

Norbert LITWIŃCZUK, Maciej SADOWSKI  
Politechnika Białostocka

## **OPROGRAMOWANIE DO ANALIZY I PREZENTACJI CHARAKTERYSTYKI DYNAMICZNEJ WZMACNIACZA REZONANSOWEGO**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono oprogramowanie AMPLAM powstałe w Politechnice Białostockiej, wspomagające analizę pracy rezonansowego wzmacniacza mocy. Umożliwia ono m.in. wyznaczenie charakterystyki dynamicznej (roboczej) wzmacniacza mocy oraz wybranych parametrów energetycznych. Charakterystyka dynamiczna jest jedną z istotniejszych charakterystyk i przedstawia zachowanie się układu w warunkach pracy. Jej znajomość umożliwia szybkie określenie klasy i stanu pracy układu, nieliniowości w układzie, wartości napięć i prądów wyjściowych. Program AMPLAM napisany został w środowisku Matlab. Jako jądro do analizy nieliniowej wykorzystano program Ansoft Serenade.

**Słowa kluczowe:** wzmacniacz rezonansowy, oprogramowanie, analiza nieliniowa, charakterystyka dynamiczna

## **SOFTWARE FOR ANALYSIS AND PRESENTATION OF THE RESONANCE AMPLIFIER DYNAMIC CHARACTERISTIC**

**Summary:** The paper presents AMPLAM software created at the Bialystok University of Technology, supporting the analysis of the resonant power amplifier. AMPLAM allows to determinate dynamic characteristics of the power amplifier and selected energy parameters. Dynamic characteristic is one of the most important device's characteristic and describe the behavior of the device under operating conditions. Her knowledge allows to quickly specify the class and work's regime and values of output voltage and current. The AMPLAM program was created in the Matlab, but as core for nonlinear analysis the Ansoft Serenade software was used.

**Keywords:** resonance amplifier, software, nonlinear analysis, dynamic characteristic

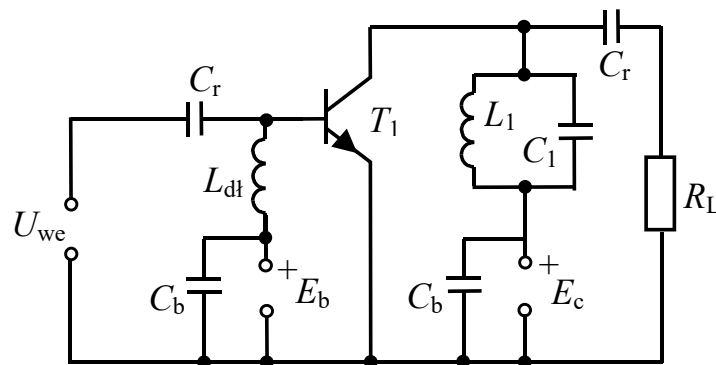
### **1. WSTĘP**

Podczas symulacji pracy układów elektronicznych typowo obserwowane są ich charakterystyki czasowe lub częstotliwościowe. Jednak często ważne są także inne rodzaje

charakterystyk, np. charakterystyki robocze (dynamiczne), których znajomość jest istotna przy analizie pracy urządzenia. Na podstawie ich znajomości można określić m.in. klasę i stan pracy wzmacniacza. Ponieważ nie są to charakterystyki uniwersalne, a jedynie wiążące pewne określone i charakterystyczne dla danego układu wielkości, ich bezpośrednia prezentacja graficzna nie jest możliwa w dostępnym oprogramowaniu komercyjnym. Autorzy, z takim problemem zetknęli się podczas analizy pracy rezonansowego wzmacniacza mocy. Odpowiedzią stało się opracowanie oprogramowania dodatkowego, wykorzystującego wyniki symulacji z klasycznego programu CAD, a następnie obliczającego z nich charakterystyki niezbędne do analizy pracy układu.

## 2. REZONANSOWY WZMACNIACZ MOCY

Rezonansowy wzmacniacz mocy jest układem dość często wykorzystywanym w technice w.cz., przy konstrukcji urządzeń nadawczych oraz bloków wykonawczych nagrzewnic w.cz. [1,4,6,9]. Jest on modyfikacją klasycznego wzmacniacza tranzystorowego. Główna różnica pomiędzy nimi tkwi w układzie obciążenia, którym nie jest sama rezystancja  $R_L$ , a równoległe połączenie tej rezystancji oraz filtra środkowoprzepustowego  $L_1C_1$  o częstotliwości rezonansowej równej częstotliwości sygnału wejściowego. Często stosowaną modyfikacją jest także układ z linearyzacją, tzw. układ Doherty'ego [1,4-6,9].



Rys. 1. Układ wzmacniacza rezonansowego  
Fig. 1. The resonant amplifier system

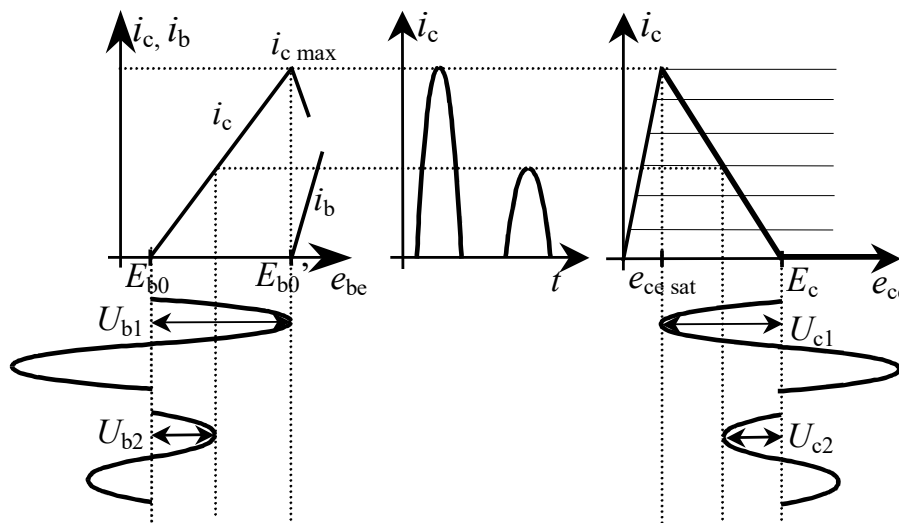
W układzie wzmacniacza pokazanym na rysunku 1 zmiana klasy pracy odbywa się poprzez zmianę kąta odcięcia  $\theta$  (zmiana wartości napięcia polaryzacji  $E_b$ ). W przypadku, gdy napięcie  $E_b$  równa się napięciu przewodzenia tranzystora  $E_{b0}$ , wzmacniacz pracuje w klasie B, zaś, gdy jest mniejsze - pracuje w klasie C. Gdy jest ono większe od napięcia przewodzenia tranzystora wzmacniacz pracuje w klasie A lub AB – decyduje o tym amplituda sygnału  $U_{we}$  na wejściu wzmacniacza. Gdy jest ona dostatecznie mała, taka że  $E_b - U_{we} > E_{b0}$  wzmacniacz pracuje w klasie A. Natomiast w przypadku  $E_b - U_{we} < E_{b0}$  uzyskujemy pracę w klasie AB.

Oprócz klas pracy wzmacniacza mocy rozróżniamy także jego stany pracy. Wyróżniamy trzy rodzaje stanów pracy wzmacniacza, zależne od tego, czy przekraczana jest wartość napięcia bazy  $E_{b0}$ , dla której rozpoczyna się nasycenie prądu kolektora (rys.2,3):

- stan niedowzbudzony – gdy  $E_b + U_{we} < E_{b0}$ ,
- stan graniczny – gdy  $E_b + U_{we} = E_{b0}$
- stan przewzbudzony – gdy  $E_b + U_{we} > E_{b0}$ .

### 3. ANALIZA PRACY WZMACNIACZA REZONANSOWEGO

Analiza pracy układu z reguły jest prowadzona przy założeniu odcinkowo - liniowej aproksymacji jego charakterystyk [1,2,4,9]. Na rysunkach 2-3 przedstawiono przykładowe kształty napięć i prądów rezonansowego wzmacniacza mocy w klasie B i w różnych stanach pracy. W stanie granicznym i niedowzbudzonym przyjmujemy warunek  $i_b = 0$  i wynikający z niego  $i_c = i_c$  (praca wielkosygnalowa). Wiąże się to z tym, że w tych stanach pracy prąd bazy tranzystora jest dużo mniejszy od prądu kolektora, stąd może być pominięty.



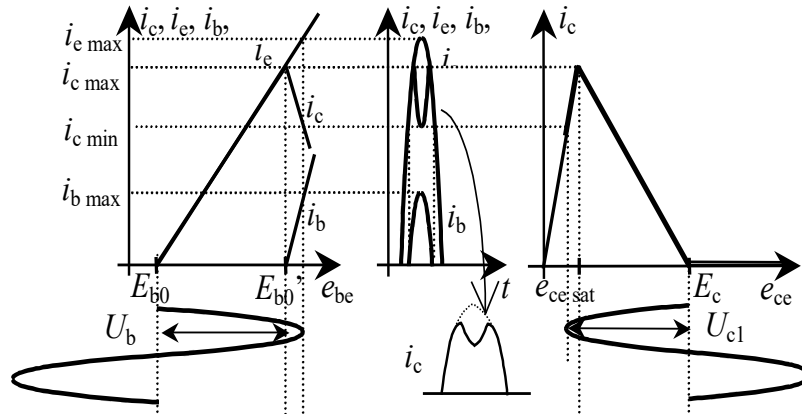
Rys. 2. Charakterystyki przy pracy wzmacniacza w klasie B w stanach granicznym (1) i niedowzbudzonym (2)

Fig. 2. Performance characteristics of the B class amplifier at limit states (1) and unaimed (2)

Rysunek 2 przedstawia przebiegi napięć i prądów dla wzmacniacza pracującego w klasie B w stanach granicznym i niedowzbudzonym. Napięcie polaryzacji bazy  $E_b$  jest równe napięciu progowemu tranzystora  $E_{b0}$ . Oznacza to, że dokładnie przez połowę okresu sygnału tranzystor wzmacnia sygnał wejściowy, a przez drugą połowę tranzystor jest zatkany. Układ pracuje w stanie granicznym z maksymalną mocą wyjściową, gdyż amplituda sygnału wejściowego  $U_{we}$  jest tak dobrana, że napięcie na bazie osiąga wartości, przy których prąd bazy przestaje być możliwy do pominięcia ( $E_{b0}$ ).

#### 4. ANALIZA PRACY W STANIE PRZEZWZBUDZONYM

Stan przewzbudzony uzyskujemy poprzez zwiększenie amplitudy sygnału wejściowego doprowadzając do przekroczenia napięcia  $E_{b0}'$  (rys.3).



Rys. 3. Charakterystyki przy pracy wzmacniacza w klasie B w stanie przewzbudzonym  
Fig. 3. Performance characteristics of the B class amplifier in overdriven state

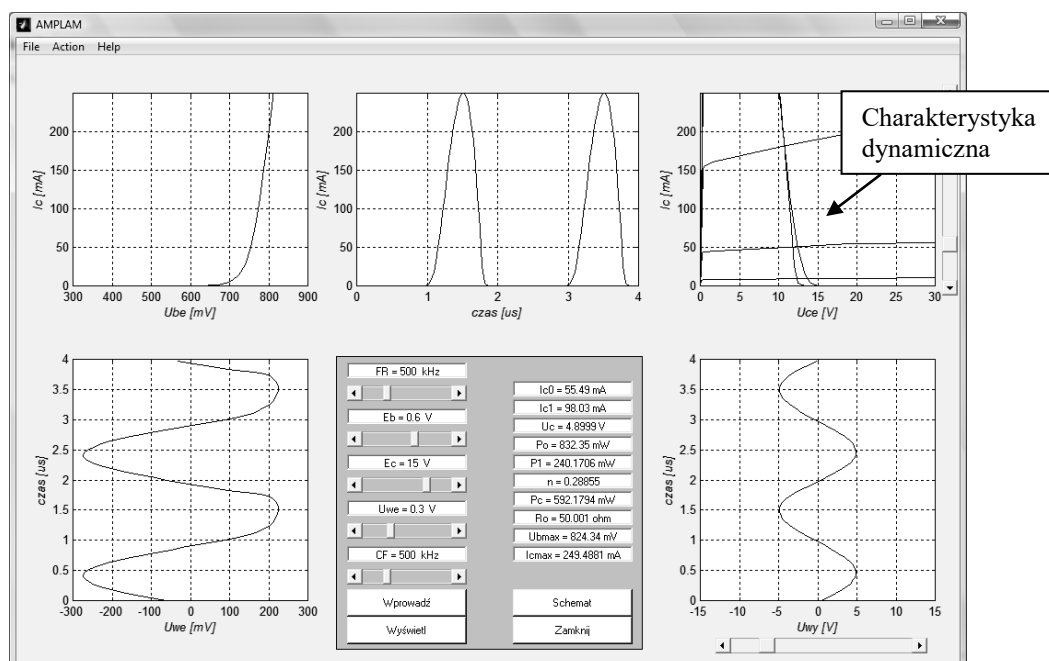
Stan przewzbudzony charakteryzuje się dużymi nieliniowościami sygnału i w związku z tym jest on stosowany dużo rzadziej. Jego cechą charakterystyczną jest początkowe spłaszczenie wierzchołka impulsu prądu kolektora, a następnie pojawienie się w nim wgłębienia. Harmoniczne prądu kolektora nie mogą być w tym wypadku wyznaczone bezpośrednio z rozkładu impulsu kosinusoidalnego, gdyż prąd kolektora jest odkształcony. Należy zauważyć, że przejście od stanu granicznego do przewzbudzonego, ze względu na duże nachylenie charakterystyki przejściowej w tym obszarze, następuje bardzo szybko. Jest to dość niebezpieczne, gdyż może prowadzić do uszkodzenia tranzystora.

#### 5. PROGRAM AMPLAM

W ramach prac badawczych prowadzonych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej opracowane zostało oprogramowanie AMPLAM umożliwiające szybkie i przejrzyste obserwacje najważniejszych charakterystyk wzmacniaczy rezonansowych. Oprogramowanie zostało napisane w środowisku MATLAB i współpracuje z programem Ansoft Serenade, w którym wykonywana jest analiza nieliniowa zamodelowanego wzmacniacza. Po przejęciu firmy Ansoft przez Ansys, program ten, po pewnych zmianach występował na rynku jako Ansys Designer. Obecnie nie występuje jako oddzielny program, zaś jego funkcjonalności zostały zaimplementowane w pakietach Ansys HFSS i Ansys Electronics Desktop [7]. Oprogramowanie Serenade umożliwia modelowanie, analizę i optymalizację układów elektronicznych i mikrofalowych składających się z bardzo wielu

elementów. Wśród modeli elementów zawartych w bazach programu można wyróżnić: elementy o parametrach skupionych (kondensatory, cewki, rezystory i ich różne połączenia oraz inne elementy pasywne); elementy o parametrach rozłożonych (różne rodzaje linii transmisyjnych, w tym linie paskowe symetryczne i niesymetryczne oraz modele ich połączeń i nieciągłości); aktywne elementy dyskretne: diody, tranzystory bipolarne i polowe; elementy typu „czarna skrzynka” w postaci od 1- do 4-wrotników, których parametry mogą być zadawane przy pomocy dowolnych macierzy Z, Y, S. Ponadto oprogramowanie zawiera bogatą bibliotekę modeli elementów pasywnych i aktywnych wiodących producentów. Przykłady analizy innych układów przy pomocy programu Serenade można znaleźć w [8].

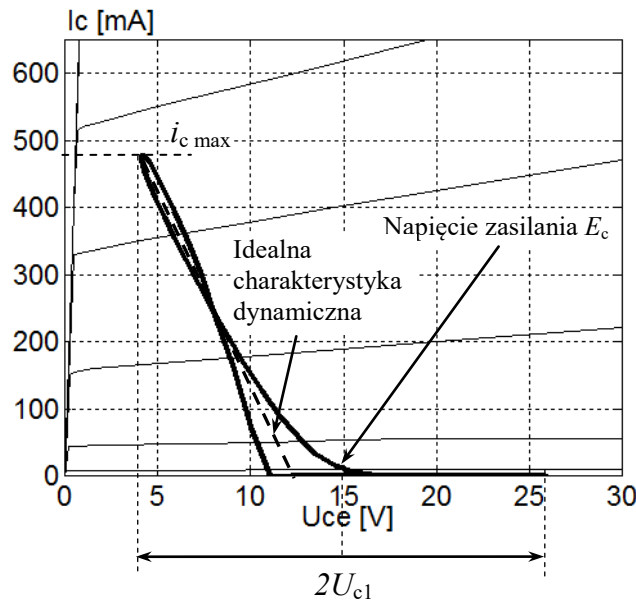
Przykładowy widok okna programu AMPLAM podczas analizy układu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Główne okno wynikowe programu AMPLAM

Fig. 4. The main result window of the program AMPLAM

W oknie programu odpowiednio rozmieszczone zostały następujące charakterystyki: napięcia wejściowego  $U_{we} = f(t)$ , przejściowa  $I_c = f(U_{be})$ , przebieg prądu kolektora  $I_c = f(t)$ , wyjściowa  $I_c = f(U_{ce})$  oraz napięcia wyjściowego  $U_{wy} = f(t)$ . Charakterystyki statyczne tranzystora wykorzystanego we wzmacniaczu wczytywane są z odrębnych plików zawierających dane z wcześniej przeprowadzonych analiz stałoprądowych. Na statycznej charakterystyce wyjściowej tranzystora dodatkowo rysowana jest charakterystyka dynamiczna (rys.5), przedstawiająca chwilowe zmiany punktu pracy, czyli zależne od czasu wzajemne jednoczesne zmiany  $I_c$  oraz  $U_{ce}$ . Charakterystyka ta nie jest możliwa do bezpośredniego uzyskania w programach do analizy układów elektronicznych, a jej analiza pozwala szybko określić warunki pracy elementu czynnego.



Rys. 5. Przykładowa charakterystyka dynamiczna w klasie C w stanie niedowzбудzonym  
 Fig. 5. Sample dynamic characteristics in Class C in an anaeraged state

W teorii charakterystyka dynamiczna przy zastosowaniu aproksymacji odcinkowo - liniowej ma postać prostej o nachyleniu zależnym od klasy pracy wzmacniacza, zaś jej wielkość zależy od stanu pracy. W rzeczywistości, jest ona nieliniowa i posiada histerezę. Na rys.5 wrysowano linią przerywaną także idealną charakterystykę dynamiczną. Z charakterystyki dynamicznej (rys.5) odczytać można m.in. wartości impulsu prądu kolektora  $i_{c\max}$ , napięcia zasilania  $E_c$ , amplitudy napięcia wyjściowego  $U_c$  oraz klasę i stan pracy analizowanego wzmacniacza, a także czy układ pracuje w rezonansie. W środkowej części okna programu wyświetlane są, automatycznie obliczane przez program, wybrane parametry opisujące pracę wzmacniacza: amplitudy składowych prądu kolektora – składowa stała  $I_{c0}$  i pierwsza harmoniczna  $I_{c1}$ , amplituda napięcia wyjściowego kolektora  $U_c$ , moce prądu stałego  $P_0$  i pierwszej harmonicznej  $P_1$ , sprawność  $\eta$ , moc tracona w kolektorze  $P_c$ , rezystancja obciążenia  $R_o$ , maksymalna wartość napięcia na bazie  $U_{b\max}$  oraz maksymalna wartość impulsu prądu kolektora  $I_{c\max}$ . Wartości tych parametrów są obliczane z klasycznych zależności:

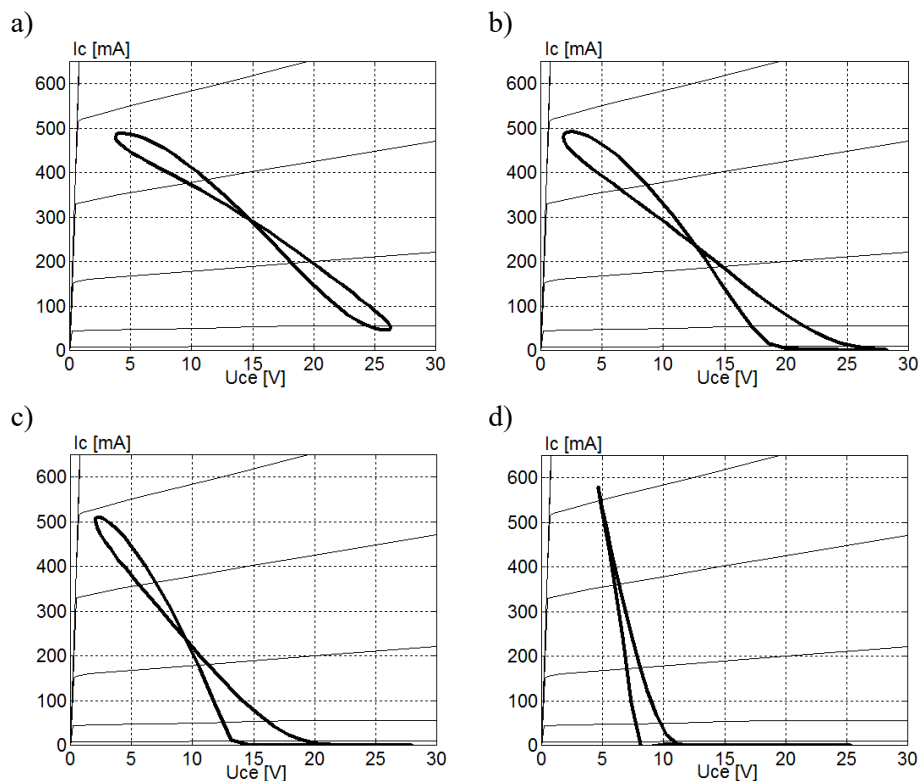
$$P_0 = E_c \cdot I_{c0} \quad P_1 = \frac{1}{2} U_c \cdot I_{c1} \quad \eta = \frac{P_0}{P_1} \quad (1)$$

Z poziomu programu AMPLAM możliwe jest zadawanie pięciu podstawowych parametrów wejściowych umożliwiających zmianę klasy i stanu pracy wzmacniacza. Są to napięcia stałe polaryzujące tranzystor  $E_b$  i  $E_c$ , amplituda i częstotliwość napięcia wejściowego oraz częstotliwość rezonansowa wzmacniacza (program sam oblicza wartość pojemności dla zadanej wcześniej indukcyjności w obwodzie rezonansowym). Wielkości te można zmieniać wpisując je z klawiatury lub za pomocą suwaków umieszczonych w oknie programu. Analiza

pracy wzmacniacza wykonywana jest w programie Ansoft Serenade, zaś pogram AMPLAM modyfikuje plik wejściowy tego programu opisujący całą strukturę wzmacniacza. Program Serenade wykonuje analizę nieliniową układu w dziedzinie częstotliwości, a następnie na jej podstawie oblicza charakterystyki czasowe prądów i napięć. Aby przebiegi czasowe były wiernie odtworzone, szczególnie w przypadku pracy wzmacniacza w stanie przewzbudzonym, wymuszono w programie wyznaczenie większej liczby harmonicznego sygnału – przyjęto 25 harmonicznego sygnału, aby zapewnić odpowiednią dokładność analizy i w miarę krótki czas jej wykonywania. Po wykonanej analizie AMPLAM wczytuje pliki wyjściowe zawierające dane z przeprowadzonej analizy, dokonuje własnych dodatkowych obliczeń, a następnie prezentuje wszystkie wyniki w głównym oknie – kształty prądów i napięć wejściowych i wyjściowych, charakterystykę dynamiczną oraz wyznaczone parametry.

## 6. ANALIZA PRACY WZMACNIACZA

Jako obwód wyjściowy zastosowano równoległy obwód rezonansowy ( $f_{\text{rez}} = 500 \text{ kHz}$ ), ze względu na łatwość strojenia. Inne konstrukcje obwodów wyjściowych, np. typu pi, przedstawiono w pracach [2,3].

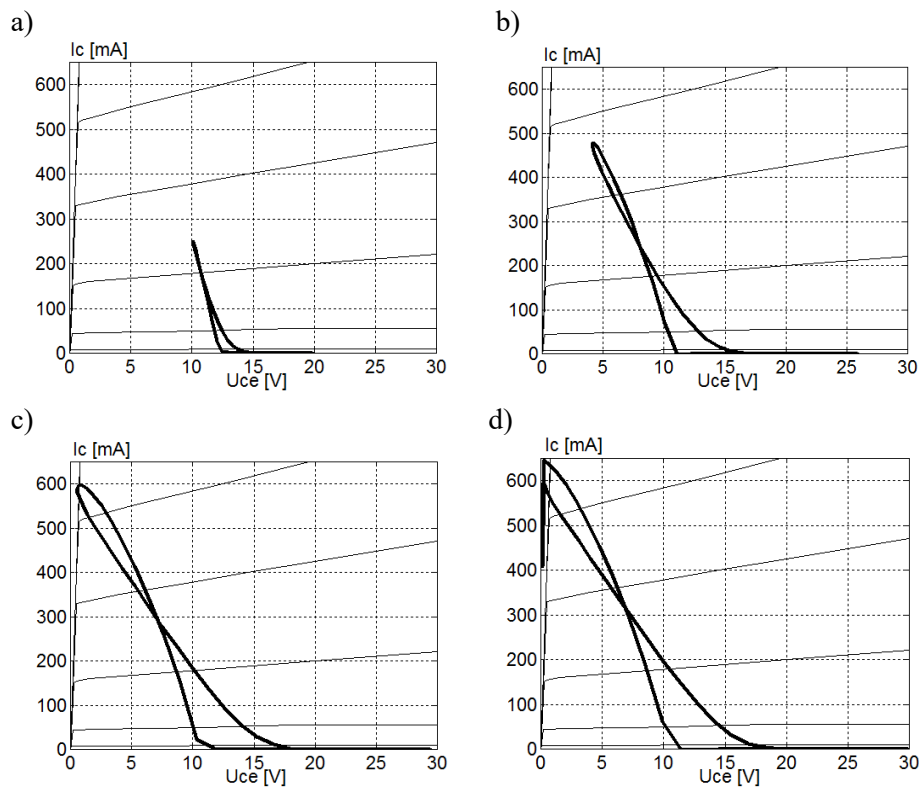


Rys. 6. Charakterystyki dynamiczne w klasach: A (a), AB (b), B (c), C (d)

Rys. 6. Dynamic characteristics in classes: A (a), AB (b), B (c), C (d)

Na rysunku 6 pokazano charakterystyki dynamiczne analizowanego wzmacniacza w różnych klasach pracy. Oscylują one wokół napięcia zasilania  $E_c = 15$  V. Zmianie klasy pracy towarzyszy zmiana długości poziomej części charakterystyki (gdy  $i_c = 0$ ), w której napięcie wyjściowe jest odtwarzane z energii zgromadzonej w obwodzie rezonansowym (największa w klasie C, brak w klasie A).

Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki dynamiczne wzmacniacza mocy pracującego w płytce w klasie C ( $E_b = 0,6$  V) w różnych stanach pracy. Charakterystyka dynamiczna składa się z dwóch części: jednej nieliniowej, związanej z przepływem prądu kolektora i drugiej, leżącej na osi odciętych (gdy  $i_c$  jest bliskie 0). Przy przechodzeniu ze stanu niedowzbudzonego do granicznego (zwiększanie napięcia wejściowego) zmienia się zarówno długość jak i nachylenie charakterystyki dynamicznej, co odpowiada zwiększaniu się amplitudy napięcia wyjściowego. Zwiększa się też histereza charakterystyki.

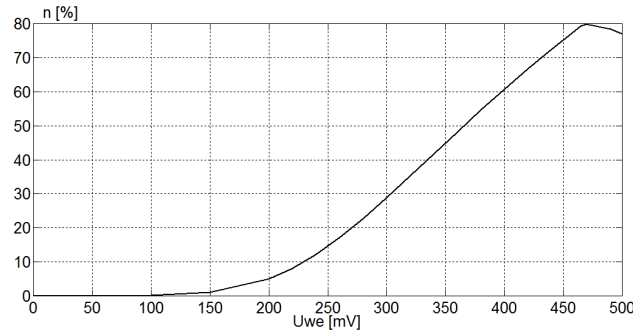


Rys. 7. Charakterystyki dynamiczne w klasie C w stanach: a,b) niedowzbudzonym ( $U_{we} = 0,3$  V i 0,4 V), c) granicznym ( $U_{we} = 0,46$  V), d) przewzbudzonym ( $U_{we} = 0,472$  V)

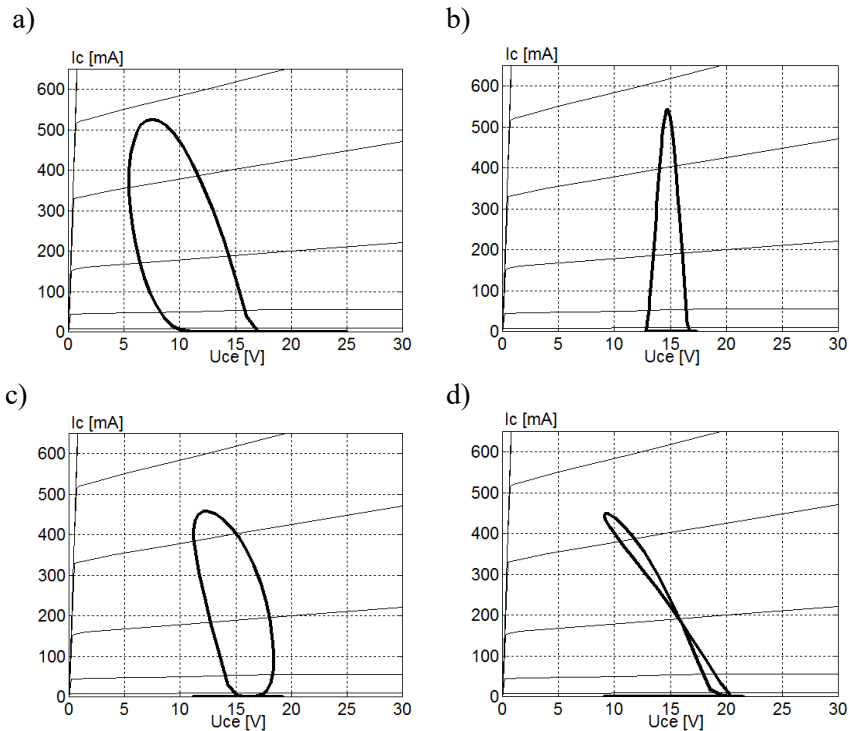
Fig. 7. Dynamic characteristics in class C in states: a, b) unenconscious ( $U_{we} = 0.3$  V and 0.4 V), c) limit ( $U_{we} = 0.46$  V), d) overexcited ( $U_{we} = 0.472$  V)

W stanie granicznym charakterystyka dynamiczna dotyka do pionowej części charakterystyki statycznej. Dalsze zwiększanie napięcia wejściowego powoduje przejście do stanu przewzbudzonego – pojawia się deformacja w górnej części charakterystyki dynamicznej i jej załamanie - jej część pokrywa się z prostą prądu kolektora w stanie nasycenia. Oznacza to jednocześnie zniekształcenie wierzchołka impulsu prądu kolektora (rys.3).



Rys. 8. Charakterystyka sprawności przy  $U_b = \text{const} = 0,6 \text{ V}$ Fig. 8. Performance curve at  $U_b = \text{const} = 0.6 \text{ V}$ 

Przejściu ze stanu granicznego do przewzbudzonego towarzyszy także zmniejszenie mocy wyjściowej i sprawności. Sprawność jest największa przy pracy w stanie granicznym (rys.8) - w analizowanym przypadku (płytką klasa C) wynosi ona ok. 80 %



Rys. 9. Charakterystyki dynamiczne wzmacniacza przy pracy poza rezonansem dla częstotliwości:

a) 490 kHz, b) 420 kHz, c) 260 kHz, d) 250 kHz

Fig. 9. Dynamic characteristics of the amplifier at operation outside resonance for the following frequencies: a) 490 kHz, b) 420 kHz, c) 260 kHz, d) 250 kHz

Wraz ze zmianą częstotliwości sygnału wejściowego zmieniać się będzie wartość napięcia wyjściowego oraz wyjściowa charakterystyka dynamiczna. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowe zmiany jej kształtu przy zmianie częstotliwości sygnału od rezonansu głównego do pierwszej subharmonicznej 250 kHz (wówczas praca wzmacniacza jako powielacza częstotliwości). Zmiana kształtu charakterystyki dynamicznej z quasi-liniowej na elipsoidalną jest równoznaczna z pracą poza rezonansem.

## 7. PODSUMOWANIE

Oprogramowanie AMPLAM jest doskonałym narzędziem do analizy pracy wzmacniacza rezonansowego. Jego szczególną zaletą jest możliwość obserwacji charakterystyk dynamicznych. Analizując ich kształt można określić takie parametry wzmacniacza, jak klasa i stan pracy oraz uzyskać informacje o pracy w rezonansie lub poza nim. Zaletą oprogramowania jest także łatwość jego modyfikacji do analizy innych układów elektronicznych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Kazimierczuk M. K.: RF Power Amplifier, J. Wiley & Sons, New York, Hoboken 2014.
2. Modzelewski J.: Rezonansowy wzmacniacz mocy klasy C w stanie przewzbudzonym, „Elektronika - konstrukcje, technologie, zastosowania”, 2008, nr 11, s. 36-39.
3. Modzelewski J.: Obwody typu pi 1 o małej dobroci wypadkowej w rezonansowych wzmacniaczach mocy. „Przegląd Elektrotechniczny”, 2010, nr 11a, s. 200-203.
4. Eroglu A.: Linear and Switch-Mode RF Power Amplifiers. CRC Press, Boca Raton, London, New York 2018.
5. Kim J.H.: Kim K.J., Park C.S.: Linearity Improvement of a Power Amplifier Using a Series LC Resonant Circuit. „Microwave and Wireless Comp. Letters, IEEE” 2008, nr 5, s. 332-334.
6. Grebennikov A, Bulja S.: High-Efficiency Doherty Power Amplifiers. Historical Aspect and Modern Trends. „Proceedings of the IEEE” 2012, nr 12, s.3190–3219.
7. <https://www.ansys.com/products/electronics> [Dostęp: 14.05.2018]
8. McPherson D.S., Chrisstonidis C.E.: CAD Techniques. W: Robertson I.D., Lucyszyn S. (ed.), RFIC and MMIC Design and Technology, The Institution of Engineering and Technology. London 2009.
9. Thangasamy V., Kamsani N.A., Hamidon M.N., Bukhori M.F., An Overview of RF Power Amplifier Techniques and Effect of Transistor Scaling on its Design Parameters. „International Journal of Applied Engineering Research”, 2014, nr 2, s. 257-276.

Dr inż. Norbert LITWIŃCZUK

Politechnika Białostocka

Wydział Elektryczny, Katedra Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej

ul. Wiejska 45D

15-351, Białystok

Tel. (85) 746-93-99; e-mail: n.litwinczuk@pb.edu.pl

Dr inż. Maciej SADOWSKI

Politechnika Białostocka

Wydział Elektryczny, Katedra Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej

ul. Wiejska 45D

15-351, Białystok

Tel. (85) 746-93-71; e-mail: m.sadowski@pb.edu.pl