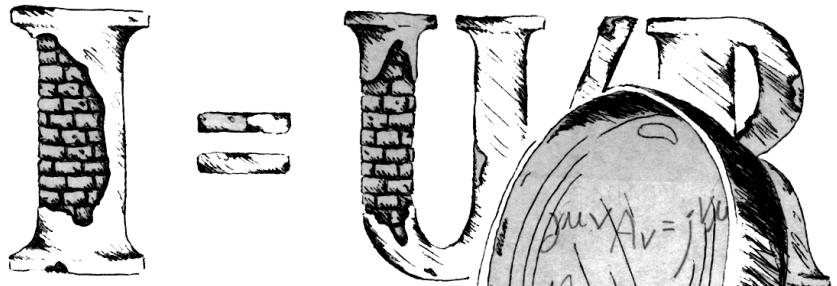


W następnym liście spróbuję zmusić cię do intensywnego wysiłku umysłowego. Ale dziś będzie trochę odpoczynku. Zasygnalizuję ci tylko pewne bardzo ważne, a często przeoczone zagadnienia. Rozszerz więc swoje horyzonty.



## FUNDAMENTY ELEKTRONIKI

# Modele i przybliżenia

Od pewnego czasu próbuję ci wytłumaczyć znaczenie pojęcia impedancji. Jeśli nadążasz za mną, to jest dla ciebie jasne, że podanie oporności w omach nie w pełni charakteryzuje tę oporność. Wiesz już, że rezystancja, reaktancja indukcyjna i reaktancja pojemnościowa są szczególnymi przypadkami pewnej ogólnej oporności, którą nazywamy impedancją. W poprzednich odcinkach okazało się także, że impedancję możemy traktować jako odpowiednie złożenie rezystancji i reaktancji. Nie masz wątpliwości, że impedancja danego elementu czy dwójnika nie jest stała - zależy od częstotliwości występujących napięć i prądów. Jest to oczywiste dla reaktancji, bo ze wzorów:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

jasno wynika zależność od częstotliwości  $f$ .

Dla prądu stałego sprawa się upraszcza - reaktancja pojemnościowa jest nieskończenie wielka, reaktancja indukcyjna jest równa zero i w obliczeniach uwzględniamy tylko rezystancje, pomijając wszystko, co wiąże się z częstotliwością.

W poprzednich odcinkach zasygnalizowałem ci pewną ważną sprawę: co prawda wszystkie poznane oporności wyrażamy w omach, ale pokazałem ci, że "om, omowi nie równy". Zarówno rezystancja, jak i reaktancje mogą mieć równe liczbowo oporności (wyrażone w omach), a coś je różni. Ta różnica związana jest z zależnością prądu od

przyłożonego do elementu napięcia zmiennego. Przy rezystancji, prąd zmienia się ściśle w takt zmian napięcia. Ale w przypadku reaktancji, zmiany prądu albo opóźniają się względem napięcia (indukcyjność), albo wyprzedzają zmiany napięcia (pojemność). Jeszcze raz ci powtarzam, że określenie "w kondensatorze zmiany prądu wyprzedzają zmiany napięcia" nie oznacza, iż kondensator ma jakieś właściwości przewidywania, co zdarzy się za chwilę - o wyprzedzaniu mówimy w warunkach ustalonych, gdy do elementu dołączone jest napięcie o kształcie sinusoidalnym.

Dowiedziałeś się, że przesunięcie między przebiegami nazywamy fazą. Wygodnie jest podawać to przesunięcie w mierze kątowej: w stopniach lub radianach. Zrozumiałeś, że dla scharakteryzowania oporności, czyli impedancji w sposób kompleksowy, musimy podać nie tylko wartość oporności w omach, ale i miarę tego przesunięcia między prądem i napięciem, czyli kąt.

Może już jesteś trochę przerażony, że to wszystko jest takie skomplikowane.

Aby jeszcze bardziej cię przerazić, proponuję, żebyś zastanowił się, czy wspomniany kąt przesunięcia między prądem i napięciem jest dla danego elementu stały, czy zmienia się z częstotliwością?

Spróbuj zastanowić się sam.

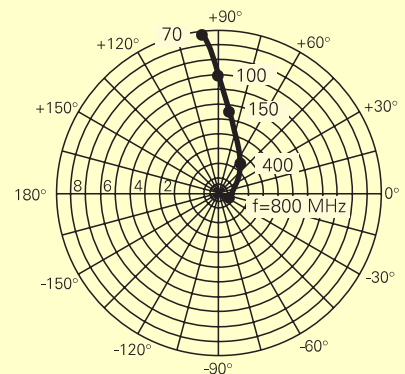
Niestety, muszę cię poważnie zmartwić: ten kąt przesunięcia jest stały, czyli niezależny od częstotliwości, tylko dla czystej rezystancji wynosi zero, dla czystej reaktancji pojemnościowej wynosi -90 stopni i dla czystej reaktancji indukcyjnej: +90 stopni.

Dla elementów, które ją niejako złożeniem rezystancji i reaktancji, kąt przesunięcia zmienia się z częstotliwością, i to często w dość dziwny sposób.

Mamy więc nie jeden, ale dwa poważne problemy: jak przedstawić i obliczyć kompleksową oporność, czyli impedancję, uwzględniając kąt przesunięcia, i jak zobrazować zmiany tej oporności (w tym zmiany kąta) w funkcji częstotliwości?

Ale może zagalopowaliśmy się za daleko? Może takie obliczenia nie są potrzebne w praktyce?

Niestety, jeśli chcesz być "rasowym" elektronikiem, musisz to rozumieć, nie tylko rozumieć - także umieć przeprowadzać prostsze obliczenia. Przygoda z rysunkiem 28 w EdW 3/97 powinna cię o tym upewnić. Ponadto w katalogach napotkasz dziwaczne wykresy, takie, jak na **rysunku 1**. Chciałbym, żebyś rozumiał ich sens.



Rys. 1. S21 Forward Transmission Coefficient Versus Frequency.

## Listy od Piotra

Jeśli jednak jesteś elektronikiem, który jak często mówimy, myśli lutownicą, na pewno w tym miejscu zaprotestujesz. Powiesz: po co wbijać sobie do głowy taką teorię? Czy nie lepiej zająć się sprawami praktycznymi? W EdW przydałoby się więcej schematów, płytek, a nie teorii.

Nie masz racji! Schematy, owszem są ważne, ale jeśli nie będziesz rozumiał sedna sprawy, to będziesz pisał potem do Redakcji listy z pytaniami, czy w danym układzie można zmienić wartości kondensatorów sprzęgających, co to jest 3-decybelowe pasmo przenoszenia, itp. Zapewne też do końca życia nie zrozumiesz, jaka jest przyczyna powstawania samowzbudzenia wielu wzmacniaczy i jak z tym walczyć. Bez wiedzy, którą ci próbuję włożyć łopatą do głowy nie masz szans zrozumieć problemu kompensacji wzmacniaczy operacyjnych. A to już nie jest teoria - sam się o tym nieraz przekonaś.

Dobrze ci radzę: zrozum i opanuj temat oporności kompleksowej - czyli impedancji. Poznaj też liczby zespolone i zrozum ich związek z tą impedancją.

### Matematyczność przyrody

Zanim przejdziemy do dalszych szczegółów, muszę ci jeszcze wspomnieć o związku między elektroniczną rzeczywistością i matematyką.

W elektronice mamy do czynienia z napięciami i prądami, które występują w układach zawierających przeróżne elementy: tranzystory, układy scalone, oporniki, kondensatory, cewki itp. Działanie układów elektronicznych podlega pewnym prawom. Może wydaje ci się to oczywiste.

Ale co to znaczy, że podlega prawom?

Możemy to rozumieć w ten sposób: podlega prawom, to znaczy, mając pewną wiedzę możemy przewidzieć, czy też obliczyć, jak będzie działało dane urządzenie. Prosty przykładem jest prawo Ohma. Z grubsza biorąc, mówi ono, że prąd w przewodniku jest wprost proporcjonalny do przyłożonego napięcia, a odwrotnie proporcjonalny do oporu tego przewodnika. Znając napięcie i rezystancję, możemy obliczyć prąd ze znanego wzoru:

$$I = \frac{U}{R}$$

Przytaczając powyższy wzór, chciałem ci zwrócić uwagę na coś, co można nazwać matematycznością przyrody. Mamy jakiś materiał przewodnika, zbudowany z atomów, cząstek elementarnych, a w sumie, jak udowodnił Einstein - zbudowany ze "skoncentrowanej" energii. Mówi się, że prąd elektryczny to ruch elektronów. A co to są elektrony? Na pewno nie są to maleńkie kuleczki,



krążące po orbitach. Tak naprawdę, to nie wiemy, czym są. Na pewno jest to jakaś energia będąca w ruchu, można to sobie wyobrazić jako falę. Ale co to jest fala energii? Dlaczego elektron jednocześnie zachowuje się jak fala oraz jak cząstka? Na te pytania niewielu, a może nawet nikt na świecie nie potrafi precyzyjnie odpowiedzieć. Fizycy wciąż badają te fascynujące zagadnienia.

Choć nie wiemy, czym "naprawdę" są elektrony, znamy pewne fundamentalne prawa przyrody rządzące tymi elektronami. Prawa te są jakby zaklęte w materię. Przyroda stosuje się do tych praw. Ale materia to forma energii, więc gdzie tkwią te prawa? To pytanie zahacza o teorię bytu i wchodzi w dziedzinę filozofii, a może nawet teologii...

W każdym razie przyroda rządzi niezmiennie prawa. Co ogromnie ważne, prawa te można zapisać pojęciami matematycznymi. A co to jest matematyka? Według słownika jest to "zespół nauk posługujących się metodą dedukcyjną, zajmujących się głównie badaniem zbiorów liczb, punktów i innych elementów abstrakcyjnych". Na pewno zwrócisz uwagę na słowo "abstrakcyjnych" - tak, matematyka zajmuje się czymś zupełnie abstrakcyjnym, między innymi liczbami i zależnościami pomiędzy tymi liczbami. Już ci kiedyś wspomniałem o jajogłowych matematykach, zupełnie oderwanych od rzeczywistości. Czy wiesz, że przed stuleciami matematyków traktowano na równi z czarownikami i astrologami? I oto okazuje się, że zasady i for-

muły matematyczne, wymyślone przez tych niepoprawnych teoretyków... leżą u podstaw funkcjonowania całego naszego wszechświata.

Może uważasz, że jest to coś oczywistego. To wcale nie jest oczywiste, wprost przeciwnie - jest wręcz zadziwiające. Ale idźmy dalej...

Wiesz, że Newton sformułował swego czasu prawa mechaniki. Wydawało się, że są to absolutne prawa, idealnie ściśle opisujące rzeczywistość.

Okazało się to nieprawdą. Prawa mechaniki klasycznej Newtona tylko w przybliżeniu opisują zachowanie obiektów naszego świata. W tym stuleciu uściślono te prawa. Powstała mechanika kwantowa. Dziś wiemy, że zasady rządzące materią trzeba opisywać bardzo zaawansowanymi metodami matematycznymi. Wykorzystuje się tam wzory związane z szerokim pojęciem liczby. Przy obliczeniach trzeba się posługiwać bardzo skomplikowanymi wzorami.

Czy mechanika kwantowa idealnie dokładnie opisuje naszą rzeczywistość? Nie wiemy. Najprawdopodobniej nie. Kiedyś wydawało się, że to prawa sformułowane przez Newtona idealnie dokładnie opisują rzeczywistość. Dziś mamy mechanikę kwantową z jej skomplikowanymi pojęciami i wzorami. Na podstawie pewnych matematycznych (oczywiście teoretycznych) rozważań niektórzy fizycy przypuszczają, iż nasz wszechświat może być dziesięciowymiarowy. W takim wypadku mechanika kwantowa na obecnym poziomie też pewnie nie byłaby do końca ścisła. Niedawno czytałem na przykład, że teoria strun (dotycząca budowy najmniejszych hipotetycznych składników materii) nie może się rozwinąć, bo w XX wieku nie opracowano jeszcze odpowiedniego aparatu matematycznego do przeprowadzenia obliczeń. Czekamy na jakiegoś Zweisteina, a może nawet Dreisteina, bo Einstein urodził się i umarł za wcześnie, nie poradziliśmy sobie z tak zwaną Wielką Teorią Unifikacji.

Na razie podsumujmy tę część rozważań: przyroda podlega prawom, a prawa



te można wyrazić w języku matematyki. Pojęcia matematyczne, potrzebne do opisu obiektów, zjawisk i praw naszego świata są bardzo skomplikowane.

Dotyczy to także elektroniki. W praktyce nie przeprowadzamy jednak takich skomplikowanych obliczeń. Jeśli to tylko możliwe, zamiast bardzo zaawansowanej matematyki, wprowadzamy pewne uproszczenia.

Teraz opowiem ci trochę o tych uproszczeniach.

## Przybliżenia, uproszczenia i modele

Wracamy do "matematycznego" zapisu prawa Ohma. Czy na pewno podany przed chwilą wzór wyrażający prawo Ohma jest słuszny zawsze i wszędzie? Zapewne jest słuszny dla prądu stałego? A dla prądu zmiennego?

No właśnie... Z tego, co ci powiedziałem do tej pory, można wysnuć wniosek, że jeśli zamiast rezystancji  $R$  podstawimy impedancję  $Z$ , to będziemy mogli obliczyć prawidłowy wynik. Tak podpowiada intuicja...

Ale intuicja sromotnie zawiodła nas przy rysowaniu wspomnianego rysunku 28.

No to jak jest z tym prawem Ohma?

Doszliśmy do ogromnie ważnej sprawy: w naszych wyobrażeniach i obliczeniach świadomie, czy nieświadomie dopuściliśmy pewne uproszczenia. Czy jest to dla ciebie oczywiste? Przy rysowaniu rysunku 28 okazało się, że te uproszczenia były zbyt duże i wyprowadziły nas w pole. Po prostu przy sumowaniu oporności nie uwzględniliśmy tego tajemniczego kąta przesunięcia.

Powiesz, że teraz jesteśmy już mądrzy i potrafilibyśmy obliczyć to dokładnie, korzystając z pojęcia impedancji i wykorzystując rachunek liczb zespolonych.

Niby tak, ale sprawa jest znacznie poważniejsza.

W jednym z poprzednich numerów EdW w pocście zamieszczony był list nauczyciela, który prosił o użyte przez nas sformułowania związane z prawem Ohma. List ten pisany był niewątpliwie przez teoretyka, który gotowy był walczyć o słowa, a który prawdopodobnie niewiele lub wcale ma do czynienia z elektroniczną rzeczywistością. Rzeczywiście, prawo Ohma pierwotnie dotyczyło przewodnika i prądu stałego. Ale dziś w podręcznikach często spotykasz określenia typu: prawo Ohma dla prądu zmiennego. Ty nie daj się wpuścić w kanał dyskusji o definicjach. Jeśli zajrzysz do podręczników akademickich, to przekonasz się, że w zasadzie wszystko, czego o elektronice uczono cię w szkole średniej... jest nie do końca ściśle.

Czy słyszałeś o równaniach Maxwella? Czy przedstawiono ci je w postaci całkowej, czy różniczkowej?

Nie będę cię oczywiście katował tymi równaniami. Ale musisz wiedzieć, że w zasadzie, aby dokładniej opisać działanie elementów elektronicznych, należałoby używać tych skomplikowanych równań. Dlaczego tego nie robimy? Bo jesteśmy leniwi! Szukamy uproszczonych modeli.

Dokładnie to samo mamy w fizyce. Wiemy, że powinniśmy stosować skomplikowane zależności i wzory mechaniki kwantowej, a nadal w szkole każą nam przeprowadzać nieściśle obliczenia, z wykorzystaniem wzorów podanych przez Newtona.

Czy warto o to kruszyć kopie? Pomyśl: ważne jest, żeby przyjęte modele i wzory opisywały rzeczywistość z dokładnością wystarczającą w praktyce.

Dlatego wcale nie musimy dokładnie rozumieć, czym tak naprawdę jest elektron, a możemy stosować prawo Ohma dla prądu stałego. Dla prądów zmiennych też korzystamy z uogólnionego prawa Ohma - po prostu zamiast rezystancji, przeprowadzimy obliczenia dla impedancji, oczywiście wykorzystując rachunek liczb zespolonych (jednak tak sformułowane prawo Ohma zawodzi przy bardzo wysokich częstotliwościach).

Tłumaczę ci to wszystko, bo musisz zrozumieć, że wyniki przeprowadzanych przez nas obliczeń są tylko przybliżone. Wspominałem o równaniach Maxwella. Okazuje się, że przy bardzo dużych częstotliwościach nie możemy już mówić oddzielnie o reaktancji indukcyjnej i pojemnościowej. Przy wyższych częstotliwościach dają o sobie znać zadziwiające właściwości pola elektromagnetycznego, intuicja totalnie zawodzi, a do dokładniejszego opisu występujących napięć i prądów musimy używać wspomnianych równań Maxwella. Tu nie wystarczy nawet wiadomości o liczbach zespolonych. Dla dokładnego opisu trzeba wykorzystać jeszcze bardziej zaawansowane pojęcia matematyczne. Może spotkałeś się już z pojęciem fali stojącej, dopasowania, odbić w kablu przesyłowym - właśnie tu dają o sobie znać wspomniane zjawiska falowe. Zjawiska te występują także przy małych częstotliwościach, ale wtedy ich wpływ jest znikomy i dlatego je pomijamy, przyjmując uproszczone modele. Właśnie takimi uproszczonymi modelami są: "czysta rezystancja" i "czyste reaktancje".

Chcę ci tu zasignalizować kilka spraw. Po pierwsze musisz mieć świadomość, że wszystkie obliczenia, które przeprowadzamy, dotyczą uproszczonych modeli, a nie rzeczywistych ele-

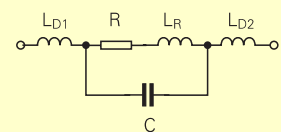
mentów i urządzeń. Bardzo często uproszczenie jest niewielkie i wynik obliczeń różni się od rzeczywistości o jakieś niemierzalne ułamki procenta. Wtedy nie ma o co kruszyć kopii. Tak jest na przykład przy prądzie stałym i przy małych częstotliwościach. Ale już przy częstotliwościach rzędu dziesiątek megaherców i wyższych, należy koniecznie uwzględnić wspomniane efekty falowe (związane w sumie ze skończoną prędkością fali elektromagnetycznej).

Ale to nie wszystko. Czy wiesz, że rzeczywisty rezystor, nawet dla prądu stałego, wcale nie jest "idealną rezystancją"? Nie chodzi mi nawet o zależność rezystancji od temperatury.

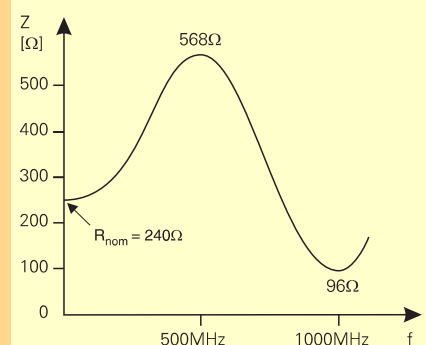
Czy wiesz, że wszystkie rezystory zmieniają swą rezystancję w zależności od przyłożonego do nich napięcia. Co prawda zmiany są rzędu tysięcznych części procenta, ale jednak są. Trzeba je uwzględnić przy konstruowaniu najbardziej precyzyjnych układów.

Przy większych częstotliwościach trzeba też uwzględnić indukcyjność doprowadzeń i pojemność własną rezystorów. To powoduje, że często rysuje się schemat zastępczy rezystora, jak na **rysunku 2**. Na **rysunku 3** znajdziesz wykres, pokazujący zmiany oporności (ściślej - tak zwany moduł impedancji) rezystora o rezystancji nominalnej 240Ω przy dużych częstotliwościach. Ale musisz wiedzieć, że taki schemat zastępczy też jest uproszczeniem i nie do końca przedstawia zachowanie prawdziwego rezystora.

Mam nadzieję, że teraz już czujesz problem niepełnej zgodności modeli (i przeprowadzanych obliczeń) z rzeczywistością?



Rys. 2. Schemat zastępczy rezystora.



Rys. 3. Oporność (moduł impedancji) rezystora przy dużych częstotliwościach.



Co więc tak naprawdę obliczamy, korzystając z poznawanych w szkole wzorów?

Ścisłe rzecz biorąc, nie obliczamy zachowania rzeczywistych układów, tylko hipotetycznych, uproszczonych modeli. I tu dochodzimy do kwalifikacji zawodowych konstruktora elektronika - powinien on mieć jasne wyobrażenie, na ile przeprowadzane obliczenia są zgodne z rzeczywistością. Nie jest to wcale łatwe, bo trzeba mieć sporą wiedzę.

Ale sprawa jest naprawdę bardzo ważna. Nieprzypadkowo zdecydowałem się poświęcić jej cały ten obszerny list. Korespondencja kierowana do AVT nie-dwuznacznie wskazuje, że temat ten jest słabo rozumiany, co w konsekwencji prowadzi do nieporozumień i "wpadek" przy konstruowaniu i budowaniu układów.

Powtórzę więc wyraźnie: matematyka jest dziedziną ścisłą i przeprowadzane obliczenia matematyczne są precyzyjne.

Ale w naszej praktyce pozwalamy sobie na uproszczenia. Wskutek tego przeprowadzane obliczenia dotyczą przyjętych uproszczonych modeli, a nie rzeczywistych układów.

I tu doszliśmy do kolejnej ważnej sprawy praktycznej.

Czy słyszałeś o programach komputerowych do symulacji układów elektronicznych? Niedługo przedstawię ci jeden z nich.

Jak działa taki program? Bardzo prosto! Ty podajesz informacje o użytych elementach i ich połączeniu, a komputer korzystając z wbudowanych zależności matematycznych, przeprowadza obliczenia i podaje ci wyniki.

Na ile otrzymane wyniki zgadzają się z rzeczywistością?

Sam odpowiedz na poniższe proste pytania:

Jak dokładnie scharakteryzowałeś elementy układu? Czy dla rezystorów podałeś tylko wartości rezystancji? A co z pozostałymi właściwościami: współczynnikiem temperaturowym, napięciowym, indukcyjnością doprowadzeń, pojemnością własną? Czy uwzględniłeś indukcyjności ścieżek, pojemności między ścieżkami oraz inne szkodliwe, a nieuniknione pojemności montażowe?

Zmartwię cię: znaczna część programów do symulacji układów elektronicznych nadaje się tylko do zabawy, właśnie dlatego, że obliczenia dotyczą bardzo uproszczonych modeli. Ale trzeba przyznać, że niektóre profesjonalne programy pozwalają uwzględnić niemal

wszystkie podane zależności i wtedy wyniki są naprawdę zgodne z rzeczywistością.

Znanym, dobrym programem symulacyjnym jest SPICE, i on zostanie zaprezentowany w EdW.

Tu kończymy ważną część rozważań. Teraz masz świadomość, że do obliczeń matematycznych obwodów i układów bierzemy pewne modele, które są lepszym lub gorszym przybliżeniem rzeczywistości. Nie uwzględniamy pewnych czynników. W efekcie układ, który znakomicie "działa" na papierze, a nawet został przetestowany z pomocą programu symulacji komputerowej, po zmontowaniu wzbudza się lub nie ma założonych parametrów.

Ja uważam się za praktyka, jednak mocno namawiam cię do poznania pewnych niezbędnych zagadnień teoretycznych. W sumie nie jest tego dużo. Bez nich zabrniesz w ślepy zaułek i nie będziesz w stanie ustalić przyczyn niewłaściwej pracy budowanych przez siebie układów.

Może dzisiejszy odcinek podetnie ci trochę skrzydła, pokazując jak niewiele umiesz. Nie martw się, Elektronika dla Wszystkich pomoże ci stopniowo zdobyć konieczną wiedzę.

Ważnym krokiem w tym kierunku będzie zapoznanie się z liczbami zespolonymi. Zaczynamy za miesiąc.

**Piotr Górecki**