



Radary kablowy,

czyli

zbuduj własny TDR



Część 1

Przyrząd opisany w artykule pozwoli naocznie zaobserwować wszystkie ważne zjawiska, charakterystyczne dla techniki w.cz. Będzie pełnił rolę edukacyjną. Będzie też wykorzystywany praktycznie przez miłośników techniki w.cz. na przykład do badania właściwości kabli, lokalizacji uszkodzeń w sieciach kablowych, do pomiaru długości (zwiąniętych) przewodów.

Projekt powstał wskutek licznych prób i pytań. Na przykład do Skrzynki Porad trafiają pytania dotyczące kabli. Jedno z nich dotyczyło możliwości zmierzenia rezystancji falowej kabla antenowego za pomocą miernika uniwersalnego. Pytano o sposoby rozróżnienia kabla 50-omowego od kabla 75-omowego. Napłynęły też prośby o przedstawienie przyrządu pozwalającego lokalizować miejsca uszkodzenia kabla metodą impulsową.

Oczywiście omomierzem i za pomocą prądu stałego nie da się zmierzyć parametrów, które dają o sobie znać dopiero przy wysokich częstotliwościach. Nie znaczy to, że do pomiarów kabli antenowych i innych konieczne jest specjalistyczne i kosztowne oprzyrządowanie. Niniejszy artykuł prezentuje proste urządzenie, które nie tylko pomoże zmierzyć rezystancję falową kabla, ale i sprawdzić jego tłumienie, zlokalizować ewentualne uszkodzenia i w niecodzienny sposób... zmierzyć jego długość bez korzystania z metrówki.

Nazwa *radar kablowy* wskazuje na zasadę pracy. W literaturze fachowej przyrząd taki nazywany jest TDR (time domain reflectometer, reflektometr w dziedzinie czasu). W badany kabel wpuszczany jest krótki, stromy impuls. Impuls ten wędruje w kablu z prędkością mniejszą od prędkości światła. Odbija się od wszelkich przeszkód i do punktu wyjścia wraca echo w postaci jednego lub kilku impulsów. Obserwacja tych odbitych impulsów przynosi wiele informacji o kablu, jego długości i właściwościach elektrycznych.

Od razu trzeba wyjaśnić, że opisane urządzenie nie ma obwodów obrazujących wyniki. Współpracuje z oscyloskopem, na którego ekranie pojawiają się odpowiednie przebiegi.

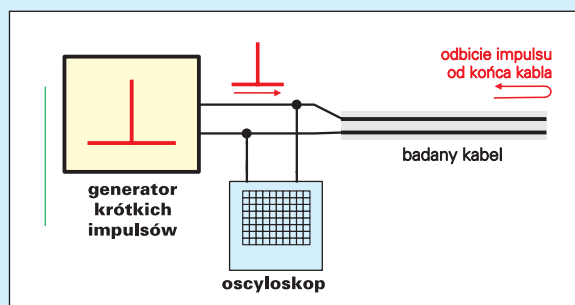
Początkującym bardzo dziwna wyda się informacja, że impuls w kablu odbija się od jakichś przeszkód. Zjawiska falowe nie zgadają się z intuicją, choć w przyrodzie występuje wiele podobnych procesów. Dla mniej zorientowanych, w drugiej części artykułu podano podstawowe informacje o rezystancji falowej kabla i zjawiskach w nim zachodzących przy przesyłaniu sygnałów w.cz. Osoby, które chcą poznać to fascynujące zagadnienie jeszcze bliżej, poszukają dalszych wyjaśnień w książkach.

Opis układu

Zasadę działania reflektometru pokazuje **rysunek 1**. Jak widać, cała sztuka polega na wytworzeniu bardzo krótkich impulsów, wpuszczeniu ich w linię i obejrzeniu powstałego echa. Większość roboty wykonuje tu fabryczny oscyloskop, który pokazuje przebiegi w linii.

Schemat ideowy generatora impulsów można zobaczyć na **ryśunku 2**. Jest to klasyczny generator z inwerterami U1E, U1F. Kondensatory C3...C6 odprzegają zasilanie. Częstotliwość przebiegu wynosi około 1MHz. Nie jest to wartość krytyczna; można ją zmieniać przez dobór C1, R2. Krótkie impulsy w czasie trwania około 5ns uzyskuje się w obwodzie C2R3. Impulsy te ukształtowane przez inwerter U1D są podawane na negatory U1A...U1C, które pełnią rolę buforów,

Rys. 1 Zasada działania reflektometru



zapewniając małą rezystancję wyjściową generatora impulsów. Na wyjściu otrzymuje się impulsy dodatnie względem masy. Sieć rezystorów R4...R11 i zworek J1...J8 pozwala uzyskać rezystancję wyjściową generatora w zakresie około 5...2,2kΩ. Pozwoli to dopasować się do wszelkich kabli.

Aby uzyskać potrzebną rezystancję, trzeba nałożyć jumperki na odpowiednie kołki.

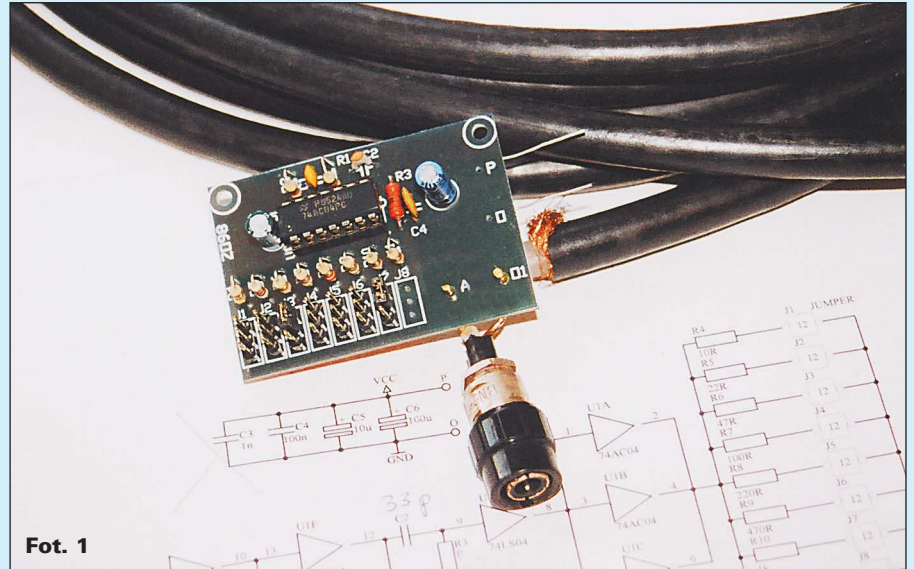
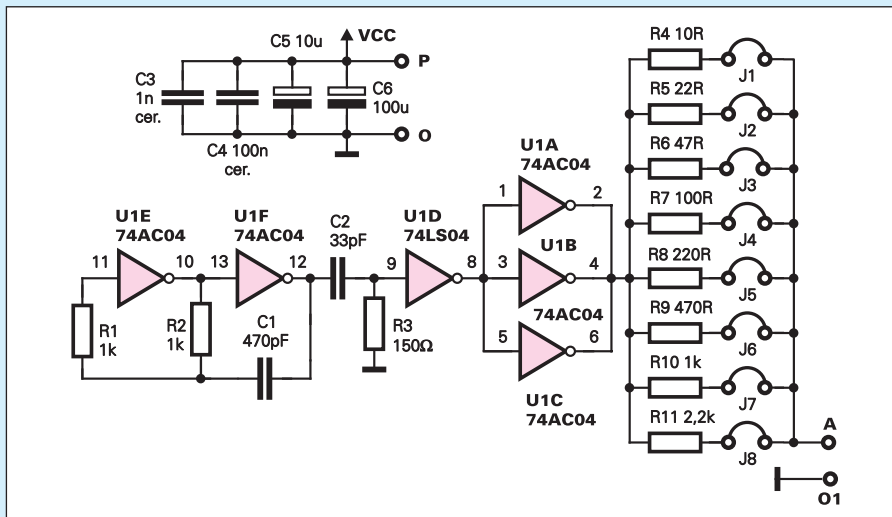
Rewelacyjnie małe czasy trwania i narastania impulsów uzyskano tu dzięki zastosowaniu bardzo szybkiego układu scalonego z serii 74ACxx.

Uwaga! W układzie należy zastosować bardzo szybkie kostki 74AC04, ewentualnie 74ACT04. Gdyby ktoś chciał spróbować wykorzystać bipolarne układy 74F04 czy 74S04, musi we własnym zakresie sprawdzić, czy będą one pracować przy tak dużych wartościach rezystorów i ewentualnie dobrać wartości elementów. Tylko tak szybkie układy zapewnią impulsy o czasie trwania rzędu 4...5ns. Powszechnie dostępne, wolniejsze układy 74HC04, 74HCT04, 74LS04 czy 7404 na pewno nie wygenerują tak krótkich impulsów. Przy próbie ich zastosowania należy samodzielnie dobrać wartości elementów, by uzyskać możliwie najkrótsze impulsy.

Montaż i uruchomienie

Układ można zmontować na małej płytce drukowanej, pokazanej na rysunku 3. Układ prawidłowo zmontowany ze sprawnych elementów pracuje od razu i nie wymaga żadnej regulacji. Ze względu na szybkość układu scalonego i parametry potrzebnych przebiegów, płytka drukowana została zaprojektowana tak, żeby zminimalizować zagrożenia charakterystyczne dla tak szybkich urządzeń. Kondensator C3 (1nF ceramiczny) miał być lutowany wprost do końcówek 7, 14 układu scalonego. W modelu pokazanym na fotografiach nie zastosowano kondensatora C3 i układ pracował poprawnie.

Rys. 2 Schemat ideowy



Połączenie z oscyloskopem zapewnia kilkucentymetrowy odcinek przewodu zakończony wtykiem BNC. W przypadku tego typu urządzenia przewód połączeniowy musi być jak najkrótszy, by jego wpływ był jak najmniejszy. Dlatego też nie przewidziano specjalnego gniazda czy zacisków do podłączenia badanego kabla. Żyły badanego kabla lutuje się do punktów oznaczonych A, O1. Szczegóły można zobaczyć na fotografii wstępnej i fotografii 1.

Do testowania modelu wykorzystano wielkowy oscyloskop produkcji byłego ZSRR o gwarantowanym paśmie przenoszenia 50MHz. Pasma w rzeczywistości jest znacznie szersze, bo na ekranie dobrze widoczne były impulsy o czasie trwania około 5ns.

Trzy fotografie pokazują sygnał w grubym 50-omowym kablu współosiowym (średnica zewnętrzna 10m, długość 6,88m), gdy rezystancja wyjściowa generatora wynosiła 50Ω, czyli kabel był dopasowany z jednej strony (od strony generatora). Fotografia 2 pokazuje przebieg, gdy na drugim końcu dołączono najwykreszniejszy rezystor 51Ω, czyli gdy kabel

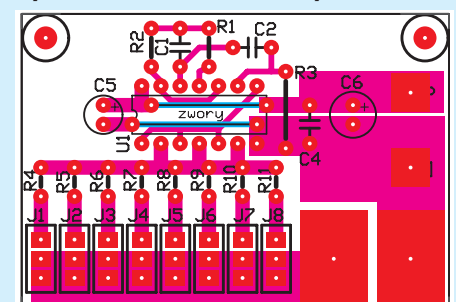
był dopasowany z obu stron. Wyraźnie widać impuls wysyłany w kabel. Odbicia są znikome – energia impulsu została przekazana do rezystora obciążenia. Fotografia 3 pokazuje przebieg, gdy drugi koniec kabla był rozwarzony. Oprócz wysłanego impulsu wyraźnie widać impuls odbity od końca kabla. Ma on taką samą biegunowość, jak impuls pierwotny. Odwrotną biegunowość ma impuls odbity, gdy na końcu kabla żyły były zwarte. Teraz odbity impuls jest ujemny – patrz fotografia 4.

Fotografie 2...4 pokazują przebiegi przy najszybszej podstawie czasu 0,1μs/dz. Użyty oscyloskop pozwala dodatkowo 10-krotnie rozciągnąć przebieg na ekranie przez zwiększenie wzmocnienia wzmacniacza odchylenia poziomego, dzięki czemu uzyskuje się czas 10ns/działkę. Fotografia 5 pokazuje przebieg z rysunku 3 przy tej rozciągniętej podstawie czasu. Jak widać, odstęp między impulsami wynosi około 70ns (oscyloskop nie był przed pomiarem kalibrowany). Impuls podróżuje przez długość kabla tam i z powrotem (13,76m), co wskazuje, że prędkość impulsu w kablu wynosi około 200 000km/s

$$(v = 13,76m / 70ns).$$

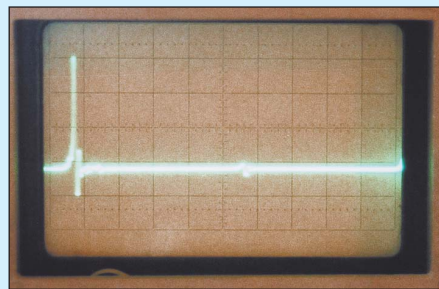
Gdyby oscyloskop został wcześniej skali-browany za pomocą generatora kwarcowego, dokładność pomiaru prędkości byłaby znaczna, błąd nie przekraczałby 2...3%.

Rys. 3 Schemat montażowy



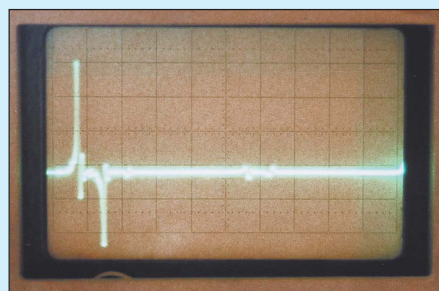
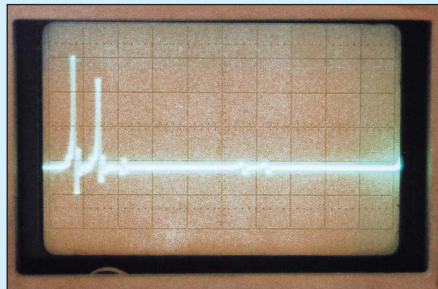
Kolejne trzy fotografie pokazują analogiczne przebiegi dla... zwykłego kabla głośnikowego 2x2,5mm² o długości 4,4m. Tym razem podstawa czasu była rozciągnięta i miała szybkość 10ns/dz. Opóźnienie odbitego impulsu wyniosło, jak widać, około 40ns, co wskazuje, że prędkość impulsu w tym kablu jest nieco większa i wynosi około 220000km/s.

Fotografie 6 i 7 pokazują przebiegi przy zwarcie i rozwarciu drugiego końca kabla. Przebieg z **fotografii 8** praktycznie nie zawiera odbicia. Powstał on przy dołączeniu do końca przewodu rezystora 140Ω. Taką wartość dobrano eksperymentalnie i taka właśnie jest oporność falowa badanego kabla (głośni-



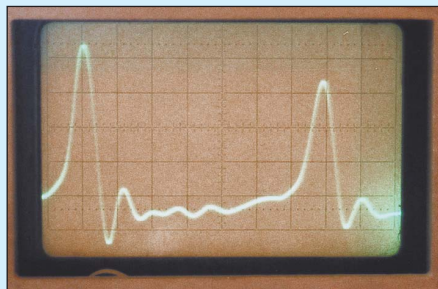
Fot. 2

Fot. 3



Fot. 4

Fot. 5



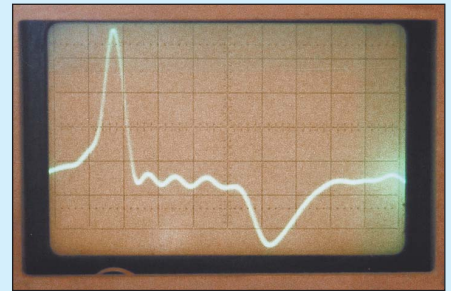
kowego). Choć tego typu przewody nie są wykorzystywane w technice w.cz. ze względu na duże tłumienie i podatność na zakłócenia, nie należy się dziwić, że kabel „m.cz.” ma właściwości typowe dla elementów w.cz. Każdy kabel ma jakąś oporność falową i tłumienność. W technice w.cz. wykorzystuje się przewody, które mają optymalne właściwości w pożądanym paśmie częstotliwości (dokładnie określoną rezystancję falową, niewielkie tłumienie i odporność na zakłócenia).

Tu widać, iż opisany przyrząd doskonale nadaje się do oznaczania oporności falowej kabla. Jest to zadanie niezwykle proste: do wolnego końca kabla należy dołączać różne rezystory, by uzyskać sygnał bez odbić. Jeśli po dołączeniu rezystora impuls odbity jest dodatni, wartość rezystora należy zmniejszyć. Jeśli odbity impuls jest ujemny, rezystancja dopasowania jest większa. Jeśli w przebiegu nie widać odbicia, dołączona rezystancja jest równa oporności falowej kabla.

Ten prosty sposób pozwoli też szybko i pewnie sprawdzić, czy dany kabel koncentryczny ma rezystancję charakterystyczną 50Ω czy 75Ω.

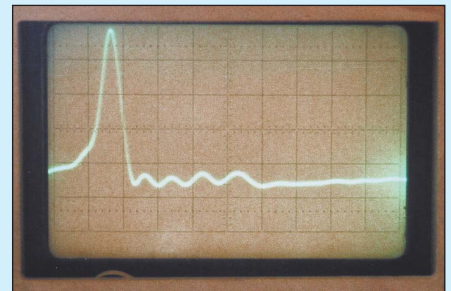
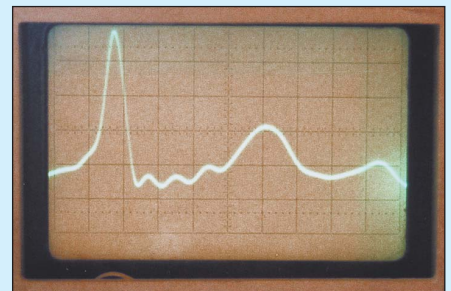
Przy niedopasowaniu na dalekim końcu kabla dadzą też o sobie znać ewentualne odbicia związane z niedopasowaniem oporności wyjściowej generatora. Przebieg pokazany na **fotografii 9** wystąpił, gdy rezystancja wyjściowa generatora wynosiła 2,2kΩ, a daleki koniec kabla był rozarty (oczywiście impulsy były małe i trzeba było zwiększyć czułość oscyloskopu). Badany był wspomniany 50-omowy kabel współosiowy o długości 6,88m. W takiej sytuacji obustronnego niedopasowania impuls odbija się wielokrotnie od obu końców kabla i przebieg przypomina grzebień. **Fotografia 10** pokazuje sytuację, gdy rezystancja wyjściowa generatora była bliska zero (punkt A został połączony kawałkiem drutu z wyjściami bramek U1A...U1C), a daleki koniec kabla też był zwarty. Powstały grzebień pozwala ocenić wielkość strat w kablu. Jeśli kolejny impuls jest zdecydowanie mniejszy od poprzedniego, wtedy straty w kablu są duże. Gdy impulsy maleją w mniejszym stopniu, straty w kablu są mniejsze. Wystarczy więc zbadać w ten sposób odcinki kilku różnych kabli o jednakowej długości, by przekonać się, który z nich będzie najmniej tłumiał sygnał w.cz.

Opisany przyrząd może oddać nieocenione usługi przy poszukiwaniu uszkodzeń w sieciach kablowych, na przykład komputerowych sieciach LAN. Gdy wszystko jest dopasowane, nie powinny występować odbicia. Każde rozwarcie, zwarcie, czy nawet niejednorodność w kablu spowodują powstanie odbicia, którego biegunowość i opóźnienie względem impulsu pierwotnego wskazują na charakter uszkodzenia i odległość od generatora. Kilka pomiarów pozwoli szybko znaleźć uszkodzenie nawet w rozbudowanych sieciach.



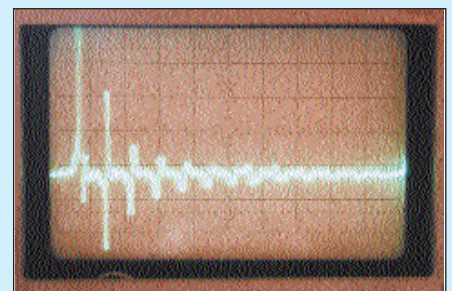
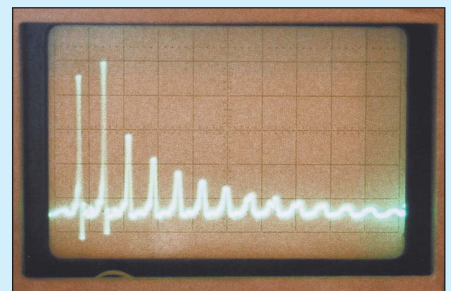
Fot. 6

Fot. 7



Fot. 8

Fot. 9



Fot. 10

Znając prędkość rozchodzenia się fali w kablu można obliczyć długość kabla czy odległość od miejsca uszkodzenia na podstawie czasu opóźnienia odbitego impulsu. Jako punkt wyjścia można przyjąć informację, że 1µs odstępu między impulsami wskazuje, iż kabel ma 100...110m długości (lub że w tej odległości od początku kabla znajduje się jakieś uszkodzenie).

Ponieważ prędkość rozchodzenia się fali jest odmienna w różnych kablach, uzyskana dokładność zależy od znajomości tej prędkości. W praktyce oznacza to, że trzeba przeprowadzić próby z odcinkami różnych kablów o znanej długości, co potem pozwoli określić długość lub odległość od miejsca uszkodzenia z dużą dokładnością.

Możliwości zmian

Uwaga! Posiadacze najtańszych oscyloskopów o paśmie rzędu 10MHz nie będą mogli zaobserwować na ekranie 5-nanosekundowych impulsów. Nie znaczy to, że wykonanie podobnych pomiarów jest niemożliwe. Trzeba tylko zmniejszyć częstotliwość gene-

ratora, stosując C1 o wartości 470pF...1nF. Trzeba też przez zwiększenie R3 zwiększyć długość impulsu, by był on widoczny na danym oscyloskopie.

Potem w trakcie testów należy wykorzystywać kable o długości co najmniej 5m. Do pierwszych prób warto wziąć kabel koncentryczny (antenowy), który gwarantuje mniejsze tłumienie impulsów niż kable symetryczne.

Dla osób, które chciałyby praktycznie wykorzystać taki reflektometr przydatne też będą następujące informacje:

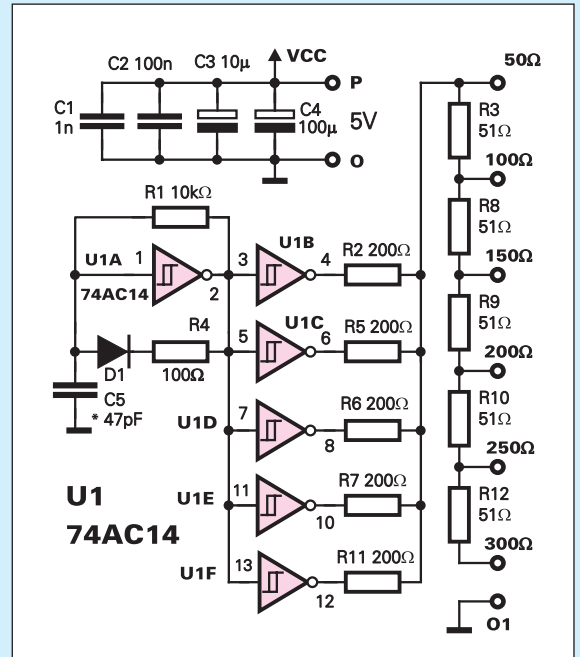
Długość impulsu wpuszczanego w kabel i stromość jego zboczy powinny być związane z długością kabla i jego tłumieniem. Do krótkich, kilkumetrowych kablów i precyzyjnych pomiarów potrzebne są krótkie impulsy o stromych zboczach.

Do pomiarów krótkich kablów wystarczą

króciutkie, nanosekundowe impulsy. Jeśli rozdzielczość ma wynosić 1m, czasy narastania i opadania impulsu muszą być mniejsze niż 10ns. To akurat nie jest trudne do spełnienia. Kostki z rodzin 74AC, 74ACT, 74F mają czasy narastania i opadania rzędu kilku nanosekund.

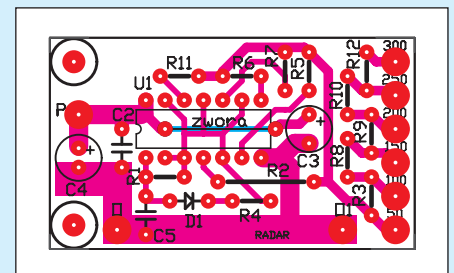
Do kablów długich, zwłaszcza o dużych stratach, impulsy powinny być dłuższe. Do pomiaru kabla o długości kilku czy kilkunastu kilometrów potrzebny będzie impuls o czasie trwania rzędu 1µs. Krótszy miałby za małą energię, by można było zaobserwować impuls odbity, poważnie stłumiony po dwukrotnym przejściu tak dalekiej drogi.

Zwykle amplituda wysyłanych impulsów jest rzędu



Rys. 4 Układ pierwotny

Rys. 5 Płytką drukowaną



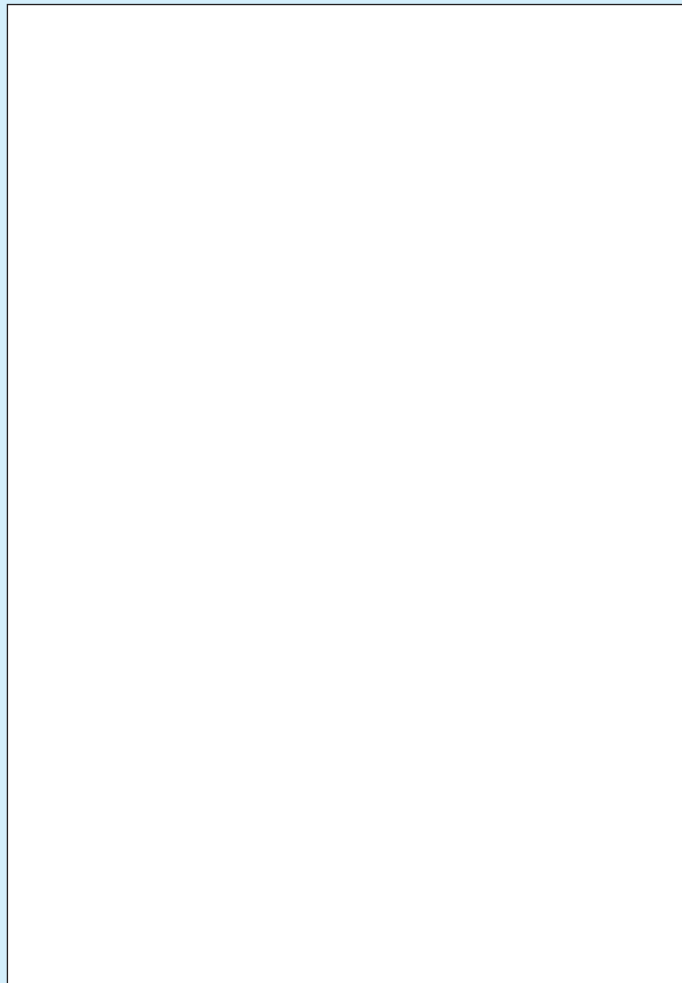
1...5V. Zbyt mała amplituda może uniemożliwić obserwację echa w instalacjach, gdzie występują szумы i zakłócenia. Gdyby z kolei wytwarzane impulsy miały dużo większą amplitudę, mogłyby zakłócać pracę innych urządzeń.

Podczas przygotowywania artykułu na początek został zaprojektowany generator z układem scalonym 74AC14 (sześć inwertorów z wejściem Schmitta) według rysunku 4. Zaprojektowano płytkę drukowaną, pokazaną na rysunku 5. Ze względu na chwilowe kłopoty ze zdobyciem układu 74AC14 układ ten nie został wykonany i przebadany – szybko powstał opisany w artykule generator z kostką 74HC04. Kto chciałby sprawdzić generator według rysunku 4, może zmontować go choćby w "pająku", pamiętając o odsprzęgnięciu zasilania i krótkich połączeniach. Zamiast sieci rezystorów wyjściowych można zastosować potencjometr (220Ω lub 470Ω), który pozwoli dopasować się do badanej linii.

Piotr Górecki

Ciąg dalszy w następnym numerze EdW.

REKLAMA · REKLAMA · REKLAMA





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

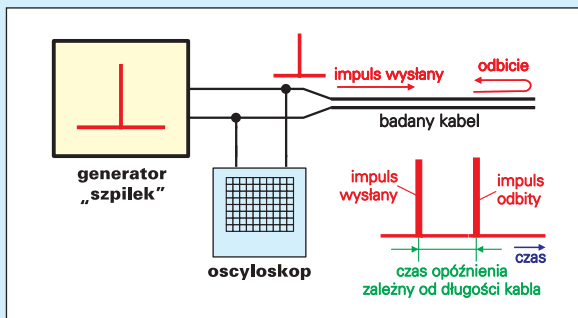
zwarcia o wartości ograniczonej rezystancją żył i rezystancją wewnętrzną źródła sygnału.

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.

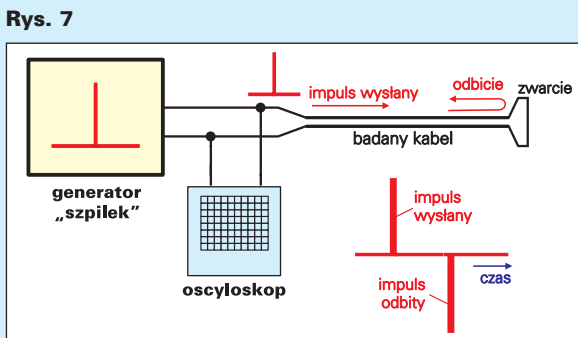
Opisywany przyrząd pozwala naocznie przekonać się, że od przeszkód odbijają się pojedyncze, krótkie impulsy – pokazują je zamieszczone fotografie (EdW 10/2001). Od przeszkód odbija się także ciągła fala sinusoidalna, a efektem jest powstanie tak zwanej fali stojącej. Opisanie wszystkich szczegółów zdecydowanie 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.

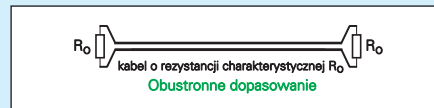
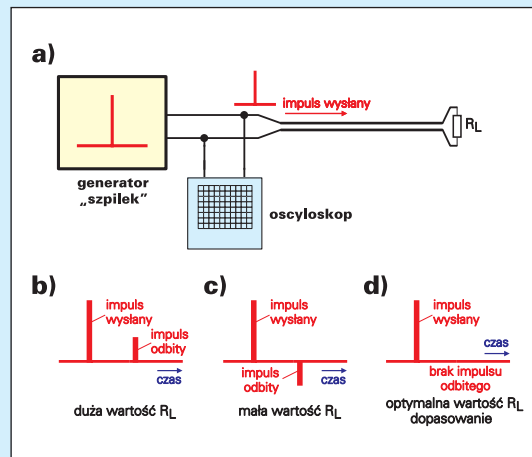
Teraz mamy wyobrażenie o „**rezystancji charakterystycznej**” kabla (oznaczymy ją R_0 lub ogólnie Z_0). Mamy niecodzienną sytuację - przy bardzo dużych częstotliwościach dany kabel „lubi” konkretną rezystancję obciążenia. Przekazuje całą energię do obciążenia tylko wtedy, gdy rezystancja obciążenia jest

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.

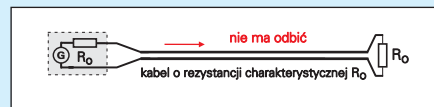
Ogólnie biorąc, wszelkie niedopasowania powodują odbicia energii. Dlatego w zakresie w.c.z. kabel powinien być z obu stron zamknięty rezystancją dopasowania, co w uproszczeniu ilustruje **rysunek 9**. Oczywiście jedna z rezystancji dopasowania będzie rezystancją wewnętrzną generatora, jak pokazuje **rysunek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

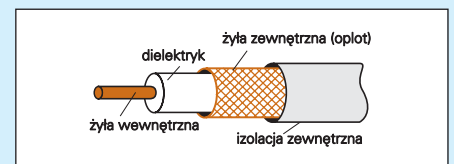
Do przesyłania przebiegów wysokiej częstotliwości i szybkich przebiegów impulsowych wykorzystuje się powszechnie tzw. kabłe współosiowe, zwane też koncentrycznymi, a ostatnio koaksjalnymi (coaxial cable). Budowę kabla współosiowego pokazuje w uproszczeniu **rysunek 11**. Wewnętrzna żyła otoczona jest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

Druka 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 $20\Omega \dots 150\Omega$. Najczęściej spotyka się kabłe 75-omowe i 50-omowe. Różne kabłe płaskie (**rysunek 12**) mają rezystancję charakterystyczną w granicach $70\Omega \dots 1k\Omega$.

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

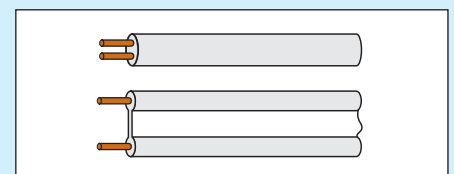
Aby w pełni wykorzystać, a właściwie przesłać energię bez strat, kabel musi być dopasowany na obu końcach: z jednej strony do rezystancji źródła, z drugiej do rezystancji obciążenia. W przypadku ciągłej fali sinusoidalnej nie wystąpi wtedy tak zwana fala stojąca.

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 PRZEPRÓWÓW INDUKTYWNYCH
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 OŚWIETLENIA 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 najwyższych 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 płytką 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.

Ścisłejsza 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 kablów 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.

