

Jerzy RUTKOWSKI

Instytut Elektroniki  
Politechniki Śląskiej

## DIAGNOZOWALNOŚĆ PRAKTYCZNYCH ANALOGOWYCH UKŁADÓW ELEKTRONICZNYCH

**Streszczenie.** Praca poświęcona jest problemowi diagnozowalności układu przy zastosowaniu metod lokalizacji uszkodzeń bazujących na sprawdzaniu zgodności I prawa Kirchhoffa. Dokonano porównania metody Salamy zmodyfikowanej przez Ozawę oraz metody Rutkowskiego - Macury, wykazując wyższość tej drugiej. Przedstawiono metodę wyznaczania regionu uszkodzeń wykrywalnych.

## DIAGNOSABILITY OF PRACTICAL ANALOG NETWORKS

**Summary.** Diagnosability of practical analog networks using fault location methods based on checking the consistency of KCL is investigated. Salama method modified by Ozawa and Rutkowski - Macura's method are compared. Superiority of the latter one is demonstrated. The method for determining regions of detectable faults is also presented.

## DIAGNOSTIZIERBARKEIT DER PRAKTISCHEN ELEKTRONISCHEN ANALOGSCHALTUNGEN

**Zusammenfassung.** Es ist das Ziel dieses Beitrages, die Problematik der Diagnostizierbarkeit eines Netzwerkes mit den auf der Überprüfung der Übereinstimmung mit der Kirchhoffschen Stromregel basierenden Fehlerortbestimmungsmethoden zu untersuchen. Es wurde die vom Ozawa modifizierte Salama - Methode mit Rutkowski - Macura - Methode verglichen, wobei die Überlegenheit der letzten bewiesen wurde. Es wurde ebenfalls eine Methode zur Bereichsbestimmung der nachweisbaren Fehler für Einzelfehler vorgestellt.

### 1. Wstęp

W tym samym czasie, w roku 1984, Salama [1] oraz Rutkowski i Macura [2] przedstawili skuteczną technikę lokalizacji uszkodzeń w układach analogowych. Otwarty pozostał problem diagnozowalności układu, tj. problem określenia, czy przy

zadanych pomiarach możliwa jest lokalizacja wszystkich uszkodzeń o krotności  $k$ . Technika opiera się na sprawdzaniu zgodności I prawa Kirchhoffa w węzłach dostępnych pomiarowo. W metodzie Salamy zakłada się, że jeśli element jest uszkodzony, to zostanie to wykryte we wszystkich węzłach, z którymi jest on połączony. Zakłada się, że w przypadku spełnienia I prawa Kirchhoffa (dla nominalnych wartości parametrów i zmierzonych potencjałów) w węzle  $c$  wszystkie elementy połączone z tym węzłem są nie uszkodzone, wynik testu dla tego węzła  $t_c = 0$ . W przeciwnym przypadku zakłada się, że przynajmniej jeden element połączony z węzłem  $c$  jest uszkodzony, wynik testu  $t_c = 1$ . Modyfikacja tej metody do obwodów praktycznych, tj. obwodów, których parametry przyjmują przypadkowe wartości z przedziału tolerancji, została przedstawiona w pracy [3]. Zdarzyć się może, że jeden z prądów dopływających do węzła  $c$  jest znacznie mniejszy od pozostałych prądów dopływających do tego węzła. Jeśli taki mały prąd zmieni swą wartość bardzo znacznie w związku z uszkodzeniem elementu, to w praktycznym obwodzie zmiana ta zamaskowana zostanie tolerancjami innych elementów połączonych z węzłem  $c$  (uszkodzenie w tym węzle nie zostanie wykryte). Na problem ten zwrócono uwagę w pracach [3], [7] i [8], a zostanie on szerzej omówiony w punkcie 2. Metoda przedstawiona w pracach [2] i [6] uwzględnia tolerancje projektowe elementów. W metodzie tej, w każdym dostępnym pomiarowo węzle  $c$  obliczany jest prąd niezrównoważenia  $f_c^n$  oraz jego dewiacja związana z istnieniem tolerancji:

$$f_c^n = \sum_{j_c} i_j^n \quad (1)$$

$$df_c = \sum_{j_c} \left| \partial i_j / \partial G_j \right|^n \Delta G_j$$

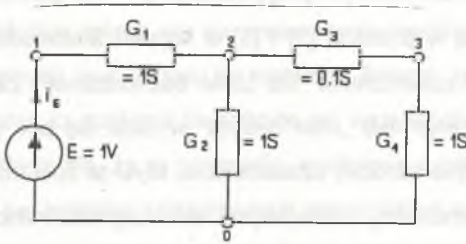
Sprawdza się, czy równanie I prawa Kirchhoffa może zostać spełnione dla wartości parametrów z przedziałów tolerancji. Jeśli jest to możliwe, tzn. jeśli

$$\left| f_c^n \right| \leq df_c \quad (2)$$

to wynik testu:  $t_c = \phi$   $\equiv$  „brak decyzji”, w przeciwnym przypadku  $t_c = 1$   $\equiv$  „jest uszkodzenie”. W metodzie przedstawionej w pracach [1] i [3] w wyniku testowania węzła  $c$  podejmowana jest decyzja „jest uszkodzenie” lub „brak uszkodzenia”. Zaproponowana klasyfikacja: „jest uszkodzenie” lub „brak decyzji” wydaje się być w przypadku praktycznych obwodów znacznie bardziej uzasadniona. Myśl ta zostanie rozwinięta w następnym punkcie, gdzie omówiony zostanie problem diagnozowalności uszkodzeń w praktycznych układach. W punkcie 3. przedstawiona zostanie prosta metoda wyznaczania obszaru uszkodzeń nie wykrywalnych w węźle testowym  $c$ .

## 2. Diagnozowalność

Diagnozowalność uszkodzeń przy użyciu metod testujących I prawo Kirchhoffa przedyskutowano najpierw dla idealnych obwodów w pracy [4], następnie dla praktycznych obwodów w pracy [3]. Mówi się, że obwód  $N$  jest  $k$ -diagnozowalny, jeśli przy założeniu co najwyżej  $k$  uszkodzeń wszystkie one mogą zostać zlokalizowane. Wprowadzona zostanie macierz diagnostyczna  $D = [D_1 D_2 \dots D_k]$ . Wiersze tej macierzy odpowiadają poszczególnym węzłom testowym. Kolumny macierzy  $D_1$  odpowiadają pojedynczym uszkodzeniom, kolumny  $D_2$  odpowiadają uszkodzeniom podwójnym, itd. Element  $d_{cj}$  macierzy  $D_1$  równy jest 1, jeśli  $j$ -ty element jest testowany w węźle  $c$ , w przeciwnym wypadku jego wartość wynosi 0. Dla  $k > 1$  kolumny macierzy  $D_k$  stanowią sumy logiczne  $k$  kolumny macierzy  $D_1$ . Zatem, obwód  $N$  jest  $k$ -diagnozowalny wtedy i tylko wtedy, gdy wszystkie kolumny macierzy diagnostycznej  $D$  są różne. Ta definicja zakłada, że wszystkie możliwe uszkodzenia wykrywalne są w węźle testowym  $c$ . Założenie to jest prawdziwe tylko dla obwodów idealnych. Jeśli wziąć pod uwagę tolerancje projektowe, to powyższe założenie przestaje być prawdziwe.



Rys. 1. Obwód z przykładu 1  
Fig. 1. Network of example 1

**Przykład 1.** Rozważony zostanie prosty obwód pochodzący z pracy [3], a przedstawiony na rysunku 1. Założono, że wszystkie węzły są dostępne pomiarowo oraz że mierzony jest prąd źródła  $i_E$ . Tolerancje projektowe konduktancji wynoszą  $\varepsilon = 10\%$ . Macierze  $D_1$  i  $D_2$  przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Macierze  $D_1$  i  $D_2$  oraz wektor  $T$  dla przykładu 1

c	T	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$	$G_1G_2$	$G_1G_3$	$G_1G_4$	$G_2G_3$	$G_2G_4$	$G_3G_4$
0	$\phi$	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1
1	$\phi$	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
2	$\phi$	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
3	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1

Przy założeniu że wszystkie uszkodzenia elementów mogą zostać wykryte we wszystkich węzłach, z jakimi te elementy są połączone, diagnozowalność przykładowego obwodu wynosi  $k = 1$ , ponieważ nie ma dwóch takich samych kolumn w podmacierzy  $D_1$ , a w macierzy  $D_2$  występują identyczne kolumny. Po obliczeniu wszystkich nominalnych prądów  $i_j^n$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) oraz ich odchyłek spowodowanych tolerancjami  $d_j$  stwierdzić można, że prąd  $i_3^n = 43,6$  mA jest znacznie mniejszy od dwóch pozostałych prądów dopływających do węzła 2. Prąd ten jest nawet mniejszy od odchyłek  $d_{i_1} = 52,2$  mA oraz  $d_{i_2} = 47,8$  mA. Zatem spodziewać się należy tego, że uszkodzenie  $G_3$  nie zostanie wykryte w węźle 2. Podobnie oczekiwać należy, że uszkodzenie  $G_4$  nie zostanie wykryte w węźle 0.

Ozawa proponuje nieuwzględnianie przy testowaniu węzła c elementów z małymi prądami nominalnymi [3]. Połączenie elementu z węzłem c nie jest brane pod uwa-

gę, jeśli jego prąd nominalny jest mniejszy od  $m_c d f_c$ , gdzie  $0 < m_c \leq 1$  jest założonym współczynnikiem. W konsekwencji macierz diagnostyczna jest modyfikowana, tzn. w odpowiednim miejscu wpisywane jest 0 zamiast 1. To podejście zakłada, że wszystkie możliwe uszkodzenia takiego elementu nie są diagnozowalne w węźle  $c$ , co nie jest prawdą. W przykładowym obwodzie zwarcie  $G_3$  lub znaczne uszkodzenie parametryczne w tym kierunku zostaną jednak wykryte w węźle 2. W heurystycznym algorytmie przedstawionym w pracy [3], przy założeniu pojedynczego uszkodzenia, obliczane są odległości Hamminga pomiędzy wektorem wyników testów  $T = [t_1, \dots, t_c, \dots, t_N]^t$  ( $N$  jest liczbą węzłów testowych) a kolumnami zmodyfikowanej macierzy diagnostycznej i na tej podstawie wyznaczane jest najbardziej prawdopodobne uszkodzenie. W wyniku takiego podejścia można dojść do błędnej diagnozy, tzn. uszkodzony element może zostać uznany za nie uszkodzony lub odwrotnie. Ta druga ewentualność wydaje się być szczególnie niebezpieczna. W proponowanej metodzie wektor  $T$  porównywalny jest z kolumnami niezmodyfikowanej macierzy diagnostycznej. Dla każdej kolumny obliczana jest odległość

$$a_j = \sum_{c=0}^N (t_c + d_{cj}) \quad (3)$$

gdzie:  $1 + 1 = 0$ ,  $1 + 0 = 1$ ,  $\phi + 1 = 0$ ,  $\phi + 0 = 0$ . Kolumny, dla których odległość  $a_j = 0$ , wskażą uszkodzone elementy. Diagnoza może okazać się nieprecyzyjna, tzn. w wyniku zastosowania metody może zostać wskazany jedynie zbiór elementów podejrzanych o uszkodzenie. Sytuacja taka będzie miała miejsce, gdy dla dwóch kolumn podmacierzy  $D_1$  odległość  $a_j = a_k = 0$ . Z drugiej strony nigdy się nie zdarzy, by element nie uszkodzony uznany został za uszkodzony (co najwyżej może się on znaleźć w zbiorze elementów podejrzanych o uszkodzenie). W przykładowym obwodzie, jeśli uszkodzony jest element  $G_3$ , a jego wartość wynosi np.  $0,2S$ , to otrzymamy wektor wyników testów jak w drugiej kolumnie tabeli 1. Odległości pomiędzy tym wektorem a kolumnami macierzy  $D_1$  wynoszą:  $a_1 = 1$ ,  $a_2 = 1$ ,  $a_3 = 0$ ,  $a_4 = 1$ , tzn. stwierdzone zostanie, że uszkodzony jest albo element  $G_3$ , albo element  $G_4$ .

W przypadku gdy interesuje nas diagnozowalność obwodu, należy przede wszystkim odpowiedzieć na pytanie: czy dla praktycznych obwodów możliwe jest

określenie jednej macierzy diagnostycznej, ważnej dla wszystkich możliwych uszkodzeń elementów obwodu? Oczywiście, nie jest to możliwe. Można jedynie określić macierz diagnostyczną dla pewnej klasy uszkodzeń. Jak wspomniano wcześniej, problemów oczekiwać należy w przypadku, gdy prąd jednego z elementów połączonych z węzłem  $c$  jest znacznie mniejszy od pozostałych prądów dopływających do tego węzła. Dla takiego elementu oszacować można klasę uszkodzeń nie wykrywalnych w węźle  $c$  (przy założeniu uszkodzenia pojedynczego). Na granicach przedziału uszkodzeń nie wykrywalnych:  $G_j^1$ ,  $G_j^u$  wartość bezwzględna prądu niezrównoważenia równa jest dewiacji wynikającej z istnienia tolerancji, tzn. spełnione są następujące zależności [2]:

$$|f_c^n| = df_c \equiv f_c^+ = f(G_j) = f_c^n - df_c = 0; f_c^- = f(G_j) = f_c^n + df_c = 0 \quad (4)$$

### 3. Metoda wyznaczania przedziału uszkodzeń nie wykrywalnych

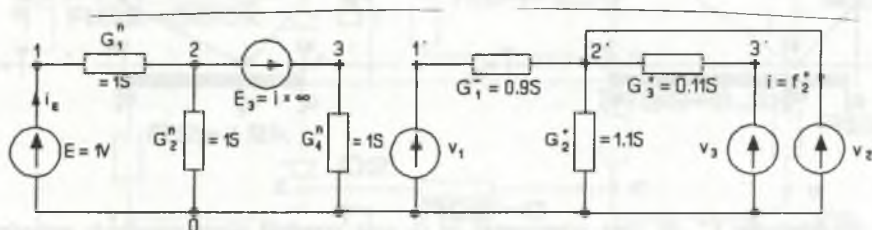
Do obliczenia wartości granicznych przedziału uszkodzeń nie wykrywalnych:  $G_j^1$ ,  $G_j^u$  wykorzystana zostanie metoda doboru elementu obwodu opisana w pracy [5]. W metodzie tej dobierany element  $G_j$  zastępowany jest sterowanym prądowo źródłem napięciowym  $E_j$  z nieskończenie dużym współczynnikiem sterowania. Prądem sterującym jest albo prąd  $f_c^-$ , albo prąd  $f_c^+$ . W wyniku analizy takich obwodów skojarzonych wyznaczone zostaną wartości  $G_j^1$  oraz  $G_j^u$  (wartość  $G_j$  otrzymana zostanie przez podzielenie wyliczonego prądu płynącego przez źródło  $E_j$  przez napięcie na zaciskach tego źródła).

**Przykład 1 - ciąg dalszy.** Spodziewając się problemów przy wykrywaniu uszkodzenia elementu  $G_3$  w węźle 2 oraz elementu  $G_4$ , w węźle 0 wyznaczone zostaną przedziały nie wykrywalnych uszkodzeń tych elementów. W celu obliczenia granicznych wartości  $G_3^1$  i  $G_3^u$  przeprowadzić należy analizę obwodu przedstawionego na rysunku 2. Równania wyrażające prąd niezrównoważenia oraz dewiację związaną z istnieniem tolerancji mają postać:

$$\begin{aligned} f_2^n &= i_1^n - i_2^n - i_3^n = (G_3 - 0,1)/3G_3 + 2) \\ df_2 &= 0,1(i_1^n + i_2^n + i_3^n) = 0,1(3G_3 + 2,1)/(3G_3 + 2) \end{aligned} \quad (5)$$

W wyniku analizy obwodu z rysunku 2, tzn. z równania (6), wyznaczona zostanie wartość  $G_3^u = 0,44 \text{ S}$ .

$$f_2^+ = G_3^u - 0,1 - 0,3G_3^u - 0,21 = 0 \tag{6}$$



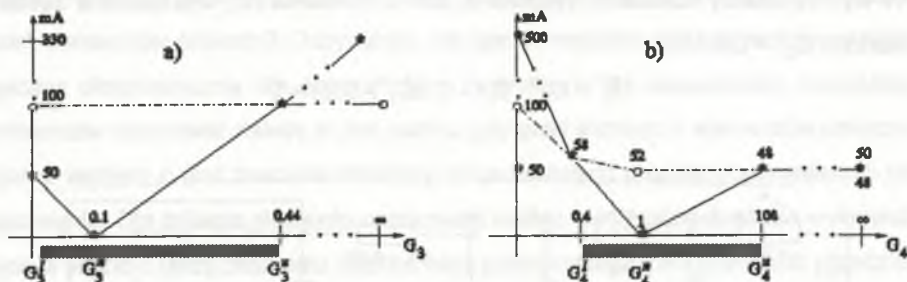
Rys. 2. Obwód skojarzony obwodu z rysunku 1 dla obliczeń  $G_3^u$   
 Fig. 2. Associated network of example 1 for calculation of  $G_3^u$

Analizując obwód o strukturze jak na rysunku 2 ze zmienionymi wartościami elementów:  $G_1^+ = 1,1 \text{ S}$ ,  $G_2 = 0,9 \text{ S}$ ,  $G_3 = 0,09 \text{ S}$ , wyznaczona zostaje wartość  $G_3^1 < 0$ , tzn.  $G_3^1 = 0 \text{ S}$ . Wartości prądu niezrównoważenia oraz dewiacji dla różnych wartości  $G_3$  zestawiono w tabeli 2, a na rysunku 3a zilustrowano graficznie.

Tabela 2

Zależność  $|f_c^{n1}|$  i  $df_c$  od  $G_j$  dla przykładowego obwodu

$G_3 \text{ S}$	$ f_2^{n1}  \text{ mA}$	$df_2 \text{ mA}$	$G_4 \text{ S}$	$ f_0^{n1}  \text{ mA}$	$df_0 \text{ mA}$
0	50	100	0	500	100
0,1	0	100	0,4	58	58
0,44	100	100	1	0	52
$\infty$	330	100	108	47	47
-	-	-	$\infty$	50	47



Rys. 3. Zależności  $f_c^n$ ,  $df_c$  (linia przerywana) od  $G_j$  oraz przedział diagnozowalnych uszkodzeń (przedział nie zakreskowany): a)  $c = 2$ ,  $j = 3$ ; b)  $c = 0$ ,  $j = 4$

Fig. 3. Charts of  $f_c^n$ ,  $df_c$ , (discontinuous line) against  $G_j$  and the region of diagnosability (unshaded region): a)  $c = 2$ ,  $j = 3$ ; b)  $c = 0$ ,  $j = 4$

Dla uszkodzeń z przedziału nie zakreskowanego otrzyma się macierz diagnostyczną  $D = D_1$ , jak w trzeciej kolumnie tabeli 1. Dla przedziału zakreskowanego element  $d_{23}$  macierzy  $D_1$  przyjmuje wartość 0 zamiast 1. Podobne rozumowanie powtórzyć można dla elementu  $G_4$ , którego prąd jest znacznie mniejszy od pozostałych prądów dopływających do węzła 0. Zależności  $f_0^n$  i  $df_0$  od  $G_4$  oraz przedział wykrywalnych uszkodzeń przedstawiono w tabeli 3 oraz na rysunku 3b. Dla przedziału zakreskowanego element  $d_{04}$  zmieni swą wartość z 1 na 0. Zatem, dla uszkodzeń  $G_3$  i  $G_4$  z przedziałów zakreskowanych dwie kolumny macierzy  $D_1$  staną się identyczne, a to oznacza, że dla pewnej klasy uszkodzeń diagnozowalność obwodu wynosi  $k = 0$ .

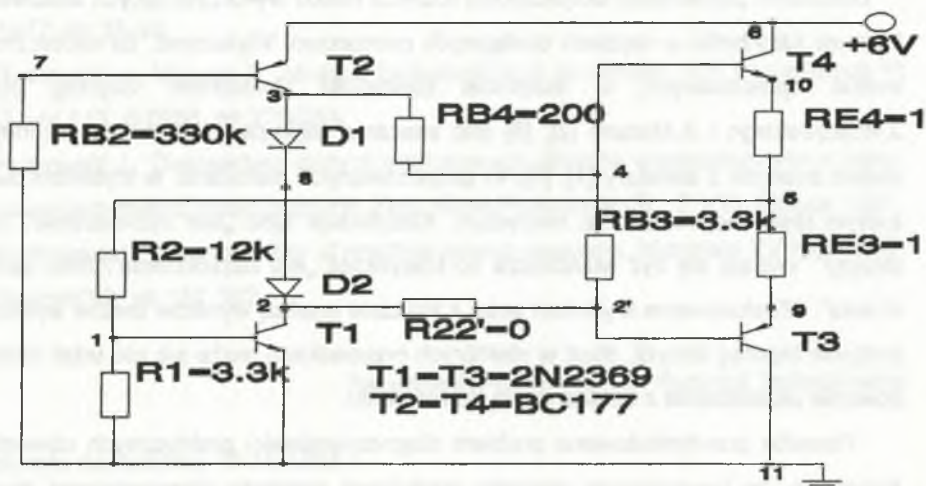
Tabela 3

## Przedziały uszkodzeń nie wykrywalnych

$R_j$	węzeł	$R_j^1$	$R_j^u$
R1	11	1,7k	$\infty$
R2	5	0	24k
RB3	2	2,0k	$\infty$
RB4	3	0	400



**Przykład 2.** Na rysunku 4 przedstawiono wzmacniacz pochodzący z pracy [2]. Założono  $\varepsilon = 5\%$ .



Rys. 4. Wzmacniacz tranzystorowy z przykładu 2  
Fig. 4. Amplifier of example 2

W obwodzie diodowo-tranzystorowym oczekiwać należy trudności przy lokalizacji uszkodzeń rezystorów połączonych z bazą tranzystora. Prądy płynące przez takie rezystory są zazwyczaj znacznie mniejsze od pozostałych prądów obwodu i w związku z tym oczekiwać należy wykrycia uszkodzenia tylko w węzle, z którym połączona jest baza. W takim przypadku uszkodzenie zostanie zlokalizowane z dokładnością do dwóch lub więcej elementów. W przykładowym wzmacniaczu występują dwa dzielniki R1, R2 oraz RB3, RB4 połączone z bazami tranzystorów T1 i T4. Uszkodzenia tworzących je rezystorów mogą zostać łatwo wykryte w węzłach 1 lub 4, lecz trudno będzie je wykryć w węzłach 5 i 11 lub 3 i 2, do których dopływają prądy rzędu miliamperów. W tabeli 2 podane zostały wartości graniczne przedziałów uszkodzeń nie wykrywalnych. Dla uszkodzeń z podanych przedziałów za uszkodzone uznane zostanie całe odcięcie (R1, R2) lub (RB3, RB4). Bez pomiaru prądów nie jest możliwa dokładniejsza lokalizacja uszkodzeń.

#### 4. Podsumowanie

Dokonano porównania skuteczności różnych metod wykorzystujących testowanie I prawa Kirchhoffa w węzłach dostępnych pomiarowo. Wykazano, że skuteczność metod opracowanych w Instytucie Elektroniki Politechniki Śląskiej przez J.Rutkowskiego i A.Macurę [2], [6] jest znacznie większa od skuteczności innych metod znanych z literatury [1], [3]. W proponowanych metodach, w kryterium decyzyjnym testu nie ma żadnej heurystyki. Klasyfikacja typu „jest uszkodzenie”/”brak decyzji” wydaje się być właściwsza od klasyfikacji „jest uszkodzenie”/”brak uszkodzenia”. Zastosowane kryterium wraz z logiczną analizą wyników testów wyklucza podjęcie błędnej decyzji, choć w niektórych przypadkach może się nie udać zlokalizowanie uszkodzenia z dokładnością do elementu.

Ponadto przedyskutowano problem diagnozowalności praktycznych obwodów. Pokazano, że heurystyczny algorytm modyfikacji macierzy diagnostycznej dawać może błędne wyniki, gdyż nie jest możliwe określenie jednej macierzy diagnostycznej dla wszystkich możliwych uszkodzeń. Dla każdego elementu istnieje przedział uszkodzeń nie wykrywalnych. Zaproponowano metodę wyznaczania granic takiego przedziału. Metodę stosować można przy założeniu uszkodzeń pojedynczych dla elementu dwuzaciskowego, przy czym może on być częścią modelu wielobiegunnika lub podobwołu.

#### LITERATURA

1. Salama A., Starzyk J., Bandler J.: A unified decomposition approach for fault location on large analog circuits, IEEE Trans. Circuits And Systems, vol. CAS-31, 7/1984, str.609-622.
2. Rutkowski J., Macura A.: Fault location for nonlinear resistive circuits, Electronic Letters, No.20/10, 1984, str.401-403.
3. Ozawa T.: Analog methods for computer-aided circuit analysis and diagnosis - Decomposition approach to fault location, M.Dekker, New York 1988, str.365-380.
4. Ozawa T., Bandler J., Salama A.: Diagnosability in the decomposition approach for fault location in large analog networks, IEEE Trans. CAS, vol. CAS-32, 4/1985, str.415-416.

5. Macura A.: Zastosowanie źródeł sterowanych dod doboru elementów układów elektronicznych, Materiały I Kraj.Konf.Teorii Obw.i Ukł.Elektronicznych, Podlesice 1977, str.35-40.
6. Rutkowski J., Macura A.: Multiple fault location in ac circuits, IEE Proceedings Pt G, vol.133, 6/1986, str.279-284.
7. Rutkowski J.: Diagnostyka dużych analogowych układów elektronicznych z zastosowaniem metod topologicznych, Zesz.Nauk.Politechniki Śl., Z.105, Gliwice 1991.
8. Rutkowski J.: Diagnosability of practical analog networks, Materiały XV KKTOiUE, Szczyrk'92, str.157-162.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Ryszard Tadeusiewicz

Wpłynęło do Redakcji 15.10.1994 r.

### Abstract

In this paper we have compared the robustness of different fault location methods based on checking consistency of KCL at accessible nodes. It seems that the robustness of the proposed method [2], [6] is much greater than of the others [1], [3]. There is no heuristic in test decision criterion and it allows the „fail” or „no decision” classification which is much more reasonable than „fail” or „pass” classification. This criterion together with the logical analysis of test results excludes the erroneous diagnosis result, however in some cases result can be unprecise.

Next, diagnosability of practical networks has been onvestigated. We have demonstrated that heuristic algorithm of Ref. [3] can yield erroneous result. It is impossible to determine only one diagnostic matrix valid for all possible faults. Some faults may not be detected in all element terminals and we have proposed the method of estimation of the range of detectable faults. The method is applicable to two port element and single faults.