

WOJCIECH TOCZEK

Katedra Miernictwa Elektronicznego Wydziału Elektroniki Telekomunikacji
i Informatyki Politechniki Gdańskiej

ZASTOSOWANIE DEKOMPOZYCJI HIERARCHICZNEJ DO KOMPUTEROWO WSPOMAGANEJ DIAGNOSTYKI UKŁADÓW ANALOGOWYCH

Praca stanowi kolejną pozycję z cyklu poświęconego systemowo zorientowanym metodom diagnostyki układów analogowych. Przedmiotem pracy jest alternatywne, w stosunku do metod weryfikacyjnych [1], podejście do problemu lokalizacji uszkodzeń za pomocą ograniczonej liczby pomiarów napięć węzłowych, oparte na koncepcji węzłowej dekompozycji układu. Artykuł zawiera podstawy teoretyczne metody dekompozycyjnej, przykład zastosowania oraz wyniki badań wpływu tolerancji elementów nieuszkodzonych na skuteczność metody.

1. WPROWADZENIE

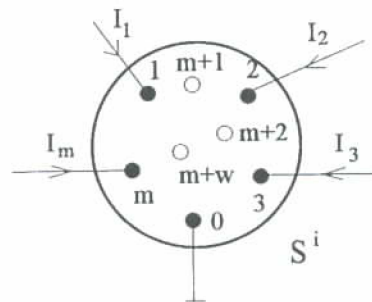
W artykule [1] uzasadniono zapotrzebowanie na systemowo zorientowane metody wyszukiwania uszkodzeń w analogowych układach elektronicznych, funkcjonujące w warunkach ograniczonego dostępu pomiarowego do węzłów wewnętrznych oraz przedstawiono metody działające na zasadzie weryfikacji układów równań diagnostycznych, z zastosowaniem testu liniowej zależności wektora wyrazów wolnych i macierzy układu równań. Niniejsza praca jest kontynuacją prezentowanej w [1] problematyki i dotyczy alternatywnego podejścia do diagnostyki uszkodzeń za pomocą ograniczonej liczby pomiarów napięć węzłowych, wykorzystującego dekompozycję hierarchiczną diagnozowanego obwodu oraz kryteria testowe oparte na prądowym prawie Kirchhoffa [2–11].

Istota metody dekompozycyjnej polega na poszukiwaniu uszkodzenia wzdłuż struktury drzewiastej, utworzonej przez wirtualny podział diagnozowanego obwodu na coraz mniejsze podobwody. Podstawą oceny podobwodów są wyniki pomiarów napięć w węzłach podziału. Bieżąca analiza komputerowa tych wyników decyduje, na podstawie kryteriów testowych, o kolejnych krokach na niższych poziomach dekompozycji. Znaczna część obwodu nie wymaga pomiarów, ponieważ jest kwalifikowana jako pozbawiona uszkodzeń. W rezultacie, uszkodzenie jest lokalizowane szybko, z pominięciem znacznej liczby pomiarów wewnątrzobwodowych wymaganych przez inne metody. Zastosowanie dekompozycji hierarchicznej jest uzasadnione w diagnostyce złożonych układów o dużej liczbie węzłów. Metoda diagnostyczna, oparta na tej

Diagnozowany układ jest korzeniem drzewa (elementem drzewa na zerowym poziomie dekompozycji), podobwód niedekomponowalny głębiej jest liściem drzewa. Każdy element drzewa posiada numer składający się z dwu liczb. Pierwsza liczba określa poziom dekompozycji, druga liczba – numer podobwodu na danym poziomie, wzrastający od lewego do prawego. Taka indeksacja umożliwia łatwe obliczanie, za pomocą formuł algebraicznych, numerów potomków i przodków poszczególnych elementów drzewa.

2.2. Równania podobwodów

Rozważmy podobwód S_i połączony z resztą układu w $m_i + 1$ węzłach podziału, jak pokazano na rys. 3. Węzły wyodrębniające (ciemne punkty) są dostępne pomiarowo i ich potencjały są znane, w pozostałych w_i węzłach wewnętrznych (jasne punkty) potencjałów nie zmierzono.



Rys. 3. Podobwód S^i : ciemne punkty oznaczają węzły wyodrębniające, jasne punkty – węzły wewnętrzne

Zakładamy, że podobwód może być opisany, wynikającym z prądowego prawa Kirchhoffa, macierzowym równaniem węzłowym, w którym wiersze i kolumny uporządkowano według kryterium dostępu pomiarowego

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{m_i m_i} & \mathbf{Y}_{m_i w_i} \\ \mathbf{Y}_{w_i m_i} & \mathbf{Y}_{w_i w_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{m_i} \\ \mathbf{e}_{w_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{m_i} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

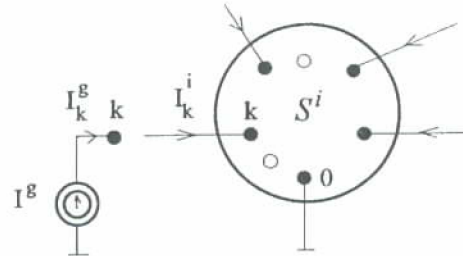
gdzie: $\mathbf{Y}$ jest macierzą admitancji węzłowych, $\mathbf{e}_{m_i} = [e_1, e_2, \dots, e_m]^T$ jest wektorem obejmującym potencjały węzłów zewnętrznych, $\mathbf{e}_{w_i} = [e_{m+1}, e_{m+2}, \dots, e_{m+w}]^T$ jest wektorem potencjałów węzłów wewnętrznych, $\mathbf{i}_{m_i}$ jest wektorem prądów wpływających do podobwodu z zewnątrz.

Jeżeli podmacierz $\mathbf{Y}_{w_i w_i}$ jest nieosobliwa, to eliminując z (1) potencjały węzłów wewnętrznych, można obliczyć prądy wpływające do podobwodu przez m_i węzłów wyodrębniających

$$\mathbf{i}_{m_i} = (\mathbf{Y}_{m_i m_i} - \mathbf{Y}_{m_i w_i} \mathbf{Y}_{w_i w_i}^{-1} \mathbf{Y}_{w_i m_i}) \mathbf{e}_{m_i}. \quad (2)$$

2.3. Kryteria testowe

Kryteria testowe, oparte na prądowym prawie Kirchhoffa, służą do określania statusów węzłów. W zależności od liczby podobwodów zaangażowanych w danym teście, stosowane jest kryterium testowe własne lub wzajemne. Własne kryterium testowe jest przydatne w sytuacji przedstawionej na rys. 4, gdzie testowany węzeł k jest incydentny z jednym podobwodem i znany prąd I_k^g dopływający do tego węzła.



Rys. 4. Przykład zastosowania własnego kryterium testowego

Znany prąd I_k^g , gdzie k – numer węzła, może być:

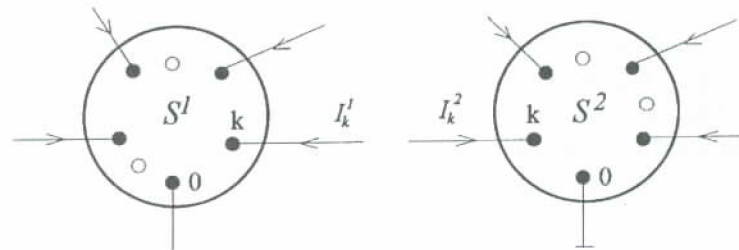
- zmierzonym prądem źródła, lub obciążenia,
- obliczonym prądem dopływającym do S^i z podobwodu, który w wyniku uprzednio przeprowadzonych testów, uznano za pozbawiony uszkodzeń.

Niech I_k^i , gdzie i – numer podobwodu, oznacza prąd wpływający do wyodrębnionego podobwodu S^i przez testowany węzeł, obliczony według wzoru (2) na podstawie pomierzonych potencjałów węzłowych i znanych, nominalnych wartości parametrów elementów. Własne kryterium testowe ma postać

$$|I_k^g - I_k^i| < \varepsilon_k^p, \quad (3)$$

gdzie ε_k^p (p – poziom dekompozycji) jest wartością progową, wynikającą z tolerancji elementów i wyznaczoną dla danego węzła, na poziomie dekompozycji p .

Wzajemne kryterium testowe dotyczy sytuacji przedstawionej na rys. 5, gdzie testowany jest węzeł k , incydentny z dwoma podobwodami, dla których można obliczyć prądy I_k^i zakładając „rozerwanie” węzła podziału.



Rys. 5. Przykład zastosowania wzajemnego kryterium testowego

Wzajemne kryterium testowe ma postać

$$\left| \sum_{i=1}^2 I_k^i \right| < \varepsilon_k^p \quad (4)$$

W wyniku testów, węzłom wyodrębniającym podobwody przyporządkowywane są statusy. Węzeł uzyskuje status poprawnego – „0”, w przypadku spełnienia jednej z nierówności (3) lub (4). Gdy suma obliczonych prądów wykracza poza wartość progową ε_k^p , węzłowi nadawany jest status „1”, oznaczający uszkodzenie.

2.4. Algorytm lokalizacji uszkodzonych podobwodów

Na podstawie dotychczasowych rozważań, można sformułować następujący algorytm lokalizacji uszkodzonych podobwodów:

Krok 1. Sporządź plan dekompozycji diagnozowanego obwodu na najmniejsze możliwe podobwody, dzieląc obwód w węzłach dostępnych pomiarowo.

Krok 2. Zmierz potencjały w węzłach wyodrębniających podobwody na bieżącym poziomie dekompozycji.

Krok 3. Oblicz prądy wpływające do podobwodów przez węzły wyodrębniające.

Krok 4. Za pomocą kryteriów testowych (3) i (4), określ statusy węzłów.

Krok 5. Wypracuj diagnozę stosując metodę rozpoznawania wzorców uszkodzeń.

Krok 6. Jeżeli uszkodzony podobwód jest liściem drzewa dekompozycji, zatrzymaj proces, w przeciwnym wypadku, powtórz kroki 2–6 realizując plan dekompozycji na głębszych poziomach.

Diagnoza dotycząca uszkodzonych podobwodów (Krok 5) może być realizowana drogą analizy logicznej wyników testów [8]. W niniejszej pracy zastosowano metodę rozpoznawania wzorców uszkodzeń. Metoda opiera się na zero-jedynkowej macierzy, formowanej na każdym poziomie dekompozycji. Dla pierwszego poziomu dekompozycji, według planu z rys. 2, macierz wzorców uszkodzeń posiada postać

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} w_1 \\ w_4 \\ w_7 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}, \text{ gdzie} \quad \begin{matrix} 1 - S^1 \\ 2 - S^2 \\ 3 - S^1 \vee S^2 \\ 4 - \bar{S}^1 \wedge \bar{S}^2 \end{matrix} \quad (5)$$

Wiersze macierzy (5) odpowiadają węzłom wyodrębniającym podobwody, natomiast kolumny poszczególnym przypadkom uszkodzeń. W pierwszej i drugiej kolumnie macierzy wyraz (i, j) ma wartość 1 jeżeli i -ty węzeł wyodrębnia j -ty podobwód, trzecia kolumna jest wynikiem sumowania logicznego dwóch pierwszych kolumn i odpowiada przypadkowi podwójnego uszkodzenia, czwarta kolumna (wszystkie elementy zerowe) odpowiada sytuacji braku uszkodzenia jakiegokolwiek podobwodu. Wypracowanie diagnozy polega na porównaniu wektora statusów węzłów kolejno z wektorami kolumnowymi macierzy wzorców, w celu znalezienia identycznego wzoru jaki tworzą zera i jedynki.

3. PRZYKŁAD

Rozważmy przypadek układu idealizowanego (bez tolerancji), przedstawionego na rys. 1 i pochodzącego z pracy [9]. Znamionowe wartości elementów układu wynoszą: $G1=1.5$, $G2=1.8$, $G3=2$, $G4=0.5$, $G5=2.6$, $G6=1.2$, $G7=3$, $G8=1.3$, $G9=2.3$, $G10=3.1$, $G11=2.9$, $G12=0.8$, $I1=2$, $I7=1$. Załóżmy, że w układzie występuje jeden uszkodzony element $G7$, którego parametr uległ dewiacji z wartości 3 do 2. Realizując algorytm lokalizacji uszkodzeń, zgodnie z planem dekompozycji układu przedstawionym na rys. 2, otrzymujemy wyniki zamieszczone w Tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki lokalizacji uszkodzenia w układzie z rys. 1

Poziom dekompozycji	Numer węzła	Znane prądy I_k^g	Obliczone prądy wpływające do podobwodów		Wynik obliczenia kryterium testowego	Status węzła
			$S^{1,1}$	$S^{1,2}$		
1	1	$I_1^g=2$	$I_1^{1,1}=2.000$	—	0	0
	4	0	$I_4^{1,1}=-0.700$	$I_4^{1,2}=0.596$	$10.486E-2$	1
	7	$I_7^g=1$	—	$I_7^{1,2}=1.028$	$2.844E-2$	1
			$S^{2,3}$	$S^{2,4}$		
2	4	$I_4^g=-I_4^{1,1}$	$I_4^{2,3}=0.748$	$I_4^{2,4}=-0.162$	$11.512E-2$	1
	6	0	$I_6^{2,3}=0.911$	$I_6^{2,4}=-0.837$	$7.355E-2$	1
	7	$I_7^g=1$	—	$I_7^{2,4}=0.999$	$1.192E-7$	0
			$S^{3,5}$	$S^{3,6}$		
3	4	$I_4^g=-I_4^{1,1}-I_4^{2,4}$	$I_4^{3,5}=0.652$	—	$21.106E-2$	1
	5	0	$I_5^{3,5}=0.175$	$I_5^{3,6}=0.035$	$21.106E-2$	1
	6	$I_6^g=-I_6^{2,4}$	—	$I_6^{3,6}=0.837$	$5.960E-8$	0
			$S^{4,9}$	$S^{4,10}$		
4	4	$I_4^g=-I_4^{1,1}-I_4^{2,4}$	$I_4^{4,9}=0.652$	—	$21.106E-2$	1
	5	$I_5^g=-I_5^{3,6}$	$I_5^{4,9}=-0.211$	$I_5^{4,10}=0.386$	$21.106E-2$	1

Dekompozycja układu na pierwszym poziomie polega na wyodrębnieniu podobwodów $S^{1,1}$ i $S^{1,2}$. Na tym etapie procedury diagnostycznej mierzone są trzy potencjały w węzłach wyodrębniających: $e1=1.700$ V, $e4=0.367$ V, $e7=0.570$ V, służące do obliczenia prądów wpływających do podobwodów, które z kolei, pozwalają określić statusy węzłów, za pomocą kryteriów testowych. Własne kryterium testowe, zastosowane do węzła nr 1, wskazuje, że węzeł ten jest nieuszkodzony – posiada status „0”. Natomiast dwa pozostałe węzły są uszkodzone i posiadają statusy „1”. Wyniki te wskazują, że podobwód $S^{1,1}$ jest poprawny, zaś $S^{1,2}$ uszkodzony.

Na drugim poziomie dekompozycji, testowane są podobwody $S^{2,3}$ i $S^{2,4}$. Do sprawdzenia podobwodu $S^{2,3}$ użyto prądu $I_4^g=-I_4^{1,1}$, obliczonego dla podobwodu $S^{1,1}$, uznanego, na poprzednim etapie procedury, za poprawny. Dokonano pomiaru

potencjału w węźle podziału nr 6 ($e_6 = 0.282$ V). Wyniki testów wskazują na uszkodzenie podobwołu $S^{2,3}$.

Podobwód $S^{2,3}$ jest dekomponowany głębiej na $S^{3,5}$ i $S^{3,6}$. Test tych podobwodów wymaga pomiaru potencjału w węźle nr 5 ($e_5 = 0.297$ V). Wynik testów – uszkodzony podobwód $S^{3,5}$.

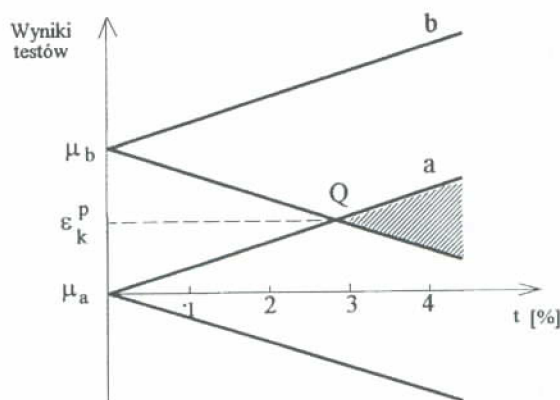
Podobwód $S^{3,5}$ jest dekomponowany na $S^{4,9}$ i $S^{4,10}$. Wyniki testów nie są w tym przypadku jednoznaczne, wskazują na uszkodzenie podobwołu $S^{4,9}$ nie wykluczając jednak jednoczesnego uszkodzenia podobwołu $S^{4,10}$, dla którego dalsze testy nie są możliwe ponieważ jest to liść drzewa dekompozycji. Wobec tego, rezultatem procedury może być tylko diagnoza uzyskana na trzecim poziomie dekompozycji – uszkodzenie $S^{3,5}$. Uszkodzony element G7 należy do podobwołu $S^{3,5}$, a zatem diagnoza jest prawidłowa.

Do lokalizacji uszkodzonego podobwołu wykonano, łącznie, pomiary w 70% węzłów układu. Stosując dekompozycję hierarchiczną uzyskano więc 30% redukcję liczby pomiarów w stosunku do metod z pełnym dostępem pomiarowym. Ten stosunkowo mały zysk wynika z niewielkich rozmiarów diagnozowanego obwodu.

4. PROBLEM TOLERANCJI

W przykładzie zamieszczonym w poprzednim rozdziale, nieuszkodzone elementy diagnozowanego układu miały wartości nominalne. W tych warunkach, ustalenie statusu węzłów nie przedstawiało trudności, ponieważ wartości progowe ϵ_k^p kryteriów testowych (3) i (4) wynikały jedynie z błędów zaokrągleń obliczeń komputerowych. W praktyce, elementy nieuszkodzone mają z góry założone tolerancje i kluczowym zagadnieniem metody staje się określenie wartości progowych dla kryteriów testowych, umożliwiających prawidłowe ustalenie statusów węzłów w warunkach tolerancji elementów nieuszkodzonych. Zadanie to, dotyczące każdego węzła dekompozycji diagnozowanego obwodu, może być zrealizowane metodą komputerowej symulacji statystycznej, tzw. metodą Monte Carlo. Polega ona na generowaniu pseudolosowych wartości elementów, analizie układu i realizacji testów. Po zadanej liczbie powtórzeń, estymowane są statystyczne właściwości wyników testów dla określonych węzłów. Estymowana jest wartość średnia oraz wariancja wyników testów, zrealizowanych dla zaprogramowanej liczby losowań wartości elementów, według równomiernego rozkładu prawdopodobieństwa.

Jeżeli za miarę rozproszenia wyników testów wokół średniej μ przyjąć 3-krotne odchylenie standardowe $\pm 3\sigma$, to dla określonego węzła k i określonego uszkodzenia, otrzymamy wykres w postaci widełek tolerancji, przedstawiony na rys. 6. Na rysunku tym, widełki (a) dotyczą podobwołu poprawnego, widełki (b), położone powyżej, podobwołu uszkodzonego. Położenie wyniku testu poza obszarem zakreślowanym stwarza możliwość jednoznacznej kwalifikacji węzła. Znalezienie się wyniku w obszarze zakreślowanym powoduje niewykrywalność uszkodzenia, ponieważ jego efekt kompensują odchyłki (z przedziałów tolerancji) elementów nieuszkodzonych. Na podstawie wykresu można wyznaczyć taką wartość progową ϵ_k^p , która



Rys. 6. Wyznaczenie wartości progowej dla kryterium testowego metodą Monte Carlo: widełki tolerancji dla podobowodu poprawnego (a), widełki tolerancji dla podobowodu uszkodzonego (b)

zapewnia najszerszy zakres dopuszczalnych tolerancji w diagnozowanym obwodzie. Wartość ta jest równa rzędnej punktu Q przecięcia widełek tolerancji dla obwodu poprawnego i uszkodzonego. Odcięta punktu Q odpowiada granicy dopuszczalnych tolerancji.

5. PODSUMOWANIE

Podstawową zaletą przedstawionej metody diagnostycznej jest jej efektywność, w sensie nakładu pomiarowego i obliczeniowego, w zastosowaniu do dużych układów. Natomiast podstawowym problemem metody jest maskowanie uszkodzeń przez dopuszczalne odchyłki parametrów elementów spowodowane tolerancjami. W trakcie symulacyjnych badań odporności metody na wpływ tolerancji elementów, poczyniono następujące spostrzeżenia:

- Granica dopuszczalnego przedziału tolerancji, przy którym możliwa jest właściwa klasyfikacja statusu węzła, sukcesywnie rozszerza się wraz z głębokością poziomu dekompozycji. Wynika to ze zmniejszania się wymiarów diagnozowanego podobowodu zawierającego uszkodzony element.

- Węzły położone bliżej uszkodzonego elementu charakteryzuje większa wartość średnia wyników testów, a tym samym większy zakres dopuszczalnych tolerancji. Jest to spowodowane zależnością wrażliwości napięć węzłowych od wzajemnej lokalizacji węzła i uszkodzenia.

Wpływ tolerancji na skuteczność metody zależy także od wielu innych czynników, między innymi: zakresu zmian parametrów uszkodzonych elementów, wzajemnego stosunku wartości parametrów elementów diagnozowanego obwodu oraz od zakresu dostępu pomiarowego do węzłów wewnętrznych. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że metoda może być skuteczna w zakresie do kilku (3–5) % tolerancji elementów nieuszkodzonych. Jest to, z praktycznego punktu widzenia, wartość zbyt mała. Dalsze prace powinny być prowadzone w kierunku poszukiwania kryteriów testowych bardziej odpornych na tolerancje.

LITERATURA

1. Toczek W.: *Weryfikacyjne metody pomiarowo-diagnostyczne układów analogowych z ograniczonym dostępem*, Metrologia i systemy pomiarowe, Tom III Zeszyt 1, 1996.
2. Chen Y.: *Experiment on Fault Location in Large-Scale Analog Circuits*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1993, vol. 42, no. 1, s. 30–34.
3. Hatzopoulos A.A., Kontoleon J.M.: *A new analog fault diagnosis procedure based on the branch decomposition technique*, ECCTD'87, 1987, s. 411–416.
4. Fan L., Luo X.: *Location of faulty subnetworks in analog network*, IEEE Int. Symp. Circuits Syst. Proc., 1988, s. 929–932.
5. Lin P.M., Hassoun M.M.: *Most General Characterization of Linear N-Terminal Components*, IEEE Int. Symp. Circuits Syst. Proc., 1990, s. 2413–2416.
6. Ozawa T., Bandler J.W., Salama A.E.: *D diagnosability in the Decomposition Approach for Fault Location in Large Analog Networks*, IEEE Transactions on Circuit and Systems, 1985, vol. CAS-32, no. 4, s. 415–416.
7. Starzyk J., Dai H.: *Fault diagnosis and calibration of large analog circuits*, IEEE Int. Symp. Circuits Syst. Proc., 1988, s. 14–944.
8. Salama A.E., Starzyk J.A., Bandler J.W.: *A unified decomposition approach for fault location in large analog circuits*, IEEE Transaction on Circuits and Systems, 1984, vol. CAS-31, no. 7, s. 609–621.
9. Jiang B.L., Wey C.L.: *Fault prediction process for large analogue circuit networks*, International Journal of Circuit Theory and Applications, 1989, vol. 17, s. 141–149.
10. Dai H., Starzyk J.A.: *A decomposition approach for parameter identification in large scale networks*, IEEE Int. Symp. Circuits Syst. Proc., 1990, s. 2409–2412.
11. Ozawa T.: *Analog Methods for Computer-Aided Circuit Analysis and Diagnosis*, Marcel Dekker, New York, 1988, s. 365–380.

DECOMPOSITION APPROACH FOR COMPUTER AIDED FAULT LOCATION
IN ANALOG CIRCUITS

Summary

The paper deals with the problem of fault location in analog circuits. A nodal decomposition of the whole circuit under test into smaller subnetworks is carried out. The voltage measurements in the nodes of decomposition are employed to isolate the faults. The method of isolation is based on checking the consistency of KCL in the decomposed circuit. The faults are localized to within the smallest possible subnetworks not to the component level. Both the on-line computations and measurements are keeping within an acceptable limit. The off-line computation involves the analysis of the nominal circuit only. The approach is applicable to large analog linear circuits. The description of the diagnosis procedure and the computer simulation results are given.