

Jan CHOJCAN,
Jacek IZYDORCZYK
Instytut Elektroniki
Politechniki Śląskiej

ZASTOSOWANIE PROGRAMU IZTIS DO OBLICZANIA WRAZLIWOŚCI W DZIEDZINIE CZASU

Streszczenie. W pracy przedstawiono program IZTIS do analizy wrażliwości w dziedzinie czasu liniowych układów elektronicznych. Do obliczania wrażliwości wykorzystano metodę obwodów dołączonych. Podano zasady tworzenia obwodów dołączonych oraz szczegółowy algorytm numerycznych obliczeń. W tablicy zebrano wszystkie wzory umożliwiające obliczanie wrażliwości tą metodą. Metodę obwodów dołączonych uważa się za najefektywniejszą metodę numerycznego obliczenia wrażliwości czasowych.

Program IZTIS przeznaczony jest do realizacji na maszynie cyfrowej IBM PC/XT/AT, wyposażonej w koprocesor matematyczny 8087/80287/80387, pod kontrolą systemu operacyjnego MS-DOS wersja 3.xx. Opis tego programu wraz z uproszczonym schematem blokowym zamieszczono w pracy. Podano też sposób przygotowania danych wejściowych w języku symulacyjnym programu NAP2.

Możliwości obliczeniowe programu ilustrują załączone przykłady liczbowe uporządkowane od najprostszych do złożonych.

1. Wstęp

Do optymalizacji projektowanych układów elektronicznych najczęściej wykorzystuje się analizę wrażliwościową w dziedzinie częstotliwości. Istnieją jednak sytuacje, w których wygodniej posłużyć się analizą wrażliwościową w dziedzinie czasu. Autorzy nie znają żadnego uniwersalnego programu służącego do analizy obwodów elektronicznych, który byłby w stanie obliczać wrażliwości czasowe. Skłoniło ich to do napisania programu IZTIS służącego do obliczania wrażliwości w dziedzinie czasu dla liniowych obwodów elektronicznych metodą obwodu dołączonego.

2. Metoda obwodu dołączonego [1], [2], [3]

Najskuteczniejszą metodą obliczania wrażliwości w dziedzinie czasu za pomocą maszyny cyfrowej jest metoda obwodu dołączonego. Jeżeli dany jest liniowy obwód N , to obwód dołączony \hat{N} tworzymy z obwodu N następująco:

- a) zerujemy wszystkie niezależne źródła;
- b) elementy pasywne (rezystory, kondensatory, cewki) pozostawiamy nie zmienione;
- c) źródła sterowane przekształcamy tak jak przedstawiono w tabelicy 1;

Tabela 1

Zasady przekształcania źródeł sterowanych
z obwodu N do \hat{N}

Obwód N	Obwód \hat{N}
$u_2 = k \cdot u_1$	$\hat{i}_1 = -k \cdot \hat{i}_2$
$i_2 = g_m \cdot u_1$	$\hat{i}_1 = g_m \cdot \hat{u}_2$
$u_2 = r_m \cdot i_1$	$\hat{u}_1 = r_m \cdot \hat{i}_2$
$i_2 = \beta \cdot i_1$	$\hat{u}_1 = -\beta \cdot \hat{u}_2$

- d) jeżeli interesuje nas wrażliwość napięcia w 1-tej gałęzi obwodu N, to równolegle do 1-tej gałęzi obwodu dołączonego \hat{N} wprowadzamy prądowe wymuszenie Diraca o wartości -1 ;
- e) jeżeli interesuje nas wrażliwość prądu w 1-tej gałęzi obwodu N, to szeregowo do 1-tej gałęzi obwodu dołączonego \hat{N} wprowadzamy napięciowe wymuszenie Diraca o wartości 1 ;
- f) napięcia początkowe na kondensatorach i prądy początkowe w cewkach w obwodzie dołączonym \hat{N} przyjmujemy równe zero.

Algorytm obliczania wrażliwości sprowadza się do dwóch analiz w dziedzinie czasu - obwodu podstawowego N i obwodu dołączonego \hat{N} .

Można go podsumować w następujących punktach:

- a) przeprowadzamy analizę czasową układu N w przedziale czasu $[0, T]$;
- b) tworzymy odpowiedni obwód dołączony \hat{N} ;
- c) przeprowadzamy analizę czasową układu \hat{N} w przedziale czasu $[0, T]$;
- d) wrażliwości napięć (prądów) obliczamy wg wzorów zebranych w tabelicy 2.

Analizę układu podstawowego i dołączonego program IZTIS zleca uniwersalnemu programowi analizy obwodów elektronicznych NAP2 wersja BR.DS07. Inne szczegóły dotyczące realizacji obliczeń wrażliwości przez program IZTIS można znaleźć w opracowaniu [9].

Tablica 2

Wrażliwości w dziedzinie czasu

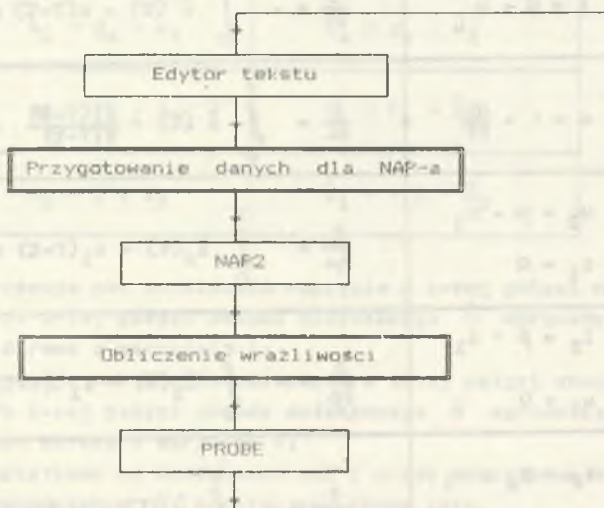
Element	Opis	Wrażliwość dla $t=T$
R	$u = R \cdot i$	$\frac{\partial}{\partial R} = \int_0^T \hat{i}(\tau) \cdot i(T-\tau) d\tau$
C	$i = C \cdot \frac{du}{dt}$	$\frac{\partial}{\partial C} = - \int_0^T \hat{u}(\tau) \cdot \frac{du(T-\tau)}{d(T-\tau)} d\tau$
G	$i = G \cdot u$	$\frac{\partial}{\partial G} = - \int_0^T \hat{u}(\tau) \cdot u(T-\tau) d\tau$
L	$u = L \cdot \frac{di}{dt}$	$\frac{\partial}{\partial L} = \int_0^T \hat{i}(\tau) \cdot \frac{di(T-\tau)}{d(T-\tau)} d\tau$
μ	$u_2 = \mu \cdot u_1$ $i_1 = 0$	$\frac{\partial}{\partial \mu} = \int_0^T \hat{i}_2(\tau) \cdot u_1(T-\tau) d\tau$
β	$i_2 = \beta \cdot i_1$ $u_1 = 0$	$\frac{\partial}{\partial \beta} = - \int_0^T \hat{u}_2(\tau) \cdot i_1(T-\tau) d\tau$
g_m	$i_2 = g_m \cdot u_1$ $u_1 = 0$	$\frac{\partial}{\partial g_m} = - \int_0^T \hat{u}_2(\tau) \cdot u_1(T-\tau) d\tau$
r_m	$u_2 = r_m \cdot i_1$ $u_1 = 0$	$\frac{\partial}{\partial r_m} = \int_0^T \hat{i}_2(\tau) \cdot i_1(T-\tau) d\tau$
T	$u_2 = n \cdot u_1$ $i_1 = -n \cdot i_2$	$\frac{\partial}{\partial n} = \int_0^T [\hat{i}_2(\tau) \cdot u_1(T-\tau) + \hat{u}_1(\tau) \cdot i_2(T-\tau)] d\tau$

3. Opis programu

Przyjęto, że:

- program będzie wyznaczał wrażliwości w dziedzinie czasu obwodów liniowych zawierających dwójniki, źródła sterowane, idealne wzmacniacze i cewki sprzężone;
- w jednym przebiegu będą liczone wrażliwości dowolnego napięcia lub prądu na zmianę 1,2 lub 3 parametrów;
- program będzie zrealizowany na IBM PC;
- dane wejściowe do programu będą przygotowane w języku symulacyjnym programu NAP2 [5].

Uproszczony schemat blokowy programu IZTIS przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat programu IZTIS

Fig. 1. Simplified flow chart of IZTIS program

Dane wejściowe do programu IZTIS tworzy się za pomocą edytora tekstu WordStar lub Norton Editor. Oba edytory dołączone są do programu. Istnieje możliwość wykorzystania innego edytora tekstu. Program przetwarza dane wejściowe tak, żeby stanowiły opisy (wraz z instrukcjami sterującymi) obwodu podstawowego i obwodów dołączonych w języku symulacyjnym programu NAP2. Wyniki analizy programem NAP2 (umieszczone w zbiorze dyskowym) wykorzystane są do obliczania wrażliwości, które mogą być następnie wydrukowane lub przekazane postprocesorowi graficznemu PROBE [5].

Program IZTIS wykonywany jest pod kontrolą systemu operacyjnego MS-DOS. Napisany jest w dużej części w języku Pascal. Tylko procedury odwołujące się bezpośrednio do funkcji systemu operacyjnego napisano w języku assemblera procesora 8088/86. Dostępny jest edytor, program NAP2, post-procesor PROBE oraz funkcje programu IZTIS.

Program IZTIS może być wykorzystany też do ułatwienia współpracy użytkownika z programem NAP2.

4. Obliczanie wrażliwości za pomocą programu IZTIS

Jak już wspomniano, dane do programu IZTIS stanowi opis obwodu podstawowego w języku symulacyjnym programu NAP2 [4,5]. Opis ten powinien zaczynać się komendą *CIRCUIT, natomiast nie może zawierać instrukcji sterujących wyjściem oraz komend *RUN i *END. Musi być określony przedział czasu analizy za pomocą instrukcji *TIME. Element, na którym napięcie (lub prąd) będzie wielkością wyjściową, oznacza się znakiem # na końcu linii opisu. Natomiast znaki \$ służą do oznaczania elementów, wobec zmian których będą obliczane pochodne (wrażliwości względne) wielkości wyjściowej. Poniższe przykłady ilustrują możliwości wykorzystania programu IZTIS.

Przykład 1

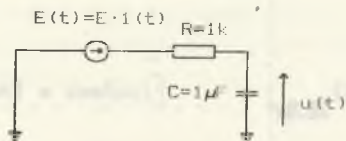
Określić wpływ zmian rezystancji R na kształt napięcia wyjściowego $u(t)$ w całkującym obwodzie RC przy zerowych warunkach początkowych.

Dane: $R=1k\Omega$, $C=1\mu F$, $E=1V$.

Dane dla programu IZTIS przedstawia rys. 2.

```
*CIRCUIT
RE 1 0 1 E 1V
R 2 1 1R
C 2 0 1uF
*TIME 0ms 3ms
```


#V



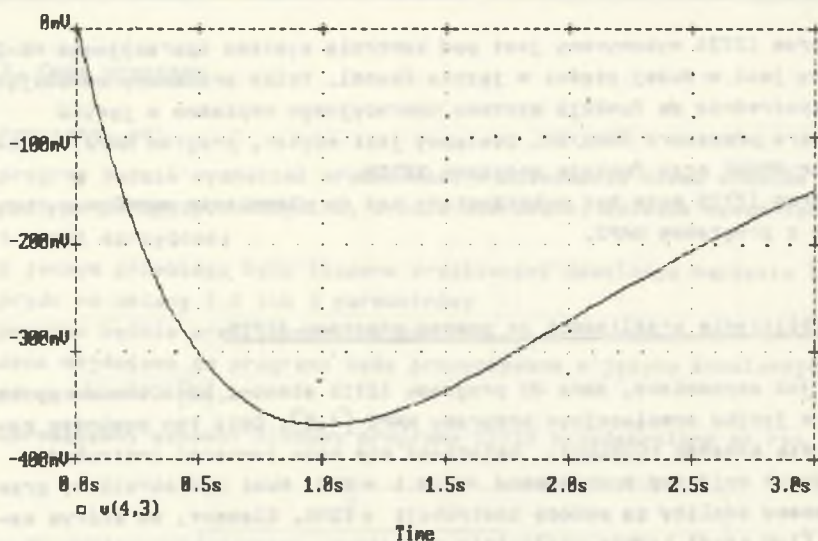
Rys. 2. Obwód całkujący RC i jego opis przygotowany dla programu IZTIS
Fig. 2. An RC circuit with data for IZTIS program

Analityczne rozwiązanie przedstawionego problemu jest następujące:

$$\frac{\partial u(t)}{\partial R} = -\frac{E \cdot t}{R^2 \cdot C} \cdot \exp\left(-\frac{t}{R \cdot C}\right). \quad (1)$$

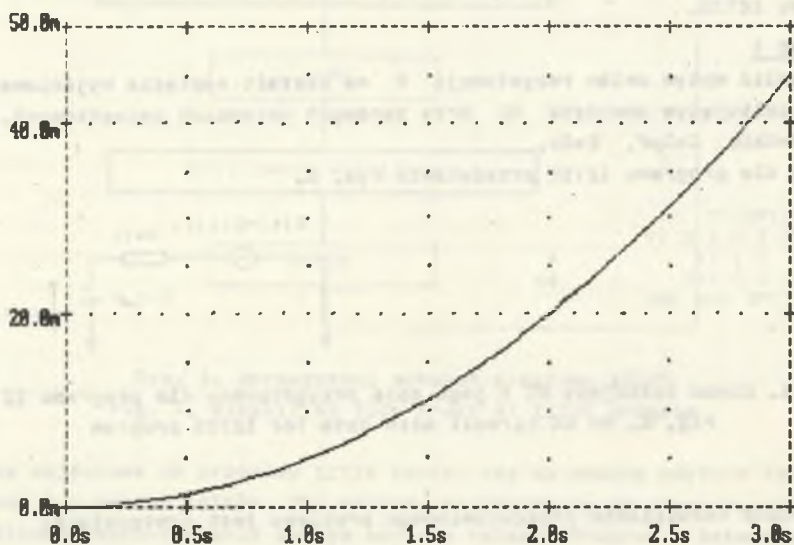
Rys. 3 przedstawia rozwiązanie uzyskane za pomocą programu IZTIS. Rys. 4 zawiera przebieg błędu uzyskanego rozwiązania.

Widać, że jest on mniejszy niż 5%.



Rys. 3. Wrażliwość napięcia wyjściowego całkującego obwodu RC na zmianę oporności R

Fig. 3. Voltage sensitivity of the RC circuit with respect to resistance R



Rys. 4. Względny błąd obliczeń wrażliwości z rysunku 3

Fig. 4. Relative error of sensitivity of figure 3

Przykład 2

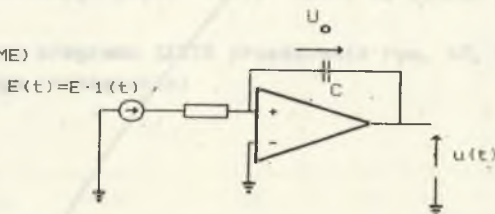
Obliczyć wrażliwość napięcia wyjściowego $u(t)$ wobec pojemności C w układzie całkującym ze wzmacniaczem operacyjnym (rys. 5). Przyjąć warunek początkowy na kondensatorze równy $1V$. Dane: $R=1k\Omega$, $C=1\mu F$, $E=1V$.

Dane dla programu IZTIS zawarte są na rys. 5. Uzyskane rezultaty zawiera rys. 6. Błąd w stosunku do rozwiązania dokładnego:

$$\frac{\partial u(t)}{\partial C} = \frac{E}{T} \cdot \frac{t^2}{2} \cdot \frac{1}{R^2 C} \quad (2)$$

nie przekroczył 20 ppm.

```
*CIRCUIT
F1 /TAB2/ 0 0 1 1
R 1 0 1k E 1*F1(TIME)
C 1 2 1uF. $
RO 2 3 0 E 1V
G 0 1 1
VOF 2 0 VG #V
*TIME 0ms 3ms
```



Rys. 5. Układ całkujący z WO i jego opis przygotowany dla programu IZTIS
Fig. 5. Integral network and data for IZTIS program

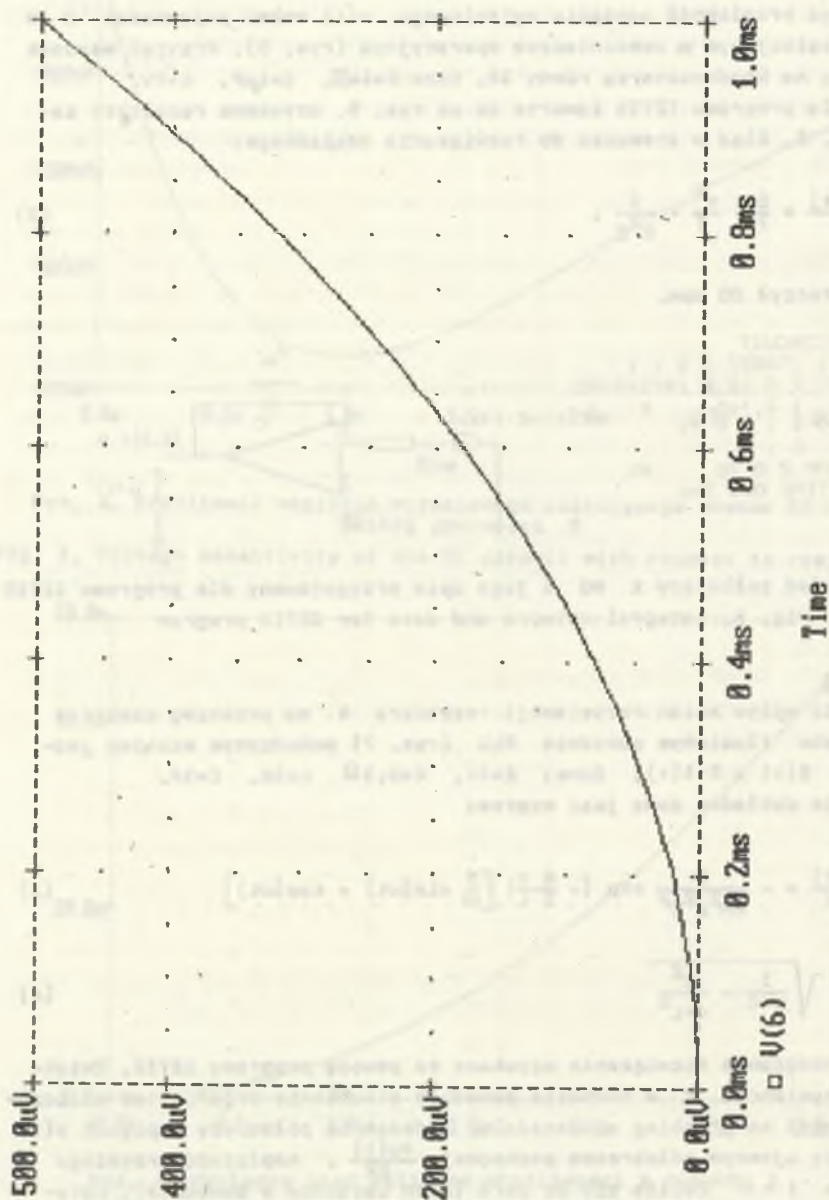
Przykład 3

Określić wpływ zmian rezystancji rezystora R na przebieg napięcia $u(t)$ w słabo tłumionym obwodzie RLC (rys. 7) pobudzonym skokiem jednostkowym $E(t) = E \cdot 1(t)$. Dane: $E=1V$, $R=0,1\Omega$, $L=1H$, $C=1F$.
Rozwiązanie dokładne dane jest wzorem:

$$\frac{\partial u(t)}{\partial R} = - \frac{E}{2\omega^2 L^2 C^2} \exp\left(-\frac{R}{2L}t\right) \left[\frac{1}{\omega} \sin(\omega t) + \cos(\omega t)\right] \quad (3)$$

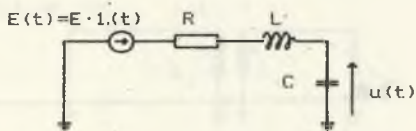
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}} \quad (4)$$

Rys. 8 przedstawia rozwiązanie uzyskane za pomocą programu IZTIS. Zwiększenie rezystancji R w obwodzie powoduje stłumienie drgań. Stąd obliczona wrażliwość ma przebieg sinusoidalny - dodatnie półokresy napięcia $u(t)$ odpowiadają ujemnym półokresom pochodnej $\frac{\partial u(t)}{\partial R}$. Amplituda przebiegu $\frac{\partial u(t)}{\partial R}$ dla $t \rightarrow \infty$ zbliża się do zera (stan ustalony w obwodzie), natomiast maksimum przyjmuje dla chwili t zbliżonej do stałej czasowej tłumienia obwodu (20 s). Tuż po załączeniu napięcia $E(t)$ napięcie $u(t)$ narasta w kierunku E , przy czym im większa rezystancja R , tym dłuższy czas narastania. Stąd przebieg $\frac{\partial u(t)}{\partial R}$ zaczyna się ujemnym półokresem.



Rys. 6. Wrażliwość napięcia wyjściowego układu całkującego z WO na zmianę pojemności C
 Fig. 6. Output voltage sensitivity of integral network with respect to capacitance C


```
*CIRCUIT
R 1,0 0.1 E 1
L 2 1 1
C 2 0 1
*TIME 0s 60s
```



Rys. 7. Szeregowy obwód RLC i jego opis przygotowany dla programu IZTIS
Fig. 7. An RLC circuit and data for IZTIS program

Przykład 4

Rozważmy obwód przedstawiony na rys. 9. Interesuje nas wpływ sprzężenia cewek M na kształt przebiegu prądu $i(t)$. Cewki są silnie sprzężone tzn. $M = \sqrt{L_1 L_2}$.

Wyniki uzyskana za pomocą programu IZTIS przedstawia rys. 10. Nie odbiegają one od teoretycznego rozwiązania:

$$\frac{\partial i(t)}{\partial t} = \frac{2 E L_2 M}{L_3 L_1^2} t \quad (5)$$

Przykład 5

Obliczyć wrażliwość napięcia wyjściowego $u(t)$ liniowego wzmacniacza tranzystorowego (rys. 11) dla $t \in [0, \mu s, 3, \mu s]$ na zmianę pojemności kolektorowej i emiterowej przy pobudzeniu układu skokowym impulsem napięciowym. Dane: $R_I = 1k\Omega$, $R_B = 570k\Omega$, $R_C = 4,5k\Omega$. Przedstawiona na rys. 12 dane dla programu IZTIS utworzone zostały na podstawie małosygnałowego modelu wzmacniacza.

Wyniki analizy przedstawia rys. 13. Jak można było się spodziewać, wrażliwość napięcia wyjściowego na pojemność kolektorową jest wielokrotnie większa od wrażliwości na pojemność emiterową.

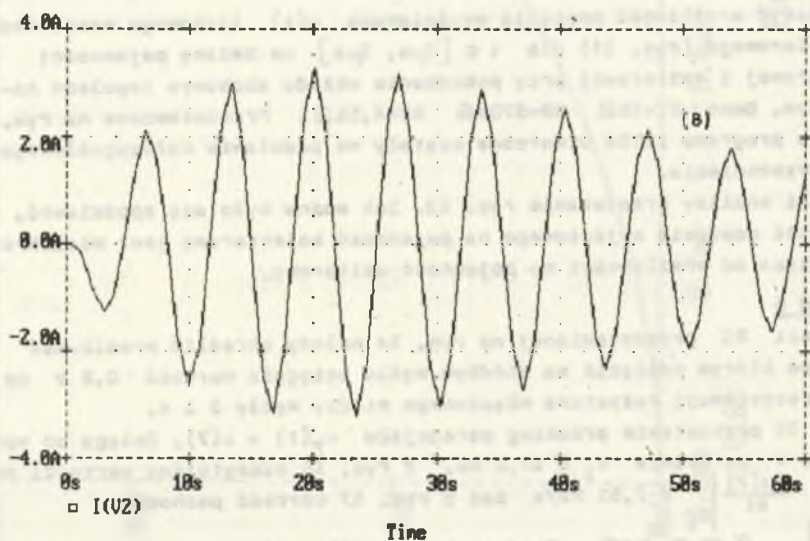
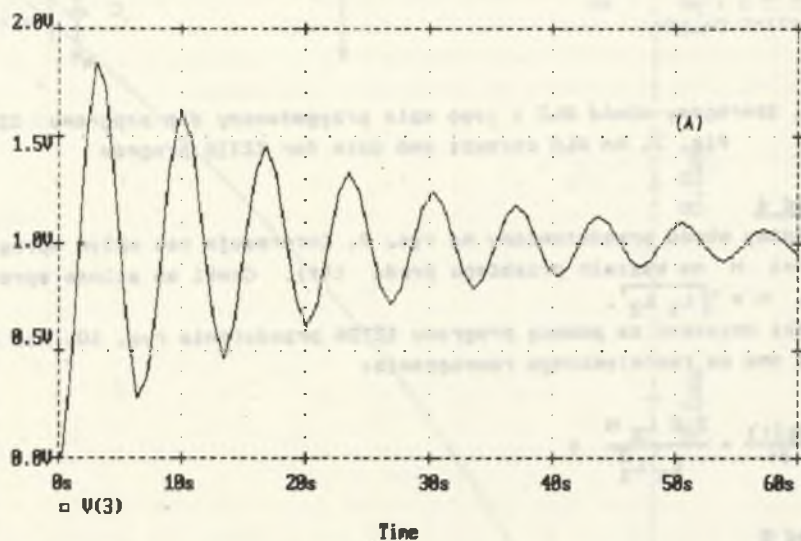
Przykład 6

W sieci RC przedstawionej na rys. 14 należy określić wrażliwość czasu, po którym napięcie na siódmym węźle osiągnie wartość $0,8 V$ na zmianę rezystancji rezystora włączonego między węzły 3 i 4.

Rys. 15 przedstawia przebieg potencjału $v_7(t) = u(7)$. Osiąga on wartość $0,8 V$ po czasie $t_1 \approx 17,6 ns$. Z rys. 16 odczytujemy wartości pochodnej $\left. \frac{\partial u(7)}{\partial t} \right|_{t_1} \approx 7,51 MV/s$ zaś z rys. 17 wartość pochodnej

$$\left. \frac{\partial u(7)}{\partial R_{12}} \right|_{t_1} \approx 26,8 \mu V/\Omega. \text{ Stąd szukana wrażliwość wyraża się wzorem:}$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial R_{12}} = - \frac{\left. \frac{\partial u(t)}{\partial t} \right|_{t_1}}{\left. \frac{\partial u(7)}{\partial R_{12}} \right|_{t_1}} \approx - 3,56 \frac{ns}{k\Omega} \quad (6)$$



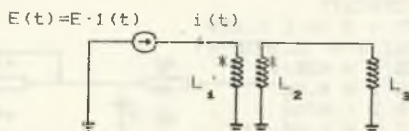
Rys. 8. Napięcie wyjściowe obwodu RLC (A) i jego wrażliwość na zmianę oporności $R(B)$

Fig. 8. Output voltage of RLC circuit (A) with its sensitivity with respect to $R(B)$

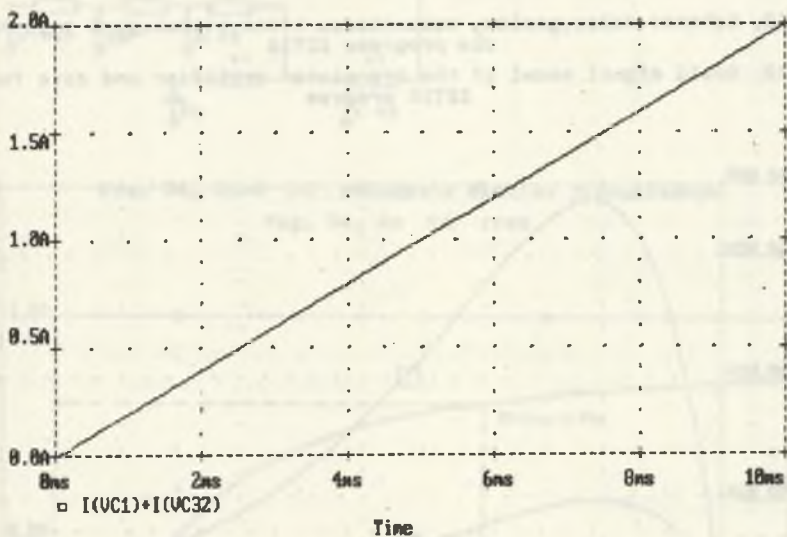
```

*CIRCUIT
L1 1 0 1      #I
L2 2 0 1
M L1 L2 1     $
L3 2 0 1E-2
*TIME 0ms 10ms

```

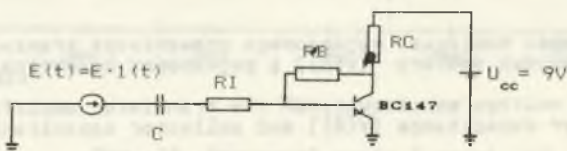


Rys. 9. Układ ze sprzężonymi cewkami
Fig. 9. An network with coupled inductors



Rys. 10. Wrażliwość prądu cewki L_1 względem indukcyjności wzajemnej cewek

Fig. 10. Sensitivity of inductor's L_1 current with respect to mutual inductance

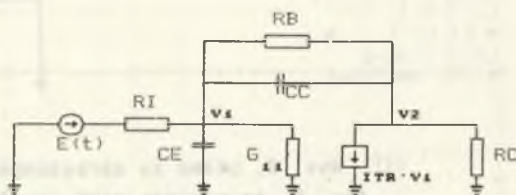


Rys. 11. Wzmacniacz tranzystorowy
Fig. 11. An transistor amplifier

```

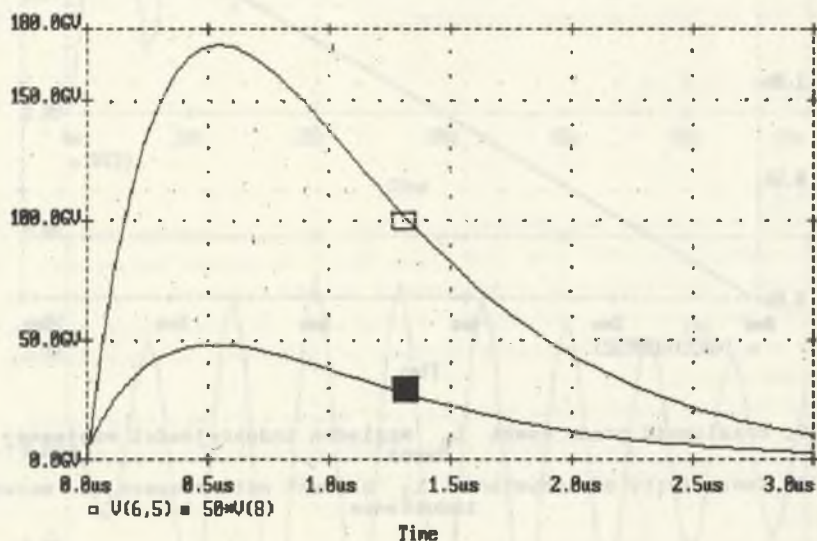
*CIRCUIT
RI 1 0 1k E 0.02V
G11 1 0 2.593E-4
CE 1 0 42E-12 $
RC 2 0 4.5K #V
RB 2 1 570K $
CC 2 1 4.5E-12
ITR 2 0 3.889E-2 VG11
*TIME 0us 3us

```



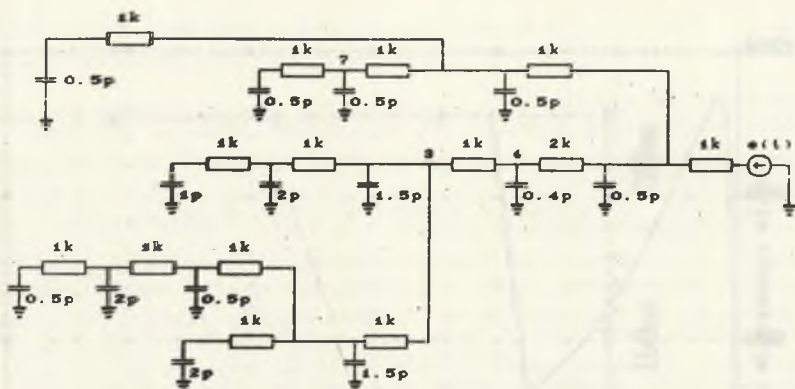
Rys. 12. Schemat małosygnałowy wzmacniacza tranzystorowego i jego opis dla programu IZTIS

Fig. 12. Small signal model of the transistor amplifier and data for IZTIS program



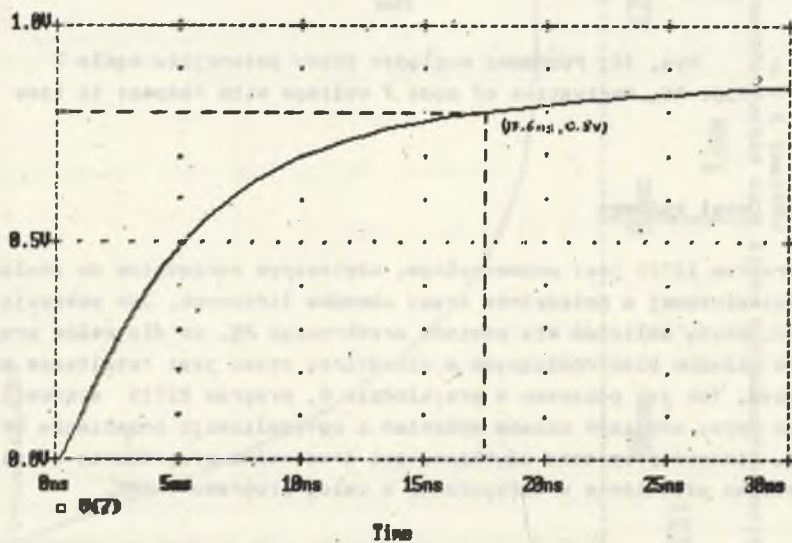
Rys. 13. Wrażliwość napięcia wyjściowego wzmacniacza tranzystorowego na zmianę pojemności emitera (V(8)) i pojemności kolektora (V(6,5))

Fig. 13. Output voltage sensitivity of the transistor amplifier with respect to emitter capacitance (V(8)) and collector capacitance (V(6,5))



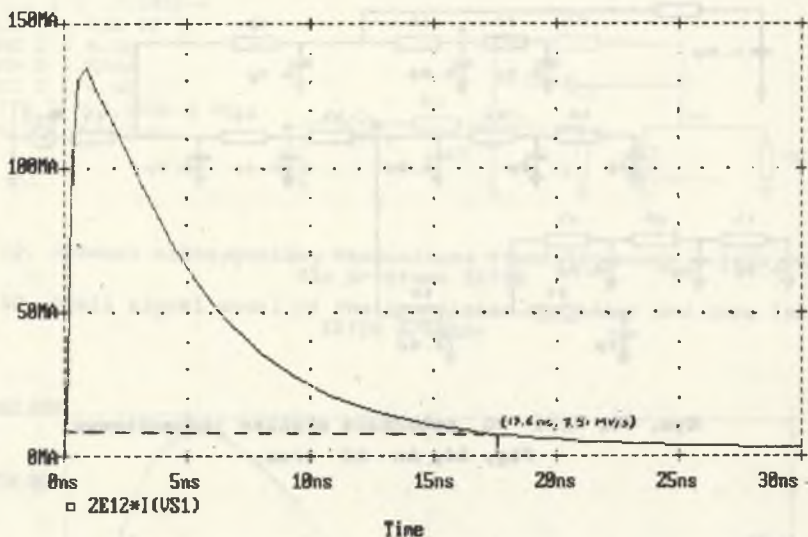
Rys. 14. Sieć RC pobudzona skokiem jednostkowym

Fig. 14. An RC tree



Rys. 15. Potencjał węzła 7 sieci RC

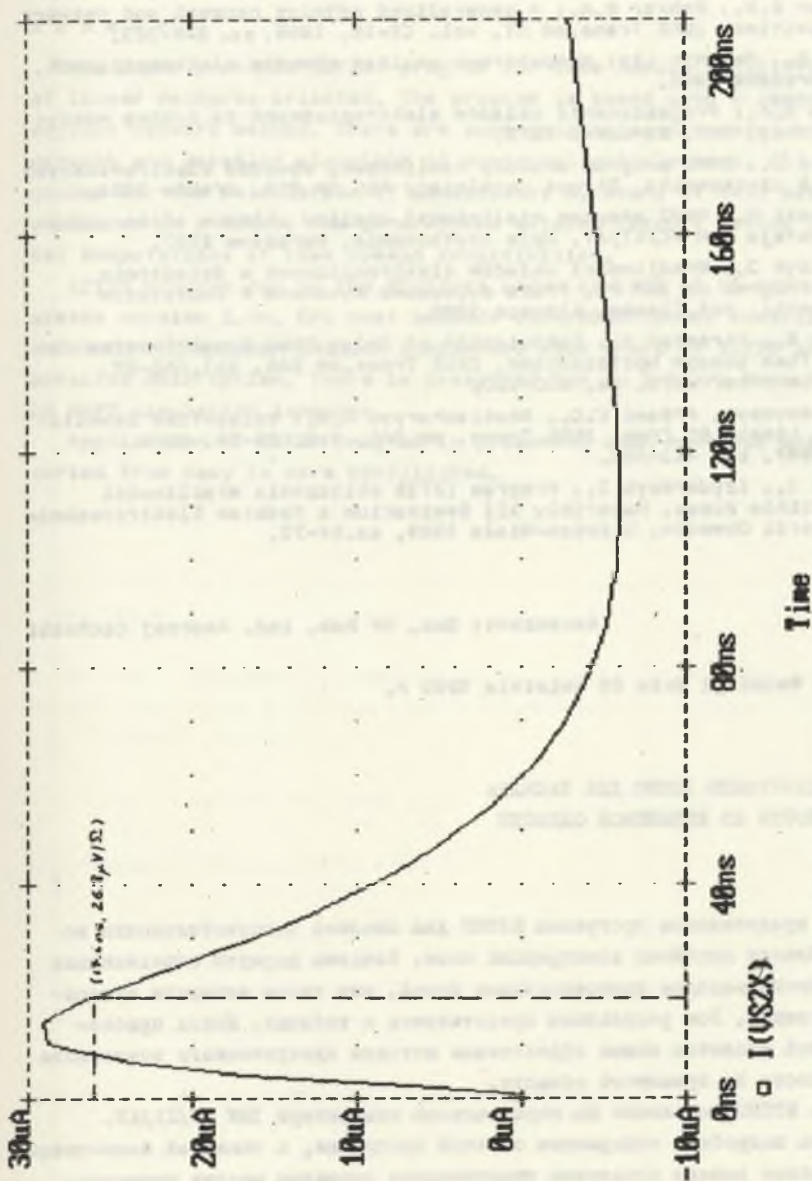
Fig. 15. Node 7 voltage of the RC tree



Rys. 16. Pochodna względem czasu potencjału węzła 7
 Fig. 16. Derivative of node 7 voltage with respect to time

5. Uwagi końcowe

Program IZTIS jest uniwersalnym, użytecznym narzędziem do analizy wrażliwościowej w dziedzinie czasu obwodów liniowych. Jak pokazują przykłady, błędy obliczeń nie powinny przekroczyć 5%, co dla celów projektowania układów elektronicznych w dziedzinie czasu jest rezultatem zadowalającym. Tak jak pokazano w przykładzie 6, program IZTIS stanowić może pomoc przy analizie czasów opóźnień i optymalizacji przebiegów czasowych. Stanowi przyjazne użytkownikowi środowisko programowe, oferując dodatkowo ułatwienie w korzystaniu z usług programu NAP2.



Rys. 17. Wrażliwość potencjału węzła 7 na zmianę oporności rezystora włączonego między węzłami 3 i 4

Fig. 17. Sensitivity of node 7 voltage with respect to resistor included between 3 and 4 node

LITERATURA

- [1] Director S.W., Rohrer R.A.: A generalized adjoint network and network sensitivities, IEEE Trans.on CT, vol. CT-16, 1969, ss. 318-323.
- [2] Chua L.O., Pen-Min Lin: Komputerowa analiza obwodów elektronicznych, WNT, Warszawa 1981.
- [3] Calahan D.A.: Projektowanie układów elektronicznych za pomocą maszyny cyfrowej, WNT, Warszawa 1978.
- [4] Porębski J.: NAP2 program analizy nieliniowej obwodów elektronicznych Poradnik użytkownika, Skrypt uczelniany AGH nr 916, Kraków 1984.
- [5] Ramotowski M.: NAP2 program nieliniowej analizy układów elektronicznych, Wersja IBM PC/XT/AT, Opis użytkownika, Warszawa 1987.
- [6] Izydorczyk J.: Wrażliwości układów elektronicznych w dziedzinie czasu. Program na IBM PC, Praca dyplomowa wykonana w Instytucie Elektroniki, Pol.Śląska, Gliwice 1988.
- [7] Brayton R., Director S.: Computation of Delay Time Sensitivities for Use in Time Domain Optimization, IEEE Trans.on CAS, Vol.CAS-22, No 12, December 1975, ss. 910-920.
- [8] Jain K.,Navneet, Prasad V.C., Bhattacharyya A.B.: Delay-Time Sensitivity in Linear RC Tree, IEEE Trans. on CAS, Vol.CAS-34, no 4, April 1987, ss. 443-445.
- [9] Chojcan J., Izydorczyk J.: Program IZTIS obliczania wrażliwości w dziedzinie czasu, Materiały XII Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Gliwice-Wisła 1989, ss.64-72.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Andrzej Cichocki

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 kwietnia 1989 r.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ ИЗТИС ДЛЯ РАСЧЁТА
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Р е з ю м е

В работе представлена программа ИЗТИС для анализа чувствительности во временной области линейных электронных схем. Введены формулы определяющие чувствительности методом присоединённых цепей, дан также алгоритм численных вычислений. Все результаты представлены в таблице. Метод присоединённых цепей является самым эффективным методом численного исчисления чувствительности во временной области.

Программа ИЗТИС выполнена на персональном компьютере IBM PC/XT/AT. В работе дана подробная информация об этой программе, а также её блок-схема. Теоретические выводы дополнены практическим решением многих примеров.

COMPUTER-AIDED TIME DOMAIN SENSITIVITY ANALYSIS
OF LINEAR NETWORKS USING IZTIS PROGRAM

S u m m a r y

The paper presents IZTIS program for time domain sensitivity analysis of linear networks oriented. The program is based upon a generalized adjoint network method. There are some principles presented how to adjoint network and detailed algorithm of numerical calculations. All formulae needed for the calculation of sensitivity by means of this method are collected in a table. The generalized adjoint network method for numerical computations of time domain sensitivities.

IZTIS program run on IBM PC/XT/AT under control of MS-DOS operating system version 3.xx. CPU must include 8087/80287/80387 numerical processor extension. The paper include simplified flow chart of IZTIS program with detailed description. There is presented how to prepare data for IZTIS in NAP2 simulation language.

Application of IZTIS program is presented upon numerous examples sorted from easy to more complicated.