificatii reconvergente si în consecinta probabilitatile semnalelor sunt usor de calculat. Ori de câte ori apar intervale pe linii calculele se fac separat pentru fiecare din cele doua capete de interval.

Gasirea celor mai dificile defecte

In mod uzual lungimea unei secvente de test L_{max} este limitata de factori colaterali ai procesului de testare, cum ar fi timpul maxim alocat pentru experimentul de testare s.a.m.d.

Data o lungime a secventei de test L_{max} si o calitate a detectiei c, din cele aratate anterior putem deduce limita inferioara p_L a probabilitatii de detectie a oricarui defect din circuit. Cu alte cuvinte daca $p_d > p_L$ pentru fiecare defect d, atunci testarea cicuitului cu L_{max} vectori generati aleator va atinge o calitate a detectiei cel putin egala cu c.

Atunci, dat un circuit ne intereseaza daca acesta contine defecte "dificile", adica defecte a caror probabilitate de detectie este mai mica decât p_L.

Rezultatul urmator arata ca defectele cele mai dificile, daca exista, se gasesc printre defectele punctelor de verificare ale circuitului.

Lema 8.5 Intr-un circuit defectul cu cea mai mica probabilitate de detectie, este unul dintre defectele punctelor de verificare.

Demonstratie: Pentru orice defect *d* situat pe o linie ce nu este punct de verificare (linie ramificata sau LPI), putem sa gasim cel putin un defect *f* asociat unui punct de verificare, astfel încât *d* domina *f*. Astfel numarul de teste ce detecteaza *f* este mai mic sau egal cu numarul de teste ce detecteaza *d*. Deci $p_d < p_f$.

In continuare este prezentata o procedura de determinare a celor mai dificile defecte aplicând practic ideile prezentate anterior:

for every defect *d* al punctelor de verificare
    begin
        repeat
            begin
                alege o cale de propagare înca neevaluata *P* pentru *d*;
                introdu G o poarta auxiliara SI a.î. p_G este probabilitatea de detectie a defectului *d* pe calea *P*;
                calculeaza p^L_G, marginea inferioara a p_G;
            end
        until $p^L_G > p_L$ **or** s-au analizat toate caile de propagare;
        if $p^L_G < p_L$ **then** marcheaza defectul *d* ca fiind dificil;
    end

De remarcat ca în algoritmul enuntat sunt analizate doar propagarile pe cai unice. Un defect ce poate fi detectat numai prin senzitivizarea unor cai multiple poate fi marcat ca fiind dificil. Defectele liniilor redundante vor fi deasemenea printre defectele dificile. O data defectele dificile identificate se pot opera modificari în structura respectivului circuit astfel încât probabilitatile de detectie sa devina acceptabile.

8.4. TVGA având distributii neuniforme ale LPI

Expunerea de pâna acum a presupus asa cum s-a enuntat initial o distributie uniforma a vectorilor de intrare generati aleator. Aceasta însemna ca orice LPI *i* avea probabilitatea p_i=0,5. Aceasta distributie uniforma nu este totusi în mod necesar si optimala; adica alte valori ale probabilitatilor p_i pot conduce la secvente de test mult mai scurte. S-a aratat, spre exemplu, ca pentru circuite fara ramificatii compuse din porti SI-NU cu numar constant de intrari (n), valoarea optimala p_{opt} a probabilitatilor p_i este data de solutia pozitiva si subunitara a ecuatiei:

$$p_i = 1 - p_i^n$$

Pentru n = 2, p_{opt} = 0,617. Circuite de tipul celui mentionat cu 10 nivele ar necesita aproximativ 8 000 de vectori generati aleator pentru a atinge o calitate a detectiei 0,99 folosind p_i

= 0,5, în timp ce folosind p_{opt} aceeasi calitate a detectiei se obtine cu circa 700 de vectori generati aleator. Rezultate experimentale similare au aratat ca distributii neuniforme au condus la secvente mai scurte de vectori aleatori chiar si pentru circuite combinationale oarecari. O abordare înca si mai buna a problemei se obtine daca LPI au valori diferite ale probabilitatilor p_i. Astfel de vectori aleatori sunt numiti ponderati sau polarizati.

Metode *adaptive* de TVGA modifica dinamic valorile probabilitatilor p_i încercând sa atinga valori "optimale". Astfel de proces necesita un mecanism de adaptare bazat pe monitorizarea procesului de TVGA pentru determinarea vectorilor aleatori "potriviti".

O metoda este dirijarea vectorilor aleatori prin numarul de defecte detectat. Se masoara frecventa valorilor 1 asupra LPI peste multimea testelor ce au detectat cele mai multe defecte si valorile probabilitatilor p_i sunt ajustate corespunzator acestor frecvente.

Exista si alte metode, bazate pe alte principii, cum ar fi masurarea activitatii induse de schimbarea valorilor LPI, sau calcularea unei functii cost ce se încearca a fi minimizata prin modificarea probabilitatilor LPI etc.

8.5 Generarea testelor într-o maniera combinata

Deoarece TVGA este mult dependenta de modelul intern al circuitului, defectele ce au probabilitati mici de detectie necesita secvente lungi de test pentru detectia acestora. Dar unele dintre aceste defecte pot fi detectate cu usurinta daca se foloseste un algoritm deterministic. Spre exemplu, sa consideram o poarta SI cu 10 intrari. Probabilitatea oricarui defect al unei intrari este 1/1024 < 0,001 ceea ce reprezinta, totusi, o valoare mica. Sa observam însa, ca generarea testelor pentru aceste defecte este o problema simpla pentru oricare algoritm de generare deterministica a testelor.

Sistemul **RAPS** (Random Path Sensitization) este un exemplu posibil de aplicare combinata a celor doua maniere de abordare a problemei generarii testelor. Sistemul RAPS încearca sa creeze cai aleatoare critice între LPI si LPE. Initial toate valorile liniilor sunt x. Sistemul demareaza prin alegerea aleatoare a unei LPE Z si a unei valori binare v. Apoi obiectivul (Z,v) este transformat într-o asociere de valori a LPI (i, v_i) printr-o procedura aleatoare de trasare înapoi (random backtrace) numita Rbacktrace. Procedura Rbacktrace este similara cu rutina Backtrace folosita în algoritmul PODEM exceptând faptul ca alegerea unei intrari de poarta se face aleator. (In algoritmul PODEM aceasta alegere este dirijata prin costurile de controlabilitate.) Asocierea $i = v_i$ este apoi simulata (folosind o simulare cu 3 valori 0, 1 si x), si procesul se repeta pâna când valoarea asociata LPE Z devine binara. Dupa ce toate LPE au asociate valori binare, o faza secundara a RAPS asociaza valori acelor LPI cu valoare x (daca exista vreuna), astfel încât probabilitatea crearii de cai critice sa creasca. Intreaga procedura se repeta pentru a genera atâtea teste câte sunt necesare. In fiecare test sunt posibile generari de noi cai critice prin circuit .