

Jerzy Witkowski

ANALIZA OBWODÓW ELEKTRONICZNYCH NA MASZYNACH CYFROWYCH ZA POMOCĄ SYSTEMU PROGRAMÓW ECAP

Streszczenie. System programów ECAP (skrót od Electronic Circuit Analysis Program) dzięki swojej uniwersalności znalazł szerokie zastosowanie do analizy układów elektronicznych. Analizę można przeprowadzić dla prądu stałego, zmiennego oraz dla określenia stanów przejściowych. Przyrządy elektroniczne zastępuje się przy tym ich schematami zastępczymi uzyskanymi w wyniku aproksymacji charakterystyk prądowo-napięciowych liniami prostymi. W artykule zawarto opis systemu ECAP ukazując - ważne z punktu widzenia użytkownika - możliwości tego systemu; przedstawiono także sposoby tworzenia schematów zastępczych diody i tranzystora.

1. Wstęp

Wśród wielu istniejących programów analizy układów elektronicznych na maszynach cyfrowych dwa systemy programów zwracają na siebie - powszechnością stosowania, uniwersalnością - szczególną uwagę [1]. Są to mianowicie system NET-1 [2] opracowany w 1962 r. w Los Alamos Scientific Laboratory, University of California oraz system ECAP [3] opracowany przez IBM w kooperacji z The Norden Division of United Aircraft Corporation w 1965 r.

Oba systemy programów różnią się między sobą podejściem do zagadnienia, a więc także uzyskiwanymi rezultatami. Stosowany w systemie NET-1 model tranzystora jest bardzo złożony, wymaga podania 36 parametrów opisujących tranzystor; diodę określa 13 różnych parametrów.

Modele tranzystora i diody są w systemie NET-1 ściśle określone, narzucone z góry (oczywiście wymagane jest wprowadzenie danych szczegółowych charakteryzujących zastosowane w układzie elektronicznym tranzystory lub diody); są one przechowywane w pamięci maszyny i w odpo-

wiednim momencie wykorzystywane do obliczeń. Wszystko to powoduje, że nawet do analizy prostych układów elektronicznych, pracujących w szczególnych warunkach (np. tranzystory pracujące w nasyceniu), przy nie wymaganej dużej dokładności obliczeń stosuje się także skomplikowane schematy zastępcze przyrządów elektronicznych. System ten jest więc mało elastyczny, trudny do przystosowania do różnych wymagań użytkowników. Jego główną zaletą jest duża dokładność obliczeń szczególnie w przypadku analizy stanów nieustalonych.

W systemie programów ECAP nie ma ustalonych modeli przyrządów elektronicznych - budowa schematów zastępczych, stopień ich złożoności zależy więc głównie od użytkownika (od wymaganej dokładności obliczeń). Zastosowany schemat zastępczy jest, rzecz jasna, poddany dwom zasadniczym ograniczeniom:

- mogą w nim występować jedynie takie elementy obwodów elektronicznych, które są "uznawane" przez ECAP,
- złożoność takiego schematu zastępczego nie może być większa od możliwości, jakie daje system ECAP w konkretnej instalacji.

Ostatni warunek związany jest z ograniczoną pojemnością pamięci maszyny cyfrowej. W instalacji zawierającej np. pamięć o pojemności 40k możliwa jest analiza - przy użyciu systemu ECAP - obwodu elektronicznego złożonego z 20 węzłów (plus węzeł wspólny) oraz 60 gałęzi (patrz rys. 1).

Literatura poświęcona maszynowej analizie układów elektronicznych jest obszerna; wiele pozycji [4] omawia cały zespół zagadnień związanych z tym problemem (np. sposoby uzyskania równań opisujących dany układ, metody ich rozwiązywania na maszynach cyfrowych itp.) i są interesujące przede wszystkim dla osób zajmujących się opracowywaniem systemów programów analizujących.

Niniejszy artykuł jest poświęcony tylko jednemu systemowi programów [5] i jest napisany z punktu widzenia użytkownika. Pozwala to ukazać dokładniej możliwości, jakie stwarza system programów ECAP.

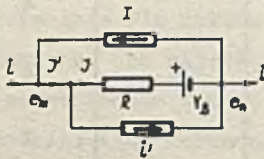
2. Analiza obwodów elektronicznych w systemie programów ECAP

System programów ECAP napisany jest w Fortranie i składa się z czterech podstawowych programów określonych jako:

- język wejściowy,
- analiza obwodów dla prądu stałego,
- analiza obwodów dla prądu zmiennego,
- analiza stanów przejściowych.

Pierwszy z powyższych programów ma znaczenie kluczowe w systemie. Dzięki niemu możliwe jest określenie w sposób prosty danych wejściowych od razu na podstawie budowy układu elektronicznego. Program ten kontroluje formalną poprawność danych na kartach wejściowych i określa rodzaj błędu, wybiera rodzaj analizy, a po zakończeniu obliczeń decyduje o sposobie wyprowadzenia danych wyjściowych.

System programów ECAP umożliwia wykonanie jednej z trzech podanych wyżej analiz (punkty b,c,d), jeśli zestaw elementów obwodu elektronicznego jest ograniczony. Istniejące możliwości ujęto w tablicy 1.



Rys. 1. Standardowa gałąź obwodu elektronicznego zgodnie z systemem ECAP (przykład analizy dla prądu stałego)

Podobnie przyjęto określoną budowę standardowej gałęzi układu elektronicznego, którą - dla przypadku analizy obwodów dla prądu stałego - przedstawiono na rys. 1. Zakłada się przy tym, że każda gałąź analizowanego obwodu musi zawierać element bierny o niezerowej wartości. Liczba źródeł zależnych (i'') może być większa niż na rys. 1. W systemie ECAP stosuje się jednostki układu SI.

Analiza układów elektronicznych dla prądu stałego pozwala na:

- uzyskanie rozwiązania dla nominalnych wartości elementów obwodu (możliwe jest wydrukowanie względnie wydziarkowanie na kartach wartości napięć węzłowych, napięć gałęzi, napięć na elementach tworzących gałąź, prądów gałęzi i prądów płynących przez poszczególne elementy, jak również mocy strat na poszczególnych elementach);

Tablica 1

Element obwodu elektronicznego	Rodzaj analizy		
	dla prądu stałego	dla prądu zmiennego	dla stanów przejściowych
Rezystor (R)	x	x	x
Kondensator (C)		x	x
Cewka indukcyjna (L)		x	x
Źródło napięciowe o stałej wartości (E)	x		x
Źródło napięcia o stałej wartości skutecznej (E)		x	
Źródło napięcia, zmienne w czasie $E(t)$			x
Siła prądomotoryczna (SPM) o stałej wartości (I)	x		x
SPM o stałej wartości skut. (I)		x	
SPM zmienna w czasie $I(t)$			x
Cewki indukcyjne wzajemnie sprzężone (M)		x	
Klucz (S)			x
SPM zależna od prądu gałęzi z rezystorem (i')	x	x	x
SPM zależna od prądu gałęzi z kondensatorem, cewką indukcyjną (i')			x

- + uzyskanie rozwiązania w przypadku zmiany wartości jednego z elementów układu, w szerokich granicach;
- uzyskanie rozwiązania przy jednoczesnej modyfikacji wartości grupy elementów (maksimum 20);
- wyznaczenie zależności napięć węzłowych od zmian wartości poszczególnych elementów (czułość napięć węzłowych na tolerancje elementów);
- obliczenie maksymalnej i minimalnej wartości napięć węzłowych dla najgorszego przypadku, przy zadanych tolerancjach elementów;

- wyznaczenie odchylenia standardowego;
- przekształcenie układu w równoważny zgodnie z twierdzeniem Thèvenina (lub Nortona).

W wyniku natomiast analizy układów elektronicznych pobudzanych prądem sinusoidalnie zmiennym można uzyskać:

- rozwiązanie dla nominalnych wartości elementów obwodu i dla częstotliwości określonej przez użytkownika (możliwe jest uzyskanie - jak w przypadku analizy dla prądu stałego - wartości napięć węzłowych, napięć gałęzi itd., przy czym wynik składa się z wartości skutecznej danej wielkości oraz przesunięcia fazowego),
- rozwiązanie w przypadku jednoczesnego zmodyfikowania wartości kilku elementów (maksimum 20),
- rozwiązanie przy zmianie wartości jednego z elementów układu o stałą wartość (przyrost) w kolejnych etapach,
- rozwiązanie przy dowolnych wartościach przesunięć fazowych niezależnych źródeł napięcia i prądu,
- charakterystyki częstotliwościowe obwodu,
- rozwiązanie układu z transformatorem idealnym,
- rozwiązanie dla układu zawierającego sprzężone magnetycznie cewki indukcyjne (co najwyżej 5 par),
- przekształcenie danego układu w równoważny zgodnie z twierdzeniem Thèvenina (lub Nortona).

Z kolei, analiza stanów przejściowych danego obwodu pozwala uzyskać rozwiązanie dla:

- stanu nieustalonego,
- stanu ustalonego.

Dla obu przypadków można uzyskać wartości napięć węzłowych i prądów płynących przez poszczególne elementy obwodu. Dla stanu nieustalonego wielkości te mogą być wyprowadzane w regularnych odstępach czasu oraz tuż przed i tuż po zadziałaniu kluczy (jeśli występują one w obwodzie); z zasady podawany jest również moment zadziałania klucza.

Zmienne w czasie źródła pobudzające, działające w obwodach poddanych analizie, mogą być wytworzone przez odpowiednio skonstruowane obwody generacyjne (np. dla przebiegów periodycznych) względnie złożone z odcinków linii prostych o skończonym nachyleniu. System ECAP umożliwia także dzięki wykorzystywaniu kluczy oraz źródeł zależnych, analizę obwodów elektronicznych z elementami nieliniowymi. Charakterystyki takich elementów są aproksymowane odcinkami linii prostych.

Podane powyżej rodzaje analizy obwodów elektronicznych zawarte w systemie ECAP można przeprowadzić jedynie przy pewnych ograniczeniach i w określonych warunkach. Ograniczenia te dotyczą m.in. rodzaju elementów, które mogą wystąpić w obwodach analizowanych (patrz tablica 1) oraz stopnia złożoności i minimalnej konfiguracji tych obwodów (np. w najprostszym przypadku obwód analizowany musi zawierać przynajmniej jedną gałąź, niezerowe elementy bierne w gałęziach itp.). W systemie programów ECAP nie można rozpatrywać również układów, w których występują zwarcie względnie przerwa. Przerwę traktuje się tutaj jako b. dużą rezystancję (zwykle 10 Mom), a zwarcie jako b. małą rezystancję (przeważnie 0,01 om) z tym, że ostateczna decyzja o wartościach rezystancji dla obu przypadków może zależeć od użytkownika.

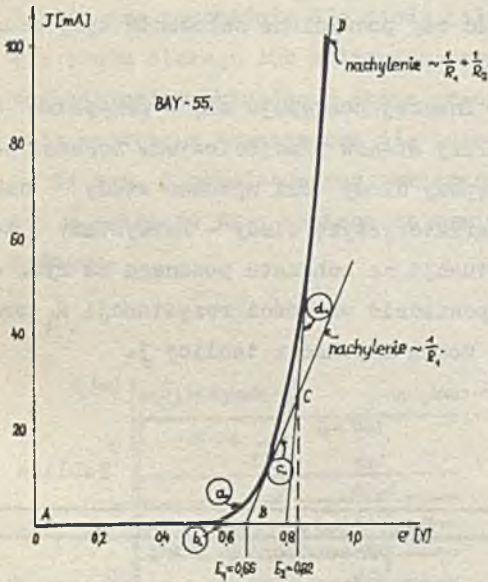
3. Schematy zastępcze elementów elektronicznych

Jak wspomniano poprzednio, w celu przeprowadzenia analizy układu elektronicznego z wykorzystaniem systemu programów ECAP należy zastąpić wszystkie występujące w nim przyrządy elektroniczne (diody, lampy, tranzystory itp.) ich odpowiednimi schematami zastępczymi. Schematy te oczywiście mogą być złożone jedynie z elementów ujętych w tablicy 1.

Poniżej podano przykłady schematów zastępczych dla diody i tranzystora, które należą do przyrządów najczęściej występujących w układach elektronicznych. Ich schematy zastępcze konstruuje się w oparciu o charakterystyki prądowo-napięciowe aproksymując je liniami prostymi; schematy takie nie uwzględniają własności dynamicznych przyrządów, tj. zakłada się, że o stanach przejściowych układu elektronicznego decydują w głównym stopniu elementy zewnętrzne, dołączone do diod i tranzy-

storów. W przypadku pracy układów elektronicznych przy wielkich częstotliwościach, w układach w których o przebiegach przejściowych decydują głównie własności dynamiczne diod i tranzystorów - schematy tych przyrządów elektronicznych należy uzupełnić odpowiednimi elementami biernymi. Podobnie, jeśli dioda względnie tranzystor pracują przez cały czas w punkcie znajdującym się na zagięciu charakterystyki, pomiędzy aproksymującymi charakterystykę liniami prostymi, wówczas ich schematy zastępcze należy tak zmienić, aby dostosować je do konkretnej sytuacji. W przeciwnym przypadku rezultaty otrzymanych obliczeń będą obarczone znacznymi błędami.

3.1. Schemat zastępczy diody

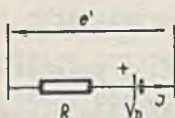


Rys. 2. Charakterystyka diody BAY-55 (a) oraz jej aproksymacja trzema (b,c,d) odcinkami linii prostych

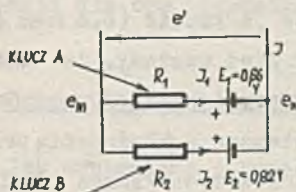
Na rys. 2 przedstawiono zdjętą doświadczalnie charakterystykę diody BAY-55 w kierunku przewodzenia (krzywa a) oraz trzy (w naszym przypadku) aproksymujące ją proste (b,c oraz d). Tak więc uważamy, że charakterystykę diody z dostateczną dokładnością przybliża krzywa łamana ABCD. Na rys. 3 przedstawiono schemat zastępczy tej diody, który można wykorzystać do obliczeń korzystając z systemu programów ECAP. Wartości rezystancji R oraz SEM V_D podano w tabelicy 3.

Tablica 2

Parametr	Stan diody		
	odcięcia $J \leq 0$	przewodzenia $J > 0$	
	$e' \leq 0.66V$	$0.66V \leq e' \leq 0.82V$	$0.82V < e'$
R	10 Mom	6.0 om	1.58 om
V_D	0.66 V	0.66 V	0.82 V



Rys. 3. Schemat zastępczy diody (analiza dla prądu stałego)



Rys. 4. Schemat zastępczy diody wykorzystywany dla analizy stanów przejściowych

Podany schemat diody można wykorzystać dla celów analizy układu elektronicznego dla prądu stałego lub zmiennego (po usunięciu stałych SEM). Należy wówczas najpierw założyć punkt pracy diody, wybrać zgodnie z tabelicą 2 wartości dla R oraz V_D a po przeprowadzeniu obliczeń sprawdzić czy poczynione założenia były słuszne.

Inaczej postępuje się w przypadku analizy stanów przejściowych. Schemat zastępczy diody musi ujmować wtedy całą charakterystykę diody - korzystamy w tej sytuacji ze schematu podanego na rys. 4. Odpowiednie wartości rezystancji R_1 oraz R_2 można uzyskać z tabelicy 3.

Tablica 3

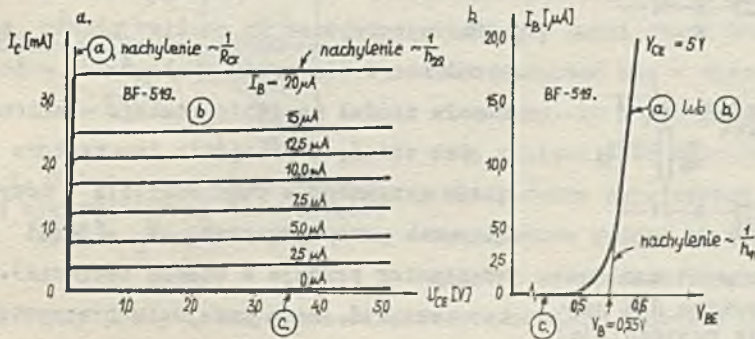
Parametr	Stan diody		
	odcięcia $J \leq 0$	przewodzenia $J > 0$	
	$e' \leq 0.66V$	$0.66V < e' \leq 0.82V$	$0.82V < e'$
R_1	20Mom	6.0 om	6.0 om
R_2	20Mom	20 Mom	2.15om
Klucz A	WYŁ.	ZAŁ.	ZAŁ.
Klucz B	WYŁ.	WYŁ.	ZAŁ.

Zmiany wartości rezystancji R_1 oraz R_2 uzyskujemy w systemie programów ECAP automatycznie dzięki wprowadzeniu elementu określonego jako "klucz" (patrz tablica 1). Stan klucza jest uzależniony od prądu płynącego w danej gałęzi (prąd J' - rys. 1, lub prądy J_1 oraz J_2 - rys.4); zmiana kierunku przepływu prądu gałęzi powoduje zmianę stanu klucza, a więc i skokową zmianę wartości rezystancji (ale także np. innych elementów biernych występujących w układzie, SEM, itd.). Przyjmuje się, że klucz znajduje się w stanie wyłączonym (WYL.) gdy $J \leq 0$, względnie w stanie włączonym (ZAŁ.) jeśli $J > 0$. Stany kluczy A i B wykorzystywanych do uzyskania skokowych zmian wartości rezystancji R_1 oraz R_2 podano również w tablicy 3.

3.2. Schemat zastępczy tranzystora

Wiadomo, że w układach elektronicznych tranzystor może pracować w jednym z trzech stanów: stanie odcięcia, aktywnym oraz nasycenia. Podobnie jak poprzednio dla diody należy tranzystor dla celów analizy dla prądu stałego lub zmiennego zastąpić odpowiednim schematem z uwzględnieniem aktualnego stanu pracy. Tak więc należy określić schematy zastępcze tranzystora dla poszczególnych obszarów jego pracy.

Na rys. 5 przedstawiono pomierzone charakterystyki tranzystora BF-519 w układzie WE i zaznaczono wymienione wcześniej stany pracy tranzystora.



Rys. 5. Charakterystyki tranzystora BF-519 wraz z oznaczeniem stanów pracy: praca w stanie nasycenia (a), aktywnym (b) oraz odcięcia (c)

Tranzystor pracuje w nasyceniu, jeśli jego punkt pracy na charakterystyce z rys. 5a znajduje się na prostej oraz jeżeli $I_B > 0$. Dla wspomnianej prostej mamy

$$I_C = \frac{1}{R_{CX}} V_{CE}, \quad (1)$$

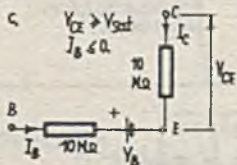
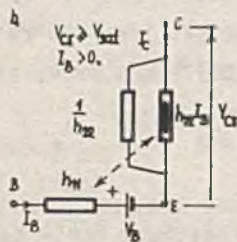
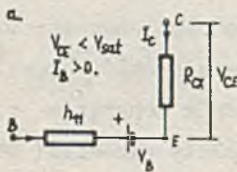
zaś zgodnie z zaproponowanym sposobem aproksymacji charakterystyki przedstawionej na rysunku 5b.

$$I_B = \frac{1}{h_{11}} (V_{BE} - V_B). \quad (2)$$

Oba równania są spełnione w schemacie zastępczym tranzystora pokazanym na rys. 6a.

Schemat zastępczy tranzystora pracującego w stanie aktywnym przedstawiono na rys. 6b. Prąd bazy jest wówczas określony wzorem (2) zaś prąd kolektora równaniem

$$I_C = h_{21} I_B + h_{22} V_{CE}. \quad (3)$$



Rys. 6. Schemat zastępczy tranzystora dla pracy w stanie nasycenia (a) aktywnym (b) oraz odcięcia (c)

Gdy tranzystor pracuje w stanie odcięcia, wówczas $I_B \leq 0$ i stanowi on praktycznie przerwę obwodu. Schemat zastępczy tranzystora pracującego w tym stanie przedstawiono na rys. 6c. Schematy podane na rys. 6 można wykorzystać do analizy układu elektronicznego dla prądu stałego lub - po usunięciu źródeł napięcia stałego - zmiennego.

Jak widać, o przejściu tranzystora ze stanu aktywnego w stan odcięcia decyduje kierunek przepływu prądu I_B (jeśli $I_B \leq 0$ tranzystor pracuje w stanie odcięcia). Łatwo zauważyć, że o przejściu tranzystora ze stanu nasycenia w stan aktywny decyduje z

kości zmiana napięcia V_{CE} . Załóżmy mianowicie, że tranzystor pracuje w nasyceniu z napięciem $V_{CE} = V_{sat}$. Korzystając z (1) oraz (3) mamy

$$I_C = \frac{1}{R_{CX}} V_{sat} = I_B h_{21} + V_{sat} h_{22},$$

stąd

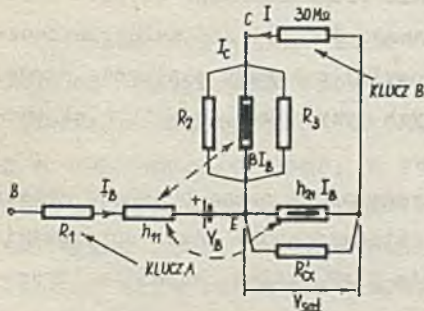
$$V_{sat} = I_B h_{21} R'_{CX} \approx I_B h_{21} R_{CX}, \quad (4)$$

gdzie

$$R'_{CX} = \frac{R_{CX}}{1 - h_{22} R_{CX}}.$$

Znając wartość V_{sat} możemy stwierdzić, że jeśli V_{CE} tranzystora spełnia warunek $V_{CE} \geq V_{sat}$ - tranzystor pracuje w stanie aktywnym lub odcięcia, a jeśli $V_{CE} < V_{sat}$, wówczas tranzystor znajduje się w nasyceniu.

Podane zależności umożliwiają określenie warunków granicznych przy spełnieniu których schemat zastępczy tranzystora powinien ulec zmianie tak, aby odpowiadał aktualnemu stanowi pracy tranzystora. Jest to szczególnie ważne przy analizie stanów przejściowych, gdy punkt pracy tranzystora może zmieniać się w szerokich granicach np. ze stanu nasycenia w stan odcięcia. Do tego rodzaju analizy można wykorzystać schemat tranzystora podany na rys.7, schemat ten uwzględnia wszystkie moż-



Rys. 7. Schemat zastępczy tranzystora wykorzystywany dla analizy stanów przejściowych

żliwe stany pracy tranzystora dzięki zastosowaniu kluczy A oraz B.

Klucz A działa, gdy kierunek przepływu prądu I_B ulegnie zmianie - wartości elementów R_1 , R_2 oraz β zostaną przy tym zmienione skokowo;

klucz B zmienia natomiast wartości elementów R_2 , R_3 oraz β przy zmianie prądu I płynącego przez rezystancję 30M Ω . Odpowiednie wartości wszystkich elementów schematów zastępczych tranzystora BF-519 podano w tabelicy 4.

Tabelica 4

Parametr	Stan tranzystora		
	nasycenia	aktywny	odcięcia
	$I_B > 0, V_{CE} < V_{sat}$	$I_B > 0, V_{CE} \geq V_{sat}$	$I_B \leq 0, V_{CE} \geq V_{sat}$
R_1	0.01 Ω	0.01 Ω	10M Ω
R_2	30M Ω	$1/h_{22} = 55$ kom	30M Ω
R_3	$R_{CX} = 33$ Ω	30M Ω	30M Ω
β	0	$h_{21} = 125$	0
h_{11}	2,25kom	2,25kom	2,25kom
V_B	0,55V	0,55V	0,55V
Klucz A	ZAŁ.	ZAŁ.	WYŁ.
Klucz B	ZAŁ.	WYŁ.	WYŁ.

Jak stwierdzono uprzednio, w systemie programów ECAP stopień złożoności schematu zastępczego zastosowanego do obliczeń zależy wyłącznie od użytkownika programu. Podane powyżej schematy zastępcze diody i tranzystora odnoszą się do najprostszyc przypadków, gdy ich własności dynamiczne można zaniedbać.

W sposób podobny jak dla diody i tranzystora można budować schematy zastępcze dla innych przyrządów elektronicznych. Pewne opracowania, dostosowane do wykorzystania w systemie ECAP, można znaleźć w literaturze [6],[7].

4. LITERATURA

1. Christiansen D.: Comparing the "Big Two" programs. Electronics, 40(1967) str. 74.
2. Malmberg A.F.: NET-1 gets an "A" for accuracy. Electronics 40 (1967) str. 76.
3. Wall H.M.: Flexibility is ECAP's forte. Electronics 40(1967) str.82.
4. Ilin W.N.: Maszynowe projektowanie elektronicznych schem. Moskwa 1972, Energia.
5. 1620 Electronic Circuit Analysis Program (ECAP). Program number 1620-EE-02X. User's Manual IBM, Technical Publications Dept. 1965.
6. Roberts D.D.Jr., Harbourt C.O.; Computer Models of Field-Effect Transistor. Proc. IEEE 55(1967) str. 1921.
7. Daniel M.E.: Development of Mathematical Models of Semiconductor Devices for Computer Aided Circuit Analysis. Proc. IEEE 55 (1967), str. 1913.

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ ПРИ ПОМОЩИ ЭВМ
С ПРОГРАММОЙ "ЕСАР"

Р е з ю м е

Система программы "ЕСАР" (Electronic Circuit Analysis Program) благодаря своей универсальности нашла применение в анализе электронных схем. Анализ возможен для постоянного и переменного тока, а также для переходных процессов. Электронные приборы представлены при этом при помощи эквивалентных схем, полученных в результате аппроксимации отрезками вольтамперных характеристик элемента. В статье дано описание системы "ЕСАР", подчеркнуты с точки зрения эксплуатации, возможности этой системы; представлены также методы конструирования эквивалентных схем для диод и транзисторов.

COMPUTER AIDED ELECTRONIC CIRCUIT ANALYSIS BE MEANS OF ECAP

Summary

The ECAP, an integrated system of programs, is widely used in the analysis and design of electronic circuits. The system can produce DC, AC and Transient analyses but all electronic components must be replaced with their equivalent circuits based on piecewise approximation of current-voltage characteristics. This paper describes the main - from the user's point of view - features of ECAP.