A R C H I W U M E L E K T R O T E C H N I K I
TOM XXII ZESZYT 1 1973

Nadbitka

621.374

Wpływ właściwości elementów wewnętrznych na charakterystyki statyczne i parametry zaciskowe bramek TTL

BOGDAN MACIEJ WILAMOWSKI

Instytut Technologii Elektronowej, Politechnika Gdańska

Rękopis dostarczono 31. 5. 1972

Przeprowadzono analizę 4 typowych układów bramek TTL. W oparciu o odcinkową aproksymację charakterystyk, określono zależność parametrów i charakterystyk zaciskowych od właściwości indywidualnych elementów wewnętrznych układu.

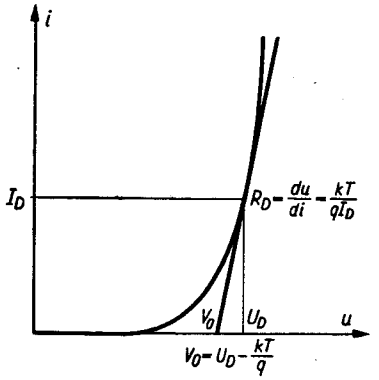
Wskazano na możliwość badania elementów wewnętrznych układu scalonego na podstawie pomiaru jego charakterystyk zewnętrznych. Zbudowano model z elementów indywidualnych i poprzez zmianę wartości elementów sprawdzono poprawność przeprowadzonych rozważań.

1. WSTĘP

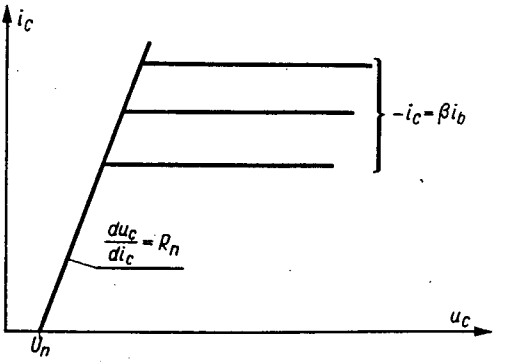
Układ TTL charakteryzuje duża szybkość działania przy stosunkowo niewielkim poborze mocy. Fakt ten zadecydował, że bramki TTL są obecnie najpowszechniej stosowanymi logicznymi układami scalonymi. Cechą charakterystyczną układów scalonych jest również to, że po ich wykonaniu praktycznie niemożliwa jest kontrola właściwości elementów indywidualnych składających się na całość układu scalonego. Jedynymi możliwymi do pomierzenia wielkościami są parametry i charakterystyki zaciskowe [1]. Poprawność procesu technologicznego i własności elementów wewnętrznych w pewnych określonych przypadkach kontrolować można poprzez pomiar parameterów zaciskowych. Proces ten jest niczym innym jak badaniem właściwości wnętrza układu scalonego na podstawie „symptomów" zewnętrznych. Stąd tego typu badania nazywamy często badaniami symptomatycznymi.

Mając na względzie optymalizacje parametrów układu scalonego przy określonych możliwościach technologicznych, jak również proces kontroli jakości wyrobów gotowych, należy znać wpływ własności elementów wewnętrznych układu na parametry i charakterystyki zaciskowe.

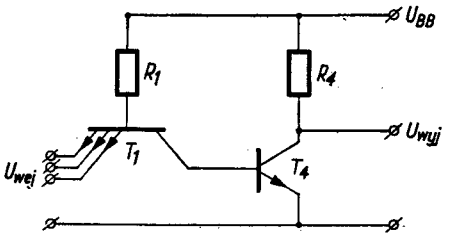
Tego rodzaju analiza dla bramek TTL została wykonana w momencie ich opracowywania i jest najprawdopodobniej wykorzystywana przez firmy zachodnie. Jednak jej wyniki nie zostały jak dotąd opublikowane.



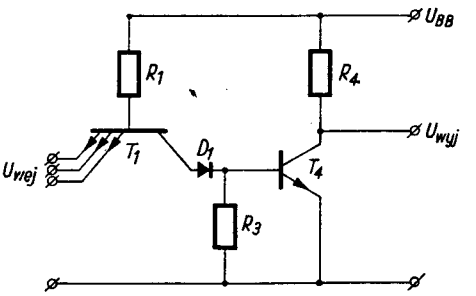
Rys. 1. Sposób aproksymacji charakterystyki statycznej diody



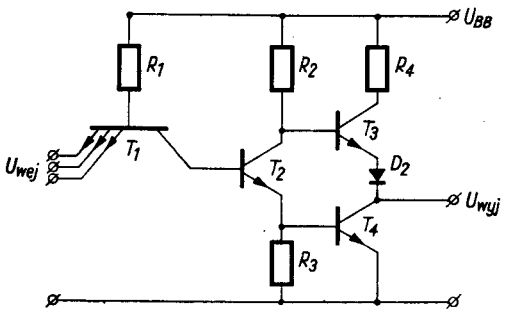
Rys. 2. Sposób aproksymacji charakterystyki statycznej tranzystora



Rys. 3. Standardowy układ bramki TTL



Rys. 4. Układ bramki TTL z podwyższonym progiem

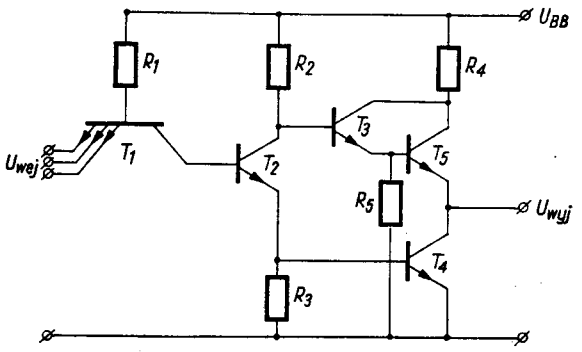


Rys. 5. Bramka TTL o dużej obciążalności

Praca niniejsza przedstawia wyniki takiej analizy przeprowadzonej w oparciu o odcinkową aproksymację charakterystyk diod [2] i tranzystorów [3].

Sposób aproksymacji charakterystyk statycznych diod i tranzystorów ilustrują odpowiednio rysunki 1 i 2.

Analizy dokonano dla czterech topologicznie różnych bramek TTL [4], przedstawionych na rysunkach 3, 4, 5, 6.



Rys. 6. Zmodyfikowana bramka TTL o dużej obciążalności

W pracy przyjęto następujące ważniejsze oznaczenia:

U_{EBk} – spadek napięcia w stanie przewodzenia między emiterem i bazą k-tego tranzystora.
U_{CBk} – spadek napięcia na złączu kolektorowym k-tego tranzystora-złącze w stanie przewodzenia.
U_{nk} – napięcie kolektor-emiter w nasyceniu dla k-tego tranzystora.
U_D – spadek napięcia na diodzie w kierunku przewodzenia.
β_k – współczynnik wzmocnienia prądowego k-tego tranzystora.
β_{ink} – współczynnik wzmocnienia prądowego przy polaryzacji inwercyjnej k-tego tranzystora.
R_{nk} – oporność k-tego tranzystora w nasyceniu.
R_D – oporność różniczkowa diody.

2. STATYCZNE PARAMETRY ZACISKOWE

Ponieważ przy badaniu układów łatwiejsze są pomiary parametrów niż charakterystyk, zostaną poniżej zdefiniowane parametry zaciskowe łatwe do zmierzenia i zawierające w sobie informacje o wnętrzu układu. Wartości parametrów zaciskowych są uzależnione od wartości elementów wewnętrznych i topologii układów. Zależności te dla różnych parametrów zaciskowych, różnych topologii bramek zostaną podane w postaci tablic.

1. $I_{z\,wej}^{-}$ – zwarciowy prąd wejściowy, jedno wejście zwarte do minusa baterii, pozostałe wejścia wolne. Zależność $I_{z\,wej}^{-}$ od wartości elementów wewnętrznych układu ma postać

$$I_{z\,wej}^{-}=\frac{U_{BB}-U_{EB_1}}{R_1}\approx\frac{U_{BB}-0{,}7}{R_1}. \tag{1}$$

Zależność ta jest słuszna dla wszystkich czterech układowo różnych bramek TTL. Na podstawie tego parametru zaciskowego oszacować można z dużą dokładnością wartość rezystora R_1. Z kolei, znając R_1 i konfigurację geometryczną oraz wymiary innych rezystorów w układzie oszacować można ich wartość.

2. $I_{z\,wej}^{+}$ – zwarciowy prąd wejściowy, jedno wejście zwarte do plusa baterii, pozostałe wejścia wolne. Zależności $I_{z\,wej}^{+}$ od wartości elementów wewnętrznych układu dla różnych konfiguracji układowych bramek TTL podane są w tablicy 1. Mierząc $I_{z\,wej}^{+}$ określić można wartość współczynnika wzmocnienia prądowego tranzystora wieloemiterowego przy polaryzacji inwersyjnej. Im β_{in_1} będzie mniejsze, tym mniejszą mocą może być bramka sterowana.

Tablica 1

$I_z^+{}_{wej}$ — zwarciowy prąd wejściowy, wyjście zwarte do plusa baterii

Rodzaj układu	Zależność I_{zwej}^+ od parametrów układu
rys. 1	$\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_4}}{R_1}\beta_{in_1}\approx\frac{U_{BB}-1{,}4}{R_1}\beta_{in_1}$
rys. 2	$\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_4}-U_{D_1}}{R_1}\beta_{in_1}\approx\frac{U_{BB}-2{,}0}{R_1}\beta_{in_1}$
rys. 3	$\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_4}-U_{EB_2}}{R_1}\beta_{in_1}\approx\frac{U_{BB}-2{,}0}{R_1}\beta_{in_1}$
rys. 4	$\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_4}-U_{EB_2}}{R_1}\beta_{in_1}\approx\frac{U_{BB}-2{,}0}{R_1}\beta_{in_1}$

3. $I_z^-{}_{wyj}$ — zwarciowy prąd wyjściowy, wyjście zwarte do minusa baterii, wejście w stanie 0. Zależności $I_z^-{}_{wyj}$ od wartości elementów wewnętrznych układu dla różnych konfiguracji bramek TTL podane są w tablicy 2. Parametr $I_z^-{}_{wyj}$ zawiera w sobie informacje o wartości rezystora R_4. Jest to szczególnie istotne w przypadku, gdy rezystor R_4 wykonywany jest jednocześnie z dyfuzją emiterów.

Tablica 2

$I_z^-{}_{wyj}$ — zwarciowy prąd wyjściowy, wyjście zwarte do minusa baterii, wejście w stanie 0

Rodzaj układu	Zależności I_{zwyj}^- od parametrow układu
rys. 1	$\frac{U_{BB}}{R_4}$
rys. 2	$\frac{U_{BB}}{R_4}$
rys. 3	$\frac{U_{BB}-U_{D_2}-U_{EB_3}}{R_2+R_D}+\frac{U_{BB}-U_{D_2}-U_{n_3}}{R_4+R_D+R_{n_3}}\approx\frac{U_{BB}-0{,}8}{R_4\parallel R_2}$
rys. 4	$\frac{U_{BB}-U_{EB_5}-U_{EB_3}}{R_2}+\frac{U_{BB}-U_{n_5}}{R_4}-\frac{U_{EB_5}}{R_5}\approx\frac{U_{BB}}{R_4\parallel R_2}$

4. $I_z^+{}_{wyj}$ — zwarciowy prąd wyjściowy, wyjście zwarte do plusa baterii, wejście w stanie *1*. Zależności $I_z^+{}_{wyj}$ dla różnych konfiguracji bramek podane są w tablicy 3. Parametr $I_z^+{}_{wyj}$ może być pomocny przy określaniu wartości β_4 czwartego tranzystora. Na tej podstawie sądzić możemy o wartości β pozostałych tranzystorów jako, że wszystkie wytwarzane są w tych samych warunkach procesu technologicznego. Wartości rezystorów R_2, R_3 zawarte w wyrażeniach podanych w tablicy 3 określić można z innych parametrów zaciskowych i charakterystyk lub też oszacować w oparciu o pomiar rezystora R_1, wychodząc z założenia, że względne stosunki oporności w układzie zależne od kształtu i wielkości masek oporowych są w przybliżeniu stałe.

Tablica 3

$I_{z\,wyj}^{+}$ – zwarciowy prąd wyjściowy, wejście zwarte do plusa baterii, wejście w stanie 1

Rodzaj układu	Zależności $I_{z\,wyj}^{+}$ od parametrów układu
rys. 1	$\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_4}}{R_1}\beta_{in_1}\beta_4 \approx \frac{U_{BB}-1{,}4}{R_1}\beta_{in_1}\beta_4$
rys. 2	$\beta_4\left(\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{D_1}-U_{EB_4}}{R_1}\beta_{in_1}-\frac{U_{EB_4}}{R_3}\right)\approx \approx\left(\frac{U_{BB}-2{,}0}{R_1}\beta_{in_1}-\frac{0{,}7}{R_3}\right)\beta_4$
rys. 3	$\beta_4\left(\frac{U_{BB}-U_{EB_4}-U_{n_4}}{R_2}-\frac{U_{EB_4}}{R_3}\right)\approx\left(\frac{U_{BB}-0{,}8}{R_2}-\frac{0{,}7}{R_3}\right)\beta_4$
rys. 4	$\beta_4\left(\frac{U_{BB}-U_{EB_4}-U_{n_1}}{R_2}-\frac{U_{EB_4}}{R_3}\right)\approx\left(\frac{U_{BB}-0{,}8}{R_2}-\frac{0{,}7}{R_3}\right)\beta_4$

5. I_{BB}^{0} – prąd zasilania dla wejścia w stanie 0, wyjście nie obciążone. Zależności na I_{BB}^{0} dla układów z rysunków 1 - 3 są analogiczne jak zależności na $I_{z\,wej}^{-}$ i wyrażają się wzorem

$$I_{BB}^{0}=\frac{U_{BB}-U_{EB_1}}{R_1}\approx\frac{U_{BB}-0{,}7}{R_1}, \tag{2}$$

zaś dla układu bramki podanego na rys. 6 wyrażenie na I_{BB}^{0} ma postać

$$I_{BB}^{0}=\frac{U_{BB}-U_{EB}}{R_1}+\frac{U_{BB}-U_{EB_3}}{R_5+\frac{R_2}{\beta_3}}\approx(U_{BB}-0{,}7)\left\{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_5+\frac{R_2}{\beta_3}}\right\}. \tag{3}$$

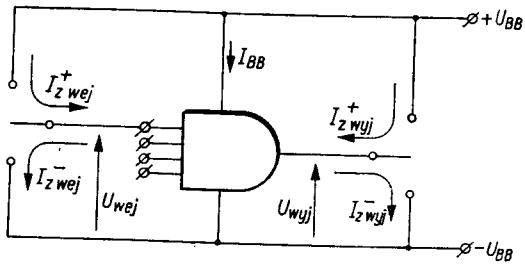
6. I_{BB}^{1} – prąd zasilania dla wejścia w stanie *1* (lub wejścia wolnego), wyjście nie obciążone. Zależności na I_{BB}^{1} podane są w tablicy 4. Parameter I_{BB}^{1} może być pomocny przy określaniu wartości rezystora R_2.

Tablica 4

I_{BB}^{1} – prąd zasilania dla wejścia w stanie 1 lub wejścia wolnego, wyjście nie obciążone

Rodzaj układu	Zależność I_{BB}^{1} od parametrów układu
rys. 1	$\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_4}}{R_1}+\frac{U_{BB}-U_{n_4}}{R_4}\approx\frac{U_{BB}-1{,}4}{R_1}+\frac{U_{BB}}{R_4}$
rys. 2	$\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{D_1}-U_{EB_4}}{R_1}+\frac{U_{BB}-U_{n_4}}{R_4}\approx\frac{U_{BB}-2{,}0}{R_1}+\frac{U_{BB}}{R_4}$
rys. 3	$\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_2}-U_{EB_4}}{R_1}+\frac{U_{BB}-U_{n_2}-U_{EB_4}}{R_2}\approx\frac{U_{BB}-2{,}0}{R_1}+\frac{U_{BB}-0{,}8}{R_2}$
rys. 4	$\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_2}-U_{EB_4}}{R_1}+\frac{U_{BB}-U_{n_2}-U_{EB_4}}{R_2}\approx\frac{U_{BB}-2{,}0}{R_1}+\frac{U_{BB}-0{,}8}{R_2}$

7. $I_{BB\,max}$ – maksymalny prąd zasilania w momencie przełączania. Zależności $I_{BB\,max}$ podane są w tablicy 5. Wyprowadzono je przy założeniu, że oporność kolekto tranzystora czwartego jest pomijalnie mała. Założenie to jest słuszne dla układów wykon



Rys. 7. Sposób pomiaru parametrów statycznych bramki

Tablica

I_{BBmax} – maksymalny prąd zasilania w momencie przełączania układu

Rodzaj układu	Zależność I_{BBmax} od parametrów układu
rys. 1	$I_{BBmax}=I^{1}_{BB}$
rys. 2	$I_{BBmax}=I^{1}_{BB}$
rys. 3	$\frac{U_{BB}-U_{D_2}-U_{n_4}-U_{n_3}}{R_4}+\frac{U_{BB}-U_{D_2}-U_{n_1}-U_{EB_3}}{R_3}+\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_4}-U_{EB_2}}{R_1}\approx$ $\approx\frac{U_{BB}-0{,}8}{R_4}+\frac{U_{BB}-1{,}5}{R_4}+\frac{U_{BB}-2{,}0}{R_1}\cong\frac{U_{BB}-1}{R_4\|R_2\|R_1}$
rys. 4	$\frac{U_{BB}-U_{n_4}-U_{n_5}}{R_4}+\frac{U_{BB}-U_{n_4}-U_{EB_5}-U_{EB_3}}{R_2}+\frac{U_{BB}-U_{CB_1}-U_{EB_2}-U_{EB_4}}{R_1}\approx$ $\approx\frac{U_{BB}-0{,}1}{R_4}+\frac{U_{BB}-1{,}5}{R_2}+\frac{U_{BB}-2{,}0}{R_1}\cong\frac{U_{BB}-0{,}2}{R_2\|R_4\|R_1}$

wanych z zastosowaniem tzw. warstwy zagrzebanej. Wyrażenia na $I_{BB\,max}$ podobnie jal wyrażenia na $I^{-}_{z\,wyj}$ zawierają w sobie informacje o wartości rezystora R_4. Sposób pc miaru poszczególnych statycznych parametrów zaciskowych ilustruje rys. 7.

3. CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE BRAMEK TTL

Do charakterystyk statycznych bramek TTL zaliczamy:

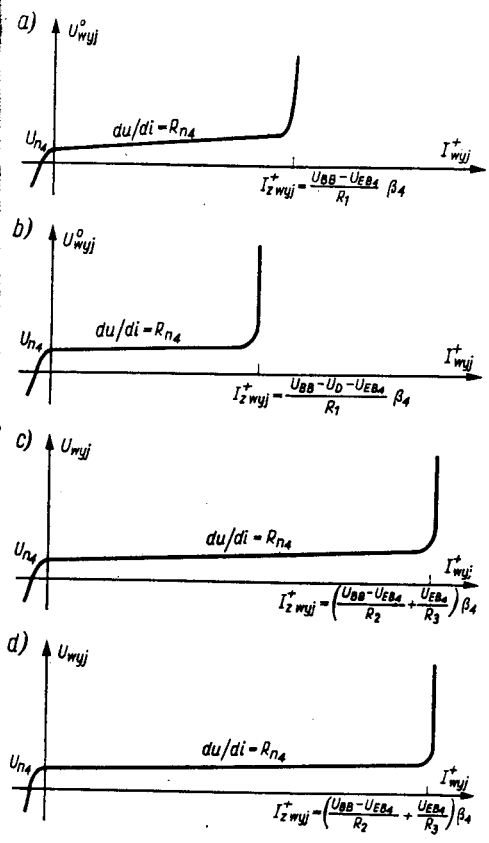
1) charakterystyki wyjściowe – obrazujące wpływ prądu obciążenia na napięcie wyjściowe;

2) charakterystykę wejściową – obrazującą zależności prądu wejściowego od napięcia na wejściu;

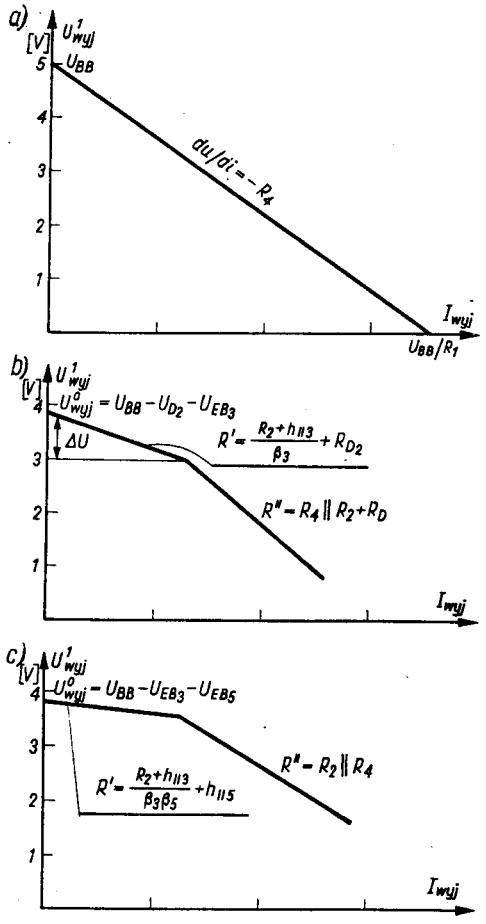
3) charakterystykę przejściową – ilustrującą zależność napięcia na wyjściu od napięcia wejściowego;

4) charakterystykę zasilania – określającą zależność prądu zasilania bramki od napięcia wejściowego.

Wyniki analizy kształtu poszczególnych charakterystyk statycznych w zależności od właściwości liniowych i nieliniowych elementów wewnętrznych układu scalonego zostaną podane niżej. Przy analizie dla zwiększenia przejrzystości obrazu stosowano liniowe idealne napięciowe źródła sterujące i liniowe obciążenia.



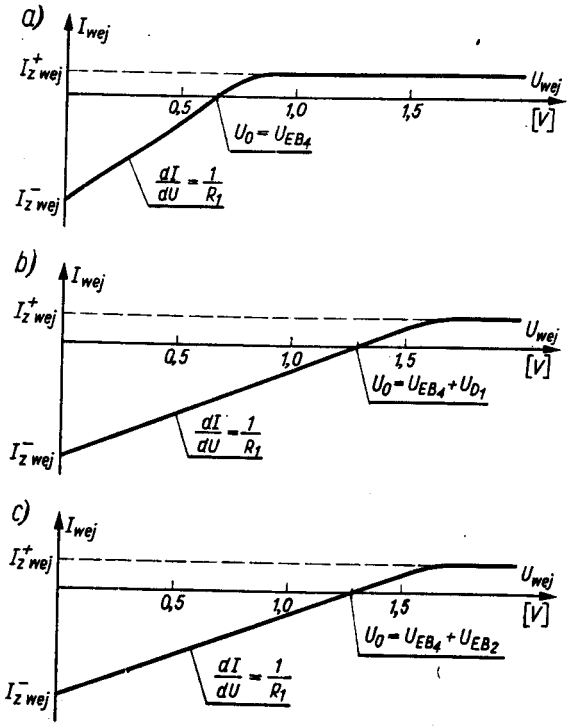
Rys. 8. Charakterystyki wyjściowe bramek TTL przy stanie 0 na wyjściu dla układów: a) z rys. 3 i z rys. 4, b) z rys. 5, d) z rys. 6



Rys. 9. Charakterystyki wyjściowe bramek TTL przy stanie 1 na wyjściu dla układów: a) z rys. 3 i z rys. 4, b) z rys. 5, c) z rys. 6

3.1. Charakterystyki wyjściowe

Charakterystyki wyjściowe określają zależność napięcia na wyjściu bramki od prądu obciążenia. Rysunek 8 przedstawia zależności $U^0_{wyj}=f(I_{wyj})$ dla stanu 0 na wyjściu i różnych odmian bramek, zaś rys. 9, przedstawia charakterystyki $U^1_{wyj}=f(I_{wyj})$ dla stanu *1*. Z pomiaru charakterystyki $U^1_{wyj}=f(I_{wyj})$ określić można wartość rezystorów R_4 i R_2



Rys. 10. Charakterystyki wejściowe dla bramek TTL: a) z rys. 3, b) z rys. 4, c) z rys. 5 i z rys. 6

oraz wartości β tranzystorów T_3 i T_5, zaś z pomiaru zależności $U^0_{wyj} = f(I_{wyj})$ wartość β tranzystora T_4 jak również rezystancje rozproszenia kolektora R_{n4} tranzystora T_4. Oporność rozproszona kolektora tranzystorów w półprzewodnikowych układach scalonych jest wielkością bardzo istotną.

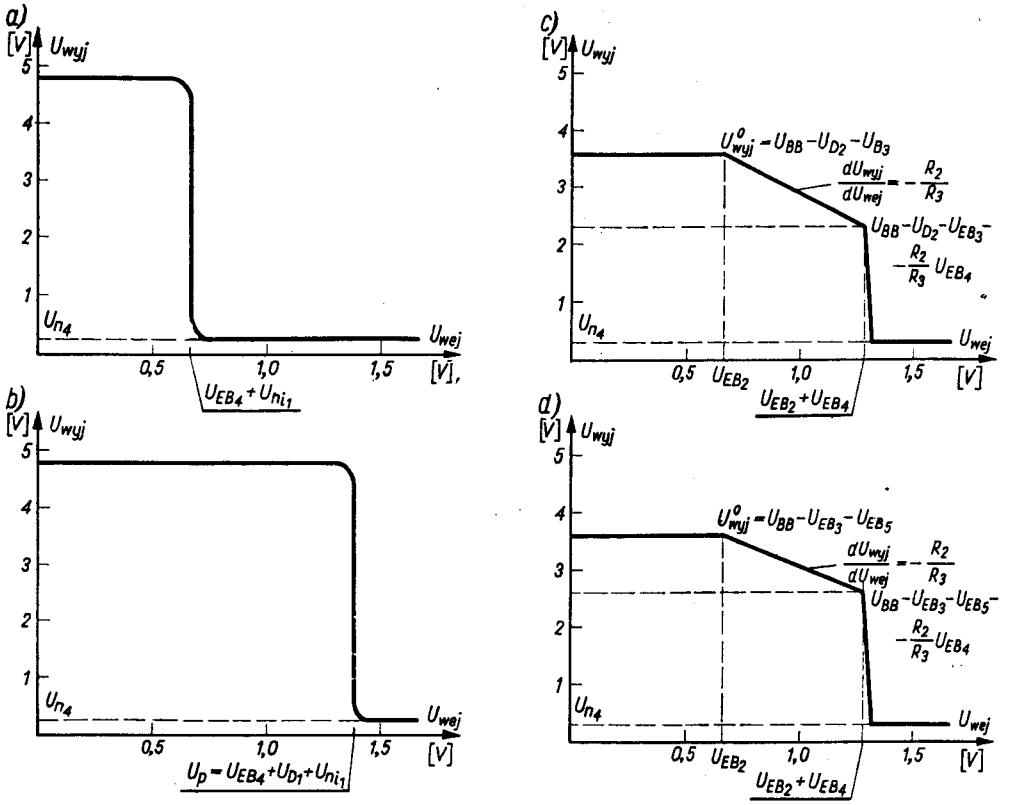
W przypadku stosowania warstwy zagrzebanej można badać jej jakość, poprzez pomiar oporności obszaru kolektora. W układach bez warstw zagrzebanych oporność tranzystora w nasyceniu daje informacje o grubości względnie koncentracji domieszek warstwy epitaksjalnej.

3.2. Charakterystyka wejściowa

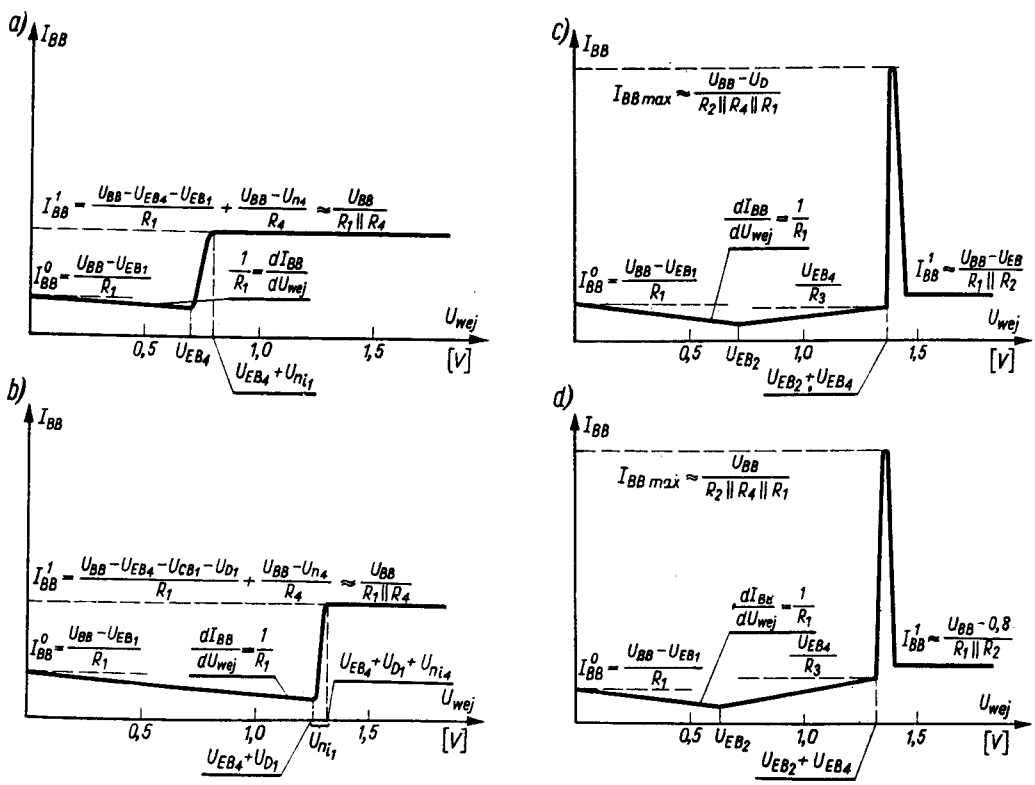
Obrazuje ona zależność prądu wejściowego do napięcia na wejściu $I_{wej} = f(U_{wej})$. Charakterystyki wejściowe dla różnych konfiguracji układowych bramek ilustruje rys. 10. Informacje uzyskane z pomiaru charakterystyki $I_{wej} = f(U_{wej})$ pokrywają się w zasadzie z informacjami uzyskanymi przez pomiar parametrów statycznych I^+_{wej} i I^-_{wej}. Napięcie dla którego prąd wejściowy równa się 0 odpowiada w przybliżeniu napięciu progowemu bramki. Z nachylenia charakterystyki określić można wartość rezystora R_1.

3.3. Charakterystyka przejściowa

Jest to charakterystyka używana najczęściej ze względu na możliwość bezpośredniego odczytu parametrów eksploatacyjnych bramki. Charakterystyki przejściowe dla rozważanych typów bramek przedstawione są na rys. 11. Charakterystyka przejściowa w zniko-



Rys. 11. Charakterystyki przejściowe dla bramek TTL: a) z rys. 3, b) z rys. 4, c) z rys. 5, d) z rys. 6



Rys. 12. Charakterystyki zasilania dla bramek TTL: a) z rys. 3, b) z rys. 4, c) z rys. 5, d) z rys. 6

mym stopniu zależy od parametrów elementów wewnętrznych układu — mierząc ją oszacować możemy jedynie stosunek rezystancji R_2 do R_3. Spadki napięcia na złączach nie dostarczają w zasadzie żadnej informacji o procesie technologicznym układu scalonego.

3.4. Charakterystyka zasilania

Zależności prądu zasilania od napięcia na wejściu bramki $I_{BB}=f(U_{wej})$ dla analizowanych bramek TTL podane są na rys. 12. Pomiar charakterystyki zasilania daje największą ilość informacji o wartości oporników w układzie. W oparciu o charakterystykę zasilania oszacować można wartości rezystorów R_1, R_2, R_3, R_4, R_5.

4. UWAGI I WNIOSKI

Rozważania powyższe zostały sprawdzone na modelu z elementów indywidualnych dla bramki o układzie z rys. 5. Zmieniano wartości rezystorów, podłączano tranzystory o różnych współczynnikach wzmocnienia prądowego. Badano wpływ tych zmian na charakterystyki i parametry zaciskowe. Badania potwierdziły słuszność przeprowadzonej analizy. Wyniki pomiarów wskazały na dużą zgodność wyników pomiarowych z wynikami otrzymanymi w sposób analityczny przy użyciu odcinkowej aproksymacji charakterystyk. Świadczy to, że aproksymacja odcinkowa charakterystyk nieliniowych jest dobrym narzędziem do analizy i badania scalonych układów logicznych.

WYKAZ LITERATURY

1. Hartley R. L.: *Evaluation of packed integrated circuits*, Part. 3. Digital devices. Microelectronics, Vol. 3, 1970, s. 27 - 33.
2. Lynn D. K. i inni: *Analysis and design of integrated circuits*. Mc Graw–Hill Book Co, New York 1967, s. 86.
3. op. cit. s. 275.
4. Naumow: *Intiegralnyje logiczeskije schiemy*. Moskwa 1970, s. 245 - 249.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ВНУТРЕННИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ НА ЗАЖИМАХ ТРАНЗИСТОР-ТИРИСТОРНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

В статье проанализирована работа четырех типичных ТТЛ — схем. На основании кусочно-линейной аппроксимации характеристик транзисторов, выведена зависимость параметров и зажимных характеристик от индивидуальных свойств внутренних элементов схемы определенных путем измерений внутренних характеристик. Построена модель с индивидуальными элементами, посредством последовательных замен этих элементов проверена правильность проведенных рассуждений.

INFLUENCE OF PROPERTIES OF INSIDE ELEMENTS ON STATIC CHARACTERISTICS AND OUTSIDE PARAMETERS OF TTL GATES

Analysis of 4 typical circuits of TTL gate using segment approximation has been made. Dependence of outside parameters and characteristics on properties of individual inside elements was obtained. Possibilities of investigation of inside elements by measurements of their output characteristics have been shown. Model of TTL gate using discrete elements was built. By changing the values of inside elements correctness of the given analysis has been checked.

EINFLUSS DER INNEREN ELEMENTEN AUF STATISCHE CHARAKTERISTIKEN UND KLEMMENPARAMETER VON TTL-TORE

Nach der Analyse von 4 meist gebrauchten TTL-Tore und der Streckeapproximation von denen Kurvenverlauf, werden charakteristiken und Klemmenparameter mit einzelnen inneren Elementenwerte verbunden. Es wird auf die Möglichkeit nachgewiesen, dass innere Elemente durch Aussenmessungen zu untersuchen sind. Auch ein Modell ist individuellen Elementen gebaut worden. Damit wird mit Hilfe von wechselnden Elementenwerte die Genauigkeit der obengegebenen Ergebnisse durchgeprüft.