

MACIEJ NOWIŃSKI

POMIARY ELEMENTÓW LOGICZNYCH DO ZASTOSOWAŃ PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. W artykule omówiono pomiary statyczne i dynamiczne elementów logicznych przeznaczonych do zastosowań przemysłowych. Przedstawiono układy pomiarowe oraz typowe charakterystyki badanych elementów, poświęcając szczególną uwagę wyznaczaniu statycznych i impulsowych marginesów zakłóceń.

Elementy logiczne do zastosowań przemysłowych powinny odznaczać się następującymi cechami:

- dużym marginesem zakłóceń dla prądu stałego ($4 \div 6V$)
- odpornością na krótkotrwałe zakłócenia impulsowe, nawet o dużych amplitudach
- iskrobezpieczeństwem
- niewrażliwością na zmiany temperatury otoczenia w zakresie co najmniej $-20 \div +50^{\circ}C$
- odpornością na wpływy wilgoci, zanieczyszczeń przemysłowych itp.

Nie jest wymagana duża częstotliwość graniczna ($\max 10 \div 50 \text{ kHz}$). W związku z powyższymi wymaganiami najczęściej stosowane są elementy typu DTLZ, przy napięciu zasilania 12V i poborze mocy ze źródła zasilania rzędu $30 \div 100 \text{ mW}$. Podstawowym elementem jest zwykle bramka NAND.

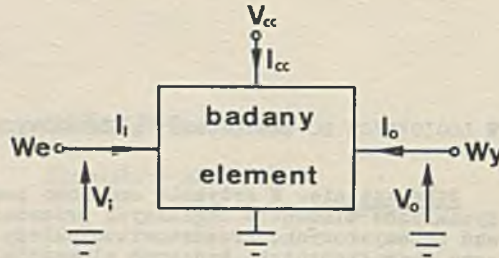
1. Pomiary statyczne

Do pomiarów statycznych zaliczamy:

- pomiar charakterystyki przejściowej elementu
- pomiar charakterystyki wejściowej
- pomiar charakterystyki wyjściowej
- wyznaczenie marginesów zakłóceń dla prądu stałego
- wyznaczenie maksymalnej obciążalności
- pomiar poboru prądu ze źródła zasilania.

W artykule założono dodatnie napięcie zasilania V_{CC} , co odpowiada najczęściej spotykanym elementom opartym na tranzystorach n-p-n. Przyjęto logikę pozytywną, tzn. logiczne "1" odpowiada wysokiemu potencjałowi V_H , a logiczne "0" odpowiada potencjałowi niskiemu V_L .

Strzałkowanie napięć i prądów jest zgodne z powszechnie stosowanymi zasadami (rys. 1).



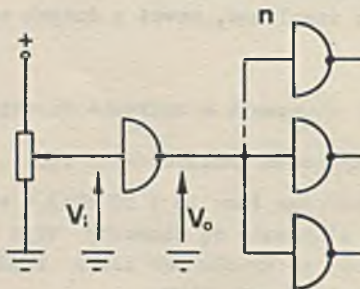
Rys. 1

Stan logiczny elementu jest równy stanowi jego wejścia. Przykładowe wyniki dotyczą typowej bramki NAND typu DTLZ; na wszystkich wykresach osie prądów wyskalowane są w miliamperach, a osie napięć w woltach.

Dla elementów wielowejsciowych pomiary należy przeprowadzać:

- dla wszystkich wejść zwartych
- dla każdego wejścia osobno, przy czym pozostałe wejścia powinny pozostać

- a) zwarte i dołączone do punktu o potencjale V_{OH} lub V_{OL}
- b) rozwarte.



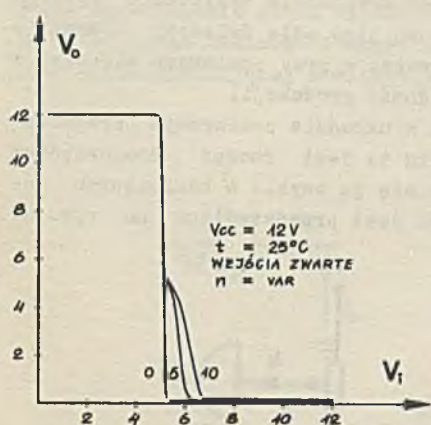
Rys. 2

Zależność napięcia wyjściowego elementu logicznego od napięcia wejściowego nazywamy charakterystyką

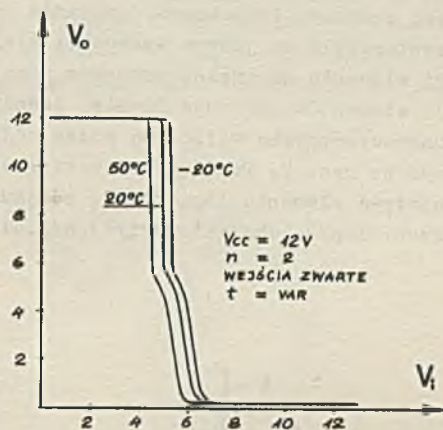
przebiegową. Zdejmuje się ją w układzie jak na rys. 2. Zmiennymi parametrami podczas pomiaru są:

- napięcie zasilania V_{cc} w granicach dopuszczalnych dla danego elementu (najczęściej $\pm 5\%$)
- ilość elementów obciążających w granicach od zera do maksymalnej. Jeżeli w badanym szeregu logicznym istnieją elementy o różnych parametrach wejściowych, obciążenie elementu badanego powinny stanowić różne kombinacje tych elementów
- temperatura w granicach przewidzianych dla mierzonego elementu; szczególnie istotne jest przeprowadzenie pomiarów w granicznych temperaturach.

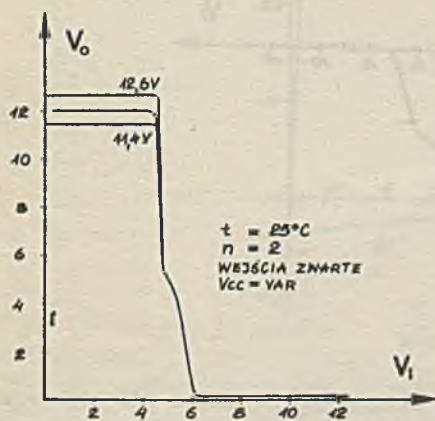
Wyniki pomiarów można przedstawić na wykresach obrazujących wpływ zmian obciążenia na charakterystyki (rys. 3), wpływ temperatury (rys. 4) i napięcia zasilania (rys. 5).



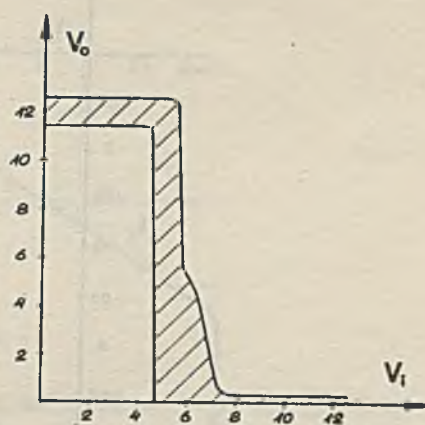
Rys. 3



Rys. 4



Rys. 5



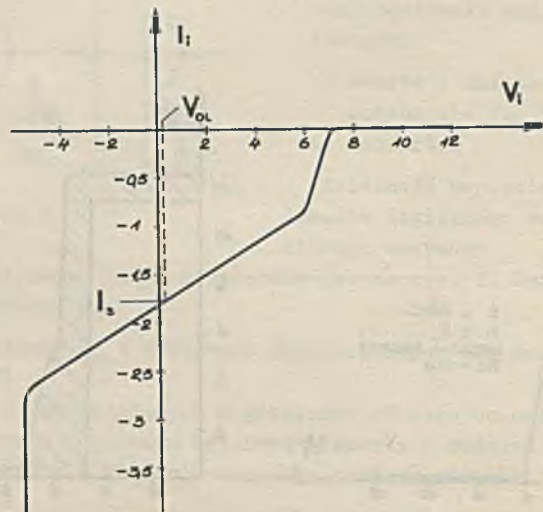
Rys. 6

Rysunek 6 przedstawia przykładowe pole tolerancji charakterystyki przejściowej elementu logicznego, powstałe przez wrysowanie wszystkich zdjętych charakterystyk na jednym wykresie; wielkość tego pola świadczy o wrażliwości elementu na zmianę warunków jego pracy, a przy pomiarach większej ilości elementów obrazuje również jednorodność produkcji.

Charakterystykę wejściową można zdjąć w układzie pomiarowym przedstawionym na rys. 7. Ponieważ charakterystyka ta jest raczej drugorzędny parametrem elementu logicznego, zdejmuje się ją zwykle w nominalnych warunkach. Typowa charakterystyka wejściowa jest przedstawiona na rys. 8.



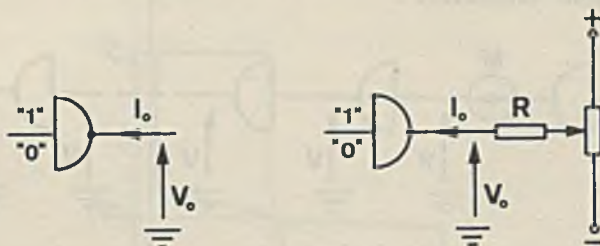
Rys. 7



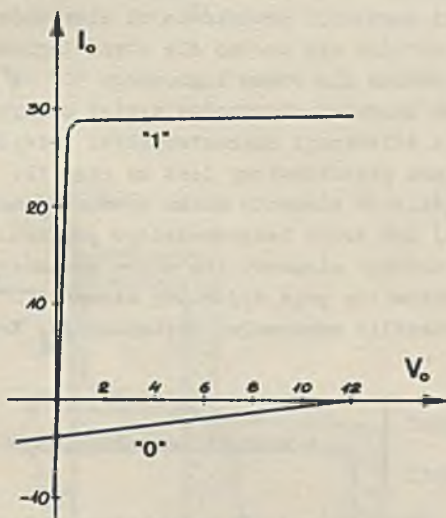
Rys. 8

Można z niej wyznaczyć nominalną wartość prądu wejściowego elementu I_B , odpowiadającą nominalnemu napięciu wejściowemu V_{OL} , jak również wartość prądu odpowiadającą napięciu sterującemu V_{OH} .

Sposób zdejmowania charakterystyki wyjściowej elementu przedstawiono na rys. 9, a typową charakterystykę na rys. 10. Opornik R ma na celu ewentualne ograniczenie prądu wyjściowego do wartości bezpiecznej dla tranzystora końcowego badanego elementu; w zasadzie nie należy przekraczać wartości prądu wynikającej z maksymalnej obciążalności. Pomiar należy prze-



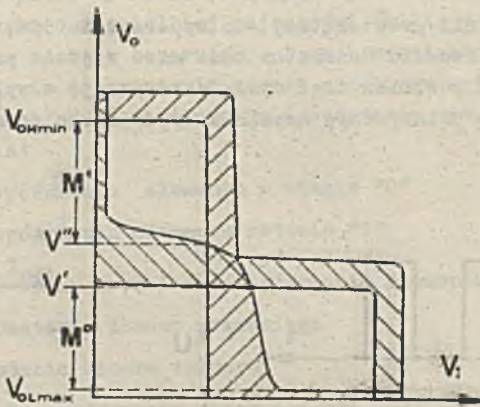
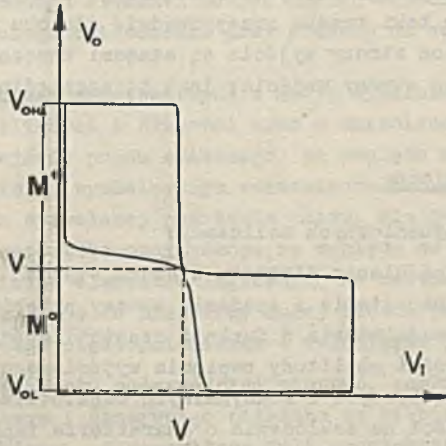
Rys. 9



Rys. 10

prowadzić dla dwóch różnych stanów logicznych na wejściu. Kształt charakterystyki wyjściowej zależy dość silnie od napięcia zasilania i temperatury, dlatego też celowe jest jej zdjęcie w skrajnych warunkach pracy (najczęściej: obniżone napięcie zasilania, najniższa temperatura; podwyższone napięcie zasilania, najwyższa temperatura).

Wśród wielu istniejących definicji marginesów zakłóceń wydaje się być najlepsza następująca: margines zakłóceń dla prądu stałego jest to takie napięcie zakłócające M , które wywołuje we wszystkich punktach połączeń



Rys. 12

kach pomiar charakterystyki przejściowej sprowadza się do wyznaczenia wejściowych napięć progowych, powodujących zmianę stanu elementu. Na ich podstawie wyznacza się marginesy zakłóceń dla prądu stałego. Dodatkowym, ale niezbędnym pomiarem jest wyznaczenie marginesu zakłóceń na wyjściu elementu poprzez pomiar progu napięcia wymuszonego na wyjściu, powodującego zmianę stanu. Pomiar taki trzeba przeprowadzić dla obu stanów logicznych. Marginesy zakłóceń od strony wyjścia są czasami znacznie mniejsze od marginesów zakłóceń od strony wejścia; jest to szczególnie niepożądane w przerzutnikach.

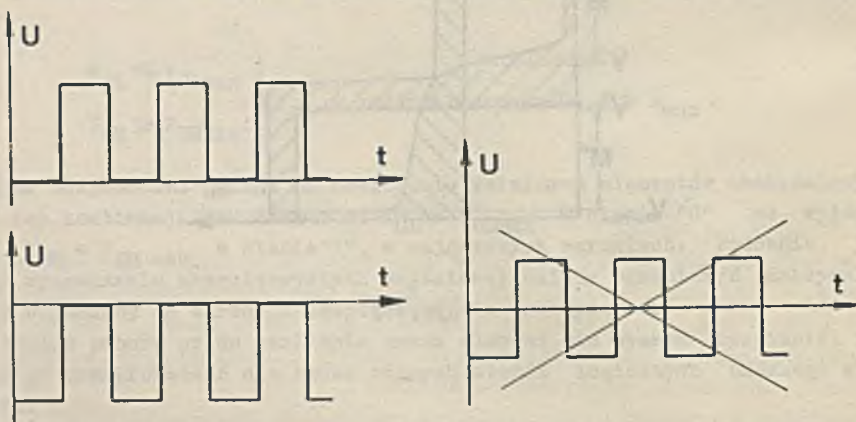
2. Pomiary dynamiczne

Do pomiarów dynamicznych zaliczamy:

- pomiar czasu opóźnienia elementu w dwóch stanach logicznych
- pomiar czasów narastania i opadania zboczy przebiegu wyjściowego
- pomiar progów zadziałania w funkcji częstotliwości
- zdjęcie zależności amplitudy napięcia wyjściowego od częstotliwości
- wyznaczenie granicznych i maksymalnych częstotliwości pracy
- pomiar odporności na zakłócenia o charakterze impulsowym (wyznaczenie impulsowych marginesów zakłóceń)
- pomiar poboru prądu przy przełączaniu elementu.

Podstawową aparaturę niezbędną przy wykonywaniu pomiarów dynamicznych stanowią:

a) Generator fali prostokątnej - o wypełnieniu 50%, regulowanej amplitudzie i częstotliwości. Generator musi mieć wyjście prądu stałego, a generowany przebieg powinien mieć stałą polaryzację - wyjaśnia to rys. 13. Pożądane jest, by polaryzację napięcia wyjściowego można było zmieniać.



Rys. 13

Gdy generator ma wyjście prądu zmiennego (przez kondensator oddzielający składową stałą), może wystąpić niepożądany efekt przylegania, ze względu na silnie nieliniowe charakterystyki badanych elementów. Przy symetrycznym względem masy przebiegu wyjściowym generatora łatwo można przekroczyć dopuszczalny dla badanego elementu zakres napięć wejściowych - np. wiele typowych elementów ulega zniszczeniu przy podaniu na wejście napięcia ujemnego.

b) Generator impulsów prostokątnych o małym wypełnieniu, regulowanej amplitudzie, częstotliwości i długości oraz o zmienianej biegunowości. Generator może mieć wejście prądu zmiennego ze względu na małe wypełnienie.

c) Dobry oscyloskop o wyskalowanym wzmacniaczu Y i podstawie czasu, z możliwością pracy na wyzwalanej podstawie czasu. Nie jest wymagane bardzo szerokie pasmo przenoszenia oscyloskopu, ze względu na stosunkowo małe częstotliwości graniczne elementów logicznych do zastosowań przemysłowych - wystarcza pasmo ok. 10 ± 20 MHz. Przy dużej ilości pomiarów pomocne jest korzystanie z cyfrowego częstotliciomierza - falomierza liczącego.

Czas opóźnienia elementu najwygodniej mierzyć, posługując się oscyloskopem dwustrumieniowym i obserwując nałożone na siebie dwa przebiegi: wyjściowy oraz wejściowy, z generatora fali prostokątnej. Korzystając z oscyloskopu jednostrumieniowego można wykorzystać fakt, że sygnał z generatora fali prostokątnej pozostawia na przebiegu wyjściowym drobny ślad, wynikający z niedopasowania generatora i z istnienia pojemności pasożytniczych. W razie potrzeby można połączyć wejście i wyjście badanego elementu kondensatorem o niewielkiej pojemności (kilka \pm kilkanaście pF), stosując ewentualnie opornik separujący. Sposób wyznaczenia czasu opóźnienia oraz czasów opadania i narastania zboczy przebiegu wyjściowego, mierzonych w tym samym układzie pomiarowym przedstawia rys. 14. Przyjęto następujące oznaczenia:

t_{p0} - czas opóźnienia elementu w stanie "0"

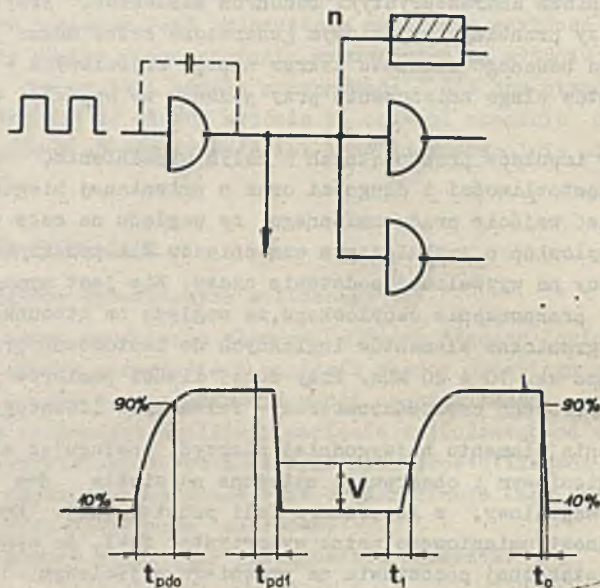
t_{pd1} - czas opóźnienia elementu w stanie "1"

$t_{pd} = \frac{t_{p0} + t_{pd1}}{2}$ - średni czas opóźnienia elementu

t_i - czas narastania zbocza przedniego

t_o - czas opadania zbocza tylnego.

Zarówno opóźnienie wprowadzane przez element logiczny, jak i stromości zboczy zależą od obciążenia, w mniejszym stopniu od częstotliwości i temperatury; zmieniają się również w zależności od badanego egzemplarza. W dobrym szeregu logicznym opóźnienia wprowadzane przez element w obu stanach logicznych powinny być w przybliżeniu jednakowe w typowych warunkach pracy (średnia częstotliwość, obciążenie 2 ± 3 elementy, nominalne napięcie zasilania i temperatura); czasy te nie powinny silnie zależeć od warunków pracy. Podczas pomiaru opóźnień i stromości zboczy przy obciążaniu badanego

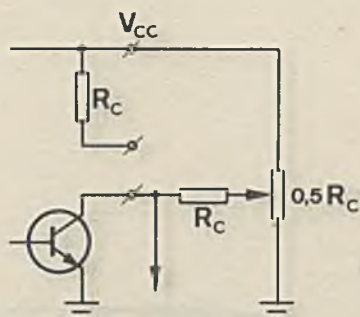


Rys. 14

elementu nie należy zapominać o zamodelowaniu pojemności montażu, nieuniknionej w rzeczywistych układach przemysłowych - najczęściej wystarcza pojemność wejściowe oscyloskopu i kabla pomiarowego (ok. 100pF). Jeżeli w badanym elemencie przewidziano możliwość jego spowolnienia zewnętrznym kondensatorem, pomiary należy powtórzyć dla różnych pojemności spowalniających.

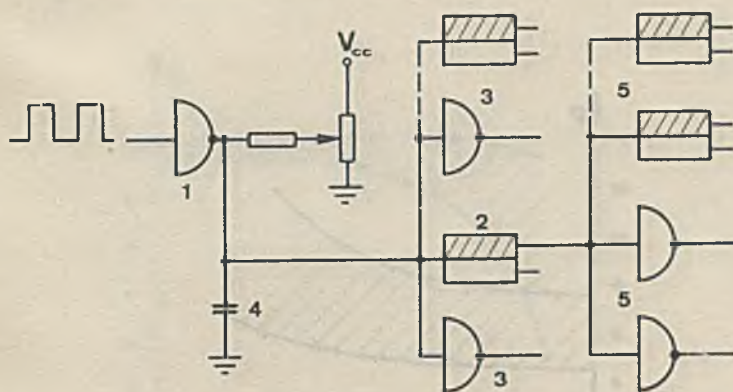
Wszystkie powyższe pomiary należy przeprowadzać przy częstotliwości na tyle małej, by amplituda napięcia wyjściowego była równa maksymalnej.

Przez zmianę amplitudy generatora sterującego można wyznaczyć zależność progu działania elementu od częstotliwości - dotyczy to szczególnie elementów sterowanych dynamicznie (tzn. wyzwalanych zboczem), takich jak przerzutnik czy element czasowy. W tym przypadku ważne jest zachowanie takich samych warunków sterowania, jak w rzeczywistych układach, czego nie zapewnia sterowanie z niedopasowanego generatora fali prostokątnej. Dlatego też pomiędzy generator a badany element należy włączyć element separujący umożliwiający zmianę amplitudy napięcia przy niezmienionej charakterystyce wyjściowej. Elementem takim może być np. bramka NOR lub NAND z otwartym kolektorem, zmodyfikowana wg rys. 15.



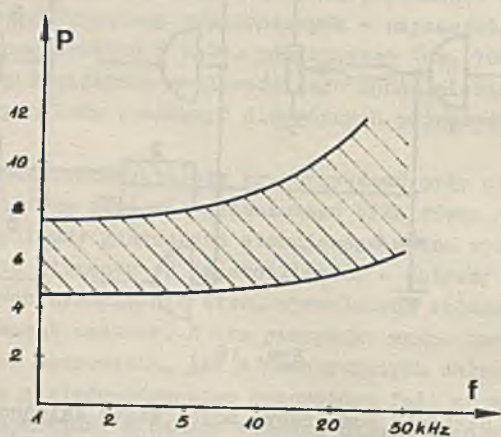
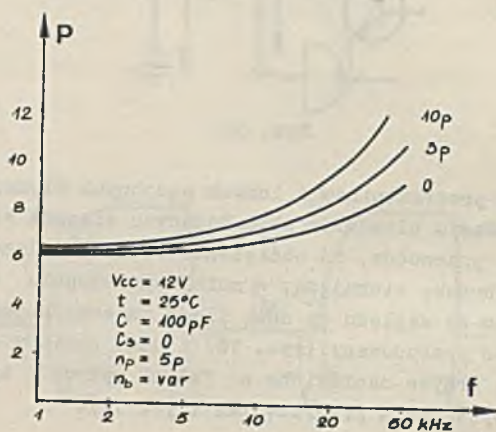
Rys. 15

Próg wyzwalania przerzutników i innych podobnych elementów zależy silnie od ilości i rodzaju elementów obciążających element sterujący, od pojemności montażu i przewodów, od obciążenia badanego elementu, od pojemności spowalniającej bramkę sterującą, w mniejszym stopniu od temperatury i napięcia zasilania. Ze względu na dużą ilość zmiennych parametrów układ pomiarowy jest dość rozbudowany (rys. 16) a same pomiary są bardzo pracochłonne. Wszystkie krzywe naniesione na jeden wykres wyznaczają pole tolerancji progu wyzwalania przerzutnika (rys. 17).

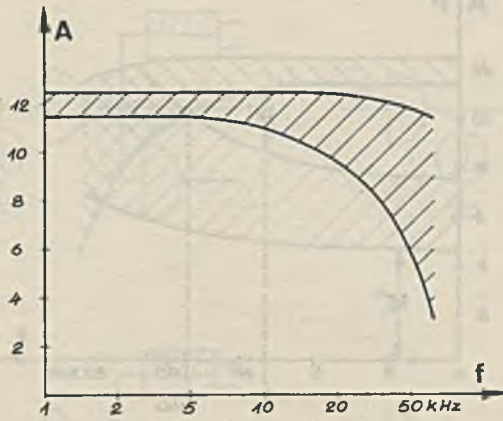
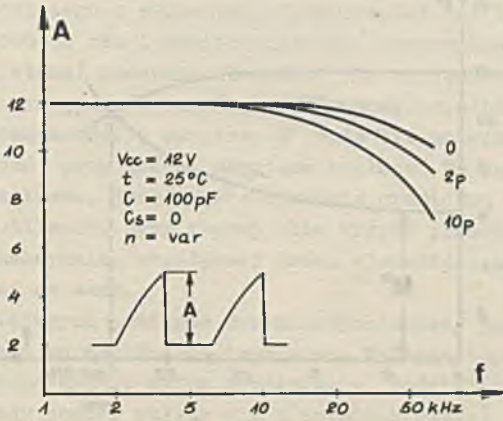


Rys. 16

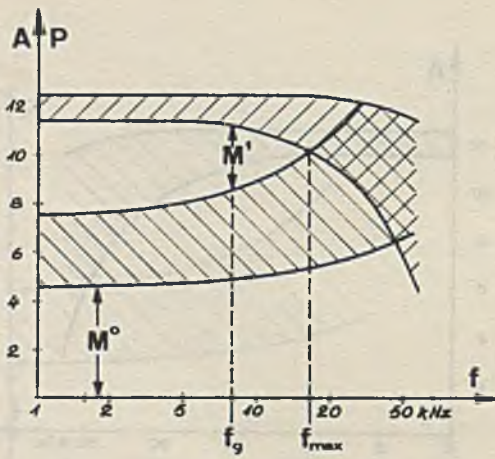
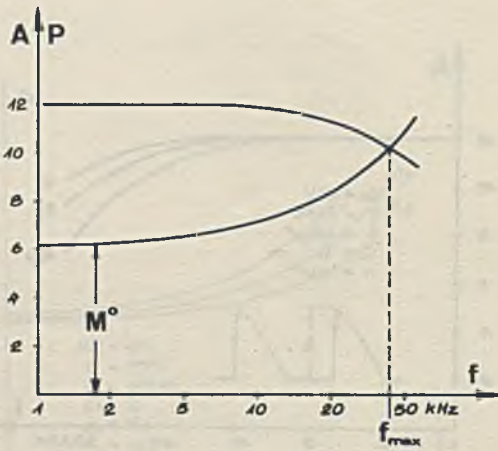
W takim samym układzie pomiarowym można zdjąć zależność amplitudy napięcia wyjściowego elementu (np. bramki) od częstotliwości; zmiennymi parametrami są: obciążenie, pojemność montażu, pojemność spowalniająca, napięcie zasilania; wpływ temperatury jest zwykle nieistotny. W wyniku pomiarów otrzymuje się pole tolerancji amplitudy napięcia wyjściowego badanego elementu.



Rys. 17



Rys. 18



Rys. 19

Naniesienie na jednym wykresie obu rodzin krzywych: progu wyzwania i amplitudy napięcia wyjściowego w funkcji częstotliwości całkowicie określa współpracę dwóch elementów (rys. 19).

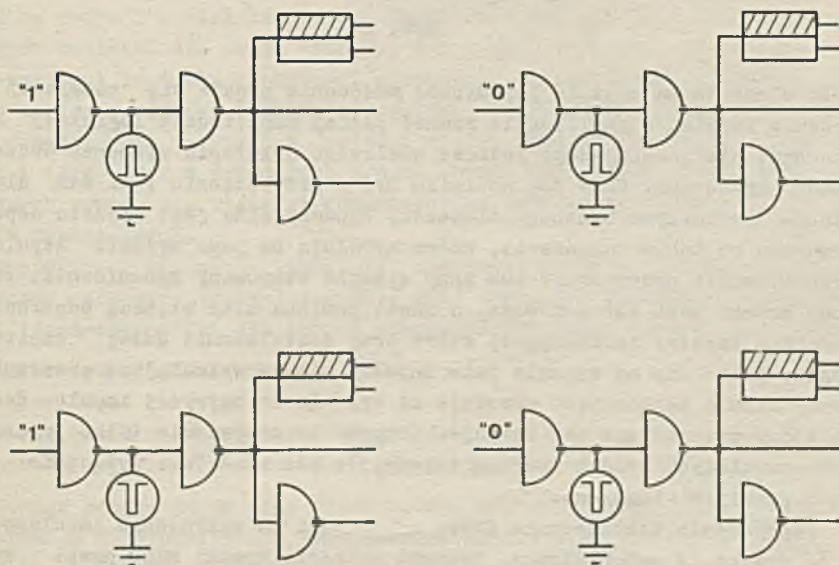
M^0 oznacza margines zakłóceń w stanie "0", tzn. największą amplitudą impulsu wejściowego, nie powodującego jeszcze zmiany stanu badanego elementu.

M^1 oznacza margines zakłóceń w stanie "1", tzn. największą amplitudę impulsu zakłócającego o przeciwnej biegunowości niż impuls sterujący, podanego szeregowo z nim i synchronicznego, zapewniającego jeszcze wyzwolenie (zmianę stanu) badanego elementu. Ze względu na bardzo małe prawdopodobieństwo wystąpienia impulsu zakłócającego spełniającego powyższe warunki (synchroniczność!), margines M^1 może być mniejszy od M^0 .

Częstotliwość, przy której margines zakłóceń M^1 jest równy najmniejszemu dopuszczalnemu, jest częstotliwością graniczną współpracy dwóch elementów. Częstotliwość, przy której obie krzywe przecinają się, jest częstotliwością maksymalną współpracy dwóch elementów; margines zakłóceń M^1 spada przy niej do zera.

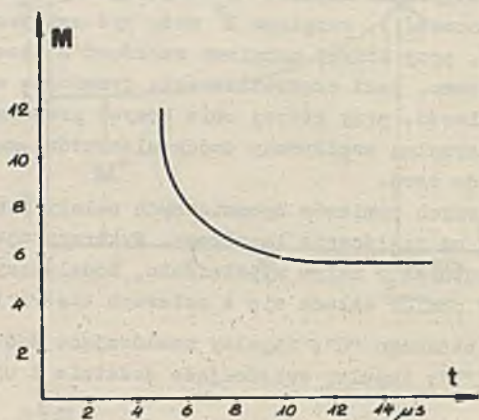
Do najważniejszych pomiarów dynamicznych należy pomiar odporności elementu logicznego na zakłócenia impulsowe. Wykorzystuje się tu generator impulsów prostokątnych o małym wypełnieniu, modelujący źródło zakłóceń impulsowych. Każdy pomiar składa się z czterech części (rys. 20):

- stan elementu badanego "0"; impulsy zakłócające dodatnie i ujemne
- stan elementu "1"; impulsy zakłócające dodatnie i ujemne.



Rys. 20

W badaniach tych nie można przekroczyć dopuszczalnego zakresu napięć wejściowych, gdyż grozi to zniszczeniem badanego elementu. Analogicznie do kryterium odporności na zakłócenia dla prądu stałego można przyjąć kryterium odporności na zakłócenia impulsowe - impuls zakłócający musi być przez kolejne elementy tłumiony; najczęściej dopuszcza się takie maksymalne zakłócenie, które na wyjściu dowolnego elementu kontrolnego obciążającego badany, wywołuje impuls o amplitudzie mniejszej od marginesu zakłóceń dla prądu stałego. Zależność marginesu zakłóceń od czasu trwania pojedynczego impulsu zakłócającego można przedstawić w postaci wykresu; dla dużych czasów trwania zakłóceń krzywa dąży asymptotycznie do marginesu zakłóceń dla prądu stałego (rys. 21). Jako parametr charakteryzujący odpor-



Rys. 21

ność elementu na krótkie pojedyncze zakłócenia podaje się zazwyczaj czas trwania impulsu o amplitudzie równej pełnej amplitudzie logicznej danego szeregu, nie powodującego jeszcze wadliwego działania elementu według przyjętego kryterium. Czas ten powinien być w przybliżeniu taki sam dla obu stanów logicznych badanego elementu. Dopuszczalna jest większa odporność elementu na takie zakłócenia, które wywołują na jego wyjściu impulsy mogące wyzwolić przerzutnik lub inny element sterowany dynamicznie. Przykładowo bramka NAND lub NOR może, a nawet powinna mieć większą odporność na dodatnie impulsy zakłócające, które przy dostatecznie dużej amplitudzie mogą pojawić się na wyjściu jako impulsy ujemne wyzwalamy przerzutnik. Ujemny impuls zakłócający wywołuje na wyjściu co najwyżej impuls dodatni, na który przerzutnik nie reaguje. Dotyczy to oczywiście tylko przerzutników wyzwalamy tylnym zboczem (ujemnym), ale właściwie wyłącznie takie są w praktyce stosowane.

Zapewnienie dostatecznie dużej odporności na zakłócenia impulsowe jest dość trudne. W najprostszym, typowym układzie bramki NAND nawet krótkie

dotądnie zakłócenie na wejściu wprowadza tranzystor w stan silnego nasycenia; wskutek przeciągania prądu kolektora zakłócenie na wyjściu elementu (ujemne) ulega znacznemu wydłużeniu.

Odporność na krótkie zakłócenia jest ściśle związana z czasem opóźnienia elementu, opóźnienie jest oczywiście zawsze większe od czasu trwania zakłócenia, na które dany element nie reaguje. Dlatego też dobór tych dwóch ważnych parametrów jest zawsze kompromisem. Tym niemniej sam fakt wprowadzania znacznych opóźnień a tym bardziej niska częstotliwość graniczna jeszcze nie determinuje dużej odporności elementu logicznego na krótkie, pojedyncze zakłócenia.

Dobry element logiczny przy całkowitym tłumieniu krótkich impulsów wejściowych powinien jednocześnie odznaczać się dobrą regeneracją impulsów nieco szerszych; gwarantuje to, że krótki impuls sterujący nie zeniknie po przejściu przez kilka kolejnych elementów.

Osobnego odwołania wymaga odporność elementów z histerezą na zakłócenia impulsowe. Ze względu na silne dodatnie sprzężenie zwrotne są one na tego typu zakłócenia bardzo czułe, a próby ich "spowolnienia" są trudne. Zdarzają się przypadki, że krótkie zakłócenie nie zmienia trwale stanu elementu, ale pojawia się na jego wyjściu; innymi słowy element taki "przepuszcza" zakłócenia, nie zmieniając przy tym stanu. Często przy tym energia zakłócenia ulega powiększeniu, w związku z czym może zadziałać następny element. Na przykład, gdy na wejście licznika złożonego z triggerów przedostanie się krótkie zakłócenie, to nie zmieni ono stanu pierwszego, ale zmieni stan przerzutnika drugiego lub trzeciego z kolci, a zatem wprowadza błąd na pozycji o większej wadze. Oczywiście tak jak przy pomiarach marginesów zakłóceń dla prądu stałego, tak i przy pomiarach dynamicznych konieczna jest kontrola odporności elementu z histerezą na zakłócenia podawane na jego wyjście. Pomiary odporności na zakłócenia impulsowe należy przeprowadzić dla wszystkich wejść i wyjść, również dla wejść ustawiających i zerujących w triggerach dynamicznych. Ogólnie od przerzutników statycznych wymaga się większej odporności na krótkie zakłócenia niż od triggerów dynamicznych.

W pomiarach elementów logicznych specjalne miejsce zajmują pomiary elementów czasowych (opóźniających). Poza pomiarami statycznymi i dynamicznymi identycznymi jak dla innych elementów, dochodzą jeszcze następujące:

- pomiar czasu opóźnienia
- pomiar czasu martwego
- pomiar czasu opóźnienia w funkcji odstępu czasu pomiędzy zakończeniem impulsu wyjściowego a następnym impulsem wyzwalaającym.

Pomiar poboru prądu przy przełączaniu elementu można przeprowadzić przez obserwację na wyskalowanym oscyloskopie spadku napięcia na niewielkim oporniku włączonym w przewód zasilający. Wartość opornika należy dobrać tak, by maksymalny spadek napięcia na nim nie przekraczał 5% napięcia za-

silania. Pobór prądu powinien być mniej więcej stały, krótkie impulsy prądu zasilania występujące przy przekazywaniu elementu, tak charakterystyczne dla elementów z wyjściem symetrycznym, mogą zakłócać pracę elementów współpracujących.

LITERATURA

1. Lynn D.K., Meyer Ch.S., Hamilton D.J.: Analysis and design of integrated electronic circuits, New York, McGraw Hill Book Co, 1967.
2. Naumow Ju. E.: Integralnyje logiczeskie schemy, Moskwa, Sowietskoje Radio, 1970.
3. Biażko M.: Układy mikroelektroniczne, WKŁ, Warszawa, 1969.

ИСПЫТАНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Р е з ю м е

В докладе обсуждены статические и импульсные испытания логических схем предназначенных для промышленных применений. Приводятся схемы измерений и типичные характеристики испытанных логических схем. Подробно рассмотрен вопрос об измерении статической и импульсной помехоустойчивости.

TESTING OF LOGIC CIRCUITS DESIGNED FOR INDUSTRY APPLICATIONS

S u m m a r y

The static and impulse measurements of the logic circuits designed for industry applications are presented. The measurement networks and obtained typical logic circuits performances are described. The special attention was turned toward the investigation both of static and impulse noise margins.