



Radar kablowy, czyli zbuduj własny TDR



Część 2

Informacje dla początkujących

Wszyscy wiedzą, iż przy prądzie stałym i przy małych częstotliwościach kabel zachowuje się „normalnie”. Głównym parametrem kabla w takich warunkach jest rezystancja żył. Można ją zmierzyć omomierzem. Jest niewielka i nawet w cienkich kablach o długości kilku czy kilkunastu metrów rezystancja żył zwykle nie przekracza 1Ω. Drugim parametrem kabla, dość istotnym w zakresie małych częstotliwości jest pojemność. Chodzi o pojemność między żyłami, która w zależności od rodzaju kabla wynosi od 10...100pF/m. Pojemność tę można łatwo zmierzyć za pomocą jakiegokolwiek miernika pojemności. Odcinek przewodu dołączony do miernika zachowuje się przy małych częstotliwościach jak niewielki kondensator.

Można też zmierzyć indukcyjność jednej lub obu żył odcinka przewodu dla przebiegów małej częstotliwości. Indukcyjność kilkumetrowego przewodu jest niewielka, co najwyższej rzędu mikrohenrów i w zakresie m.cz. nie ma praktycznego znaczenia.

Zjawiska występujące przy dołączeniu do dwóch żył przewodu źródła napięcia stałego lub zmiennego m.cz. są jak najbardziej zgodne z intuicją. Gdy kabel jest na drugim końcu otwarty, prąd stały w ogóle nie płynie. Ewentualnie przez pojemność między żyłami płynie jakiś mały prąd zmienny. Gdy końce kabla są zwarte, płynie jakiś prąd

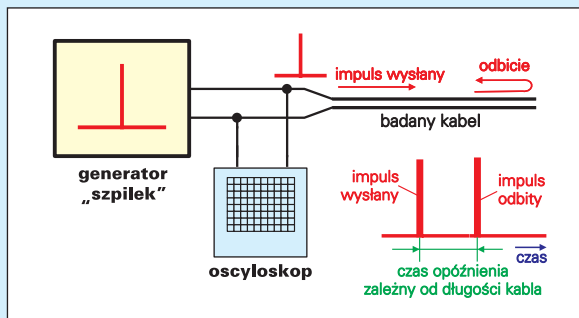
zwarcia o wartości ograniczonej rezystancją żył i rezystancją wewnętrzną źródła sygnału.

Przy bardzo dużych częstotliwościach sytuacja drastycznie się zmienia. Źródło „nie widzi” już kabla jako kondensatora o małej pojemności, staje się on falowodem, a nie „zwykłym przewodem”. Fala wysokiej częstotliwości będzie się odbijać od przeszkód.

Opisywany przyrząd pozwala naocznie przekonać się, że od przeszkód odbijają się pojedyncze, krótkie impulsy – pokazują to zamieszczone fotografie (EdW 10/2001). Od przeszkód odbija się także ciągła fala sinusoidalna, a efektem jest powstanie tak zwanej fali stojącej. Opisanie wszystkich szczegółów zdecydowanie wykracza poza ramy tego artykułu – należy ich szukać w książkach. W każdym razie przy bardzo dużych częstotliwościach oraz krótkich impulsach powstaje osobliwa sytuacja.

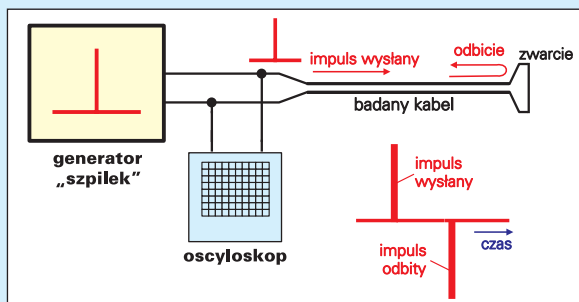
Jeśli przykładowo kabel jest rozarty na końcu i w taki kabel zostanie wysłany krótki impuls, wtedy impuls ten odbije się od rozwartego końca kabla i po pewnym czasie powróci na wejście.

Jeśliby na długości kabla nie wystąpiły żadne straty, powracający impuls miałby taką samą wielkość, jak impuls wysłany – patrz rysunek 6. Idealnych kabli nie ma, w rzeczywistych przewodach zawsze występują straty, więc powracający impuls będzie mniejszy od wysłanego. Rzeczywiste przebiegi pokazane



Rys. 6

Rys. 7



są na fotografiach 3 i 8 w poprzednim numerze EdW. Czym większe tłumienie (gorszy kabel), tym powracający impuls będzie mniejszy.

Jeśli kabel będzie na końcu zwarty, wbrew intuicyjnym wyobrażeniom, nie nastąpi zwarcie i pochłonięcie impulsu. Także i w tym przypadku wystąpi pełne odbicie. Tym razem jednak powracający impuls będzie miał przeciwną biegunowość – patrz **rysunek 7**. W idealnym przypadku powracający impuls będzie mieć taką samą wielkość, jak impuls wysłany. Rzeczywiste przebiegi pokazane są na fotografiach 4 i 7 (EdW 10/2001).

Należy tu zauważyć, że wysłany impuls niesie jakąś energię. Możemy powiedzieć, że zarówno w przypadku rozwarcia, jak i zwarcia dalekiego końca kabla, cała energia wraca z powrotem na wejście. Co ważne, dotyczy to nie tylko impulsów, ale i fali ciągłej.

Gdy na dalekim końcu kabla dołączony zostanie rezystor obciążenia R_L (**rysunek 8a**), sytuacja będzie zależała od wartości tego rezystora. Przy, z grubsza biorąc, dużej wartości rezystancji R_L nastąpi częściowe odbicie. Na wejście wróci jakiś mały impuls - patrz **rysunek 8b**. Gdy z kolei rezystancja R_L będzie bardzo mała, na wejście wróci mały impuls o polaryzacji odwrotnej - patrz **rysunek 8c**. Nietrudno się domyślić, że przy jakiejś wartości R_L na wejście nie wróci nic - patrz **rysunek 8d**. Oznacza to ni mniej, ni więcej, że cała energia impulsu... została przekazana do rezystora obciążenia. To samo dotyczy fali ciągłej. Przy dołączeniu obciążenia o pewnej charakterystycznej rezystancji R_0 cała energia zostaje dostarczona do obciążenia - nie ma szkodliwych odbić.

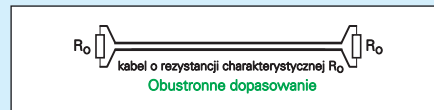
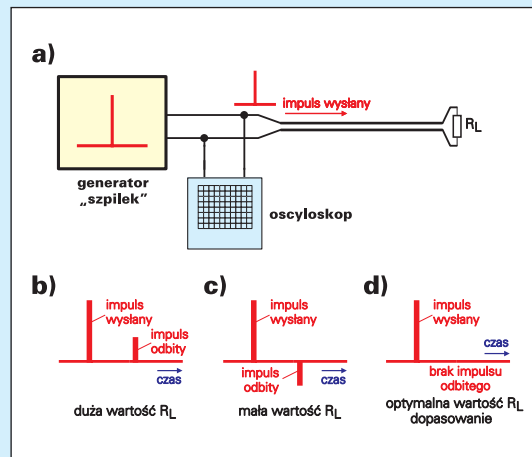
Teraz mamy wyobrażenie o „**rezystancji charakterystycznej**” kabla (oznaczymy ją R_0 lub ogólnie Z_0). Mamy niecodzienną sytuację - przy bardzo dużych częstotliwościach dany kabel „lubi” konkretną rezystancję obciążenia. Przekazuje całą energię do obciążenia tylko wtedy, gdy rezystancja obciążenia jest

równa rezystancji charakterystycznej kabla. Mówimy wtedy o **dopasowaniu**.

Możemy sobie wyobrazić w uproszczeniu, że przy niewłaściwej rezystancji obciążenia energia nie chce „wyjść z kabla” na jego dalekim końcu. Co ważne, energia nie chce też „wejść do kabla”, jeśli na zasilanym końcu nie ma podobnego dopasowania.

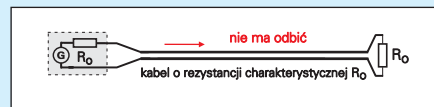
Ogólnie biorąc, wszelkie niedopasowania powodują odbicia energii. Dlatego w zakresie w.c.z. kabel powinien być z obu stron zamknięty rezystancją dopasowania, co w uproszczeniu ilustruje **rysunek 9**. Oczywiście jedna z rezystancji dopasowania będzie rezystancją wewnętrzną generatora, jak pokazuje **rysunek 10**.

Rys. 8



Rys. 9

Rys. 10



Przy niedopasowaniu z obu stron, w kablu nastąpią wielokrotne odbicia od obu końców. Fotografia 10 pokazuje, że wielokrotnie odbijające się impulsy ulegną w końcu sfluwieniu. Oczywiście są one szkodliwe; to właśnie niedopasowanie i odbicia są główną przyczyną powstawania tzw. „duchów” na ekranie telewizora. Właśnie po to, by możliwe było dopasowanie do kabla obu stron, w zaprezentowanym generatorze przewidziano szereg rezystorów i zwór.

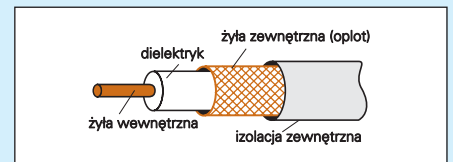
Do przesyłania przebiegów wysokiej częstotliwości i szybkich przebiegów impulsowych wykorzystuje się powszechnie tzw. kable współosiowe, zwane też koncentrycznymi, a ostatnio koaksjalnymi (coaxial cable). Budowę kabla współosiowego pokazuje w uproszczeniu **rysunek 11**. Wewnętrzna żyła otoczona jest warstwą izolacji.

Druga żyła ma zwykle postać oplotu (siatki). Taka budowa minimalizuje wrażliwość na zewnętrzne zakłócenia i zapobiega promieniowaniu energii z kabla na zewnątrz. Rezystancja charakterystyczna kabli koncentrycznych zależy od stosunku średnic żyły wewnętrznej i zewnętrznej oraz od właściwości dielektryka i zawiera się w granicach $20\Omega...150\Omega$. Najczęściej spotyka się kable 75-omowe i 50-omowe. Różne kable płaskie (**rysunek 12**) mają rezystancję charakterystyczną w granicach $70\Omega...1k\Omega$.

Co istotne, **impedancja charakterystyczna nie zależy od długości kabla ani od częstotliwości**.

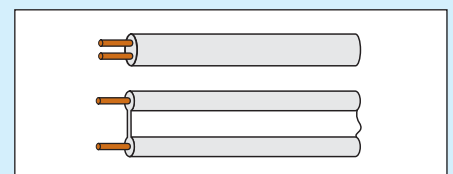
Aby w pełni wykorzystać, a właściwie przesłać energię bez strat, kabel musi być dopasowany na obu końcach: z jednej strony do rezystancji źródła, z drugiej do rezystancji obciążenia. W przypadku ciągłej fali sinusoidalnej nie wystąpi wtedy tak zwana fala stojąca.

Jest to ważne zarówno w urządzeniach nadawczych, by minimalizować straty mocy na drodze do anteny, jak i w odbiorczych, gdzie niedopasowanie powoduje „zmarowanie” części cennego, maleńkiego sygnału odebranego przez antenę.



Rys. 11 Kabel koncentryczny

Rys. 12 Kabel symetryczny (płaski)



R E K L A M A . R E K L A M A . R E K L A M A

ZAKŁAD PRZETWORÓW INDUKCYJNYCH
INDEL Sp. z o.o.
 00-000 BRZEZIŃ ul. Piłsudskiego 29
 http://www.indel.pl; e-mail: handel@indel.pl
 tel./fax (0-48) 874 31 37
 (0-48) 874 31 28
 (0-48) 874 32 27
 centr. (0-48) 874 31 48
 kortownia tel./fax (0-22) 669-99-57

TRANSFORMATORY 0,5 ÷ 5000VA
 DO ZASILANIA URZĄDZEŃ ELEKTRONICZNYCH,
 DO OŚWIECENIA HALOGENOWEGO,
 BEZPIECZYSTWA,
 REPARACYJNE,
 CIĄŚNIKOWE,
 SIĘCIOWE,
 CENKI I DŁAWIKI,
 AUTOTRANSFORMATORY.

Co prawda w przypadku obustronnego dopasowania, do obciążenia dostarczana jest tylko połowa mocy wytworzonej w źródle (reszta wydziela się w rezystancji źródła), ale nie ma na to rady. W każdej innej sytuacji jest jeszcze gorzej.

Następną istotną sprawą, o której koniecznie trzeba wspomnieć, jest tłumienie impulsu w kablu. W idealnym przypadku cała energia wchodząca do kabla zostaje bez strat przesłana do obciążenia. W rzeczywistym kablu część przesyłanej energii zostaje stracona, a ściślej biorąc, zamienia się na ciepło. Oczywiście czym dłuższy kabel, tym większe tłumienie. Trzeba też wiedzieć, że tłumienie zależy od budowy kabla oraz od dielektryka. Z kilku powodów tłumienie silnie wzrasta ze wzrostem częstotliwości, a przyczynami są między innymi zjawisko nasłódkowości oraz straty w dielektryku.

Zależnie od zastosowania i częstotliwości pracy, trzeba wykorzystać kabel o odpowiednio małym tłumieniu. Przykładowo, do zasilenia anteny systemu GSM umieszczonego na kominie elektrociepłowni potrzebny jest kabel koncentryczny o średnicy 5cm (2-calowy). Tylko wtedy straty będą stosunkowo niewielkie. Gdyby kabel był cieńszy, do anteny dotarłaby niewielka część energii wysyła-

nej z nadajnika. Reszta zamieniłaby się na ciepło w kablu.

W najpopularniejszych kablach współosiowych dielektrykiem jest tani polietylen, w trochę lepszych – pianka z tworzywa sztucznego. W niskostratnych kablach koncentrycznych dielektrykiem jest powietrze, a środkowa żyła utrzymywana jest w przewidzianej pozycji za pomocą umieszczonych co pewien odcinek krążków dystansowych.

I kolejna sprawa: warto wiedzieć, że prędkość rozchodzenia się fali w kablu jest znacznie mniejsza od prędkości światła. Prędkość ta zależy głównie od właściwości zastosowanego dielektryka i wynosi zwykle 60...70% prędkości światła w próżni; średnio przyjmuje się prędkość fali w kablu około 195000km/s.

Przedstawione tu pokrótce zjawiska falowe dają o sobie znać przy częstotliwościach, przy których długość kabla jest porównywalna z długością fali w tym kablu.

Jak wiadomo długość fali to iloraz prędkości fali i częstotliwości:

$$l = v / f$$

Przykładowo dla przebiegów audio o najwyższej częstotliwościach (20kHz)

$$l = 195\,000\text{km/s} / 20\,000\text{Hz}$$

Długość fali wynosi więc około 10km. Jeśli kable połączeniowe mają metr, kilka, czy

nawet kilkaset metrów, nie ma żadnej potrzeby rozpatrywania zjawisk falowych, których wpływ w tym przypadku będzie znikomy i pomijalnie mały.

Tak samo jeśli mamy oscyloskop o paśmie, powiedzmy 20MHz, nie trzeba dopasowywać kabla połączeniowego do impedancji wejściowej oscyloskopu (rezystancja 1MΩ równoległe kilkanaście pF), ani do oporności wyjściowej badanego obwodu, która może być różna. Często wykorzystujemy tu kilkudziesięciocentymetrowy odcinek kabla koncentrycznego o rezystancji charakterystycznej 50Ω i zaniedbujemy efekty wywołane przez fale, których długość jest większa niż 10m. Dopiero przy większych częstotliwościach uwzględniamy te zjawiska i właśnie dlatego oscyloskopy o bardzo szerokim paśmie często mają wejście 50-omowe.

O ile zjawiska falowe nie mają znaczenia w zakresie audio, o tyle trzeba je uwzględnić przy produkcji szybkich komputerów i innych urządzeń pracujących z częstotliwościami powyżej 100MHz. W takich urządzeniach konstruktorzy stosują tak zwane linie mikropaskowe (microstrip lines) o ściśle określonej rezystancji falowej. Temat ten wykracza poza ramy artykułu.

Piotr Górecki

Wykaz elementów

Rezystory

R1, R2, R10	.....1kΩ
R3	.....50Ω
R4	.....10Ω
R5	.....22Ω
R6	.....47Ω
R7	.....100Ω
R8	.....220Ω
R9	.....470Ω
R11	.....2,2kΩ

Kondensatory

C1	.....470pF
C2	.....33pF
C3	.....1nF ceramiczny
C4	.....10nF ceramiczny
C5	.....10μF
C6	.....100μF

Inne

U1	.....74AC04
listwa 2x8 pin	
jumper 8szt	
płytką drukowaną	

Komplet podzespołów z płytka jest dostępny w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-2606

Rezystancja charakterystyczna

W uproszczonych rozważaniach przedstawionych w artykule przyjęto, że kabel ma charakterystyczną rezystancję.

Ścisłsza analiza wykazuje, że należałoby mówić o impedancji charakterystycznej. Impedancja charakterystyczna oznaczana jest zwykle Z_0 i definiowana jako stosunek natężenia pola elektrycznego do natężenia pola magnetycznego fali (występującej w kablu). Wymiarem jest Ω ($\Omega = V/A$), ponieważ natężenie pola elektrycznego wyraża się w voltach na metr, a magnetycznego w amperach na metr. $[Z_0] = V/m / A/m$

Jeśli w kablu nie występuje fala stojąca (dopasowanie z obu stron), Z_0 jest stosunkiem napięcia i prądu w.cz.

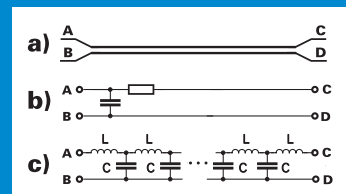
Impedancja charakterystyczna rzeczywistych kabli jest niemal czystą rezystancją, dlatego często nazywa się ją **rezystancją charakterystyczną** przewodu i takie właśnie określenie używane jest konsekwentnie w artykule. W podręcznikach spotyka się też określenia **impedancja falowa** i **rezystancja falowa**.

Dla małych częstotliwości przyjmuje się czasem schemat zastępczy kabla jak na **rysunku 13b**.

Schemat zastępczy kabla dla wysokich częstotliwości przedstawia się jako połączenie indukcyjności i pojemności. Kabel, który można nazwać linią transmisyjną, należy traktować jako połączenie (nieskończenie) wielkiej liczby elementarnych ogniw LC według **rysunku 13c**. Dla ścisłości należałoby jeszcze dodać rezystancje reprezentujące straty w miedzi i w dielektryku. Biorąc pod uwagę model z rysunku 13c można też obliczyć impedancję charakterystyczną ze wzoru,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

gdzie L, C to jednostkowa indukcyjność i pojemność linii.



8 numerów w prenumeracie za darmo kupuj po 5,30 zł/egz. z dostawą do domu!