

A-1. Linia długa (opóźniająca)

wersja 04'2014

1. Zakres ćwiczenia

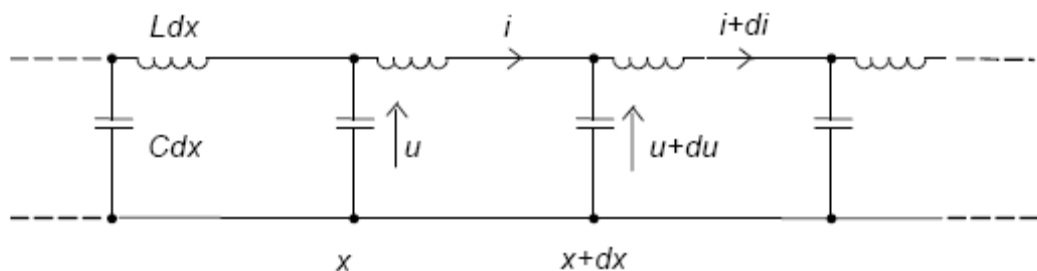
Temat obejmuje zbadanie modelu linii długiej oraz odcinka kabla koncentrycznego w aspekcie przesyłania sygnałów elektrycznych, a także zastosowanie sztucznej linii opóźniającej do formowania impulsów.

2. Wstęp teoretyczny

2.1. Model linii o parametrach rozłożonych

Rzeczywisty obwód bierny może być dobrze przybliżony układem elementów skupionych R, L, C , jeżeli zmiany napięć (prądów) są znacznie wolniejsze od propagacji sygnałów między dowolnymi punktami obwodu. Nie zachodzi to na ogół przy przesyłaniu sygnałów na bardzo duże odległości, a w przypadku sygnałów narastających (opadających) bardzo szybko warunek ten może nie być spełniony nawet w obrębie jednego urządzenia (np. typowy czas przełączania układów cyfrowych jest rzędu 10^{-8} s, gdy średnia prędkość propagacji w obwodach drukowanych jest około $2 \cdot 10^8$ m/s, a w typowym kablu koncentrycznym około $2.5 \cdot 10^8$ m/s). Dlatego rozpatrując transmisję informacji na duże odległości, a także analizując przesyłanie bardzo szybkich sygnałów, stosuje się specjalny model linii długiej, mianowicie model z parametrami rozłożonymi. Jest to nieskończony łańcuch ogniw składających się z elementów R, G, L, C , odpowiadających pierwotnym parametrom linii: rezystancji, upływności, indukcyjności i pojemności liczonych na jednostkę długości. Wielkości te symbolizują odpowiednio straty energetyczne w przewodniku i izolacji oraz magazynowanie energii magnetycznej i elektrycznej. Taki model tłumaczy zjawiska falowe, które zachodzą w linii rzeczywistej, w tym odbicia sygnału od jej końców (co nie występuje w obwodach o stałych skupionych), i pozwala na określenie tzw. wtórnych parametrów linii: impedancji falowej Z_f (inaczej: impedancji charakterystycznej), jednostkowego opóźnienia sygnału t_0 oraz jednostkowego tłumienia.

Zwykle wystarcza stosowanie uproszczonego modelu LC , w którym zaniedbuje się straty ciepłe w przewodniku i dielektryku. W takiej bezstratnej linii (rys. 1), impedancję falową zastępuje rezystancja falowa R_f , nie ma uzależnienia częstotliwościowego (pasmo przenoszenia ma nieskończoną szerokość) i nie występuje tłumienie.



Rys. 1.

Dla takiego modelu zachodzi:

$$\frac{\delta u}{\delta x} = -L \frac{\delta i}{\delta t} \quad \text{oraz} \quad \frac{\delta i}{\delta x} = -C \frac{\delta u}{\delta t}$$

co prowadzi do równań typu falowego, tzw. równań telegraficznych:

$$\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} = LC \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \quad \text{oraz} \quad \frac{\delta^2 i}{\delta x^2} = LC \frac{\delta^2 i}{\delta t^2}$$

których rozwiązania są następującymi funkcjami czasu i położenia:

$$u(x, t) = u_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + u_2\left(t + \frac{x}{v}\right)$$

$$i(x, t) = i_1\left(t - \frac{x}{v}\right) - i_2\left(t + \frac{x}{v}\right)$$

W równaniach tych wielkości

$$v = 1 / \sqrt{LC} \quad \text{oraz} \quad t_o = 1 / v$$

są odpowiednio prędkością propagacji fali i opóźnieniem sygnału na jednostkę długości linii. Rozwiązania powyższe interpretuje się następująco: w każdym punkcie x linii w chwili t napięcie (lub prąd) jest superpozycją dwóch fal u_1 oraz u_2 (lub i_1 oraz i_2) przemieszczających się wzdłuż łańcucha LC w przeciwnych kierunkach. Jeśli przyjąć praktyczny przypadek linii o skończonej długości, to ma się do czynienia z superpozycją fali biegnącej od nadajnika do odbiornika i fali od odbiornika do nadajnika, albo, inaczej mówiąc, fali pierwotnej i fali wtórnej, odbitej. Znak minus w drugim równaniu uwzględnia to, że prądy i_1 oraz i_2 płyną w przeciwnych kierunkach. Stosunek napięcia do prądu w określonym punkcie i chwili dla fali pierwotnej jest stały i nosi nazwę rezystancji falowej:

$$R_f = \sqrt{L/C}$$

Dla fali odbitej stosunek napięcia i prądu jest równy $-R_f$. W przypadku idealnym, gdy nie występują straty, linia przesyłowa nie wnosi zniekształceń amplitudowych i fazowych, podczas gdy w liniach rzeczywistych zniekształcenia takie (zwane zniekształceniami liniowymi) występują i stosunek napięcia do prądu fali pierwotnej w danym punkcie i momencie jest impedancją $Z_f(j\omega)$, czyli wielkością zależną od częstotliwości.

2.2. Odbicia. Niektóre przypadki szczególne

Jeśli na wejściu linii o długości l nastąpi zmiana napięcia, to zmianę tę zaobserwuje się na końcu linii dopiero po czasie $l t_o$, kiedy dotrze tam fala padająca. W zależności od obciążenia załączonego na linię energia fali zostanie przez obciążenie pochłonięta w całości, lub tylko w części, lub wcale. Stosunek amplitudy napięcia fali padającej do amplitudy fali odbitej, wyliczony dla końca linii obciążonej rezystancją R , jest nazywany współczynnikiem odbicia dla końca linii:

$$\rho = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R / R_f - 1}{R / R_f + 1}$$

Jeżeli $R = R_f$ to $\rho = 0$ i fala odbita nie występuje, a linię nazywa się dopasowaną. W przypadku $R = 0$, to jest zwarcia linii na końcu, $\rho = -1$ i fala napięciowa odbija się z fazą przeciwną; następuje więc wygaszenie fali pierwotnej ($u_1 + u_2 = 0$). Dla linii nieobciążonej, to jest dla $R \rightarrow \infty$, współczynnik $\rho = 1$ i w wyniku superpozycji fal na końcu linii występuje podwojenie sygnału. W przypadkach pośrednich część energii wytraca się w obciążeniu, reszta wraca do linii w postaci fali odbitej. Jak fala pierwotna na końcu linii, tak fala wtórna odbija się na początku linii, co zachodzi po czasie $2 \cdot l \cdot t_0$, ze współczynnikiem odbicia wyrażonym jak poprzednio, przy czym R jest w tym przypadku rezystancją wewnętrzną źródła sygnału.



Rys. 2.

Jeżeli ani odbiornik, ani nadajnik sygnału nie są dopasowane do linii ($R \neq R_f$), to występują odbicia wielokrotne. W przykładzie pokazanym na rys. 2 efekt jest obserwowany na wejściu linii. Przypadek dotyczy sterowania linii jednostkowym skokiem napięcia, przy współczynnikach odbicia na początku i końcu odpowiednio $-0,5$ oraz $+0,5$. Przyczynki do zmiany napięcia na wejściu linii pojawią się co $2 \cdot l \cdot t_0$, zaś asymptotyczne, końcowe napięcie na linii wyniesie $0,1V$. W stanie ustalonym bowiem zjawiska falowe w linii nie występują, prądy nie płyną i pojemności są naładowane do napięcia wynikającego z wartości rezystancji generatora i obciążenia; przekładnia tego dzielnika napięcia jest $(R_f/3)/(3R_f + R_f/3)$.

Jeśli linia ma obciążenie czysto reaktancyjne C lub L , to odpowiedź na skok jednostkowy napięcia będzie miała charakter wykładniczy, przy czym stała czasowa będzie zależna od obciążenia i rezystancji falowej, jak na rys. 3. Asymptotami odpowiednio dla obciążenia pojemnościowego i indukcyjnego są 1 i 0 .

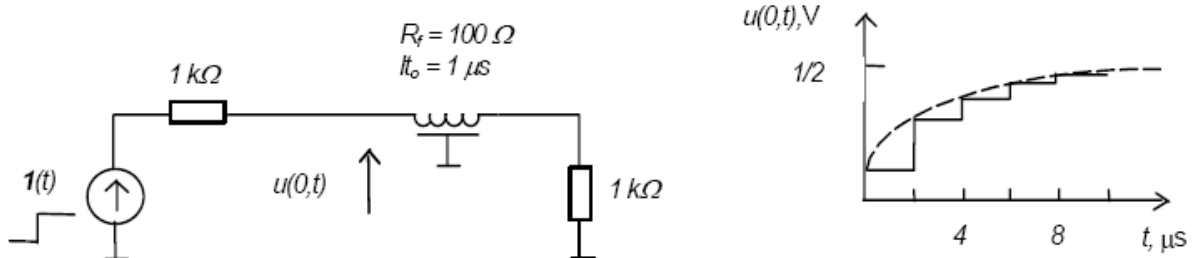


Rys. 3.

Gdy rezystancja wewnętrzna źródła sygnału i rezystancja obciążenia są znacznie większe od R_f , to w wyniku wielokrotnych odbić odpowiedź jednostkowa jest przebiegiem narastającym schodkowo, o obwiedni przypominającej reakcję przy obciążeniu pojemnościowym, jak to widać na rys. 4. Można mówić wtedy o efekcie pojemnościowym linii niedopasowanej oraz o pewnej „stałej czasowej” obwodu transmisji sygnału, danej zależnością:

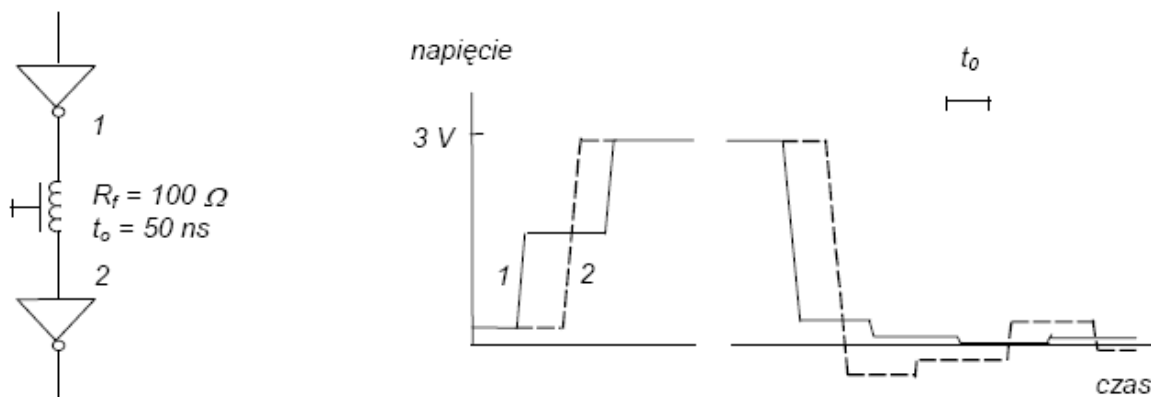
$$\tau = -\frac{2t_0}{\ln(\rho\rho')}$$

gdzie ρ i ρ' są współczynnikami odbicia na wyjściu i wejściu linii. Zatem tutaj „pojemność” linii jest zależna od rezystancji źródła sygnału i obciążenia. Jeśli są znacznie większe od R_f , to ta „pojemność” jest równa pojemności linii na metr wymnożonej przez długość linii, natomiast w przypadku dopasowania spada do zera i pojęcia „stałej czasowej” oraz „pojemności” w odniesieniu do transmisji sygnału tracą sens.



Rys. 4.

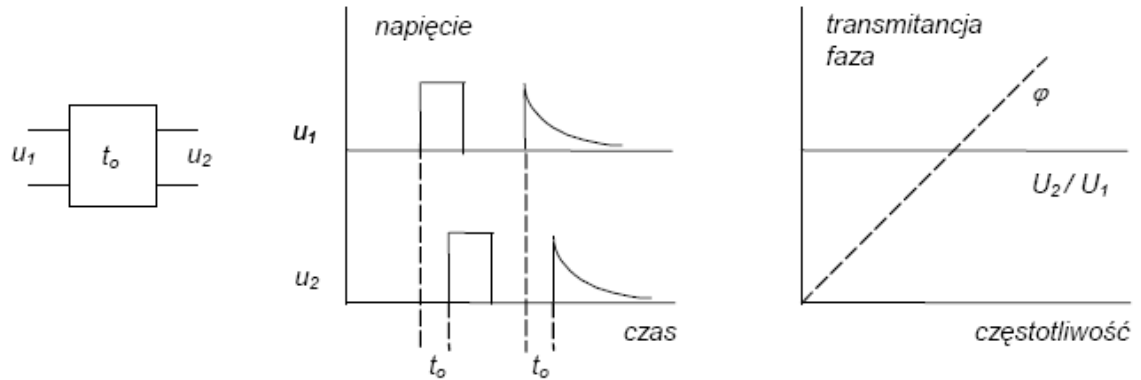
Stosowanie linii w obwodach cyfrowych zwykle odbywa się w warunkach obustronnego niedopasowania; najczęściej występuje nieliniowe obciążenie i dla fali pierwotnej i dla wtórnej. Na ogół rezystancje falowe połączeń mieszczą się w przedziale od 50 do 200 omów. Zniekształcenia sygnałów spowodowane w takich warunkach wielokrotnymi odbiciami mogą prowadzić do błędów już przy połączeniach o długościach decymetrowych, dla których podwójny czas opóźnienia bywa większy od czasu narastania (opadania) sygnału. W takich przypadkach można wyznaczać odbicia w linii metodą graficzną Bergerona, wykorzystując charakterystyki wejściowe i wyjściowe modułów cyfrowych. Uzyskane tą drogą przebiegi na początku i końcu kabla łączącego bramki logiczne (tutaj inwertery wykonane w technologii TTL) pokazano na rys. 5.



Rys. 51

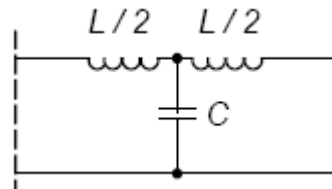
2.3. Sztuczna linia opóźniająca

Idealny czwórnik liniowy wprowadzający kontrolowane opóźnienie sygnału, zwany linią opóźniającą, ma tę własność, że jego charakterystyka amplitudowa jest płaska, zaś fazowa stanowi liniową funkcję częstotliwości - jak to pokazuje rys. 6. Przez t_0 oznaczono na nim całkowity czas opóźnienia (tutaj opóźnienie jednostkowe nie jest użyteczne), natomiast U_2/U_1 jest stosunkiem amplitud sygnałów.



Rys. 6.

Stosowanie w roli elementu opóźniającego linii o parametrach rozłożonych, na przykład kabla koncentrycznego, jest niepraktyczne ze względu na małe opóźnienie jednostkowe, rzędu 10^{-8} s/m. Dlatego buduje się sztuczne linie opóźniające, złożone zwykle z kilkudziesięciu ogniw LC , które pozwalają uzyskać szeroki zakres opóźnień i rezystancji falowych. Elementarne ogniwo takiej linii można rozważyć jako czysto reaktancyjny czwórnik typu T o częstotliwości granicznej f_g (rys. 7).



Rys. 7.

Przy założeniu, że widmo częstotliwościowe sygnału ogranicza się do wartości znacznie niższych od f_g , oraz że w łańcuchu występuje n ogniw, otrzymuje się następujące wyrażenia na czas narastania odpowiedzi jednostkowej, czas opóźnienia i rezystancję falową:

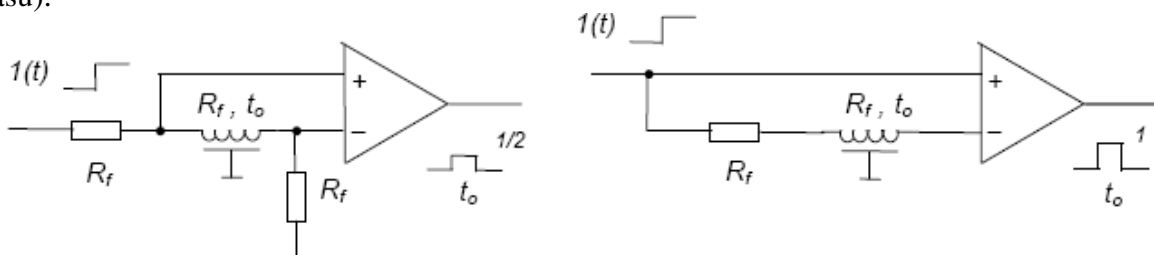
$$t_r = 1,1 n^{1/3} \sqrt{LC}$$

$$t_o = n \sqrt{LC}$$

$$R_f = \sqrt{L/C}$$

2.4. Formowanie impulsów

Linie opóźniające bywają stosowane do formowania impulsów, często w układach ze wzmacniaczami operacyjnymi. Można w tym celu wykorzystać efekt superpozycji fal pierwotnej i wtórnej dla linii na końcu zwartej lub otwartej, przy dopasowaniu źródła sygnału - jak w przykładach z rys. 8. Obydwa układy wytwarzają krótki sygnał, o czasie trwania równym opóźnieniu linii, informujący o zmianie poziomu napięcia na wejściu (tzw. znacznik czasu).



Rys. 8.

3. Program ćwiczenia

1) Zbadać przesyłanie impulsów prostokątnych przez linię długą posługując się modelem utworzonym z 50 ogniw indukcyjno-pojemnościowych ($L = 100 \mu H$, $C = 100 pF$). Całkowite opóźnienie wynosi $t_o = 5 \mu s$, a rezystancja falowa $R_f = 1 k\Omega$ (parametry te są wyliczone przy idealizującym założeniu bezstratności linii). Sterując model impulsem prostokątnym o czasie trwania nie większym od opóźnienia linii, w warunkach dopasowania na wejściu (dobrać na modelu odpowiednią rezystancję), zaobserwować na oscyloskopie i przerysować przebiegi na **początku linii, w środku i na końcu**.

Doświadczenie wykonać kolejno dla trzech charakterystycznych przypadków obciążenia:

- a) $R = R_f$,
- b) $R = 0$,
- c) $R \rightarrow \infty$.

Zmierzyć czas opóźnienia t_o .

2) Zbadać na modelu linii przechodzenie impulsu prostokątnego o czasie trwania znacznie większym od opóźnienia, przy dopasowaniu na wejściu i kolejno przy obciążeniu:

- a) $R = 0$,
- b) $R \rightarrow \infty$.

Zmierzyć czasy opóźnienia t_o poszczególnych zboczy odpowiedzi napięciowej na **początku linii, w środku i na końcu**.

Zaobserwować efekt pojemnościowy linii, występujący, gdy rezystancja falowa jest znacznie mniejsza od rezystancji na wejściu linii i obciążeniu. Zmierzyć czasu opóźnienia przynajmniej pierwszych trzech zboczy oraz ich poziomy napięcie.

3) Zaobserwować efekty spowodowane nieidealnymi własnościami rzeczywistego modelu: zmniejszenie amplitudy (tłumienie) oraz spowodowane ograniczonym pasmem przenoszenia - pochylenie zboczy impulsu. Wielkość tłumienia łatwo otrzymać mierząc przebieg na wejściu linii dopasowanej z przodu i zwartej na końcu - superpozycja fali padającej i odbitej da wartość napięcia różną od zera - właśnie ze względu na tłumienie sygnału przy przejściu przez linię tam i z powrotem. Własności częstotliwościowe można oszacować mierząc czas narastania t_r impulsu na dopasowanym wyjściu linii.

4) Zbadać transmisję krótkiego impulsu prostokątnego (np. $100 ns$) przez kabel koncentryczny o znanej długości. Sprawdzić wartość rezystancji falowej dobierając rezystancję obciążenia, przy której nie występuje odbicie oraz zmierzyć t_o , t_r oraz tłumienie. Traktując w przybliżeniu kabel jak linię bezstratną obliczyć jednostkową pojemność i indukcyjność.

Literatura

- Łakomy M., Zabrodzki J., *Cyfrowe układy scalone*.
Korbel K., *Elektronika jądrowa, cz.I*, skrypt AGH, 878
Kohonen T., *Elementy i układy elektronicznych maszyn cyfrowych*.

Schemat poglądowy płytki PCB: **Linia długa:**

