

Harry Kybett, Earl Boysen

# ELEKTRONIKA

DLA KAŻDEGO

PRZEWODNIK

Spełnij marzenia  
— zaprojektuj swój pierwszy układ elektroniczny!



Tytuł oryginału: All New Electronics Self-Teaching Guide

Tłumaczenie: Julia Szajkowska

ISBN: 978-83-246-5740-7

Copyright © 2008 Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana.

All Rights Reserved. This translation published under license with the original publisher John Wiley & Sons, Inc.

Translation copyright © 2012 by Wydawnictwo Helion.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning or otherwise without the prior written permission of the Publisher.

Wiley, the Wiley logo, and are related trade dress are trademarks or registered trademarks of John Wiley & Sons, Inc. and / or its affiliates in the United States and other countries, and may not be used without written permission. All other trademarks are the property of their respective owners. Wiley Publishing, Inc., is no associated with any product or vendor mentioned in this book.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich niniejszej publikacji.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi bądź towarowymi ich właścicieli.

Autor oraz Wydawnictwo HELION dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne. Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz Wydawnictwo HELION nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Wydawnictwo HELION

ul. Kościuszki 1c, 44-100 GLIWICE

tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63

e-mail: [helion@helion.pl](mailto:helion@helion.pl)

WWW: <http://helion.pl> (księgarnia internetowa, katalog książek)

Drogi Czytelniku!

Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres

[http://helion.pl/user/opinie/elekdk\\_ebook](http://helion.pl/user/opinie/elekdk_ebook)

Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

Printed in Poland.

- [Poleć książkę na Facebook.com](#)
- [Kup w wersji papierowej](#)
- [Oceń książkę](#)

- [Księgarnia internetowa](#)
- [Lubię to! » Nasza społeczność](#)

*Mojej cudownej żonie Nancy.  
Dziękuję, że idziesz przez życie razem ze mną.*

## Podziękowania

Pragnę przede wszystkim podziękować Harry'emu Kybettowi, który wiele lat temu napisał pierwszą wersję tej książki. Aktualizowanie zawartej w niej wiedzy było dla mnie prawdziwym zaszczytem. Dziękuję Carol Long za wprowadzenie mnie do tego projektu. Dziękuję też Kevinowi Shaferowi za sprawne organizowanie wszystkich spraw związanych z wydaniem tej książki. Korektą techniczną zajmował się Rex Miller, natomiast za stronę językową pracy odpowiadała Mildred Sanchez. Dziękuję wszystkim pracownikom wydawnictwa Wiley, szczególnie zaś Liz Britten, która koordynowała przygotowanie wszystkich rysunków, oraz Ericowi Charbonneau za pilnowanie terminów. Dziękuję też mojej żonie, Nancy Muir, za rady i wsparcie, którego udzieliła mi w czasie pracy nad książką.



# Spis treści

<b>O autorze</b>	<b>9</b>
<b>Wstęp</b>	<b>11</b>
<b>Rozdział 1. Powtórzenie informacji o prądzie stałym i test wstępny</b>	<b>17</b>
Przepływ prądu	17
Prawo Ohma	20
Szeregowe łączenie oporników	22
Równoległe łączenie oporników	23
Moc prądu	24
Prądy o małym natężeniu	27
Charakterystyka prądowo-napięciowa	28
Dzielnik napięcia	30
Dzielnik prądu	33
Przełączniki	36
Kondensatory w obwodach prądu stałego	38
Podsumowanie	44
Obwody prądu stałego — test wstępny	46
<b>Rozdział 2. Dioda</b>	<b>51</b>
Jak działa dioda?	52
Dioda w doświadczeniu	56
Przebiecie diody	70
Dioda Zenera	73
Podsumowanie	80
Test zrozumienia	80
<b>Rozdział 3. Wprowadzenie do tranzystorów</b>	<b>85</b>
Czym jest tranzystor?	86
Doświadczenie	100
Tranzystor polowy złączowy	109

	Podsumowanie	112
	Test zrozumienia	113
<b>Rozdział 4.</b>	<b>Tranzystor jako przełącznik</b>	<b>117</b>
	Włączanie tranzystora	118
	Wyłączanie tranzystora	124
	Dlaczego używamy tranzystora w charakterze przełącznika?	127
	Potrójny przełącznik tranzystorowy	136
	Alternatywny sposób realizowania przełączeń	140
	Przełączanie tranzystorów JFET	146
	Tranzystor JFET — doświadczenie	147
	Podsumowanie	151
	Test zrozumienia	151
<b>Rozdział 5.</b>	<b>Powtórzenie informacji o prądzie zmiennym i test wstępny</b>	<b>157</b>
	Generator	158
	Opornik w obwodzie prądu zmiennego	162
	Kondensator w obwodzie prądu zmiennego	164
	Cewka w obwodzie prądu zmiennego	166
	Rezonans	168
	Podsumowanie	170
	Test zrozumienia	171
<b>Rozdział 6.</b>	<b>Prąd zmienny w elektronice</b>	<b>173</b>
	Kondensatory w obwodach prądu zmiennego	173
	Kondensatory i oporniki łączone szeregowo	175
	Filtr górnoprzepustowy — doświadczenie	181
	Przesunięcie fazowe w obwodzie RC	187
	Opornik i kondensator połączone równolegle	192
	Elementy indukcyjne w układach prądu zmiennego	195
	Przesunięcie fazowe w obwodzie RL	201
	Podsumowanie	203
	Test zrozumienia	204
<b>Rozdział 7.</b>	<b>Obwody rezonansowe</b>	<b>209</b>
	Szeregowe łączenie kondensatorów i cewek	210
	Krzywa sygnału wyjściowego	220
	Wprowadzenie do układów drgających	234
	Podsumowanie	238
	Test zrozumienia	238
<b>Rozdział 8.</b>	<b>Wzmacniacze tranzystorowe</b>	<b>243</b>
	Praca ze wzmacniaczami tranzystorowymi	244
	Wzmacniacz tranzystorowy — doświadczenie	253
	Stabilny wzmacniacz	254
	Stabilizowanie	258
	Wtórnik emiterowy	267

---

	Analiza układu wzmacniającego	273
	Tranzystor JFET jako wzmacniacz	276
	Wzmacniacz operacyjny	285
	Podsumowanie	289
	Test zrozumienia	289
<b>Rozdział 9.</b>	<b>Generatory drgań</b>	<b>293</b>
	Jak działa generator drgań?	294
	Sprzężenie zwrotne	303
	Generator Colpittsa	308
	Generator Hartleya	313
	Generator Armstronga	314
	Projektowanie generatora drgań	315
	Typowe trudności z uruchomieniem generatora	319
	Podsumowanie i zastosowania	324
	Test zrozumienia	325
<b>Rozdział 10.</b>	<b>Transformator</b>	<b>327</b>
	Podstawa działania transformatora	327
	Transformatory w obwodach łączności	336
	Podsumowanie i zastosowania	340
	Test zrozumienia	340
<b>Rozdział 11.</b>	<b>Zasilacze</b>	<b>343</b>
	Diody w obwodach prądu zmiennego. Pulsacje	344
	Filtrowanie napięcia tętniącego	353
	Podsumowanie	368
	Test zrozumienia	368
<b>Rozdział 12.</b>	<b>Wnioski i test końcowy</b>	<b>373</b>
	Wnioski	373
	Test końcowy	374
<b>Dodatek A</b>	<b>Słowniczek</b>	<b>385</b>
<b>Dodatek B</b>	<b>Spis symboli i skrótów</b>	<b>389</b>
<b>Dodatek C</b>	<b>Przedrostki liczbowe</b>	<b>391</b>
<b>Dodatek D</b>	<b>Standardowe wartości oporników</b>	<b>393</b>
<b>Dodatek E</b>	<b>Materiały pomocnicze</b>	<b>395</b>
<b>Dodatek F</b>	<b>Spis wzorów</b>	<b>399</b>
<b>Dodatek G</b>	<b>Symbole stosowane w schematach obwodów elektronicznych</b>	<b>403</b>
<b>Skorowidz</b>		<b>405</b>





## O autorze

**Earl Boysen** jest inżynierem, który po dwudziestu latach pracy w przemyśle komputerowym zdecydował się zwolnić nieco tempo życia i przeprowadzić się do niewielkiego miasta w stanie Waszyngton. Boysen jest współautorem trzech innych książek: *Elektronika dla bystrzaków* (Helion, Gliwice 2011), *Electronics Project for Dummies* (Wiley, Indianapolis 2006) oraz *Nanotechnology for Dummies* (Wiley, Indianapolis 2006). Mieszka z żoną Nancy w domu, który wspólnie wybudowali. Czas upływa mu na pisaniu książek i prowadzeniu dwóch witryn internetowych poświęconych technologii. Strona [www.BuildingGadgets.com](http://www.BuildingGadgets.com) jest poświęcona projektowaniu układów elektronicznych, natomiast [www.understandingnano.com](http://www.understandingnano.com) zawiera wprowadzenie do zagadnień związanych z nanotechnologią. Boysen zdobył tytuł magistra fizyki inżynierskiej na University of Virginia.





# Wstęp

Gwałtowny rozwój współczesnej elektroniki to niebywałe zjawisko. Większość znanych Ci z półek sklepowych urządzeń zawierających komponenty elektroniczne nie istniała przed rokiem 1960, a te, które miały wówczas swoje odpowiedniki, oferowały według dzisiejszych standardów bardzo ograniczone funkcje. Chcesz wiedzieć, o czym mówię? Choćby o małym, ale potężnym narzędziu, jakim jest kalkulator, o komputerze, przenośnym odtwarzaczu muzyki, odtwarzaczach DVD czy aparatach cyfrowych. Pojawienie się współczesnych komponentów elektronicznych oraz samych urządzeń elektronicznych w masowej produkcji zrodziło wiele nowych gałęzi przemysłu i wymusiło reorganizację starszych.

Współczesna elektronika **bazuje** na tranzystorach i ich pochodnych — układach scalonych oraz mikroprocesorach. Elementy te zepchnęły w niepamięć wiele teorii z dziedziny elektroniki, zrewolucjonizowały metody tworzenia obwodów i otworzyły całkiem nowe pola badań. Niniejsza książka ma pomóc Ci rozpocząć eksplorację tych obszarów wiedzy.

## Czego nauczysz się z tej książki?

---

Tradycyjne metody nauczania elektroniki rodzą wiele niejasności. Przeciętny uczeń bardzo często nie może oprzeć się wrażeniu, że serce elektroniki to wiedza tajemna pokrewna niemal czarnej magii. A przecież to zupełnie nie tak. Choć wiele dziedzin życia skomplikowało się w ciągu lat, nauka elektroniki i zajmowanie się tą gałęzią wiedzy w domu stały się akurat znacznie prostsze. *Elektronika dla każdego. Przewodnik* stara się wykorzystać możliwości, jakie z tego wypływają, zatem zajmiemy się w niej tylko tym, co tak naprawdę liczy się w dzisiejszej elektronice.

Książka ta jest przeznaczona dla wszystkich osób, które znają podstawy elektroniki, ale chcą lepiej poznać działanie elementów znajdujących się we wszystkich obwodach elektronicznych. Poszczególne rozdziały opisują układy będące w rzeczywistości cegiełkami wielu urządzeń elektronicznych oraz kilka ważnych zasad, które będą Ci niezbędne w pracach nad układami elektronicznymi.

Proponowany przez nas układ materiału różni się zasadniczo od tego, co spotkasz w innych podręcznikach. Przede wszystkim zdecydowaliśmy się na zebranie materiału w postaci pytań i odpowiedzi, które poprowadzą Cię do wykonania prostych, ale bardzo pouczających doświadczeń. Poszczególne zadania bezboleśnie przeprowadzą Cię przez złożone schematy obliczeń, a do ich rozwiązania wystarczy Ci podstawowa wiedza z matematyki. Poza tym zdecydowaliśmy się zrezygnować ze zwyczajowego w tego rodzaju publikacjach rozdziału poświęconego fizyce półprzewodników, ponieważ na wczesnym etapie zajmowania się elektroniką taka wiedza nie będzie Ci po prostu potrzebna.

Elektronika jest bardzo prostą dziedziną wiedzy i naprawdę nie trzeba wiele wysiłku, by zrozumieć jej szczegóły. Książka ta skupia się na zastosowaniu podstawowych zasad, które w rzeczywistości tworzą współczesną elektronikę. Jeżeli zrozumiesz, w jaki sposób działają elementy dyskretne układów elektronicznych, nie tylko ułatwi Ci to pracę nad kolejnymi projektami, lecz także pozwoli zrozumieć zasady działania układów scalonych. Ponieważ w układach scalonych pojawiają się diody, tranzystory, kondensatory i oporniki, musisz rozumieć, jak elementy te zachowują się w układach elektronicznych. W układzie scalonym obowiązują przecież te same zasady co w obwodzie zbudowanym z elementów dyskretnych (choć towarzyszą im także prawa wynikające z bardzo małych rozmiarów poszczególnych elementów układu).

## **Jak zorganizowaliśmy materiał?**

---

Książka składa się z pewnych problemów, które musisz przemyśleć i nauczyć się rozwiązywać. Każdy z problemów zawiera też rozwiązanie bądź odpowiedź, dzięki czemu będziesz mógł na bieżąco kontrolować poziom zdobywanej wiedzy. Oto, co znajdziesz w poszczególnych rozdziałach:

- Rozdział 1. „Powtórzenie informacji o prądzie stałym i test wstępny”. Rozdział ten zawiera powtórzenie podstawowych zasad związanych z budową i działaniem obwodów prądu stałego. Znajdziesz w nim też test, który pozwoli Ci sprawdzić wiedzę na ten temat.
- Rozdział 2. „Dioda”. Ten rozdział zawiera informacje na temat diod i sposobów wykorzystywania ich w obwodach prądu stałego, przedstawia charakterystyki najważniejszych rodzajów diod oraz wprowadza w obliczenia, które pozwalają wyznaczać prąd, napięcie i moc wydzielającą się na diodzie.

- Rozdział 3. „Wprowadzenie do tranzystorów”. Z tego rozdziału dowiesz się, czym jest tranzystor i jak stosuje się go w układach elektronicznych. Poznasz też zasady przepływu prądu przez tranzystory bipolarne złączowe (BJT) oraz polowe złączowe (JFET).
- Rozdział 4. „Tranzystor jako przełącznik”. Ten rozdział przedstawia najprostsze i najczęściej spotykane zastosowanie tranzystorów — przełączanie. Poza tym dowiesz się z niego, jak projektować układy tranzystorowe zasilające określone obciążenie, a także poznasz sposoby realizowania przełączania w układach z tranzystorami BJT i JFET.
- Rozdział 5. „Powtórzenie informacji o prądzie zmiennym i test wstępny”. Ten rozdział sprawdzi podstawową wiedzę dotyczącą prądu zmiennego. Przypomnisz sobie z niego, w jaki sposób zachowują się w obwodach prądu zmiennego oporniki i kondensatory oraz dowiesz się, jak obliczać wielkości charakteryzujące te obwody.
- Rozdział 6. „Prąd zmienny w elektronice”. Ten rozdział został poświęcony zagadnieniom związanym z pracą oporników, kondensatorów i cewek w obwodach filtrujących wysokie i niskie częstotliwości, czyli w tak zwanych filtrach dolno- i górnoprzepustowych.
- Rozdział 7. „Obwody rezonansowe”. W tym rozdziale przedstawiliśmy podstawowe sposoby wykorzystywania kondensatorów, cewek i oporników w obwodach filtrów środkowoprzepustowych i środkowozaporowych, których celem jest przepuszczanie lub blokowanie sygnałów zmiennych o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości rezonansowej obwodu. Dowiesz się z niego także, jak obliczać częstotliwość rezonansową oraz wyznaczać pasmo przenoszenia obwodu. Rozdział ten będzie też stanowić wprowadzenie do wykorzystania obwodów rezonansowych w generatorach drgań (oscylatorach).
- Rozdział 8. „Wzmacniacze tranzystorowe”. Z tego rozdziału dowiesz się, w jaki sposób tranzystor może wzmacniać sygnały elektryczne. Przed wszystkim poznasz podstawy konstruowania wzmacniaczy z tranzystorami BJT, ale dowiesz się także, jak działają wzmacniacze JFET oraz czym są wzmacniacze operacyjne.
- Rozdział 9. „Generatory drgań”. Rozdział ten jest w całości poświęcony generatorom drgań, czyli obwodom wytwarzającym ciągły sygnał zmienny. Dowiesz się, jak działają generatory, oraz poznasz procedury pozwalające zaprojektować układ oscylatora.
- Rozdział 10. „Transformator”. Z tego rozdziału dowiesz się, w jaki sposób przekształcić napięcie sygnału zmiennego na wyższe lub niższe. Przedstawimy Ci ideę pracy transformatora oraz nauczymy Cię określać wartość napięcia wyjściowego.
- Rozdział 11. „Zasilacze”. W tym rozdziale opisaliśmy obwody pozwalające przekształcać sygnał zmienny w stały. Układy takie wykorzystują znane Ci elementy — transformator, diody, kondensatory i oporniki. Dowiesz się,

jak dobierać wartości komponentów zasilacza, by otrzymać za jego pomocą napięcie stałe o określonym poziomie.

- Rozdział 12. „Wnioski i test końcowy”. Ten rozdział pozwoli Ci sprawdzić zdobytą dotychczas wiedzę. Zawiera on test służący do ocenienia, które zagadnienia sprawiają Ci jeszcze problem.

Poza omówionymi tu rozdziałami w książce znajdziesz także kilka dodatków, w których zebraliśmy różne przydatne informacje.

- Dodatek A. „Słowniczek”. Słowniczek zawiera podstawowe pojęcia z zakresu elektroniki oraz ich definicje.
- Dodatek B. „Spis symboli i skrótów”. To lista najczęściej stosowanych symboli i skrótów elektronicznych.
- Dodatek C. „Przedrostki liczbowe”. Dodatek zawiera listę najczęściej pojawiających się w problemach związanych z elektroniką przedrostków liczbowych i odpowiadających im wartości.
- Dodatek D. „Standardowe wartości oporników”. Ten dodatek zawiera listę wartości oporników węglowych — najpopularniejszych oporników stosowanych obecnie w elektronice.
- Dodatek E. „Materiały pomocnicze”. Dodatek ten prezentuje informacje o przydatnych stronach internetowych, książkach i czasopismach.
- Dodatek F. „Spis wzorów”. Dodatek zawiera tablicę wzorów oraz spis rozdziałów i problemów, w których są one wprowadzane.
- Dodatek G. „Symbole stosowane w schematach obwodów elektronicznych”. Zawartość tego dodatku pozwoli Ci szybko sprawdzić nieznanne symbole, z jakimi możesz spotkać się w tej książce.

## Konwencje stosowane w tej książce

---

Jeśli zajmujesz się elektroniką, szybko zorientujesz się, że w literaturze bardzo często obowiązują odmienne konwencje nazewnictwa i stosowanych symboli. Spotkasz się z różnymi oznaczeniami zmiennych fizycznych oraz kilkoma wersjami oznaczeń graficznych. W tej książce zdecydowaliśmy się na zastosowanie dwóch podstawowych zasad:

- Napięcie zawsze oznaczamy symbolem  $U$ . W niektórych książkach możesz spotkać się także z oznaczeniem  $E$ .
- Na wszystkich schematach przecinające się linie oznaczają połączenie elektryczne. (W niektórych książkach wskazuje się je kropką). Jeśli przecięcie dwóch linii zasygnalizowano łukiem (jak na przykład na rysunku 9.5), to znaczy, że oznaczone liniami ścieżki nie są połączone elektrycznie.

---

## Jak korzystać z tej książki?

---

Zbierając materiał, który postanowiliśmy Ci zaprezentować, założyliśmy, że znasz podstawowe idee elektroniki — prawo Ohma czy zasady rządzące przepływem prądu. Jeśli czytałeś jakikolwiek podręcznik z tej dziedziny bądź miałeś z nią do czynienia w szkole lub zajmowałeś się już elektroniką, prawdopodobnie będziesz dysponować odpowiednią wiedzą. Jeżeli jednak wszelkie zagadnienia związane z przepływem prądu są Ci obce, powinieneś zapoznać się z książką prezentującą podstawy wiedzy o elektryczności, na przykład *Elektronika dla bystrzaków* (Helion, 2011). Możesz też odwiedzić stronę autora ([www.BuildingGadgets.com](http://www.BuildingGadgets.com)<sup>1</sup>) bądź skorzystać z któregoś z polskojęzycznych portali poświęconych elektronice (np. [elportal.pl](http://elportal.pl)). Znajdziesz tam wskazówki oraz proste układy, które pozwolą Ci rozszerzyć znajomość elektroniki. Jeśli nie jesteś pewien, na jakim poziomie jest Twoja wiedza, zajrzyj do rozdziałów 1. i 5. — znajdziesz w nich testy, które pozwolą Ci ją usystematyzować.

Sugerujemy, byś czytał poszczególne rozdziały w kolejności, w jakiej zostały one umieszczone w książce, ponieważ późniejsze zagadnienia bardzo często wymagają stosowania wiedzy zdobytej w czasie wcześniejszej lektury.

*Elektronika dla każdego. Przewodnik* to podręcznik pozwalający zdobywać wiedzę samodzielnie, w wygodnym dla Ciebie tempie. Materiał został podzielony na mniejsze partie zwane **problemami**. Każdy z problemów wprowadza nowe informacje, stawia nowe pytania i zachęca do przeprowadzania doświadczeń. Aby w pełni skorzystać z możliwości przyswajania wiedzy, które daje taka organizacja materiału, powinieneś spróbować samodzielnie rozwiązywać wszystkie zadania na osobnej kartce. Później porównaj uzyskane wyniki z przedstawionymi pod problemem odpowiedziami. Jeśli popełnisz błąd, popraw go i idź dalej. Jeżeli popełnisz kilka błędów pod rząd, wróć do odpowiedniego fragmentu teoretycznego, żeby nie stracić szansy na zrozumienie tej partii materiału.

Postaraj się także przeprowadzić wszystkie opisane tu doświadczenia. Nie są skomplikowane, a pozwolą Ci lepiej zrozumieć przerabiany materiał. Jeżeli nie masz odpowiedniego sprzętu, po prostu przeczytaj opis doświadczenia — już samo to wystarczy, by lepiej zrozumieć kryjącą się za nim ideę.

Gdy skończysz pracę z danym rozdziałem, oceń wyniki, rozwiązując test zrozumienia. Jeżeli popełnisz w nim błędy, wróć do odpowiednich fragmentów rozdziału i jeszcze raz zapoznaj się z prezentowanymi tam problemami. Jeżeli rozwiążesz go poprawnie, przejdź do następnego rozdziału. Test zrozumienia jest także swoistym powtórzeniem materiału przed zmierzeniem się z kolejną jego porcją. W ostatnim rozdziale znajdziesz test końcowy, który pozwoli Ci sprawdzić, ile nauczyłeś się z naszego podręcznika.

---

<sup>1</sup> Strona w języku angielskim — *przyp. tłum.*

Czytaj tę książkę i pracuj z nią we własnym tempie. Możesz ograniczyć się do zaprezentowanego tu materiału, ale możesz też traktować lekturę jako uzupełnienie zajęć prowadzonych w szkole. Jeśli zdecydujesz się na samodzielną naukę, pamiętaj o jednym — książka ta stanowi wprowadzenie do elektroniki, a nie pełny kurs wiedzy z tej dziedziny. Mając to na uwadze, zaprezentowaliśmy na końcu książki listę materiałów dodatkowych, które pozwolą Ci uzupełnić wiedzę. Równie przydatne będą listy symboli oraz skrótów, które niewątpliwie nieraz przydadzą Ci się podczas lektury.

A teraz do dzieła, naucz się **elektroniki!**

# Powtórzenie informacji o prądzie stałym i test wstępny

Nie można zajmować się elektroniką, nie mając podstaw w postaci wiedzy o elektryczności. W tym rozdziale znajdziesz niezbędne w elektronice wiadomości z zakresu elektrostatyki oraz zadania testu wstępnego, który pomoże Ci ocenić własną wiedzę. Zebrane tu informacje nie są w żadnym razie pełnym przedstawieniem teorii prądu stałego, ale jedynie krótkim wstępem potrzebnym do zrozumienia najprostszych zagadnień z elektroniki. Rozdział ten zawiera wiadomości dotyczące:

- przepływu prądu,
- potencjału i napięcia (różnicy potencjałów),
- prawa Ohma,
- szeregowego i równoległego łączenia oporników,
- mocy prądu stałego,
- prądów o małym natężeniu,
- charakterystyk prądowo-napięciowych,
- praw Kirchhoffa,
- dzielników prądu i napięcia,
- przełączników,
- ładowania i rozładowywania kondensatorów,
- szeregowego i równoległego łączenia kondensatorów.

## Przepływ prądu

---

**1** Urządzenia elektryczne i elektroniczne działają, ponieważ płynie przez nie prąd.

### **Zadanie**

Zdefiniuj pojęcie prądu elektrycznego.

#### **Odpowiedź**

Prąd elektryczny to uporządkowany przepływ ładunków elektrycznych, najczęściej naładowanych ujemnie elektronów. O przepływie nośników ładunku dodatniego, tak zwanych **dziur**, mówi się jedynie w przypadku półprzewodników.

**2** Istnieje kilka sposobów wywołania przepływu prądu elektrycznego.

### **Zadanie**

Podaj przynajmniej trzy metody wywołania uporządkowanego przepływu ładunków (prądu elektrycznego).

#### **Odpowiedź**

Oto najczęściej stosowane metody generowania przepływu prądu:

**Magnetycznie** — ruch elektronów jest indukowany obracaniem przewodu w polu magnetycznym. Na tej zasadzie działają generatory napędzane wodą, wiatrem lub parą (a także paskiem klinowym wentylatora).

**Chemicznie** — elektrony są uwalniane w wyniku zachodzenia reakcji chemicznych pomiędzy ośrodkiem i zanurzonymi w nim elektrodami (na przykład w bateriach).

**Fotowoltaiczne generowanie elektronów** — przepływ prądu generują fotony padające na powierzchnię półprzewodzących kryształów (w bateriach słonecznych).

Istnieją też inne, mniej popularne metody generowania przepływu prądu.

**Generowanie cieplne** — na złączu termopary pojawia się przepływ ładunków, gdy jej końcówki zostaną umieszczone w źródłach o różnych temperaturach. Generowanie cieplne jest wykorzystywane na statkach kosmicznych z napędem jądrowym.

**Reakcje elektrochemiczne** — prąd jest generowany w wyniku zachodzenia reakcji chemicznych pomiędzy wodorem, tlenem i elektrodami (ogniwa paliwowe).

**Zjawisko piezoelektryczne** — prąd pojawia się w wyniku mechanicznego odkształcenia kryształu piezoelektrycznego. Mechanizm ten jest wykorzystywany do zasilania diod LED umieszczanych w podszewkach butów. Nacisk na podszewkę wywołuje odkształcenie piezoelektryku i zapalenie się diody.

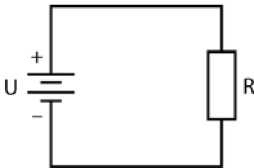
**3** W większości przykładów omawianych w tej książce źródłem zasilania będzie bateria. Wstawienie do obwodu baterii wywołuje powstanie różnicy potencjałów (napięcia), co umożliwi przepływ prądu w obwodzie. **Prąd elektryczny** to uporządkowany przepływ ładunków elektrycznych. Gdy źródłem zasilania jest bateria, nośnikami prądu będą elektrony przepływające z bieguna zawierającego ich nadmiar do bieguna, w którym jest niedobór elektronów. Tego rodzaju przepływ ładunków pojawia się w każdym zamkniętym obwodzie podłączonym do biegunów baterii. Różnica potencjałów jest w takim przypadku wywołwana różnicą liczby elektronów na obydwu biegunach baterii — elektrony będą dążyć do wyrównania tej różnicy.

Elektrony są nośnikami ujemnego ładunku elektrycznego, więc będą poruszać się z bieguna ujemnego w kierunku bieguna dodatniego. W przypadku tego ruchu mówimy o **kierunku przepływu elektronów**. W większości podręczników ze względów historycznych oznacza się ruch ładunków dodatnich, który zachodziłby w przeciwną stronę. Kierunek przepływu ładunków dodatnich określa się mianem **kierunku przepływu prądu**. Również w tej książce zawsze będziemy oznaczać kierunek przepływu prądu.

W dalszych częściach książki spotkasz się z oznaczeniami elementów półprzewodnikowych zawierających strzałkę wskazującą przyjmowany tradycyjnie kierunek przepływu prądu.

## Zadania

A. Na rysunku 1.1 zaznacz strzałkami przepływ prądu. Bieguny baterii zostały oznaczone na jej symbolu.

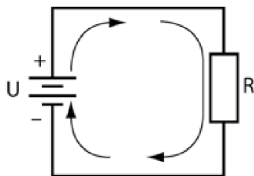


Rysunek 1.1

- B. Skąd wiadomo, że w obwodzie pojawi się różnica potencjałów?
- C. Co dzieje się z powodu istnienia różnicy potencjałów?
- D. Co stałoby się, gdyby bateria została wmontowana w obwód odwrotnie?

**Odpowiedzi**

A. Odpowiedź znajdziesz na rysunku 1.2.



Rysunek 1.2

- B. Wskazuje na to symbol baterii informujący, że obwód zasila różnica potencjałów zwana **napięciem**.
- C. Jeżeli obwód jest zamknięty, jak ma to miejsce na rysunku 1.1, wprowadzenie do niego źródła napięcia wywoła przepływ prądu w obwodzie.
- D. Prąd popłynie w przeciwną stronę.

## Prawo Ohma

4 Prawo Ohma podaje podstawową zależność łączącą napięcie z natężeniem prądu i oporem umieszczonym w obwodzie.

### Zadanie

Podaj wzór opisujący prawo Ohma.

**Odpowiedź**

$$U = I \cdot R$$

To najbardziej podstawowe równanie działu fizyki zajmującego się elektrycznością, więc zapewne doskonale je znasz. W niektórych książkach znajdziesz zapis  $E = I \cdot R$ .  $U$  i  $E$  to symbole, którymi oznacza się napięcie. W tym podręczniku będziemy się posługiwać wyłącznie oznaczeniem  $U$ . Zwróć uwagę na zależność łączącą natężenie prądu z oporem w obwodzie. Im większy będzie opór, tym mniejszy prąd popłynie pod danym napięciem przez obwód.

5 Korzystając z prawa Ohma, rozwiąż następujące zadanie.

**Zadania**

Jakie napięcie należy podać w obwodzie, by przez zadany opór popłynął prąd o podanej wartości?

- A.  $R = 20 \Omega$        $I = 0,5 \text{ A}$        $U =$   
 B.  $R = 560 \Omega$        $I = 0,02 \text{ A}$        $U =$   
 C.  $R = 1000 \Omega$        $I = 0,01 \text{ A}$        $U =$   
 D.  $R = 20 \Omega$        $I = 1,5 \text{ A}$        $U =$

**Odpowiedzi**

- A. 10 V.  
 B. 11,2 V.  
 C. 10 V.  
 D. 30 V.

**6** Jeżeli chcesz poznać natężenie prądu płynącego w obwodzie, musisz przekształcić prawo Ohma do odpowiedniej postaci.

**Zadania**

Jaki prąd popłynie przez podany opór po wprowadzeniu do obwodu źródła znanego napięcia?

- A.  $U = 1 \text{ V}$        $R = 2 \Omega$        $I =$   
 B.  $U = 2 \text{ V}$        $R = 10 \Omega$        $I =$   
 C.  $U = 10 \text{ V}$        $R = 3 \Omega$        $I =$   
 D.  $U = 120 \text{ V}$        $R = 100 \Omega$        $I =$

**Odpowiedzi**

- A. 0,5 A.  
 B. 0,2 A.  
 C. 3,3 A.  
 D. 1,2 A.

**7** Jeżeli chcesz poznać wartość oporu, musisz przekształcić prawo Ohma do odpowiedniej postaci.

**Zadania**

Jaki opór jest potrzebny w obwodzie, by przy zadanym napięciu otrzymać przepływ prądu o podanej wartości?

- A.  $U = 1 \text{ V}$        $I = 1 \text{ A}$        $R =$   
B.  $U = 2 \text{ V}$        $I = 0,5 \text{ A}$        $R =$   
C.  $U = 10 \text{ V}$        $I = 3 \text{ A}$        $R =$   
D.  $U = 50 \text{ V}$        $I = 20 \text{ A}$        $R =$

**Odpowiedzi**

- A.  $1 \Omega$ .  
B.  $4 \Omega$ .  
C.  $3,3 \Omega$ .  
D.  $2,5 \Omega$ .

**8** Rozwiąż podane niżej zadania. W każdym przypadku gdy znasz dwie wartości, musisz obliczyć trzecią.

**Zadania**

Jaka będzie wartość brakującej wielkości fizycznej?

- A.  $12 \text{ V}$  i  $10 \Omega$ . Oblicz natężenie prądu.  
B.  $24 \text{ V}$  i  $8 \text{ A}$ . Oblicz opór.  
C.  $5 \text{ A}$  i  $75 \Omega$ . Oblicz napięcie.

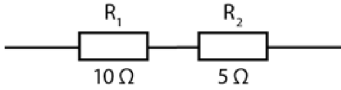
**Odpowiedzi**

- A.  $1,2 \text{ A}$ .  
B.  $3 \Omega$ .  
C.  $375 \text{ V}$ .

**Szeregowe łączenie oporników**

---

**9** Oporniki można łączyć szeregowo. Rysunek 1.3 przedstawia dwa oporniki połączone szeregowo.



Rysunek 1.3

**Zadanie**

Jaki jest łączny opór elementów połączonych szeregowo?

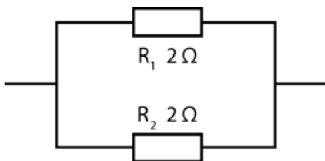
**Odpowiedź**

$$R_Z = R_1 + R_2 = 10\ \Omega + 5\ \Omega = 15\ \Omega.$$

Całkowity opór układu nazywamy **oporem zastępczym** lub **rezystancją zastępczą** i oznaczamy symbolem  $R_Z$ .

**Równoległe łączenie oporników**

**10** Oporniki można łączyć równoległe. Rysunek 1.4 przedstawia dwa oporniki połączone równoległe.



Rysunek 1.4

**Zadanie**

Jaki jest łączny opór elementów połączonych równoległe?

**Odpowiedź**

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{2\ \Omega} + \frac{1}{2\ \Omega} = \frac{1}{1\ \Omega},$$

zatem  $R_Z = 1\ \Omega$ .

**11** Prosty wzór podany w zadaniu 10. można rozszerzyć do postaci dla dowolnej liczby oporników.

**Zadanie**

Jak będzie wyglądać wzór na opór zastępczy dla trzech oporników połączonych ze sobą równolegle?

**Odpowiedź**

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Wzór ten przekształca się do postaci:

$$R_Z = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

pozwalającej obliczyć ostatecznie wartość oporu zastępczego.

**12** Podane poniżej dane opisują układ dwóch połączonych równolegle oporników.

**Zadania**

Ile wynosi opór zastępczy?

- A.  $R_1 = 1 \Omega$        $R_2 = 1 \Omega$        $R_Z =$   
 B.  $R_1 = 1000 \Omega$        $R_2 = 500 \Omega$        $R_Z =$   
 C.  $R_1 = 3600 \Omega$        $R_2 = 1800 \Omega$        $R_Z =$

**Odpowiedzi**

- A. 0,5  $\Omega$ .  
 B. 333  $\Omega$ .  
 C. 1200  $\Omega$ .

Zauważ, że opór zastępczy  $R_Z$  jest zawsze mniejszy od najmniejszego oporu pojawiającego się w układzie oporników połączonych równolegle.

**Moc prądu**

**13** W czasie przepływu prądu przez opornik na oporniku wydziela się moc (najczęściej w postaci ciepła). Jednostką mocy jest wat (W).

**Zadanie**

Jakim wzorem zapisujemy moc prądu elektrycznego?

**Odpowiedź**

Wzór pozwalający obliczyć moc prądu może przyjmować jedną z trzech postaci.

$$P = U \cdot I \text{ lub } P = I^2 \cdot R \text{ lub } P = \frac{U^2}{R}.$$

**14** Pierwszy ze wzorów podanych w zadaniu 13. pozwala obliczyć moc prądu, gdy znane są wyłącznie napięcie oraz natężenie prądu.

**Zadania**

Jaka moc wydzieli się na oporniku, gdy pod wpływem przyłożonego napięcia  $U$  popłynie przez niego prąd o natężeniu  $I$ ?

A.  $U = 10 \text{ V}$        $I = 3 \text{ A}$        $P =$

B.  $U = 100 \text{ V}$        $I = 5 \text{ A}$        $P =$

C.  $U = 120 \text{ V}$        $I = 10 \text{ A}$        $P =$

**Odpowiedzi**

A. 30 W.

B. 500 W, czyli 0,5 kW.

C. 1200 W, czyli 1,2 kW.

**15** Drugi ze wzorów podanych w zadaniu 13. pozwala obliczyć moc prądu, gdy znane są wyłącznie natężenie prądu oraz opór. Trzeci wzór podany w zadaniu 13. pozwala obliczyć moc prądu, gdy znasz wartość przyłożonego napięcia i oporu.

**Zadania**

Jaka moc wydzieli się na oporniku  $R$ , przez który popłynie prąd o natężeniu  $I$ ?  
Jaka moc wydzieli się na oporniku  $R$  po przyłożeniu do niego napięcia  $U$ ?

A.  $R = 20 \ \Omega$        $I = 0,5 \text{ A}$        $P =$

B.  $R = 560 \ \Omega$        $I = 0,02 \text{ A}$        $P =$

C.  $U = 1 \text{ V}$        $R = 2 \ \Omega$        $P =$

D.  $U = 2 \text{ V}$        $R = 10 \Omega$        $P =$

**Odpowiedzi**

- A. 5 W.
- B. 0,224 W.
- C. 0,5 W.
- D. 0,4 W.

**16** Oporniki wykorzystywane w elektronice są produkowane w pewnych standardowych wartościach rezystancji i mocy znamionowej. W dodatku D znajdziesz tabelę z zestawieniem typowych wartości rezystancji. Bardzo często w obwodach umieszcza się opornik o standardowej rezystancji możliwie zbliżonej do wartości wynikającej z obliczeń. Również w zamieszczonych tu zadaniach będziesz musiał kilkakrotnie dokonać takiego wyboru.

Dobierając opornik, należy także pamiętać o sprawdzeniu mocy znamionowej. Nie wolno montować w obwodzie opornika o mocy znamionowej mniejszej niż ta, która wydzieli się na nim w czasie pracy.

**Zadania**

Moc znamionowa opornika węglowego może wynosić 0,25 W; 0,5 W; 1 W lub 2 W. Powiedz, jaką mocą znamionową powinny charakteryzować się oporniki wmontowane w układy opisane w zadaniu 15.?

- A. Dla opornika, na którym wydzieli się moc 5 W:
- B. Dla opornika, na którym wydzieli się moc 0,224 W:
- C. Dla opornika, na którym wydzieli się moc 0,5 W:
- D. Dla opornika, na którym wydzieli się moc 0,4 W:

**Odpowiedzi**

- A. O mocy znamionowej 5 W (lub większej).
- B. O mocy znamionowej 0,25 W (lub większej).
- C. O mocy znamionowej 0,5 W (lub większej).
- D. O mocy znamionowej 0,5 W (lub większej).

W większości obwodów elektrycznych wystarczy stosować oporniki węglowe o małej mocy. W przypadku wydzielania się na oporniku większej mocy (jak na przykład 5 W w poleceniu A) należy użyć rezystora innego rodzaju.

## Prądy o małym natężeniu

**17** Wprawdzie w przemyśle ciężkim bez trudu można znaleźć przykłady stosowania prądów o natężeniach przekraczających wartość 1 A, jednak przez przeciętny układ elektroniczny nie puszczą się prądów o natężeniu większym niż ułamki ampera.

### Zadania

- A. Jak należy rozumieć pojęcie **miliamper**?  
 B. Jak należy rozumieć pojęcie **mikroamper**?

#### Odpowiedzi

- A. Jeden miliamper to jedna tysięczna ampera (0,001 A). W skrócie zapisujemy tę jednostkę jako mA.  
 B. Jeden mikroamper to jedna milionowa ampera (0,000 001 A). W skrócie zapisujemy tę jednostkę jako  $\mu\text{A}$ <sup>1</sup>.

**18** W elektronice stosuje się najczęściej oporniki o bardzo dużej rezystancji — najczęściej rzędu tysięcy omów, czasami nawet rzędu milionów omów.

### Zadania

- A. Jak odczytuje się jednostkę k $\Omega$  i co oznacza ona w odniesieniu do opornika?  
 B. Jak odczytuje się jednostkę M $\Omega$  i co oznacza ona w odniesieniu do opornika?

#### Odpowiedzi

- A. Jednostkę tę odczytuje się jako kiloom (k = kilo,  $\Omega$  = om). W ten sposób opisuje się oporności o wielkościach rzędu tysięcy omów. Stąd otrzymujemy 1 k $\Omega$  = 1000  $\Omega$ , 2 k $\Omega$  = 2000  $\Omega$  czy 5,6 k $\Omega$  = 5600  $\Omega$ .  
 B. Jednostkę tę odczytuje się jako megaom (M = mega,  $\Omega$  = om). W ten sposób opisuje się oporności o wielkościach rzędu milionów omów. Stąd otrzymujemy 1 M $\Omega$  = 1 000 000  $\Omega$  czy 2,2 M $\Omega$  = 2 200 000  $\Omega$ .

<sup>1</sup> W publikacjach spotyka się czasami także oznaczenie  $\mu\text{A}$  — *przyp. tłum.*

**19** Tego rodzaju zagadnienia spotyka się w zadaniach opisujących obwody tranzystorowe. W tym przypadku do pewnego opornika przyłożono napięcie 6 V, by uzyskać przepływ prądu o natężeniu 5 mA.

### **Zadanie**

Jakiej rezystancji należy użyć w tym obwodzie i jaka moc wydzieli się na oporniku?

#### **Odpowiedź**

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = \frac{6 \text{ V}}{0,005 \text{ A}} = 1200 \Omega = 1,2 \text{ k}\Omega.$$

$$P = U \cdot I = 6 \text{ V} \cdot 0,005 \text{ A} = 0,030 \text{ W} = 30 \text{ mW}.$$

**20** Spróbuj teraz rozwiązać poniższe problemy.

### **Zadania**

Oblicz brakujące wartości.

- A. Oblicz rezystancję opornika, przez który po przyłożeniu napięcia 50 V popłynie prąd o natężeniu 10 mA.
- B. Oblicz natężenie prądu, który popłynie przez opornik o rezystancji 1 M $\Omega$  po przyłożeniu napięcia 1 V.

#### **Odpowiedzi**

- A. 5 k $\Omega$ .
- B. 1  $\mu$ A.

## **Charakterystyka prądowo-napięciowa**

**21** Spadek napięcia na oporniku przy przepływającym przez niego prądzie można przedstawić na prostym wykresie zależności. Otrzymywaną w ten sposób funkcję nazywamy **charakterystyką prądowo-napięciową (U-I)** opornika.

Rozwiąż następujące problemy dla prostego układu prądu stałego, w którym do źródła zasilania podłączono opornik o rezystancji 1 k $\Omega$ .

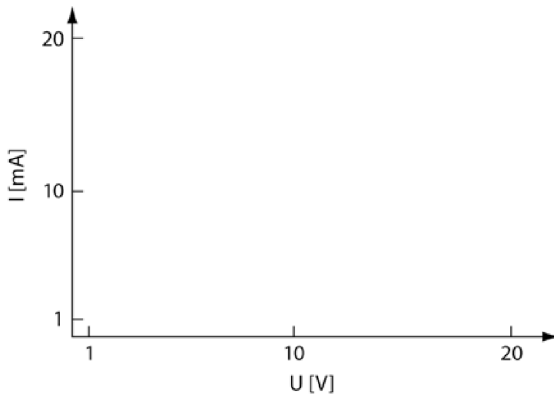
**Zadania**

- A. Oblicz natężenie prądu przepływającego przez opornik, jeśli obwód jest zasilany baterią 10 V.
- B. Oblicz natężenie prądu przepływającego przez opornik, jeśli obwód jest zasilany baterią 1 V.
- C. Oblicz natężenie prądu przepływającego przez opornik, jeśli obwód jest zasilany baterią 20 V.

**Odpowiedzi**

- A. 10 mA.
- B. 1 mA.
- C. 20 mA.

**22** Na wykres przedstawiony na rysunku 1.5 nanieś natężenia prądu wyznaczone w problemie 21. dla podanych w nim napięć. Połącz je ze sobą.



**Rysunek 1.5**

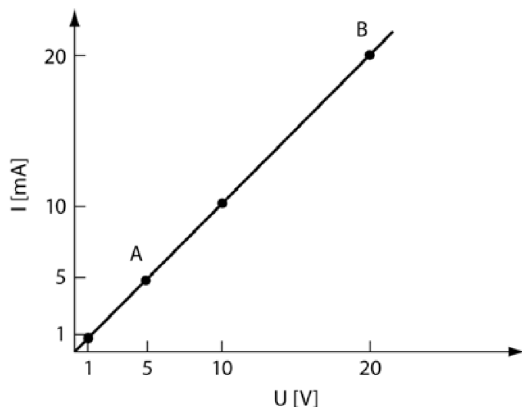
**Odpowiedź**

Powinieneś uzyskać wykres liniowy, taki jak przedstawiono na rysunku 1.6.

W niektórych problemach niezbędne jest wyznaczenie kąta nachylenia prostej na wykresie. W tym celu należy wybrać dwa punkty, przez które przebiega prosta wykresu — nazwijmy je A i B.

Punkt A ma współrzędne  $U = 5 \text{ V}$ ,  $I = 5 \text{ mA}$ .

Punkt B ma współrzędne  $U = 20 \text{ V}$ ,  $I = 20 \text{ mA}$ .



Rysunek 1.6

Współczynnik nachylenia prostej do osi oblicza się w następujący sposób:

$$a = \frac{U_B - U_A}{I_B - I_A} = \frac{20 \text{ V} - 5 \text{ V}}{20 \text{ mA} - 5 \text{ mA}} = \frac{15 \text{ V}}{15 \text{ mA}} = \frac{15 \text{ V}}{0,015 \text{ A}} = 1 \text{ k}\Omega.$$

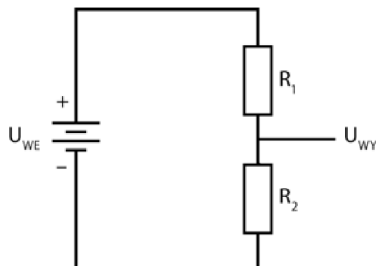
Okazuje się, że nachylenie tej prostej jest równe oporowi.

W dalszych rozdziałach poznasz charakterystyki prądowo-napięciowe innych elementów elektronicznych. Charakterystyki te mają różne zastosowania i okazuje się, że nie zawsze są liniami prostymi.

## Dzielnik napięcia

**23** Obwód przedstawiony na rysunku 1.7 to tak zwany **dzielnik napięcia**. Jest on istotnym elementem wielu teoretycznych i praktycznych problemów, z którymi zetkniesz się w dalszych zmaganiach z elektroniką.

Celem budowania takiego układu jest uzyskanie napięcia wyjściowego ( $U_{WY}$ ) o określonej wartości zależnej od umieszczonych w obwodzie oporników oraz podawanego napięcia wejściowego. Zwróć uwagę, że napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  jest równe **spadkowi napięcia** na oporniku  $R_2$ .



Rysunek 1.7

**Zadanie**

Podaj wzór pozwalający obliczyć napięcie wyjściowe  $U_{WY}$ .

**Odpowiedź**

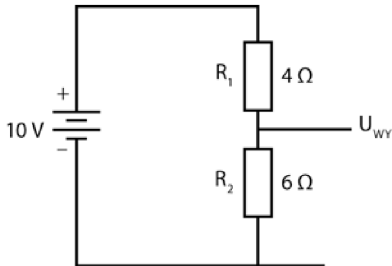
$$U_{WY} = U_{WE} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Zauważ, że suma  $R_1 + R_2 = R_Z$  to łączny opór układu.

**24** Oto przykład zastosowania tego wzoru.

**Zadanie**

Wyznacz  $U_{WY}$  w obwodzie przedstawionym na rysunku 1.8.



**Rysunek 1.8**

**Odpowiedź**

$$U_{WY} = U_{WE} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

$$U_{WY} = 10 \text{ V} \cdot \frac{6 \Omega}{4 \Omega + 6 \Omega},$$

$$U_{WY} = 10 \text{ V} \cdot \frac{6 \Omega}{10 \Omega},$$

$$U_{WY} = 6 \text{ V}.$$

**25** Rozwiąż teraz następujące problemy.

**Zadania**

Jakie będzie napięcie wyjściowe dla podanych napięć wejściowych i oporów?

- A.  $U_{WE} = 1 \text{ V}$      $R_1 = 1 \Omega$      $R_2 = 1 \Omega$      $U_{WY} =$   
B.  $U_{WE} = 6 \text{ V}$      $R_1 = 4 \Omega$      $R_2 = 2 \Omega$      $U_{WY} =$   
C.  $U_{WE} = 10 \text{ V}$      $R_1 = 3,3 \text{ k}\Omega$      $R_2 = 5,6 \text{ k}\Omega$      $U_{WY} =$   
D.  $U_{WE} = 28 \text{ V}$      $R_1 = 22 \text{ k}\Omega$      $R_2 = 6,2 \text{ k}\Omega$      $U_{WY} =$

**Odpowiedzi**

- A. 0,5 V.  
B. 2 V.  
C. 6,3 V.  
D. 6,16 V.

**26** Napięcie wyjściowe na podzielniku jest zawsze mniejsze niż napięcie wejściowe. Podzielniki napięcia są używane, by dostosować napięcie podawane następnie na różne elementy obwodu. Skorzystaj ze wzoru pozwalającego wyznaczyć napięcie wyjściowe na podzielniku, aby rozwiązać następujące problemy.

**Zadania**

- A. Podaj spadek napięcia na oporze o wartości  $22 \text{ k}\Omega$  w układzie opisanym danymi z punktu D problemu 25.  
B. Jakie napięcie uzyskasz po dodaniu tej wartości do spadku napięcia na oporniku  $6,2 \text{ k}\Omega$ ?

**Odpowiedzi**

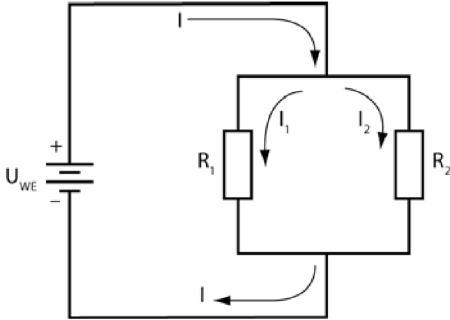
- A. 21,84 V.  
B. Suma wynosi 28 V.

Zauważ, że suma spadków napięć na opornikach dzielnika napięcia jest równa podawanemu napięciu wejściowemu. To przykład działania drugiego prawa Kirchhoffa, które mówi, że napięcie podawane do obwodu musi być równe sumie spadków napięć na poszczególnych elementach obwodu. W tej książce bardzo często będziemy posługiwać się tą zależnością bez jawnego odwoływania się do niej.

Zwróć też uwagę, że spadek napięcia na oporniku jest proporcjonalny do wartości oporu. Oznacza to, iż w przypadku szeregowego łączenia oporników o większym i mniejszym oporze większy spadek napięcia zauważymy na oporniku o większym oporze.

## Dzielnik prądu

**27** Prąd płynący przez obwód przedstawiony na rysunku 1.9 rozplywa się (dzieli) na dwie gałęzie oporników połączonych ze sobą równolegle.



Rysunek 1.9

Prąd  $I$  rozplywa się na dwa niezależne prądy  $I_1$  oraz  $I_2$ , a następnie znów łączy się w prąd o natężeniu równym  $I$ .

### Zadanie

Określ, która z podanych zależności zachodzi w przypadku obwodu przedstawionego na rysunku 1.9.

- A.  $U_{WE} = R_1 I_1$ .
- B.  $U_{WE} = R_2 I_2$ .
- C.  $R_1 I_1 = R_2 I_2$ .
- D.  $I_1 / I_2 = R_2 / R_1$ .

### Odpowiedź

Wszystkie zależności są prawdziwe.

**28** Rozwiązując zadania związane z dzieleniem prądu, postępuj zgodnie z podanymi niżej krokami.

1. Określ stosunek prądów i oporów:

$$I_1 / I_2 = R_2 / R_1.$$

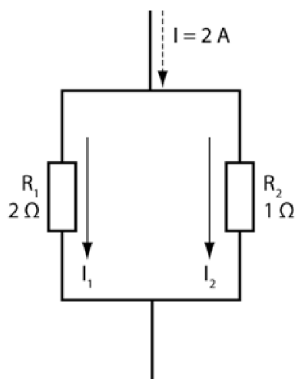
2. Przekształć tę proporcję tak, by wyznaczyć natężenie  $I_2$  w zależności od natężenia  $I_1$ :

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{R_1}{R_2}.$$

3. Korzystając z faktu, że  $I = I_1 + I_2$ , wyraż natężenie całkowite w układzie w zależności od  $I_1$ .
4. Oblicz wartość  $I_1$ .
5. Oblicz wartość  $I_2$ .

### Zadania

Rysunek 1.10 przedstawia układ dwóch połączonych ze sobą równolegle oporników o znanych oporach, przez które płynie prąd o podanym natężeniu. Jaki prąd popłynie przez każdy z oporników układu?



Rysunek 1.10

### Odpowiedzi

Postępując zgodnie z wypisanymi wcześniej krokami, otrzymujemy:

1.  $I_1/I_2 = R_2/R_1 = 0,5$ .
2.  $I_2 = 2I_1$ .
3.  $I = I_1 + I_2 = I_1 + 2I_1 = 3I_1$ .
4.  $I_1 = I/3 \approx 0,66 \text{ A}$ .
5.  $I_2 = 2I_1 \approx 1,33 \text{ A}$ .

**29** Spróbuj teraz rozwiązać podobne problemy z innymi zestawami danych. W każdym przypadku znasz prąd wejściowy na dzielniku i wartości dwóch oporów. Znajdź natężenia prądów  $I_1$  i  $I_2$ .

**Zadania**

A.  $I = 30 \text{ mA}$ ,  $R_1 = 12 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$ .

B.  $I = 133 \text{ mA}$ ,  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$ .

C. Jaki prąd otrzymasz po dodaniu do siebie prądów  $I_1$  i  $I_2$ ?

**Odpowiedzi**

A.  $I_1 = 10 \text{ mA}$ ,  $I_2 = 20 \text{ mA}$ .

B.  $I_1 = 100 \text{ mA}$ ,  $I_2 = 33 \text{ mA}$ .

C. Suma prądów jest równa prądowi wejściowemu podawanemu do dzielnika.

Zauważ, że pytanie w podpunkcie C jest bezpośrednim odwołaniem do pierwszego prawa Kirchhoffa. Prawo to stwierdza po prostu, że suma prądów wpływających do węzła w obwodzie musi być równa sumie prądów wypływających z tego węzła. Będziesz spotykać się z nim w wielu zadaniach prezentowanych w dalszych rozdziałach. Prawa Kirchhoffa są podstawą rozwiązywania i analizowania problemów związanych z działaniem obwodów prądu.

Zauważ także, że wartość prądu przepływającego przez opornik jest odwrotnie proporcjonalna do wartości opornika. Oznacza to, iż w przypadku wmontowania do układu dwóch oporników — o mniejszej i większej rezystancji — przez opornik o większym oporze popłynie mniejszy prąd. Sprawdź otrzymane rozwiązania i przekonaj się, że wyniki potwierdzają tę zależność.

**30** Prąd przepływający przez jeden z dwóch połączonych ze sobą równolegle oporników można wyznaczyć za pomocą wzoru:

$$I_1 = \frac{I \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

**Zadanie**

Zapisz wzór na natężenie prądu  $I_2$ .

Za pomocą poznanych właśnie wzorów sprawdź poprawność odpowiedzi uzyskanych w poprzednim zadaniu.

**Odpowiedź**

$$I_2 = \frac{I \cdot R_1}{R_1 + R_2}.$$

Zauważ, że prąd płynący przez jedną z gałęzi układu dwóch połączonych równolegle oporników jest równy iloczynowi oporu na przeciwległej gałęzi i całkowitego prądu wpływającego do węzła podzielonemu przez sumę oporów w układzie. To łatwy do zapamiętania wzór.

## Przełączniki

**31** **Przełącznik mechaniczny** to urządzenie pozwalające zamykać lub otwierać obwód. W życiu codziennie mamy do czynienia z przełącznikami — dzięki nim włączamy i wyłączamy różne urządzenia elektryczne. Przełącznik można wykorzystać także do sterowania sygnałem: pozwolić mu dotrzeć we wskazane miejsce, uniemożliwić przepływ lub skierować do określonej gałęzi obwodu.

W tej książce spotkasz się z dwoma rodzajami przełączników. Pierwszy z nich to zwykły włącznik, w literaturze fachowej określany także mianem **pojedynczego przełącznika jednopozycyjnego**. Drugi rodzaj to **pojedynczy przełącznik dwupozycyjny**. Symbole, którymi oznacza się je w schematach układów elektrycznych, przedstawiono na rysunku 1.11.

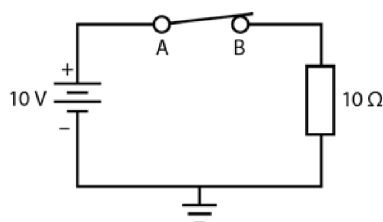


Rysunek 1.11

O przełącznikach musisz wiedzieć dwie ważne rzeczy:

- Przez przełącznik w pozycji „włączony” (zamykającej obwód) popłynie całkowity prąd, jaki płynie przez dany obwód. Na jego końcówkach **nie notujemy** spadku napięcia.
- Przez przełącznik w pozycji „wyłączony” (otwierającej obwód) **nie płynie żaden** prąd. Na jego końcówkach pojawi się napięcie równe całkowitej różnicy potencjałów podawanej przez źródło.

Rysunek 1.12 przedstawia obwód z zamykającym go przełącznikiem.



Rysunek 1.12

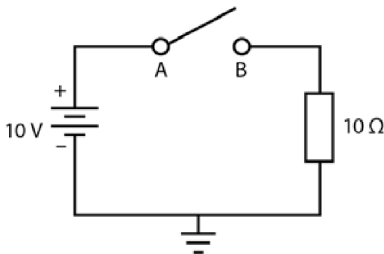
**Zadania**

- A. Policz, jaki prąd popłynie przez przełącznik.  
 B. Jakie napięcie pojawi się między punktem A a uziemieniem i między punktem B a uziemieniem?  
 C. Jaki spadek napięcia odnotujemy na przełączniku?

**Odpowiedzi**

- A.  $\frac{10 \text{ V}}{10 \Omega} = 1 \text{ A}$ .  
 B.  $U_A = U_B = 10 \text{ V}$ .  
 C. 0 V. (Na końcówkach przełącznika nie odnotujemy spadku napięcia, ponieważ w obydwu punktach panuje ten sam potencjał).

**32** Przełącznik wbudowany w obwód przedstawiony na rysunku 1.13 jest otwarty.



Rysunek 1.13

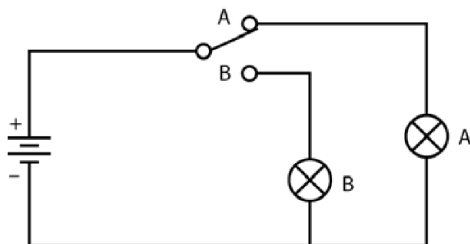
**Zadania**

- A. Jakie napięcie zmierzymy w punktach A i B względem ziemi?  
 B. Jaki prąd płynie przez przełącznik?  
 C. Jaki spadek napięcia odnotujemy na przewodniku?

**Odpowiedzi**

- A.  $U_A = 10 \text{ V}$ ;  $U_B = 0 \text{ V}$ .  
 B. Prąd nie popłynie, ponieważ przełącznik jest otwarty.  
 C. 10 V. Przy otwartym przełączniku w punkcie A pojawi się to samo napięcie, co na naładowanym dodatnio biegunie baterii, a w punkcie B pojawi się to samo napięcie, co na naładowanym ujemnie biegunie baterii.

**33** W obwód przedstawiony na rysunku 1.14 wbudowano jednobiegunowy przełącznik dwutorowy. Położenie przełącznika określa, która z żarówek wmontowanych w obwód się zapali.



Rysunek 1.14

### Zadania

- A. Która z żarówek zaświeci się, gdy przełącznik znajduje się w położeniu przedstawionym na rysunku?
- B. Czy obydwie żarówki mogą świecić jednocześnie?

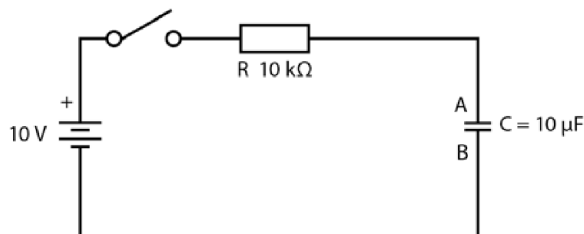
### Odpowiedzi

- A. Żarówka A.
- B. Nie. Jedna z nich zawsze będzie wyłączona.

## Kondensatory w obwodach prądu stałego

**34** Kondensatory są jednymi z najczęściej stosowanych w elektronice elementów obwodów. Wykorzystuje się je zarówno w obwodach prądu zmiennego, jak i przy zasilaniu prądem stałym. W układach prądu stałego stosuje się je przede wszystkim do przechowywania ładunku i uwalniania go w odpowiednim momencie.

Kondensator przedstawiony na rysunku 1.15 ładuje się po zamknięciu przełącznika.



Rysunek 1.15

**Zadanie**

Do jakiego napięcia naładuje się kondensator?

**Odpowiedź**

Kondensator naładuje się do napięcia 10 V. Kondensator ładuje się do napięcia, jakie pojawiłoby się na końcówkach otwartego przełącznika umieszczonego w obwodzie zamiast kondensatora.

**35** Jak długo ładuje się kondensator? To jedno z najważniejszych pytań, na jakie należy dać odpowiedź w trakcie rozwiązywania problemów praktycznych. Aby móc na nie odpowiedzieć, trzeba poznać **stałą czasową** ( $\tau$ ) obwodu.

**Zadania**

- A. Jaką postać przyjmie wzór na stałą czasową obwodów tego rodzaju?
- B. Ile będzie wynosić stała czasowa obwodu przedstawionego na rysunku 1.15?
- C. Ile czasu potrzebuje kondensator, by naładować się do napięcia 10 V?
- D. Do jakiego napięcia ładuje się kondensator w czasie równym jednej stałej czasowej?

**Odpowiedzi**

- A.  $\tau = R \cdot C$ .
- B.  $\tau = 10 \text{ k}\Omega \cdot 10 \mu\text{F} = 10000 \Omega \cdot 0,00001 \text{ F} = 0,1 \text{ s}$ . (W obliczeniach należy przekształcić wartości na omy i farady).
- C. Około pięciu stałych czasowych, czyli pół sekundy.
- D. Do napięcia równego 63% napięcia maksymalnego, czyli około 6,3 V.

**36** Kondensator nie zacznie się ładować, dopóki obwód jest otwarty. Ładunek zgromadzony na obydwu okładkach nienaładowanego lub rozładowanego kondensatora jest identyczny (napięcie pomiędzy okładkami wynosi zero).

**Zadania**

- A. Jakie napięcie będą mieć okładki kondensatora w obwodzie przedstawionym na rysunku 1.15 przed jego zamknięciem?
- B. Jak zmieni się potencjał okładki A po zamknięciu przełącznika?
- C. Jak zmieni się wtedy potencjał okładki B?

D. Jaki potencjał będzie mieć okładka A po czasie równym jednej stałej czasowej?

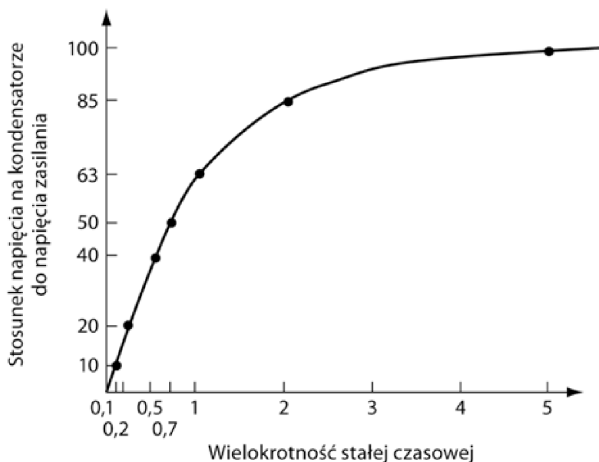
### Odpowiedzi

- A. Jeżeli kondensator jest całkowicie rozładowany, napięcie na okładkach wyniesie 0 V.
- B. Potencjał wzrośnie do wartości 10 V.
- C. Nie zmieni się. Nadal będzie równy 0 V.
- D. Około 6,3 V.

**37** Wykres ładowania kondensatora przedstawiony na rysunku 1.16 pozwala określić, przez ile wielokrotności stałej czasowej należy przykładać do kondensatora napięcie, by różnica potencjałów na okładkach osiągnęła odpowiedni ułamek wartości napięcia zasilania.

### Zadania

- A. Jak nazywa się funkcja zilustrowana krzywą przedstawioną na wykresie?
- B. Jakie zastosowanie ma przedstawiony tu wykres?



Rysunek 1.16

### Odpowiedzi

- A. To wykres funkcji **wykładniczej**. (Gdy podstawą funkcji wykładniczej jest liczba  $e$ , jak ma to miejsce w tym przypadku, używa się także nazwy **eksponencjalna**).

B. Używa się go do określenia stopnia naładowania kondensatora po określonym czasie.

**38** W obwodzie połączono szeregowo opornik z kondensatorem. Oblicz stałą czasową. Określ, po jakim czasie kondensator naładuje się w pełni. Podaj napięcie na okładkach kondensatora po upływie jednej stałej czasowej. Obwód jest zasilany dziesięciowoltową baterią.

### Zadania

A.  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$ .

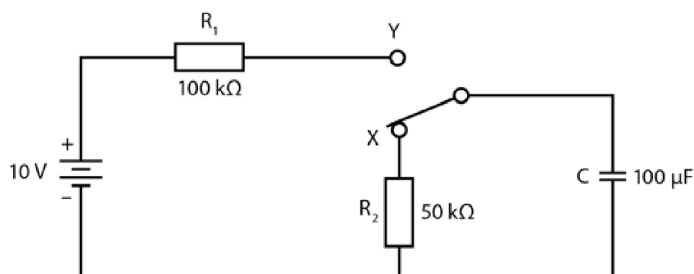
B.  $R = 330 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 0,05 \text{ }\mu\text{F}$ .

### Odpowiedzi

A.  $\tau = 1 \text{ s}$ ; czas ładowania kondensatora:  $t = 5 \text{ s}$ ;  $U_C = 6,3 \text{ V}$ .

B.  $\tau = 16,5 \text{ ms}$ ; czas ładowania kondensatora:  $t = 82,5 \text{ ms}$ ;  $U_C = 6,3 \text{ V}$  (skrót ms oznacza milisekundy).

**39** Obwód przedstawiony na rysunku 1.17 zawiera przełącznik dwubiegunowy, który umożliwia ładowanie kondensatora.



Rysunek 1.17

### Zadania

A. Jakie napięcie powstanie między okładkami kondensatora, gdy przełącznik znajdzie się w położeniu X?

B. Po przełączeniu przełącznika do położenia Y kondensator zacznie się ładować. Ile wynosi stała ładowania dla tego obwodu?

C. Ile czasu potrzeba, by naładować kondensator w pełni?

**Odpowiedzi**

- A. 0 V.  
 B.  $\tau = R_1 \cdot C = 100 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ }\mu\text{F} = 10 \text{ s}$ .  
 C. Około 50 s.

**40** Załóżmy, że po naładowaniu kondensatora w obwodzie przedstawionym na rysunku 1.17 przełącznik zostaje natychmiast ustawiony w położeniu X.

**Zadania**

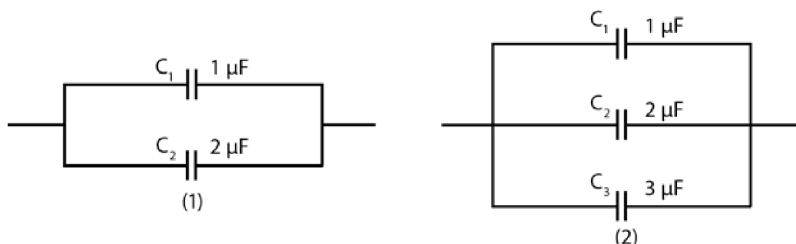
- A. Ile wynosi stała czasowa rozładowania kondensatora?  
 B. Ile czasu potrzeba, by całkowicie rozładować kondensator?

**Odpowiedzi**

- A.  $\tau = R_2 \cdot C = 50 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ }\mu\text{F} = 5 \text{ s}$ . (W czasie rozładowywania prąd płynie przez opornik o porze 50 k $\Omega$ ).  
 B. Około 25 sekund.

Zdolność kondensatorów do gromadzenia ładunku i uwalniania go we wskazanej chwili wykorzystuje się w układach zasilających lampy błyskowe aparatów fotograficznych. Czas oczekiwania pomiędzy kolejnymi użyciami flesza jest niezbędny, by aparat naładował lampę, korzystając z umieszczonych w nim baterii. Naładowany kondensator przechowuje zgromadzony ładunek do momentu naciśnięcia migawki. Wtedy zwalnia ładunek, który zasila lampę błyskową.

**41** Kondensatory można łączyć równolegle, co pokazano na rysunku 1.18.



**Rysunek 1.18**

**Zadania**

- A. Podaj wzór na całkowitą pojemność układu połączonych równolegle kondensatorów.
- B. Oblicz całkowitą pojemność w obwodzie 1.
- C. Oblicz całkowitą pojemność w obwodzie 2.

**Odpowiedzi**

A.  $C_Z = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$ .

B.  $C_Z = 1 \mu\text{F} + 2 \mu\text{F} = 3 \mu\text{F}$ .

C.  $C_Z = 1 \mu\text{F} + 2 \mu\text{F} + 3 \mu\text{F} = 6 \mu\text{F}$ .

Całkowita pojemność kondensatorów połączonych ze sobą równolegle jest sumą pojemności poszczególnych elementów.

- 42** Kondensatory można łączyć szeregowo, co pokazano na rysunku 1.19.



**Rysunek 1.19**

**Zadania**

- A. Podaj wzór pozwalający obliczyć całkowitą pojemność kondensatorów połączonych szeregowo.
- B. Oblicz całkowitą pojemność kondensatorów w układzie przedstawionym na rysunku 1.19.

**Odpowiedzi**

A.  $\frac{1}{C_Z} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$ .

B.  $\frac{1}{C_Z} = \frac{1}{1 \mu\text{F}} + \frac{1}{2 \mu\text{F}} = \frac{3}{2 \mu\text{F}}$ , a stąd  $C_Z = \frac{2}{3} \mu\text{F} \approx 0,66 \mu\text{F}$ .

- 43** Kilka kondensatorów połączono szeregowo. Znajdź całkowitą pojemność tych układów.

**Zadania**

- A.  $C_1 = 10 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 5 \mu\text{F}$ .  
 B.  $C_1 = 220 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 330 \mu\text{F}$ ,  $C_3 = 470 \mu\text{F}$ .  
 C.  $C_1 = 0,33 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 0,47 \mu\text{F}$ ,  $C_3 = 0,68 \mu\text{F}$ .

**Odpowiedzi**

- A.  $3,3 \mu\text{F}$ .  
 B.  $103,06 \mu\text{F}$ .  
 C.  $0,15 \mu\text{F}$ .

**Podsumowanie**

Tych kilka zasad, które omówiliśmy w tym rozdziale, będzie Ci niezbędnych, by zacząć naukę elektroniki. Zebraliśmy je w jednym miejscu, by ułatwić Ci odnalezienie ich w razie potrzeby.

- Podstawowy układ elektryczny składa się ze źródła zasilania (napięcia), obciążenia (oporu) i ścieżki prądowej (przewodu lub kabla).
- Napięcie jest wielkością opisującą różnicę potencjałów między dwoma punktami obwodu.
- W obwodzie zamkniętym płynie prąd elektryczny. Oporniki hamują przepływ prądu.
- Zależność pomiędzy napięciem, natężeniem prądu i oporem umieszczonym w obwodzie jest opisana prawem Ohma:

$$U = I \cdot R.$$

- Oporniki można łączyć szeregowo. Opór zastępczy takiego układu wyznacza się, sumując opory poszczególnych rezystorów:

$$R_Z = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

- Oporniki można łączyć równolegle. Opór zastępczy takiego układu można wyznaczyć za pomocą następującego wzoru:

$$\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \text{ lub po przekształceniu}$$

$$R_Z = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}}.$$

- Moc źródła napięcia jest wyrażona wzorem:

$$P = U \cdot I.$$

- Moc wydzielającą się na oporniku określa się wzorem:

$$P = I^2 \cdot R \text{ lub } P = \frac{U^2}{R}.$$

- Jeżeli znasz napięcie wejściowe  $U_{WE}$  w układzie połączonych ze sobą szeregowo oporników, możesz obliczyć spadek napięcia na dowolnym oporze, korzystając ze wzoru dla dzielnika napięć:

$$U_1 = \frac{U_{WE} \cdot R_1}{R_Z}.$$

- Prąd płynący przez jeden z dwóch połączonych równolegle oporników oblicza się z równania dzielnika prądu, jeśli znamy prąd wchodzący do węzła:

$$I_1 = \frac{I \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

- Pierwsze prawo Kirchhoffa stwierdza, że suma prądów wpływających do węzła jest równa sumie prądów wypływających z węzła. W prostym układzie o równoległym rozgałęzieniu, do którego wpływa jeden prąd całkowity  $I$ , mamy:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

- Drugie prawo Kirchhoffa mówi, że suma spadków napięć w poszczególnych oczkach obwodu jest równa całkowitemu napięciu źródła zasilającego obwód.

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

- Przełącznik umieszczony w obwodzie pozwala narzucać kierunek przepływu prądu bądź, co ma miejsce w wielu przypadkach, zamykać i otwierać obwód.

- Rolą kondensatora w obwodzie jest magazynowanie ładunku elektrycznego. Ponadto dzięki kondensatorom możemy kontrolować zmianę napięcia podawanego w obwodzie i płynącego przez niego prądu. Stałą czasową obwodu oblicza się z następującego wzoru:

$$\tau = R \cdot C.$$

- W czasie równym jednej stałej czasowej wartości prądu i napięcia w obwodzie RC osiągają 63% swojej maksymalnej wartości. Elementy obwodu potrzebują pięciu stałych czasowych, by ich parametry osiągnęły wartość ostateczną.

- Całkowitą wartość pojemności połączonych równolegle kondensatorów oblicza się z następującej zależności:

$$C_Z = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

- Kondensatory łączy się także szeregowo. Całkowitą pojemność takiego układu wyznacza się z zależności:

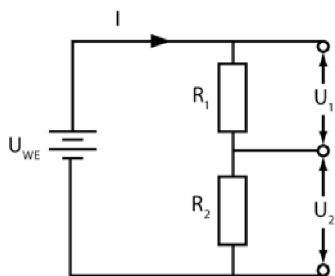
$$\frac{1}{C_Z} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \text{ lub po przekształceniu}$$

$$C_Z = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}}.$$

## Obwody prądu stałego — test wstępny

Podane niżej pytania i zadania sprawdzą Twoją wiedzę z zakresu obwodów prądu stałego. Przygotuj arkusz papieru, na którym będziesz wykonywać obliczenia. Po zakończeniu testu sprawdź wyniki z podanymi na końcu rozdziału odpowiedziami. Większość zadań da się rozwiązać na kilka różnych sposobów.

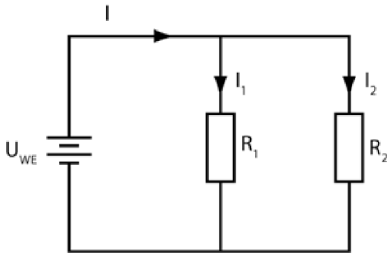
W zadaniach 1 – 5 pojawiają się dane opisujące układ przedstawiony na rysunku 1.20. Korzystając ze znanych wartości, wyznacz wielkości brakujących parametrów.



Rysunek 1.20

- $R_1 = 12 \Omega$ ,  $R_2 = 36 \Omega$ ,  $U_{WE} = 24 \text{ V}$ .  
 $R_Z = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $I = \underline{\hspace{2cm}}$
- $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{WE} = 5 \text{ mA}$ .  
 $U_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $U_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $U_{WE} = \underline{\hspace{2cm}}$
- $R_1 = 12 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 8 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{WE} = 24 \text{ V}$ .  
 $U_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $U_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
- $U_{WE} = 36 \text{ V}$ ,  $I = 250 \text{ mA}$ ,  $U_1 = 6 \text{ V}$ .  
 $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
- Posługując się danymi z zadania 1., wyznacz moc wydzielającą się na każdym z oporników oraz całkowitą moc źródła zasilania.  
 $P_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $P_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $P = \underline{\hspace{2cm}}$

W zadaniach 6 – 8 pojawiają się dane opisujące układ przedstawiony na rysunku 1.21. Korzystając ze znanych wartości, wyznacz wielkości brakujących parametrów.

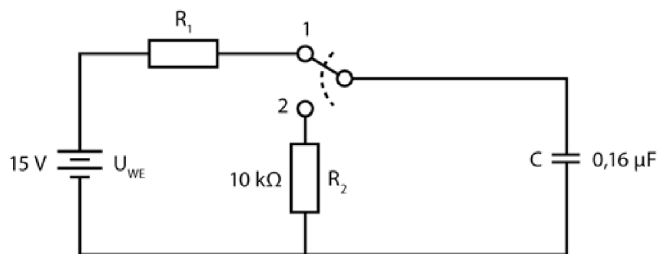


Rysunek 1.21

6.  $R_1 = 6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 12 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{WE} = 20 \text{ V}$ .  
 $R_Z = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $I = \underline{\hspace{2cm}}$
7.  $I = 2 \text{ A}$ ,  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 30 \Omega$ .  
 $I_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
8.  $U_{WE} = 12 \text{ V}$ ,  $I = 300 \text{ mA}$ ,  $R_1 = 50 \Omega$ .  
 $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $P_1 = \underline{\hspace{2cm}}$
9. Jaki maksymalny prąd może popłynąć przez opornik o rezystancji  $220 \Omega$  i mocy znamionowej  $1/4$  wata?  
 $I_{MAX} = \underline{\hspace{2cm}}$
10. W obwodzie prądu RC umieszczono opornik o wartości  $1 \text{ k}\Omega$  i przyłożono napięcie zasilające wysokości  $3 \text{ V}$ . Stała czasowa obwodu ma wynosić  $60 \mu\text{s}$ .
  - A. Jakiej pojemności kondensator powinien znaleźć się w obwodzie?  
 $C = \underline{\hspace{2cm}}$
  - B. Jakie napięcie powstanie na okładkach kondensatora po upływie  $60 \mu\text{s}$  od zamknięcia obwodu?  
 $U_C = \underline{\hspace{2cm}}$
  - C. Po jakim czasie kondensator naładuje się całkowicie?  
 $t = \underline{\hspace{2cm}}$
11. Stała czasowa obwodu przedstawionego na rysunku 1.22 po ustawieniu przełącznika w pozycji 1 powinna wynosić  $4,8 \text{ ms}$ .
  - A. Jaka musi być wartość oporu opornika  $R_1$ ?  
 $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$
  - B. Jakie napięcie powstanie na okładkach kondensatora po zupełnym naładowaniu? Ile czasu potrzebuje kondensator, by naładować się całkowicie?  
 $U_C = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $t = \underline{\hspace{2cm}}$

C. Po naładowaniu kondensatora przełącznik zostaje przełączony do pozycji 2. Ile wynosi stała czasowa rozładowania kondensatora i ile czasu potrzeba, by całkowicie rozładować ładunek zgromadzony na jego okładkach?

$$\tau = \text{_____}, t = \text{_____}$$



Rysunek 1.22

12. W obwodzie umieszczono trzy kondensatory o następujących pojemnościach:

$$C_1 = 8 \mu\text{F}, C_2 = 4 \mu\text{F} \text{ i } C_3 = 12 \mu\text{F}.$$

A. Jaka będzie całkowita pojemność układu, w którym te kondensatory zostaną połączone równolegle?

$$C_Z = \text{_____}$$

B. Jaka będzie pojemność układu, w którym kondensatory zostaną połączone szeregowo?

$$C_Z = \text{_____}$$

C. Jaka będzie pojemność układu, gdy kondensator  $C_1$  zostanie połączony szeregowo z połączonymi równolegle kondensatorami  $C_2$  i  $C_3$ .

$$C_Z = \text{_____}$$

### Odpowiedzi do testu wstępnego

Jeśli uzyskane wyniki nie zgadzają się z podanymi odpowiedziami, prześledź rozwiązania zadań, wspomagając się metodami zaprezentowanymi w tym rozdziale. Dopiero po tym przystąp do lektury następnego rozdziału. Jeżeli nadal czujesz się niepewnie w tym temacie, zajrzyj do podręczników szkolnych, do działu poświęconego obwodom prądu stałego.

Zakładamy, że prawo Ohma jest Ci dobrze znane, dlatego w odpowiedziach nie umieszczamy odwołań do problemu 4. tego rozdziału.

1.	$RZ = 48 \Omega, I = 0,5 \text{ A}.$	(problem 9.)
2.	$U_1 = 5 \text{ V}, U_2 = 15 \text{ V}, U_{WE} = 20 \text{ V}.$	(problemy 23. i 26.)
3.	$U_1 = 14,4; U_2 = 9,6 \text{ V}.$	(problemy 23. i 26.)

<b>4.</b>	$R_2 = 120 \Omega.$	(problemy 9. i 23.)
<b>5.</b>	$P_1 = 3 \text{ W}, P_2 = 9 \text{ W}, P = 12 \text{ W}.$	(problemy 9. i 13.)
<b>6.</b>	$R = 4 \text{ k}\Omega, I = 5 \text{ mA}.$	(problem 10.)
<b>7.</b>	$I_1 = 1,5 \text{ A}; I_2 = 0,5 \text{ A}.$	(problemy 28. i 29.)
<b>8.</b>	$R_2 = 200 \Omega, P_1 = 2,88 \text{ W}.$	(problemy 10. i 13.)
<b>9.</b>	$I_{\text{MAX}} = 33,7 \text{ mA}.$	(problemy 13., 15. i 16.)
<b>10.</b>	<b>A.</b> $C = 0,06 \mu\text{F}.$	(problemy 34. i 35.)
	<b>B.</b> $U_C = 1,9 \text{ V}.$	
	<b>C.</b> $t = 300 \mu\text{s}.$	(problemy 34 – 38)
<b>11.</b>	<b>A.</b> $R_1 = 30 \text{ k}\Omega.$	(problemy 35., 39. i 40.)
	<b>B.</b> $U_C = 15 \text{ V}, t = 24 \text{ ms}.$	
	<b>C.</b> $\tau = 1,6 \text{ ms}; t = 8,0 \text{ ms}.$	(problemy 39. i 40.)
<b>12.</b>	<b>A.</b> $24 \mu\text{F}.$	(problemy 41. i 42.)
	<b>B.</b> $2,18 \mu\text{F}.$	
	<b>C.</b> $5,33 \mu\text{F}.$	(problemy 42. i 43.)



Najbardziej charakterystyczną cechą diody jest przewodzenie prądu elektrycznego tylko w jednym kierunku. Pierwszymi skonstruowanymi diodami były **lampy próżniowe**, nazywano je wtedy także **prostownikami**. Dzisiejsze diody to urządzenia półprzewodnikowe. Znacznie mniejsze i zdecydowanie tańsze z powodzeniem zastąpiły lampy próżniowe we wszystkich zastosowaniach.

**Półprzewodnik** to materiał o strukturze krystalicznej, który w pewnych warunkach wykazuje właściwości przewodnika (przewodzi prąd elektryczny), w innych natomiast zachowuje się jak izolator (uniemożliwia przepływ prądu elektrycznego). Technologia wytwarzania półprzewodników rozwinęła się do tego stopnia, że regulowanie właściwości elektrycznych przylegających do siebie obszarów półprzewodnika nie stanowi większego problemu. Dzięki temu wytwarzane dziś diody, tranzystory oraz układy scalone mają bardzo małe rozmiary.

Po zakończeniu pracy z tym rozdziałem będziesz umiał:

- podać zastosowania diod w układach prądu stałego;
- określić na podstawie schematu, czy dioda jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia, czy w kierunku zaporowym;
- rozpoznać na wykresie charakterystykę prądowo-napięciową diody;
- określić napięcie progowe dla diody krzemowej i germanowej;
- obliczyć prąd przepływający przez diodę i rozpraszanie na niej mocy;
- podać napięcie przebicia;
- podać różnicę między diodą Zenera a innymi diodami;
- określić, czy dana dioda jest dobrym przybliżeniem układu idealnego.

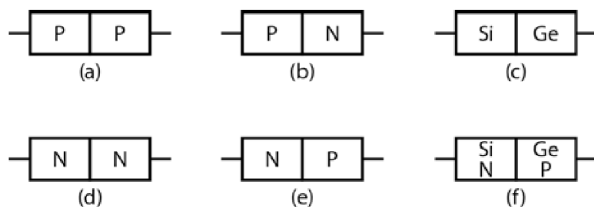
## Jak działa dioda?

**1** Krzem i german to najczęściej wykorzystywane do produkcji diod, tranzystorów i układów scalonych materiały półprzewodnikowe. Półprzewodnik jest specjalnie oczyszczany, tak by usunąć z niego wszystkie niepożądane atomy innych pierwiastków, a następnie wprowadza się do niego niewielkie, starannie kontrolowane ilości zanieczyszczeń (proces ten nazywa się **domieszkowaniem**). W zależności od tego, jakiego rodzaju zanieczyszczenie wprowadzi się do półprzewodnika, zyskuje on właściwości **typu N** lub **typu P**. W półprzewodnikach wyróżnia się dwa rodzaje nośników prądu — obok ładunków ujemnych, elektronów (to one przewodzą prąd w zwyczajnych przewodnikach), w materiałach półprzewodnikowych obserwuje się także ruch ładunku dodatniego, przemieszczanie się tak zwanych **dziur**. Domieszki wprowadzane w obszarze N zwiększają liczbę elektronów zdolnych do przewodzenia prądu, natomiast domieszki typu P — liczbę dziur, czyli dodatnich nośników prądu.

**Złącze p-n** powstaje na styku półprzewodnika typu P z półprzewodnikiem typu N. Złącza takie wytwarza się z krzemu bądź germanu, ale nigdy nie łączy się tych dwóch materiałów, by uzyskać diodę.

### Zadanie

Wskaż, który ze schematów przedstawionych na rysunku 2.1 przedstawia złącze p-n mogące pełnić funkcję diody.



Rysunek 2.1

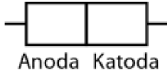
### Odpowiedź

Tylko przykłady (b) i (e).

**2** Materiał domieszkowany do typu P pełni w diodzie funkcję **anody**, materiał typu N nazywamy **katodą**.

**Zadanie**

Określ, w której części diody przedstawionej na rysunku na rysunku 2.2 znajduje się domieszka typu P, a w której domieszka typu N.

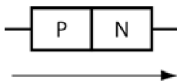


**Rysunek 2.2**

**Odpowiedź**

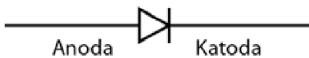
Domieszka typu P znajduje się w anodzie, a domieszka typu N w katodzie.

**3** Diody są bardzo istotnymi elementami obwodów z prądem, ponieważ przez złącze p-n **prąd płynie tylko w jedną stronę**. Rysunek 2.3 przedstawia kierunek przepływu prądu przez diodę.



**Rysunek 2.3**

W schematach obwodów z prądem zwykłą diodę oznacza się symbolem przedstawionym na rysunku 2.4. Strzałka symbolu jest zawsze zgodna z kierunkiem przepływu prądu. Zaznaczonych tu katody i anody nie wyróżnia się zazwyczaj w schematach obwodów.



**Rysunek 2.4**

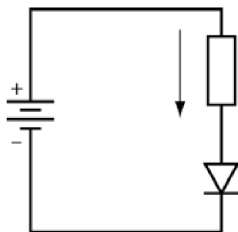
**Zadanie**

Powiedz, w jakim kierunku płynie prąd w diodzie — od anody do katody czy od katody do anody?

**Odpowiedź**

Prąd płynie od anody do katody.

**4** Strzałka widoczna na rysunku 2.5 określa kierunek przepływu prądu.



Rysunek 2.5

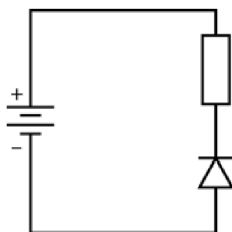
**Zadania**

- A. Czy tak podłączona dioda będzie przewodzić prąd?
- B. Zwróć uwagę, w jaki sposób podłączono w obwodzie źródło napięcia i diodę. Czy napięcie na anodzie jest wyższe od napięcia na katodzie? A może jest odwrotnie?

**Odpowiedzi**

- A. Tak.
- B. Anoda jest podłączona do dodatniego bieguna źródła zasilania, zaś katoda do ujemnego. Oznacza to, że napięcie na anodzie jest wyższe niż na katodzie.

**5** Dioda włączona w obwód w kierunku, który dopuszcza przepływ prądu, jest **spolaryzowana w kierunku przewodzenia**. Aby uzyskać efekt przewodzenia prądu przez diodę, należy podłączyć anodę do wyższego napięcia, a katodę do niższego. Spójrz teraz na sposób, w jaki włączono diodę do obwodu przedstawionego na rysunku 2.6.



Rysunek 2.6

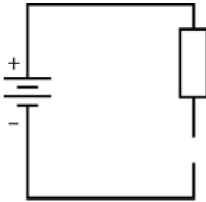
**Zadanie**

Czy ta dioda jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia? Odpowiedź uzasadnij.

**Odpowiedź**

Nie, ta dioda nie została spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Katoda jest podłączona do dodatniego bieguna źródła napięcia, anoda natomiast do ujemnego, zatem na katodzie jest wyższe napięcie niż na anodzie.

**6** Dioda, której katoda została podłączona do wyższego napięcia niż anoda, nie przewodzi prądu elektrycznego. W takim przypadku mówimy, że jest ona **wstecznie spolaryzowana**.



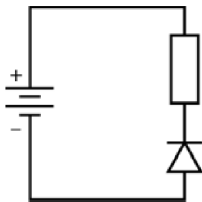
Rysunek 2.7

**Zadanie**

Na rysunku 2.7 zaznacz diodę spolaryzowaną wstecznie.

**Odpowiedź**

Twój rysunek powinien przypominać układ przedstawiony na rysunku 2.8.



Rysunek 2.8

**7** W zadaniach bardzo często przyjmuje się, że w obwodzie znajduje się dioda **idealna**. Takie założenie pozwala znacznie uprościć obliczenia. Spadek napięcia na diodzie idealnej w kierunku przewodzenia wynosi zero, natomiast w kierunku zaporowym nie płynie przez nią żaden prąd.

**Zadanie**

Przypomnij sobie podstawowe pojęcia związane z obwodami prądu. Jaki znasz jeszcze element, na którym w pewnych warunkach nie odnotowujemy spadku napięcia, w innych zaś nie przewodzi on w ogóle prądu?

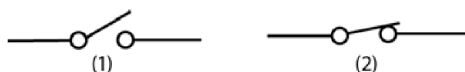
**Odpowiedź**

Przełącznik mechaniczny. Gdy jest zamknięty, umożliwia przepływ prądu bez spadku napięcia. Po otwarciu przerywa obwód, więc prąd nie płynie.

**8** Oznacza to, że dioda idealna wmontowana w obwód w kierunku przewodzenia działa jak zamknięty przełącznik — nie generuje spadku napięcia i przewodzi prąd. Diodę wmontowaną w kierunku zaporowym można porównać do otwartego przełącznika. Nie płynie przez nią żaden prąd, a napięcie mierzone na jej stykach jest równe napięciu na biegunach baterii.

**Zadanie**

Który z przełączników przedstawionych na rysunku 2.9 działa jak dioda spolaryzowana w kierunku przewodzenia?



Rysunek 2.9

**Odpowiedź**

Przełącznik (2) ustawiony w pozycji „włączony” działa jak dioda spolaryzowana w kierunku przewodzenia — umożliwia przepływ prądu, a na jego końcach nie ma spadku napięcia.

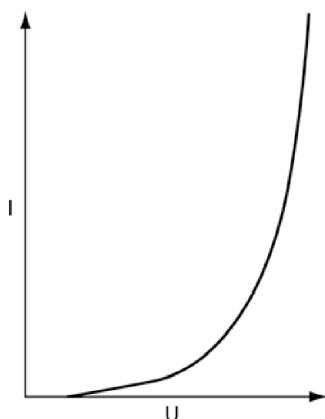
**Dioda w doświadczeniu**

**9** Jeżeli masz dostęp do prostych podzespołów elektronicznych, możesz przeprowadzić nieskomplikowany eksperyment, którego będą dotyczyć następane zadania. Jeśli to Twoje pierwsze zetknięcie z praktycznym zastosowaniem elektroniki, poproś o pomoc nauczyciela lub kogoś, kto miał już do czynienia z podobnymi zagadnieniami.

Nie pomijaj tego ćwiczenia, nawet jeśli nie masz możliwości, by przeprowadzić je osobiście. Przeczytaj cały opis i postaraj się wyobrazić sobie wyniki,

które otrzymałbyś po wykonaniu doświadczenia. Tego rodzaju zadania określa się eksperymentowaniem „na sucho”. Choć oczywiście przeprowadzenie eksperymentu byłoby lepsze, sama próba wyobrażenia sobie jego przebiegu pozwoli Ci wiele się nauczyć. Wskazówki te odnoszą się także do dalszych doświadczeń zamieszczonych w tej książce.

Celem doświadczenia jest wykreślenie charakterystyki prądowo-napięciowej (tak zwanej **krzywej U-I**) diody, obrazującej zmianę prądu przepływającego przez diodę w zależności od podawanego napięcia. Po analizie wykresu przedstawionego na rysunku 2.10 można stwierdzić, że przyłożenie niewielkiego napięcia do styków diody nie powoduje jeszcze przepływu prądu, jednak gdy napięcie przekroczy pewną wartość, prąd płynący przez diodę zacznie wzrastać bardzo szybko.



**Rysunek 2.10**

Po przeprowadzeniu tego doświadczenia będziesz umiał:

- zbudować prosty układ elektroniczny,
- zmierzyć napięcie i prąd w obwodzie,
- narysować wykres zmierzonych wartości.

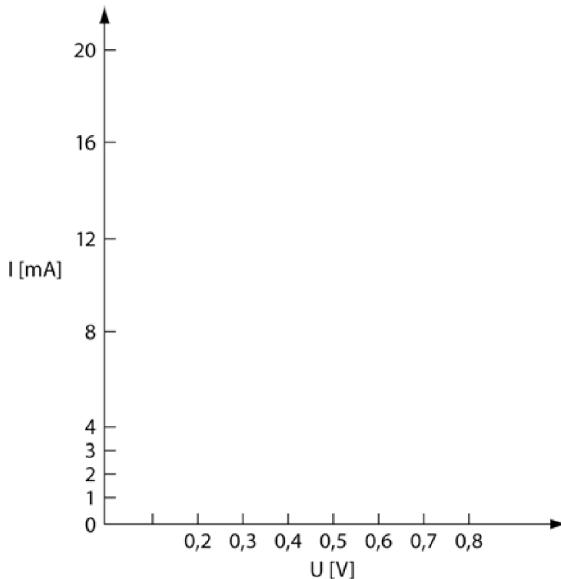
Zmontuj obwód przedstawiony na rysunku 2.11. Kółka oznaczone literami A i V to mierniki — amperomierz i woltomierz. Amperomierz pozwoli Ci zmierzyć natężenie prądu płynącego przez obwód, natomiast woltomierz poda napięcie w obwodzie.



3. Zmniejsz wartość oporu  $R$  na potencjometrze. Prąd  $I$  płynący przez diodę powinien ulec zmianie.
4. Odczytaj znów wskazania liczników i zapisz wartości  $I$  i  $U$ .
5. Postępuj zgodnie z tymi zaleceniami i zbierz jak najwięcej danych. W pewnym momencie wartość napięcia  $U$  przestanie rosnąć, natomiast prąd  $I$  zacznie zwiększać się bardzo gwałtownie. PRZESTAŃ.

**UWAGA** Jeżeli pomimo bardzo dużych wartości napięcia — rzędu 3 czy 4 woltów — przez diodę płynie bardzo mały prąd  $I$ , znaczy to, że jest ona spolaryzowana w kierunku zaporowym. Zmień polaryzację baterii i rozpocznij doświadczenie jeszcze raz.

6. Nanieś na wykres wartości zebrane w tabeli. Wykorzystaj do tego rysunek 2.12. Otrzymana krzywa powinna przypominać kształtem charakterystykę przedstawioną na rysunku 2.10.



Rysunek 2.12

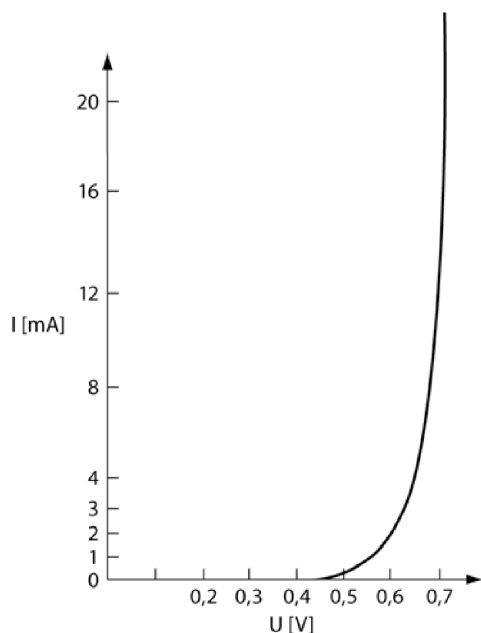
**10** Poniższa tabela zawiera zestawienie danych zebranych dla diody o symbolu handlowym 1N4001.

R	U	I
	[V]	[mA]
1 MΩ	0,30	0,02
220 kΩ	0,40	0,05
68 kΩ	0,46	0,14
33 kΩ	0,50	0,26

R	U	I
15 k $\Omega$	0,52	0,50
10 k $\Omega$	0,55	0,80
6,8 k $\Omega$	0,56	1,20
4,7 k $\Omega$	0,60	2,00
3,3 k $\Omega$	0,62	2,80
2,2 k $\Omega$	0,64	4,20
1,5 k $\Omega$	0,65	5,50
1,0 k $\Omega$	0,67	8,40
680 $\Omega$	0,70	12,00
470 $\Omega$	0,70	18,00
330 $\Omega$	0,71	23,00

Dalsze zmniejszanie wartości oporu R spowoduje bardzo niewielki wzrost napięcia i ogromny skok wartości mierzonego natężenia.

Rysunek 2.13 przedstawia charakterystykę prądowo-napięciową wykonaną na podstawie danych zebranych w tabeli.

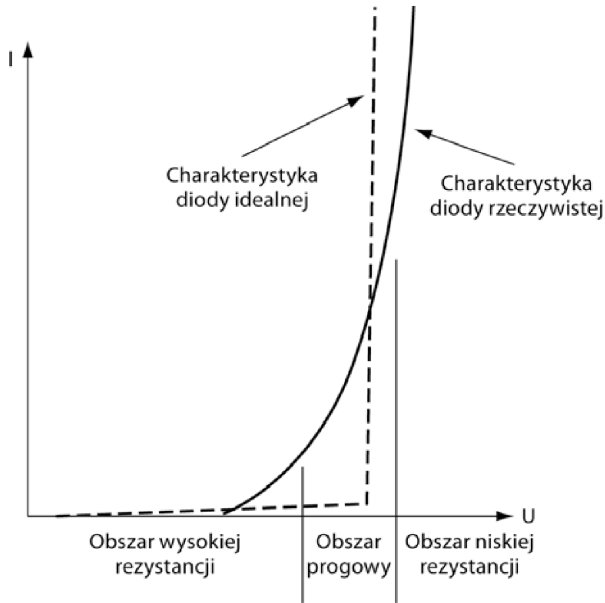


**Rysunek 2.13**

Na rysunku 2.14 ponownie znajdziesz charakterystykę prądowo-napięciową diody. Na wykres nanieśliśmy linie, które wyznaczają trzy jej bardzo istotne obszary.

Najważniejszym z nich jest **obszar progowy**. Zmiana charakterystyki nie następuje skokowo, lecz na pewnym obszarze krzywej — opór diody zmienia tam wartość z bardzo dużej na bardzo małą.

Na wykresie znajdziesz też naniesioną dla porównania charakterystykę diody idealnej.



**Rysunek 2.14**

**Napięcie progowe** diody, której charakterystykę przedstawiliśmy na rysunku 2.14, wynosi około 0,7 V. To wartość typowa dla diod krzemowych. Oznacza to (a wyniki, które zebrałeś, powinny potwierdzać przedstawiony tu wniosek), że rezystancja diody przy napięciach poniżej wartości 0,7 V jest tak duża, iż ogranicza przepływ prądu do minimalnych wartości. W diodach germanowych napięcie progowe wynosi około 0,3 V.

### Zadanie

Ile wynosi napięcie progowe diody, którą wykorzystałeś w swoim doświadczeniu?

### Odpowiedź

Jeśli używałeś diody krzemowej, napięcie progowe wynosi zapewne około 0,7 V. Jeśli stosowałeś diodę germanową, jego wartość to około 0,3 V.

**11** Napięcie progowe bywa też nazywane **napięciem przewodzenia**. Jest to maksymalna wartość napięcia, jaką daje się uzyskać na diodzie spolaryzowanej w kierunku przewodzenia.

### **Zadania**

- A. Które z diod — germanowe czy silikonowe — mają wyższe napięcia przewodzenia?
- B. Jak zmienia się rezystancja diody w obszarze napięcia przewodzenia?

### **Odpowiedzi**

- A. Napięcie przewodzenia diod krzemowych (około 0,7 V) jest wyższe od napięcia przewodzenia diod germanowych (około 0,3 V).
- B. Rezystancja diody zmniejsza się gwałtownie.

**UWAGA** Podane tu napięcia progowe będą pojawiać się w dalszych rozdziałach jako wartości spadków napięć na złączach p-n spolaryzowanych w kierunku przewodzenia.

**12** Spójrz ponownie na rysunek 2.14 i przedstawione na nim obszary różnej rezystancji diody.

### **Zadanie**

Powiedz, jak zmienia się wartość prądu płynącego przez diodę w obszarze progowym.

### **Odpowiedź**

Prąd gwałtownie wzrasta.

**13** Podane tu wartości napięć progowych 0,7 V i 0,3 V są jedynie orientacyjne — nie spodziewaj się, że rezystancja diod, z którymi będziesz mieć do czynienia, będzie zmieniać się dokładnie dla tych wartości. Najczęściej napięcia progowe będą nieco się od nich różnić, ale przygotowując się do praktycznego stosowania diod (czyli pracy z diodami niedoskonałymi), możesz poczynić dwa założenia:

- Spadek napięcia na diodzie wynosi albo 0,7 V, albo 0,3 V.
- Ograniczenie nadmiarowego prądu, który mógłby popłynąć przez diodę, odbywa się przez połączenie z nią szeregowo odpowiednio dobranego opornika.

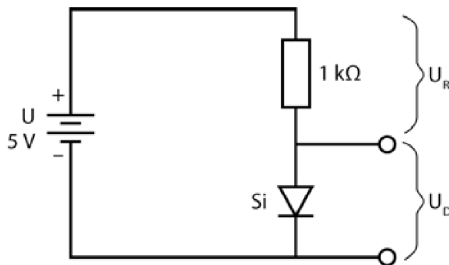
**Zadania**

- A. Dlaczego wspominamy tu o diodach niedoskonałych?
- B. Aby powstrzymać nadmiarowy przepływ prądu przez diodę, należy użyć opornika o dużej czy o małej rezystancji?

**Odpowiedzi**

- A. Wszystkie diody są niedoskonałe, a wartości 0,3 V czy 0,7 V to jedynie pewne przybliżenia. Jak przekonasz się już wkrótce, w niektórych zadaniach będziemy zakładać, że spadek napięcia na diodzie spolaryzowanej w kierunku przewodzenia wynosi 0 V. Jest to równoznaczne ze stwierdzeniem, że przyłożenie do diody jakiegokolwiek napięcia sprawi, iż prąd popłynie przez nią tak, jak przez opornik idealny (co z kolei oznacza, że napięcie progowe w charakterystyce prądowo-napięciowej diody idealnej wynosi 0 woltów).
- B. Raczej należy decydować się na oporniki o dużej rezystancji, przy czym dokładną wartość oporu można wyznaczyć, gdy znany jest spadek napięcia na diodzie i maksymalny prąd, jaki może przez nią popłynąć.

- 14** Oblicz prąd płynący przez diodę w obwodzie zaprezentowanym na rysunku 2.15, postępując zgodnie z krokami prezentowanymi w poniższych zadaniach.



Rysunek 2.15

**Zadania**

- A. Spadek napięcia na diodzie jest wartością znaną — dla diody krzemowej wynosi on 0,7 V, a dla diody germanowej 0,3 V. (Oznaczenie „Si” widoczne obok symbolu diody sugeruje, że jest to dioda krzemowa). Zapisz napięcie na diodzie.

$$U_D =$$

B. Określ spadek napięcia na oporze. Wartość tę wyznaczysz ze wzoru  $U_R = U - U_D$ . Zależność ta wynika z drugiego prawa Kirchhoffa, znanego Ci już z rozdziału 1.

$$U_R =$$

C. Oblicz prąd płynący przez opornik. Skorzystaj ze wzoru  $I = \frac{U_R}{R}$ .

$$I =$$

D. Teraz wyznacz prąd płynący przez diodę.

$$I =$$

### Odpowiedzi

Powinieneś otrzymać następujące wyniki:

A. 0,7 V.

B.  $U_R = U - U_D = 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 4,3 \text{ V}$ .

C.  $I = \frac{U_R}{R} = \frac{4,3 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 4,3 \text{ mA}$ .

D. 4,3 mA. (Przez każdy z elementów w połączeniu szeregowym płynie taki sam prąd).

**15** W praktyce, gdy źródło zasilania daje napięcie 10 V lub niższe, bardzo często przyjmuje się, że spadek napięcia na diodzie wynosi 0 V.

Wynika to z założenia, iż mamy do czynienia z diodą idealną, w której prąd przewodzenia pojawia się powyżej napięcia 0 V, co oznacza, że nie trzeba przekraczać wartości progowej napięcia, by uzyskać efekt pracy diody. Jak się wkrótce przekonasz, założenie to pojawia się w elektronice bardzo często.

### Zadania

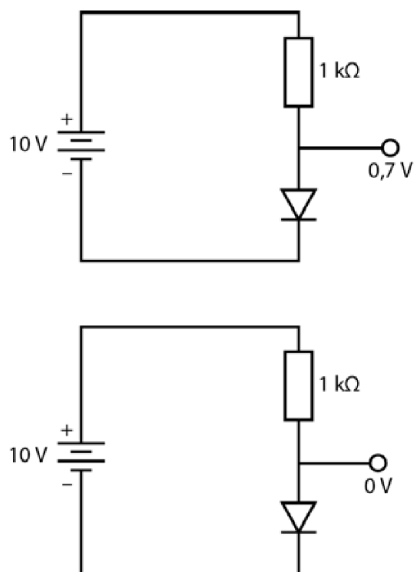
A. Oblicz prąd płynący przez krzemową diodę umieszczoną w obwodzie przedstawionym na rysunku 2.16.

$$U_D =$$

$$U = U - U_D =$$

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

$$I_D =$$



Rysunek 2.16

B. Oblicz prąd płynący przez diodę idealną przedstawioną na rysunku 2.16.

$$U_D =$$

$$U = U - U_D =$$

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

$$I_D =$$

### Odpowiedzi

A.  $U_D = 0,7 \text{ V}$ ;  $U = 9,3 \text{ V}$ ;  $I = 9,3 \text{ mA}$ ;  $I_D = 9,3 \text{ mA}$ .

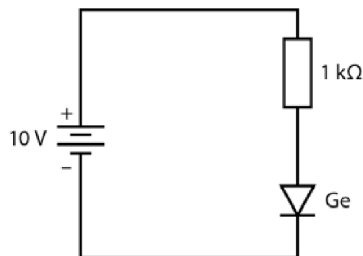
B.  $U_D = 0 \text{ V}$ ;  $U = 10 \text{ V}$ ;  $I = 10 \text{ mA}$ ;  $I_D = 10 \text{ mA}$ .

**16** Różnica wartości prądów otrzymanych w obydwu przykładach zadania 15. nie przekracza 10% całkowitej wartości prądu (0,7 mA to mniej niż 10% z 10 mA). Tolerancja nominalnych wartości większości podzespołów elektronicznych to  $\pm 5\%$ , co oznacza, iż rzeczywista wartość oporu opornika 1 k $\Omega$  mieści się w zakresie od 950  $\Omega$  do 1050  $\Omega$ . Z kolei stąd wynika, że wartość prądu płynącego przez opornik też może wahać się o  $\pm 5\%$ .

To właśnie rozbieżności między wartościami parametrami rzeczywistych elementów obwodów elektronicznych pozwalają upraszczać obliczenia, jeśli poczynione założenia nie zmieniają wyniku o więcej niż 10%. Oznacza to, że dioda zasilana napięciem nie większym niż 10 V zachowuje się z dobrym przybliżeniem jak dioda idealna.

**Zadania**

- A. Sprawdź parametry elementów obwodu przedstawionego na rysunku 2.17. Czy widoczną na nim diodę można traktować jak diodę idealną?

**Rysunek 2.17**

- B. Oblicz prąd płynący przez diodę.

**Odpowiedzi**

- A. Tak, tę diodę można traktować jak diodę idealną.  
 B.  $I = 10 \text{ mA}$ .

**17** Prąd przepływający przez diodę sprawia, że jej temperatura rośnie, co oczywiście wiąże się z utratą mocy, tak samo jak na oporniku. Utratę mocy na rezystorze obliczaliśmy ze wzoru  $P = U \cdot I$ , w przypadku diody możemy skorzystać z tego samego równania. Aby wyznaczyć moc traconą w postaci ciepła na diodzie, musisz najpierw obliczyć płynący przez ten element prąd, co ćwiczyłeś w poprzednim zadaniu. Obliczając utratę mocy, zakłada się spadek napięcia na diodzie krzemowej wynoszący  $0,7 \text{ V}$ , mimo że w czasie wyznaczania wartości prądu przyjmuje się, iż ta sama wartość wynosi  $0 \text{ V}$ .

Oto przykład obliczeń wykonanych dla diody krzemowej, przez którą płynie prąd  $100 \text{ mA}$ . Moc wydzielana w formie ciepła wynosi w takim przypadku:

$$P = 0,7 \text{ V} \cdot 100 \text{ mA} = 70 \text{ mW}.$$

**Zadanie**

Założmy, że przez diodę krzemową płynie prąd  $2 \text{ A}$ . Jaka moc wydzieli się na diodzie?

**Odpowiedź**

$$P = 0,7 \text{ V} \cdot 2 \text{ A} = 1,4 \text{ W}.$$

**18** Diody wykonuje się w taki sposób, by z założenia oddawały pewną część dostarczanej im energii w postaci ciepła. Parametrem opisującym maksymalną moc, jaka może bezpiecznie wydzielić się na diodzie, jest tak zwana moc znamionowa podawana przez producenta.

Założmy, że dysponujesz diodą krzemową o mocy znamionowej 2 watów. Jaki największy prąd może popłynąć przez diodę bez jej uszkodzenia?

$$P = U \cdot I$$

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

$$I = \frac{2 \text{ W}}{0,7 \text{ V}}$$

$$I \approx 2,86 \text{ A (po zaokrągleniu do dwóch miejsc po przecinku).}$$

Dopóki prąd płynący przez diodę nie przekroczy tej wartości, dioda nie przegrzeje się i nie ulegnie uszkodzeniu.

### Zadanie

Założmy, że moc znamionowa diody germanowej wynosi 3 waty. Oblicz największy prąd, jaki może przez nią przepłynąć, nie powodując uszkodzenia elementu.

#### Odpowiedź

$$I = \frac{3 \text{ W}}{0,3 \text{ V}} = 10 \text{ A.}$$

**19** Rozwiąż następujące zadania dla nowego przykładu.

### Zadania

- A. Czy dioda krzemowa o mocy znamionowej 3 W zniosłaby maksymalny prąd, jaki wyznaczyłeś dla diody germanowej z problemu 18.?  
 B. Jeżeli nie, to jaka byłaby bezpieczna wartość prądu dla tej diody?

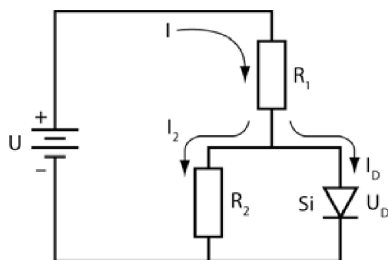
#### Odpowiedzi

- A. Nie. Prąd o natężeniu 10 A spowodowałby wydzielenie się mocy 7 W, co doprowadziłoby do spalenia się diody.

$$\text{B. } I = \frac{3 \text{ W}}{0,7 \text{ V}} = 4,3 \text{ A.}$$

Każdy prąd o natężeniu mniejszym niż wyznaczone będzie bezpieczny dla diody.

**20** Kilka kolejnych przykładów będzie polegało na znalezieniu prądu płynącego przez diodę. Spójrz na schemat obwodu przedstawiony na rysunku 2.18.



**Rysunek 2.18**

Całkowity prąd wytwarzany przez źródło napięcia przepływa przez opornik  $R_1$ , a następnie rozplywa się na dwa prądy  $I_2$  oraz  $I_D$ . Prąd  $I_2$  przepływa przez opornik  $R_2$ , natomiast prąd  $I_D$  przepływa przez diodę.

### Zadania

- A. Zapisz zależność łączącą prądy  $I$ ,  $I_2$  oraz  $I_D$ .
- B. Podaj wartość spadku napięcia na diodzie  $U_D$ .

### Odpowiedzi

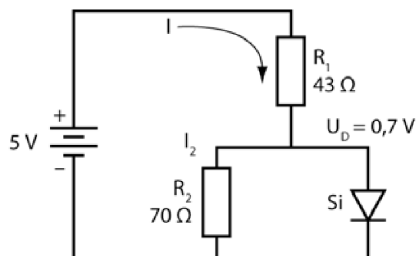
- A. To przykład pierwszego prawa Kirchhoffa:  $I = I_2 + I_D$ .
- B.  $U_D = 0,7 \text{ V}$ .

**21** Aby określić wartość prądu płynącego przez diodę  $I_D$ , należy wykonać następujące kroki, ponieważ nie ma żadnego sposobu wyznaczenia jej bezpośrednio:

1. Oblicz wartość prądu  $I_2$ . Skorzystaj w tym celu ze wzoru  $U_D = R_2 \cdot I_2$ .
2. Oblicz wartość napięcia  $U_R$ . Skorzystaj ze wzoru  $U_R = U - U_D$  (drugie prawo Kirchhoffa).
3. Oblicz wartość prądu całkowitego  $I$  i prądu płynącego przez opornik  $R_1$ . Skorzystaj ze wzoru  $U_R = I \cdot R_1$ .

4. Oblicz wartość prądu  $I_D$ . Skorzystaj w tym celu ze wzoru  $I = I_2 + I_D$ .

Wykonaj powyższe kroki, by wyznaczyć wartość prądu  $I_D$  płynącego w obwodzie przedstawionym na rysunku 2.19.



Rysunek 2.19

### Zadania

- A.  $I_2 =$
- B.  $U_R =$
- C.  $I =$
- D.  $I_D =$

### Odpowiedzi

A.  $I_2 = \frac{U_D}{R_2} = \frac{0,7 \text{ V}}{70 \Omega} = \frac{0,7 \text{ V}}{70 \Omega} = 0,01 \text{ A} = 10 \text{ mA} .$

B.  $U_R = U - U_D = 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 4,3 \text{ V} .$

C.  $I = \frac{U_R}{R_1} = \frac{4,3 \text{ V}}{43 \Omega} = 0,1 \text{ A} = 100 \text{ mA} .$

D.  $I_D = I - I_2 = 100 \text{ mA} - 10 \text{ mA} = 90 \text{ mA} .$

**22** Rozwiązanie tego problemu będzie wymagać od Ciebie posłużenia się wynikami otrzymanymi w zadaniach z problemu 21.

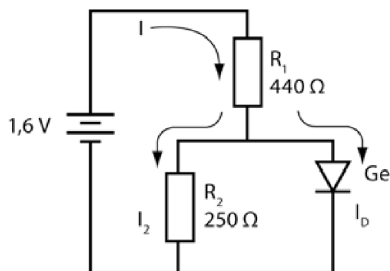
### Zadanie

Jaka moc wydzieli się na diodzie opisanej w problemie 21.?

### Odpowiedź

$P = U_D \cdot I_D = 0,7 \text{ V} \cdot 90 \text{ mA} = 63 \text{ mW} .$

**23** Aby znaleźć prąd płynący przez diodę w obwodzie przedstawionym na rysunku 2.20, wykonaj w kolejności następujące zadania:



Rysunek 2.20

### Zadania

- A.  $I_2 =$
- B.  $U_R =$
- C.  $I =$
- D.  $I_D =$

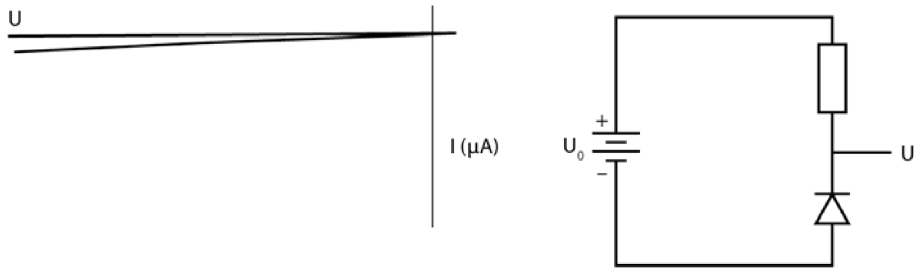
### Odowiedzi

- A.  $I_2 = \frac{0,3 \text{ V}}{250 \Omega} = 1,2 \text{ mA}.$
- B.  $U_R = U - U_D = 1,6 \text{ V} - 0,3 \text{ V} = 1,3 \text{ V}.$
- C.  $I = \frac{U_R}{R_1} = \frac{1,3 \text{ V}}{440 \Omega} = 3 \text{ mA}.$
- D.  $I_D = I - I_2 = 1,8 \text{ mA}.$

Jeśli planowałeś za jakiś czas zrobić przerwę, zrób ją teraz. To najlepszy moment.

### Przebiecie diody

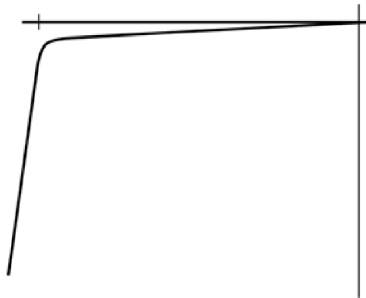
**24** Wcześniej, przy okazji przeprowadzania doświadczenia, dowiedziałeś się, że jeśli przez obwód nie płynie prąd, oznacza to najprawdopodobniej, iż umieszczona w nim dioda jest spolaryzowana w kierunku zaporowym. Tak spolaryzowana dioda — przedstawiona schematycznie na rysunku 2.21 — niemalże nie przewodzi prądu. Wskazania licznika w takim przypadku są tak



Rysunek 2.21

małe, że zakłada się całkowity brak przepływu prądu. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody spolaryzowanej w kierunku zaporowym wygląda tak jak na lewej ilustracji z rysunku 2.21.

W charakterystyce prądowo-napięciowej diody doskonałej wartość prądu płynącego w kierunku zaporowym wynosi zero dla wszystkich wartości napięć. W przypadku diody rzeczywistej przy pewnym napięciu następuje przebiecie, czyli moment, w którym dioda umożliwi przepływ większego prądu. Charakterystyka prądowo-napięciowa przebiecia została przedstawiona na rysunku 2.22.

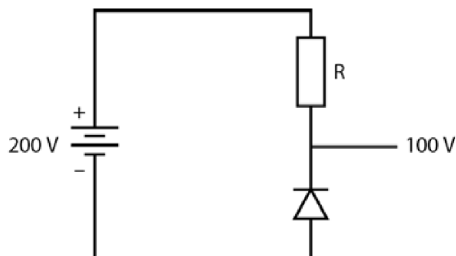


Rysunek 2.22

Dalsze podnoszenie napięcia po przebieciu diody spowoduje jej spalenie. Aby uniknąć zniszczenia elementu obwodu, mimo że znajduje się on pod napięciem przebiecia, należy ograniczyć płynący prąd poprzez włączenie do obwodu odpowiedniego opornika.

### Zadanie

Diody w obwodzie przedstawionym na rysunku 2.23 doznaje przebiecia przy napięciu 100 V, natomiast dobrze znosi, bez przegrzewania się, prąd o wartości 1 ampera. Określ wartość oporu, jaki należy połączyć z diodą, by ograniczyć płynący przez nią prąd do wartości 1 A.

**Rysunek 2.23****Odpowiedź**

$$U_R = U - U_D = 200 \text{ V} - 100 \text{ V} = 100 \text{ V}.$$

Skoro przez obwód ma popłynąć prąd o wartości 1 A,

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{100 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 100 \Omega.$$

**25** Każda dioda spolaryzowana w kierunku zaporowym dozna przebicia po przyłożeniu do niej odpowiednio wysokiego napięcia. Napięcie przebicia jest inne dla każdego rodzaju diody, a jego wartość wynika bezpośrednio z technologii, w jakiej dany element został wykonany. Wartość ta jest jednym z parametrów charakterystycznych podawanych przez producenta diody.

Przebiecie nie jest zjawiskiem nieodwracalnie niszczącym diodę. Jeśli szybko usunie się nadmierne napięcie, dioda po pewnym czasie odzyska swoje właściwości i będzie działać normalnie. Musisz zadbać jedynie o to, by prąd płynący przez diodę był odpowiednio niski, gdyż w przeciwnym razie dojdzie do jej spalenia.

Przebiecie będzie następować zawsze przy tej samej wartości napięcia, niezależnie od czasu użytkowania diody.

Napięcie przebicia określa się czasami mianem **szczytowego napięcia wstecznego** (z angielskiego *peak inverse voltage* — PIV lub *peak reverse voltage* — PRV). Poniższa tabela przedstawia przykładowe wartości PIV dla bardziej popularnych diod:

Symbol handlowy diody	PIV
1N4001	50 V
1N4002	100 V
1N4003	200 V
1N4004	400 V
1N4005	600 V
1N4006	800 V

## Zadania

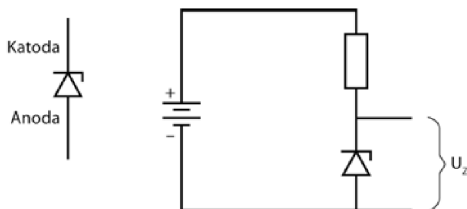
- A. Co może trwale uszkodzić diodę — zbyt duże napięcie czy zbyt duży prąd?  
 B. Co jest bardziej szkodliwe dla diody — przebicie czy spalenie?

### Odpowiedzi

- A. Zbyt duży prąd. Zbyt duże napięcie nie uszkodzi diody, o ile odpowiednio ograniczy się płynący przez nią prąd.  
 B. Spalenie. Przebicie nie jest specjalnie szkodliwe, szczególnie jeśli ograniczy się prąd płynący przez diodę.

## Dioda Zenera

**26** Diody można przygotować również w taki sposób, by przebicie następowało przy niższych i dokładniej określonych napięciach. Tego rodzaju diody nazywamy **diodami Zenera**. Występujące w nich zjawisko Zenera to właśnie specyficzna odmiana przebicia. Po osiągnięciu tak zwanego napięcia Zenera przez diodę popłynie niewielki prąd. Aby utrzymać ją w punkcie napięcia Zenera, należy ten prąd podtrzymywać. W większości przypadków chodzi tu o natężenia rzędu kilku miliamperów. Rysunek 2.24 przedstawia symbol diody Zenera oraz obwód, w który została ona wbudowana.



Rysunek 2.24

W przedstawionym na rysunku 2.24 obwodzie bateria dostarcza określone napięcie. Dioda Zenera wywołuje konkretny spadek napięcia (oznaczony tu jako  $U_Z$ ). Opornik wbudowany w układ reguluje przepływ prądu. Diody Zenera wykorzystuje się do stabilizowania napięcia w pewnym fragmencie obwodu.

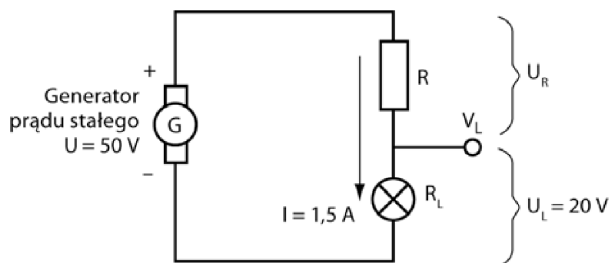
## Zadanie

Dlaczego stabilizowanie napięcia osiąga się za pomocą diody Zenera zamiast za pomocą zwykłej diody?

**Odpowiedź**

Ponieważ napięcie przebicia dla diody Zenera jest bardzo dokładnie określone.

**27** Zajmiemy się teraz przykładem układu, w którym ustalenie napięcia jest niezbędne — to lampa zasilana ze źródła prądu stałego. Załóżmy, że generator prądu pracujący na pełnych obrotach wytwarza napięcie 50 V, natomiast gdy jego obroty spadają, napięcie zmniejsza się do 35 V. Przyjmijmy, że chcesz nim zasilac dwudziestowoltową lampę, która pobiera prąd o natężeniu 1,5 A. Schemat odpowiedniego obwodu jest przedstawiony na rysunku 2.25.



**Rysunek 2.25**

Musisz wyznaczyć odpowiednią wartość oporu. W tym celu wykonaj następujące obliczenia:

1. Oblicz rezystancję lampy  $R_L$ . Skorzystaj w tym celu ze wzoru:

$$R_L = \frac{U_L}{I}.$$

2. Wyznacz wartość napięcia  $U_R$ . Skorzystaj z zależności  $U = U_R + U_L$ .

3. Wyznacz wartość oporu  $R$ . Posłuż się wzorem:

$$R = \frac{U_R}{I}.$$

**Zadania**

Przeprowadź obliczenia zgodnie z podanym schematem i zapisz swoje odpowiedzi tutaj.

- A.  $R_L =$
- B.  $U_R =$
- C.  $R =$

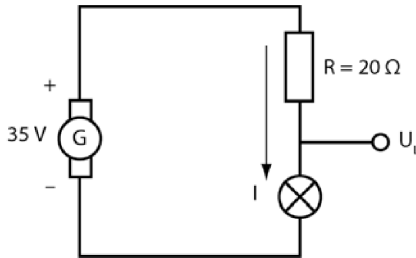
**Odpowiedzi**

$$\text{A. } R_L = \frac{20 \text{ V}}{1,5 \text{ A}} = 13,33 \Omega.$$

$$\text{B. } U_R = 50 \text{ V} - 20 \text{ V} = 30 \text{ V}.$$

$$\text{C. } R = \frac{50 \text{ V} - 20}{1,5 \text{ A}} = \frac{30 \text{ V}}{1,5 \text{ A}} = 20 \Omega.$$

**28** Załóż teraz, że do obwodu trafia dwudziestoomowy opornik z problemu 27., a generator wytwarza napięcie 35 V. Opisany układ został przedstawiony na rysunku 2.26. Tego rodzaju zmiana odpowiada procesowi starzenia się baterii. Z czasem napięcie podawane przez baterię spada, przez co źródło zasilania nie może dostarczać już prądu potrzebnego do zasilania lampy. W efekcie będzie ona świecić mniej intensywnie bądź wcale. Zauważ jednak, że jej opór nie zmienia się.



Rysunek 2.26

**Zadania**

A. Oblicz całkowity prąd wytwarzany przez źródło zasilania. Skorzystaj ze wzoru:

$$I = \frac{U_s}{R + R_L}.$$

$$I =$$

B. Oblicz spadek napięcia na lampie. Skorzystaj ze wzoru  $U_L = I \cdot R_L$ .

$$U_L =$$

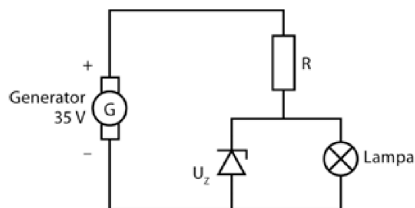
C. Czy wartości prądu i napięcia zwiększyły się, czy zmalały?

**Odpowiedzi**

$$\text{A. } I = \frac{35 \text{ V}}{20 \Omega + 13,3 \Omega} = \frac{35 \text{ V}}{33,3 \Omega} = 1,05 \text{ A}.$$

- B.  $U_L = 1,05 \text{ A} \cdot 13,3 \Omega = 14 \text{ V}$ .  
 C. Obydwie wielkości zmalały.

**29** W wielu przypadkach spadek napięcia na lampie (bądź dowolnym innym elemencie układu) jest niedopuszczalny z punktu widzenia działania obwodu. Aby zapobiec temu efektowi, umieszcza się w obwodzie diodę Zenera. Przykład schematu takiego rozwiązania zaprezentowaliśmy na rysunku 2.27.



Rysunek 2.27

Jeśli do takiego obwodu wstawisz dwudziestowoltową diodę Zenera (czyli taką, na której spadek napięcia wynosi zawsze 20 V), napięcie na lampie będzie wynosić zawsze 20 V, niezależnie od wartości podawanej przez źródło (oczywiście przy założeniu, że generator wytwarza napięcie powyżej 20 V).

### Zadania

Założmy, że napięcie na lampie ma stałą wartość, natomiast napięcie wytwarzane przez generator stopniowo się zmniejsza.

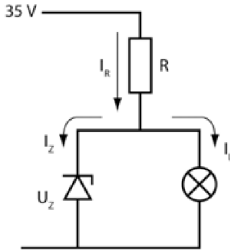
- A. Jak zmieni się prąd płynący przez lampę?  
 B. Jak zmieni się prąd płynący przez diodę Zenera?

### Odpowiedzi

- A. Prąd płynący przez lampę nie zmieni się, ponieważ napięcie na niej pozostaje stałe.  
 B. Prąd zmaleje, ponieważ zmaleje całkowity prąd wytwarzany przez źródło.

**30** Aby utrzymać obwód w stanie działania i zapewnić lampie stałe, dwudziestowoltowe napięcie przez cały czas, należy odpowiednio dobrać wartość oporu R. Musi ona umożliwiać przepływ całkowitego prądu wystarczającego do dostarczenia lampie wymaganego przez nią 1,5 A oraz utrzymania diody Zenera w napięciu Zenera. W tym celu rozważymy przypadek „najgorszych warunków”. (Projektowanie z myślą o „najgorszych warunkach” jest częstą praktyką w elektronice. W ten sposób opracowuje się rozwiązania, które będą spraw-

dzać się w najbardziej niekorzystnych warunkach). W naszym przypadku będzie się to wiązało z założeniem, że generator wytwarza napięcie o wartości 35 V. Rysunek 2.28 przedstawia przepływ prądu w tak przygotowanym obwodzie.



**Rysunek 2.28**

Określ wartość oporu  $R$  potrzebną do utrzymania przepływu przez lampę prądu o natężeniu 1,5 A. Jaki prąd ma popłynąć przez diodę Zenera? Możesz wybrać dowolną wartość, pod warunkiem że nie przekroczy ona kilku miliamperów i nie spowoduje spalenia diody. W tym przykładzie założyliśmy natężenie prądu na poziomie  $I_Z = 0,5$  A.

### Zadania

A. Jaki prąd popłynie łącznie przez opornik  $R$ ?

$$I_R =$$

B. Oblicz wartość  $R$ .

$$R =$$

### Odpowiedzi

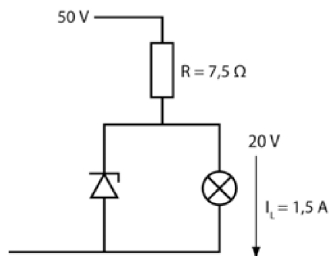
A.  $I_R = I_L + I_Z = 1,5 \text{ A} + 0,5 \text{ A} = 2 \text{ A}$ .

B.  $R = \frac{U_S - U_Z}{I_R} = \frac{35 \text{ V} - 20 \text{ V}}{2 \text{ A}} = 7,5 \Omega$ .

Przyjęcie innej wartości prądu  $I_Z$  płynącego przez diodę Zenera skutkowałoby uzyskaniem innej wartości oporu  $R$ .

**31** Sprawdź teraz, co będzie się działo, gdy generator poda napięcie 50 V. Odpowiedni układ przedstawiliśmy na rysunku 2.29.

Ponieważ napięcie na lampie wynosi nadal 20 V, będzie przez nią płynął niezmiennie prąd 1,5 A, natomiast zmienią się prąd całkowity oraz prąd płynący przez diodę Zenera.



Rysunek 2.29

**Zadania**

A. Oblicz całkowity prąd przepływający przez opornik R.

$$I_R =$$

B. Oblicz prąd płynący przez diodę Zenera.

$$I_Z =$$

**Odpowiedzi**

$$\text{A. } I_R = \frac{U - U_Z}{R} = \frac{50 - 20}{7,5} = 4 \text{ A.}$$

$$\text{B. } I_Z = I_R - I_L = 4 - 1,5 = 2,5 \text{ A.}$$

**32** Choć napięcie na lampie i płynący przez nią prąd nie zmieniły się, wartości prądu całkowitego i prądu Zenera uległy zmianie.

**Zadania**

A. Co stało się z prądem całkowitym I?

B. Co stało się z prądem płynącym przez diodę Zenera  $I_Z$ ?

**Odpowiedzi**

A. Prąd I wzrósł o 2 A.

B. Prąd  $I_Z$  wzrósł o 2 A.

Zauważ, że cała zmiana prądu całkowitego została skierowana na diodę Zenera, natomiast prąd płynący przez lampę nie uległ zmianie.

**33** Moc wydzielana na diodzie Zenera zmieni się po zmianie napięcia dostarczanego przez źródło.

**Zadania**

- A. Znajdź moc wydzielaną na diodzie, gdy generator podaje napięcie 35 V.  
 B. Znajdź moc wydzielaną na diodzie, gdy generator dostarcza napięcie 50 V.

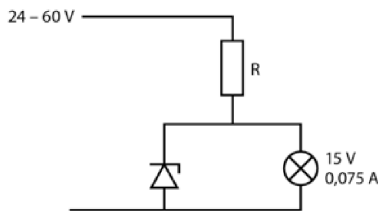
**Odpowiedzi**

A.  $P_Z = U \cdot I = 20 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} = 10 \text{ W}$ .

B.  $P_Z = U \cdot I = 20 \text{ V} \cdot 2,5 \text{ A} = 50 \text{ W}$ .

Jeśli korzystasz z diody Zenera o mocy znamionowej 50 W lub wyższej, masz gwarancję, że się nie spali.

- 34** Spójrz na schemat przedstawiony na rysunku 2.30 i rozwiąż następujące zadanie:



Rysunek 2.30

**Zadanie**

Jaką moc znamionową powinna mieć dioda Zenera przedstawiona na rysunku 2.30? Prąd płynący przez lampę oraz napięcia są podane.

**Odpowiedź**

Pod napięciem 24 V i przy założeniu natężenia prądu 0,5 A płynącego przez diodę Zenera:

$$R = \frac{9}{0,575} = 15,7 \Omega.$$

Pod napięciem 60 V:

$$I_R = \frac{45}{15,7} = 2,87 \text{ A}, \text{ zatem } I_Z \approx 2,8 \text{ A}.$$

$$P_Z = 15 \text{ V} \cdot 2,8 \text{ A} = 42 \text{ W}.$$

## Podsumowanie

---

Diody półprzewodnikowe są jednym z częściej stosowanych dziś elementów obwodów z prądem. Istnieje kilka powodów, dla których cieszą się tak dużą popularnością:

- Mają niewielkie rozmiary.
- Właściwie stosowane są bardzo wytrzymałe i charakteryzują się dużą stabilnością parametrów. Musisz jedynie pamiętać, że duże napięcie w polaryzacji zaporowej oraz duży prąd płynący przez spolaryzowaną zaporowo diodę mogą ją trwale uszkodzić lub całkowicie zniszczyć.
- Używanie diod jest wyjątkowo proste, ponieważ wymaga wykonania tylko dwóch połączeń.
- Diody są tanie.
- Można je stosować we wszystkich rodzajach obwodów elektronicznych — od prostych obwodów prądu stałego do skomplikowanych układów radioodbiorników i telewizorów.
- Stosuje się je przy różnych napięciach i w różnych przedziałach mocy.
- Specjalnie przygotowane diody (o których tu nie wspominaliśmy) oferują funkcje niedostępne w innych podzespołach elektronicznych.
- Jak przekonasz się w czasie lektury następnego rozdziału, złącze znane z diody jest nieodłącznym elementem budowy tranzystora.

Wszystkie zastosowania, które znajdujemy dla diod półprzewodnikowych, wynikają z faktu, że dioda przewodzi prąd **tylko w jednym kierunku**. Diody wykorzystuje się do:

- chronienia innych elementów układu przed skokami napięcia,
- przekształcania prądu zmiennego w prąd trwały,
- tworzenia szybko działających przełączników,
- prostowania sygnałów nadawanych w częstotliwościach radiowych.

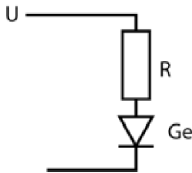
## Test zrozumienia

---

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień przedstawionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń i rysowania wykresów oraz schematów obwodów użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

1. Narysuj symbol diody i podpisz jej końcówki.
2. Z jakich materiałów wytwarza się diody?

3. Narysuj schemat układu zbudowanego z baterii, opornika i diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia.
4. Jaki prąd płynie przez diodę idealną spolaryzowaną zaporowo?
5. Naszkicuj charakterystykę prądowo-napięciową typowej diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia. Zaznacz na niej napięcie progowe.
6. Ile wynosi napięcie progowe dla diody krzemowej?
7. Ile wynosi napięcie progowe dla diody germanowej?
8. W obwodzie przedstawionym na rysunku 2.31  $U = 10 \text{ V}$ , a  $R = 100 \Omega$ . Oblicz prąd płynący przez diodę. Załóż, że masz do czynienia z diodą doskonałą.



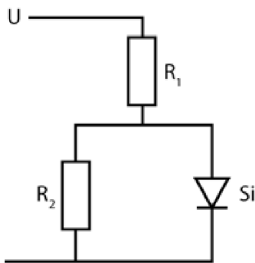
Rysunek 2.31

9. Przeprowadź analogiczne obliczenia dla wartości  $U = 3 \text{ V}$  i  $R = 1 \text{ k}\Omega$ .
10. Oblicz prąd płynący przez diodę w obwodzie przedstawionym na rysunku 2.32.

$$U = 10 \text{ V},$$

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega,$$

$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega.$$



Rysunek 2.32

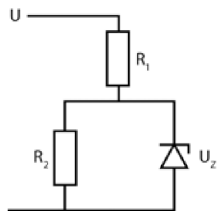
11. Znajdź prąd płynący przez diodę Zenera w obwodzie przedstawionym na rysunku 2.33.

$$U = 20 \text{ V},$$

$$U_Z = 10 \text{ V},$$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega,$$

$$R_2 = 2 \text{ k}\Omega.$$



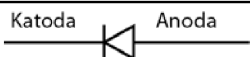
Rysunek 2.33

12. Jak zmieni się prąd płynący przez diodę Zenera w zadaniu 10., jeśli napięcie źródła zwiększy się do 45 V?
13. Jaka maksymalna moc wydzieli się na diodach w zadaniach 10. i 11.?

### Odpowiedzi do testu zrozumienia

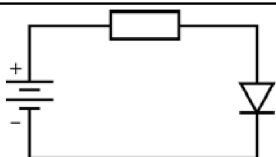
Jeśli otrzymane odpowiedzi nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdziesz do następnego rozdziału.

1. Patrz rysunek 2.34. (problem 3.)



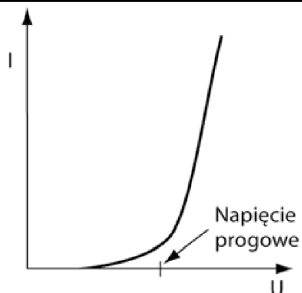
Rysunek 2.34

2. Z germanu i krzemu. (problem 1.)
3. Patrz rysunek 2.35. (problem 4.)



Rysunek 2.35

4. Przez taką diodę nie popłynie żaden prąd. (problem 6.)
5. Patrz rysunek 2.36. (problemy 9. i 10.)



Rysunek 2.36

6. Dla diody krzemowej — 0,7 V, dla diody germanowej — 0,3 V (to wartości przybliżone). (problem 10.)

---

7.	$I_D = 100 \text{ mA}$ .	(problem 14.)
8.	Dla $U = 3 \text{ V}$ nie można ignorować spadku napięcia na diodzie, dlatego $I_D = 2,7 \text{ mA}$ .	(problem 14.)
9.	W tym przypadku można zignorować spadek napięcia na diodzie, stąd $I_D = 0,3 \text{ mA}$ . Jeżeli nie pominiesz $U_D$ , wtedy $I_D = 0,23 \text{ mA}$ .	(problem 21.)
10.	$I_Z = 5 \text{ mA}$ .	(problem 31.)
11.	$I_Z = 30 \text{ mA}$ .	(problem 31.)
12.	Maksymalna moc wydzieli się, gdy $I_Z$ przyjmie wartość maksymalną, czyli $30 \text{ mA}$ . Stąd $P_{Z, \text{MAX}} = 0,30 \text{ W}$ .	(problem 33.)

---



# Wprowadzenie do tranzystorów

Tranzystor to niewątpliwie najważniejszy wynalazek w dziejach współczesnej elektroniki. Od 1948 roku, gdy tego rodzaju elementy obwodów pojawiły się po raz pierwszy, zdołaliśmy poczynić ogromne i daleko sięgające zmiany w tworzeniu układów elektronicznych.

W tym rozdziale skupimy się na przedstawieniu możliwości wykorzystania tranzystora w charakterze prostego przełącznika mechanicznego, co zresztą jest do dziś jednym z podstawowych zastosowań tego elementu. Tranzystor w obwodzie w pewnych warunkach przewodzi prąd, w innych uniemożliwia jego przepływ, czyli działa dokładnie tak, jak przełącznik mechaniczny.

W większości układów elektronicznych pojawiają się **bipolarne tranzystory złączowe** (ang. *bipolar junction transistor* — BJT), nazywane zazwyczaj po prostu tranzystorami bipolarnymi, **tranzystory polowe złączowe** (ang. *junction field effect transistors* — JFET) oraz **tranzystory polowe z izolowaną bramką typu metal – tlenek – półprzewodnik** (ang. *metal oxide silicon field effect transistor* — MOSFET). W tym rozdziale, a także w rozdziałach 4. i 8., przedstawimy zasadę pracy tranzystorów BJT oraz JFET. Nie będziemy w ogóle omawiać tranzystorów MOSFET, ponieważ tryb ich pracy jest bardzo zbliżony do działania tranzystorów JFET.

Doświadczenie zaproponowane w dalszej części rozdziału pozwoli Ci zbudować prosty, jednotranzystorowy obwód przełączający. Do wykonania takiego układu wystarczą Ci narzędzia znajdujące się w domowym schowku z narzędziami. Radzimy Ci poświęcić nieco czasu na zdobycie elementów niezbędnych do zmontowania tego obwodu i wykonanie opisanego doświadczenia.

W rozdziale 4. będziemy nadal zajmować się projektami obwodów przełączających, w których funkcję przełącznika pełni tranzystor. Z rozdziału 8. dowiesz się natomiast, jak wykorzystać tranzystor w charakterze wzmacniacza.

Sygnał wychodzący z tranzystora pracującego w takiej roli jest wzmocnieniem sygnału wejściowego. Ta zdolność tranzystorów znalazła szerokie zastosowanie w elektronice. Wiedza zawarta w rozdziałach 3., 4. i 8. pozwoli Ci w łatwy i przystępny sposób zrozumieć działanie i wykorzystanie tranzystorów w prostych układach elektronicznych.

Po zakończeniu pracy z tym rozdziałem będziesz:

- znać najprostszą konstrukcję bipolarnego tranzystora złączonego (BJT);
- umiać opisać najprostszą konstrukcję tranzystora polowego złączonego (JFET);
- umiać określić zależność pomiędzy prądami bazy i kolektora w tranzystorach typu BJT;
- potrafił podać zależność łączącą prąd bazy z prądem kolektora w tranzystorach typu JFET;
- umiać obliczyć wzmocnienie prądowe w tranzystorze BJT;
- wiedział, co łączy tranzystor z najprostszym przełącznikiem mechanicznym.

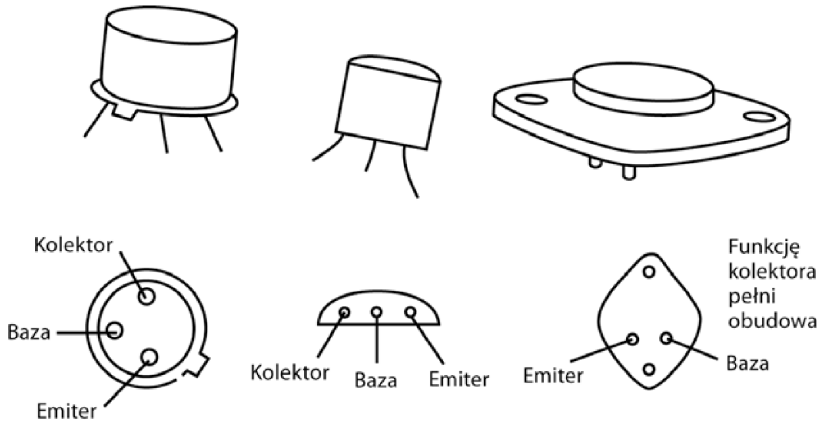
## **Czym jest tranzystor?**

---

**1** Szkice przedstawione na rysunku 3.1 przedstawiają kształty najczęściej stosowanych obudów tranzystorów. Obudowa pozwala chronić kostkę półprzewodnika, z którego jest zbudowany tranzystor, oraz wyprowadza styki, którymi można połączyć układ półprzewodników z innymi elementami obwodu. Pod schematem przedstawiającym kształt obudowy znajdziesz szkice ilustrujące rozmieszczenie poszczególnych styków tranzystora, pozwalające rozpoznać rodzaj każdego z nich po kształcie obudowy. Tranzystory można włutować bezpośrednio w obwód, umieszczając je w odpowiednich gniazdach lub wstawiać w płytki prototypowe. Podczas lutowania należy uważać, by nie przegrzać tranzystora, ponieważ można go w ten sposób nieodwracalnie uszkodzić. Aby uniknąć przegrzania, styki tranzystora łączy się z umieszczanym między lutem a obudową odbiornikiem ciepła. Jeśli planujesz używać gniazda, wlutuj je najpierw do obwodu, a dopiero później umieść w nim tranzystor.

### **Zadania**

- A. Ile styków ma przeciętny tranzystor?
- B. Co pełni funkcję trzeciego styku tranzystora, gdy widoczne są tylko dwa?
- C. Jak nazywają się styki tranzystora?
- D. Dlaczego w czasie wlotowywania tranzystora do obwodu należy zachować ostrożność?

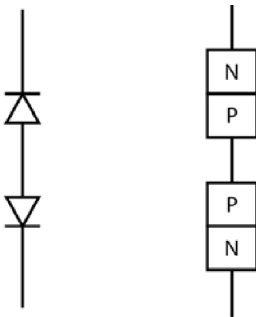


Rysunek 3.1

**Odpowiedź**

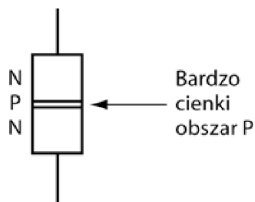
- A. Trzy.
- B. Funkcję trzeciego styku pełni wtedy obudowa tranzystora, co ilustruje trzeci szkic na rysunku 3.1. (Tego rodzaju obudowy stosuje się w tranzystorach mocy).
- C. Emiter, baza i kolektor.
- D. Nadmierna temperatura może doprowadzić do uszkodzenia tranzystora.

**2** Tranzystor bipolarny przypomina układ dwóch diod połączonych ze sobą „plecami”. Układ taki przedstawiono na rysunku 3.2.



Rysunek 3.2

Jednak w procesie technologicznym wprowadza się jedną bardzo istotną zmianę — zamiast dwóch osobnych obszarów P widocznych na rysunku 3.2 wytwarza się tylko jeden, bardzo cienki obszar typu P. Budowa tranzystora została przedstawiona schematycznie na rysunku 3.3.

**Rysunek 3.3****Zadanie**

W którym z elementów półprzewodnikowych znajduje się grubszy obszar półprzewodnika typu P — w tranzystorze przedstawionym na rysunku 3.3 czy dwóch połączonych ze sobą diodach?

**Odpowiedź**

W dwóch diodach. Obszar typu P w tranzystorze jest bardzo cienki.

**3** W rzeczywistości obszar typu P w dwóch połączonych ze sobą diodach byłby zbyt gruby, by taki układ mógł działać jak tranzystor. Próba wyjaśnienia przyczyn takiego stanu rzeczy wymagałaby zagłębienia się w fizykę półprzewodników, co wykracza poza materiał przedstawiany w tej książce.

**Zadanie**

Dlaczego układ dwóch diod zwróconych do siebie obszarami P nie będzie działał jak tranzystor?

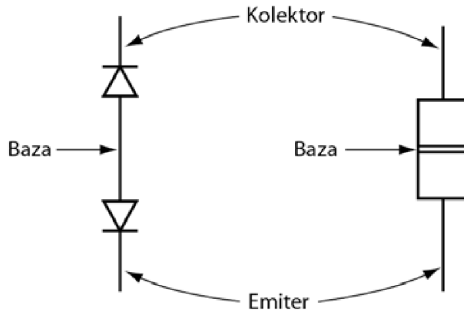
**Odpowiedź**

W tranzystorze znajduje się jeden bardzo cienki obszar półprzewodnika typu P, natomiast w układzie dwóch diod występują dwa grube obszary P.

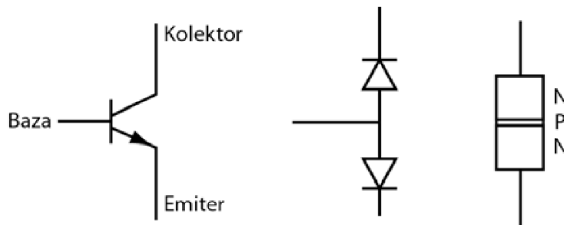
**4** Styki tranzystora (baza, emiter i kolektor) łączy się w sposób przedstawiony na rysunku 3.4.

W opisach porównujących tranzystor do układu dwóch diod pojawiają się zazwyczaj określenia **dioda baza-emiter** i **dioda baza-kolektor**.

W schematach obwodów elektrycznych tranzystor oznacza się symbolem przedstawionym na rysunku 3.5. Obok znajdziesz też odpowiadający mu układ dwóch diod oraz schematyczne przedstawienie rozmieszczenia warstw półprzewodnika wewnątrz tranzystora. Tego rodzaju tranzystory nazywamy tranzystorami *npn*.



Rysunek 3.4



Rysunek 3.5

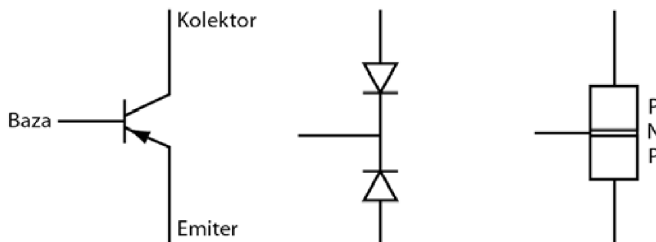
### Zadanie

Który ze styków tranzystora oznaczamy strzałką?

#### Odpowiedź

Strzałką oznacza się emiter.

**5** Wytwarza się także tranzystory o układzie *pn*p. Symbol takiego tranzystora, odpowiadający mu układ diod oraz schemat rozmieszczenia w tranzystorze warstw półprzewodnika przedstawiliśmy na rysunku 3.6.



Rysunek 3.6

Tranzystory *npn* i *pnp* wykonuje się z krzemu lub z germanu.

### Zadania

- A. Narysuj symbole, którymi w schematach obwodów elektrycznych oznacza się tranzystory *npn* i *pnp*. (Rysunki wykonaj na osobnej kartce papieru).
- B. Który z tych tranzystorów może być wykonany z krzemu?
- C. Czy wykonuje się tranzystory z połączenia krzemu i germanu?

### Odpowiedzi

A. Patrz rysunek 3.7.

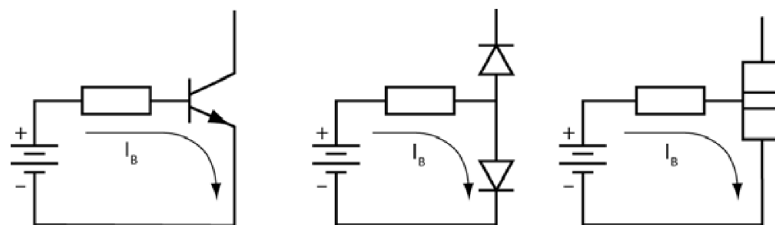


Rysunek 3.7

- B. Obydwa mogą być wykonane z krzemu. (Tak samo jak obydwie mogą być wykonane z germanu).
- C. W tranzystorach dostępnych na rynku **nie** wykorzystuje się połączenia krzemu z germanem, natomiast prowadzi się badania nad uzyskaniem bardzo szybkich tranzystorów krzemowo-germanowych.

**6** Przyjrzyj się prostym przykładom wykorzystania tranzystorów *npn*, z jakimi będziesz mieć do czynienia w kilku następujących zadaniach.

Podłączenie tranzystora *npn* do źródła zasilania w sposób przedstawiony na rysunku 3.8 spowoduje przepływ prądu w zaznaczonym kierunku.



Rysunek 3.8

Prąd płynący przez diodę baza-emiter nazywa się **prądem bazy** i oznacza symbolem  $I_B$ .

**Zadanie**

Czy prąd bazy popłynąłby, gdyby podłączyć odwrotnie bieguny baterii? Uzasadnij odpowiedź.

**Odpowiedź**

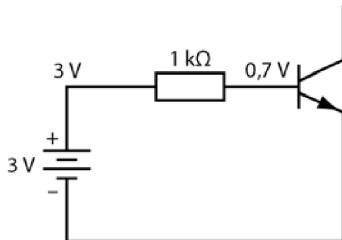
Prąd bazy nie popłynąłby, ponieważ dioda baza-emiter byłaby spolaryzowana w kierunku zaporowym.

**7** Wiedza zdobyta w czasie lektury rozdziału 2. pozwoli Ci obliczyć prąd bazy w układzie przedstawionym na rysunku 3.9.

**Zadanie**

Oblicz prąd bazy w obwodzie przedstawionym na rysunku 3.9. (**Podpowiedź:** Nie pomijaj spadku napięcia wielkości 0,7 V na diodzie baza-emiter).

$I_B =$



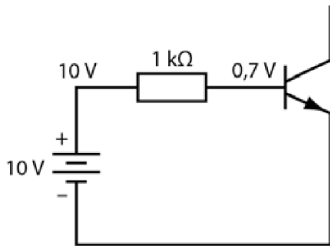
**Rysunek 3.9**

**Odpowiedź**

Twoje obliczenia powinny wyglądać mniej więcej tak:

$$I_B = \frac{U - 0,7 \text{ V}}{R} = \frac{3 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = \frac{2,3 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 2,3 \text{ mA} .$$

**8** Obwód przedstawiony na rysunku 3.10 jest zasilany z baterii dziesięciowoltowej. Dziesięć woltów to znacznie więcej niż przyjmowany spadek napięcia na diodzie równy 0,7 V, dlatego w tym przypadku możesz założyć, że układ baza-emiter zachowuje się jak dioda idealna, i przyjmując spadek napięcia na nim 0 V.



Rysunek 3.10

**Zadanie**

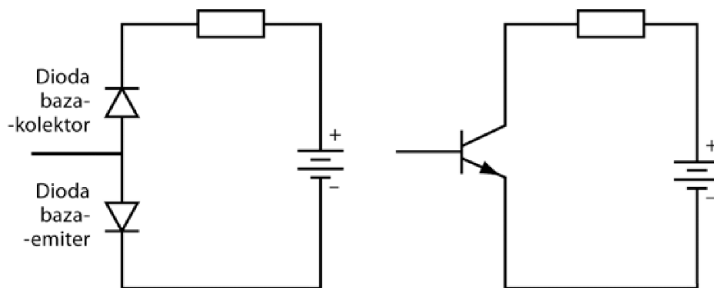
Oblicz prąd bazy.

$$I_B =$$

**Odpowiedź**

$$I_B = \frac{10\text{V} - 0\text{V}}{1\text{k}\Omega} = \frac{10\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 10\text{mA} .$$

9 Spójrz na obwód przedstawiony na rysunku 3.11.



Rysunek 3.11

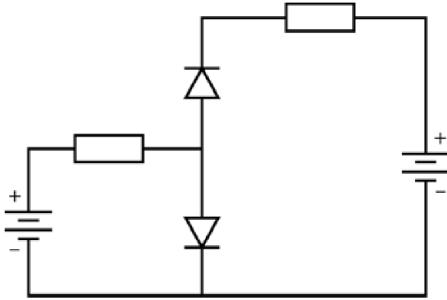
**Zadanie**

Czy w tym obwodzie popłynie prąd? Uzasadnij swoją odpowiedź.

**Odpowiedź**

Nie popłynie, ponieważ dioda baza-kolektor jest spolaryzowana w kierunku wstecznym.

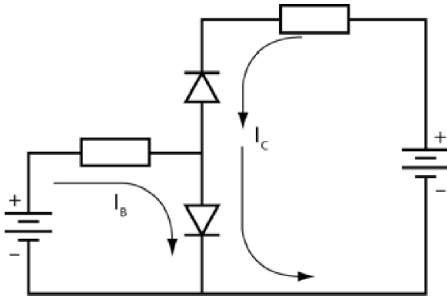
**10** Przyjrzyj się uważnie schematowi przedstawionemu na rysunku 3.12. Zauważ, że baterie są podłączone zarówno do obwodu bazy, jak i do obwodu kolektora.



Rysunek 3.12

Po podłączeniu obydwu baterii do obwodów bazy i kolektora ujawnia się najważniejsza cecha tranzystora. Określa się ją czasami mianem **efektu tranzystorowego** — **przepływ prądu bazy wywołuje przepływ prądu kolektora**.

Kierunki przepływu obydwu prądów zostały zaznaczone na rysunku 3.13.



Rysunek 3.13

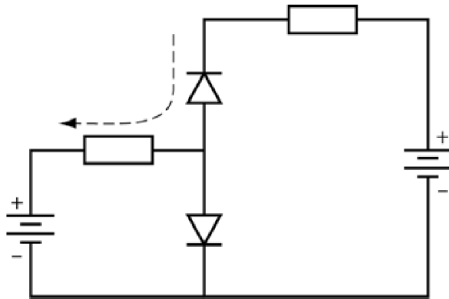
### Zadania

- Jaki prąd popłynie przez diodę baza-kolektor?
- Jaki prąd popłynie przez diodę baza-emiter?
- Który z tych prądów wywołuje przepływ drugiego?

### Odpowiedzi

- $I_C$  — prąd kolektora.
- $I_B$  oraz  $I_C$ . Zauważ, że obydwa będą przepływać przez diodę baza-emiter.
- Prąd bazy wywołuje przepływ prądu kolektora.

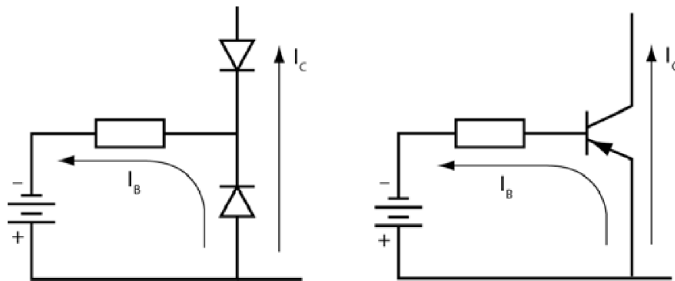
W kierunku oznaczonym na rysunku 3.14 przerywaną linią — od kolektora do bazy — nie płynie żaden prąd.



Rysunek 3.14

**11** Do tej pory zajmowaliśmy się wyłącznie tranzystorem bipolarnym typu *nnp*. Tranzystory bipolarne *pnp* działają tak samo i są również wykorzystywane w układach elektronicznych.

Obydwa typy tranzystorów dzieli jedno — „diody” tworzące tranzystor *pnp* są zwrócone do siebie, odwrotnie niż w tranzystorze *nnp*. Sytuację tę ilustruje rysunek 3.15.



Rysunek 3.15

### Zadania

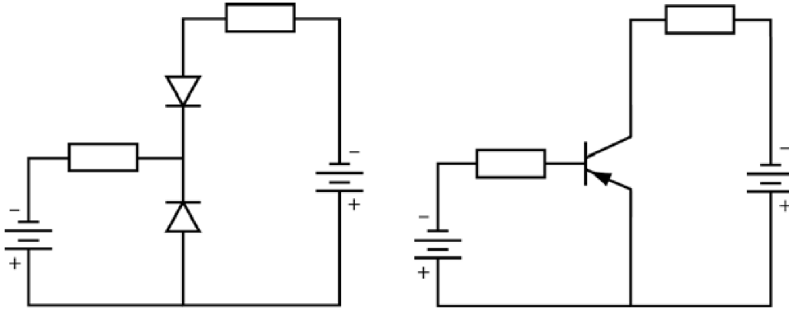
Porównaj rysunek 3.13 z rysunkiem 3.15. Czym różnią się obydwa schematy w następujących aspektach?

- A. Sposób podłączenia baterii.
- B. Kierunek przepływu prądu.

### Odpowiedzi

- A. Baterie są odwrotnie spolaryzowane.
- B. Prądy w obwodach płyną w przeciwnych kierunkach.

**12** Rysunek 3.16 przedstawia sposoby podłączania baterii umożliwiające przepływ prądów bazy i kolektora w obwodach, w których używamy tranzystorów *pnp*.



Rysunek 3.16

### Zadanie

W jakim kierunku będą płynąć prądy kolektora i bazy — zgodnie z ruchem wskazówek zegara czy przeciwnie do niego?

### Odpowiedzi

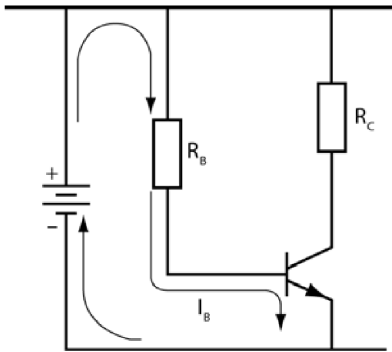
Prąd bazy popłynie przeciwnie do ruchu wskazówek zegara.  
Prąd kolektora popłynie zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

Jak już wspominaliśmy, tranzystory *npn* i *pnp* działają bardzo podobnie — w obydwu prąd bazy wzbudza przepływ prądu kolektora. Jediną istotną różnicą jest polaryzacja źródła zasilania (tak bazy, jak i kolektora) — odwrotna w obydwu przypadkach. Aby uniknąć zbędnego zamieszania, w dalszej części książki będziemy mówić wyłącznie o tranzystorach bipolarnych typu *npn*.

**13** Spójrz na schemat obwodu przedstawiony na rysunku 3.17. Baza i kolektor są zasilane z jednego źródła prądu. Kierunek przepływu prądu został zaznaczony strzałkami.

### Zadania

- Nazwij wszystkie elementy układu, przez które przepływa prąd.
- Do którego styku tranzystora wpływa prąd bazy?
- Z którego styku wypływa prąd bazy?
- Przez które styki tranzystora nie przepływa prąd bazy?



Rysunek 3.17

**Odpowiedzi**

- A. Bateria, opornik  $R_B$  oraz tranzystor.
- B. Do bazy.
- C. Z emitera.
- D. Przez kolektor.

**14** Przypomnij sobie podstawową cechę tranzystora.

**Zadanie**

Gdy w obwodzie przedstawionym na rysunku 3.17 pojawi się prąd bazy, jaki jeszcze prąd popłynie przez obwód? Przez które jego elementy?

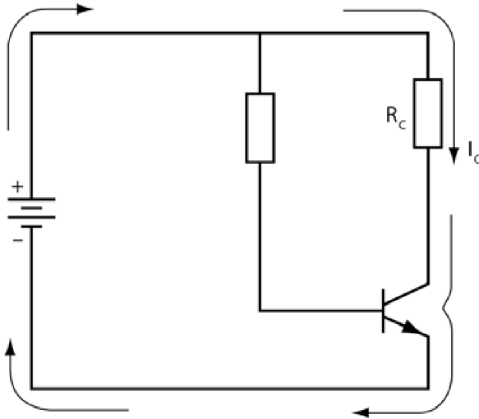
**Odpowiedź**

Przez opornik  $R_C$  i tranzystor popłynie prąd kolektora.

**15** Strzałki na rysunku 3.18 wskazują ścieżki przepływu prądu kolektora przez obwód.

**Zadania**

- A. Wymień elementy obwodu, przez które przepływa prąd kolektora.
- B. Czym jest spowodowany przepływ prądu kolektora?



Rysunek 3.18

**Odpowiedzi**

- A. Opornik  $R_C$ , tranzystor i bateria.
- B. Przepływem prądu bazy. (Prąd kolektora nie popłynie, dopóki nie popłynie prąd bazy).

**16** Tranzystor charakteryzuje się **stałym stosunkiem prądu bazy do prądu kolektora**. Prąd kolektora jest zawsze znacznie większy od prądu bazy. Stosunek obydwu wartości nazywamy **wzmocnieniem prądowym** i oznaczamy symbolem  $\beta$ . Parametr  $\beta$  przyjmuje zazwyczaj wartości z przedziału od 10 do 300.

**Zadania**

- A. Jak nazywamy stosunek prądu kolektora do prądu bazy?
- B. Jakim symbolem oznaczamy tę wartość?
- C. Która z wielkości jest większa — prąd bazy czy prąd kolektora?
- D. Spójrz ponownie na schemat obwodu z problemu 13. Przez który z oporników —  $R_B$  czy  $R_C$  — popłynie większy prąd?

**Odpowiedzi**

- A. Stosunek tych wielkości nazywamy wzmocnieniem prądowym.
- B. Wzmocnienie prądowe oznaczamy symbolem  $\beta$ .
- C. Większy jest prąd kolektora.
- D. Większy prąd — prąd kolektora — popłynie przez opornik  $R_C$ .

**UWAGA** Parametr, który oznaczamy tu symbolem  $\beta$ , przez producentów jest opisywany jako  $h_{FE}$ . Nazywa się go statycznym  $\beta$  lub DC  $\beta$ . W tym rozdziale ograniczymy się do stosowania oznaczenia  $\beta$ . Ogólny opis parametrów tranzystorów jest dostępny w większości podręczników, więc nie będziemy go tu powielać.

**17** Wzmocnienie prądowe jest opisane następującym wzorem:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B},$$

gdzie:

$I_B$  — prąd bazy,

$I_C$  — prąd kolektora.

Po przekształceniu otrzymujemy wyrażenie  $I_C = \beta \cdot I_B$ , z którego jasno wynika, że brak prądu bazy oznacza jednocześnie brak prądu kolektora. Z tego samego równania wynika jednocześnie, iż im większy będzie prąd bazy, tym większy popłynie w obwodzie prąd kolektora. Dlatego właśnie mówimy, że „prąd bazy kontroluje przepływ prądu kolektora”.

### Zadanie

Założmy, że prąd bazy wynosi 1 mA, a prąd kolektora to 150 mA. Jakie będzie wzmocnienie prądowe tego tranzystora?

#### Odpowiedź

Wzmocnienie prądowe wyniesie 150.

**18** Wzmocnienie prądowe jest fizyczną cechą każdego tranzystora. Jego wartości są podawane w opisach elementów publikowanych przez producentów, można też zbadać je doświadczalnie.

Ogólnie wzmocnienie prądowe tranzystorów pochodzących z różnych partii nieco się różni, ale dla elementów z jednej partii jego wartości pozostają zazwyczaj w dość wąskim zakresie.

W czasie opisu właściwości tranzystora najczęściej dokonuje się właśnie obliczenia prądu bazy bądź prądu kolektora przy znanej wartości parametru  $\beta$  oraz drugiego prądu.

Założmy na przykład, że przez tranzystor płynie prąd kolektora o natężeniu 500 mA, a wzmocnienie prądowe  $\beta$  w tym elemencie wynosi 100. Gdybyś miał znaleźć prąd bazy, musiałbyś skorzystać z następującej zależności:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}; \quad I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{500 \text{ mA}}{100} = 5 \text{ mA}.$$

**Zadania**

Mając dane dwie wielkości, oblicz wartość trzeciej.

- A.  $I_C = 2 \text{ A}$ ,  $\beta = 20$ . Znajdź  $I_B$ .
- B.  $I_B = 1 \text{ mA}$ ,  $\beta = 100$ . Znajdź  $I_C$ .
- C.  $I_B = 1 \text{ }\mu\text{A}$ ,  $\beta = 250$ . Znajdź  $I_C$ .
- D.  $I_B = 0,1 \text{ mA}$ ,  $I_C = 100$ . Znajdź  $\beta$ .

**Odpowiedzi**

- A. 0,1 A lub 100 mA.
- B. 100 mA.
- C. 2500  $\mu\text{A}$  lub 2,5 mA.
- D. 75.

**19** Ten problem stanowi podsumowanie wiedzy zebranej w pierwszej części rozdziału. Powinieneś móc bez problemu rozwiązać wszystkie zadania i odpowiedzieć na zadane pytania. Obliczenia i rysunki wykonuj na osobnej kartce.

**Zadania**

- A. Narysuj schemat obwodu, w którym znajdzie się tranzystor *npn*, opornik połączony z bazą, opornik połączony z kolektorem oraz bateria zasilająca bazę i kolektor. Zaznacz kierunek przepływu prądów  $I_B$  oraz  $I_C$ .
- B. Który z prądów wywołuje przepływ drugiego?
- C. Który z prądów —  $I_B$  czy  $I_C$  — będzie większy?
- D.  $I_B = 6 \text{ }\mu\text{A}$ ,  $\beta = 250$ . Znajdź  $I_C$ .
- E.  $I_C = 300 \text{ }\mu\text{A}$ ,  $\beta = 50$ . Znajdź  $I_B$ .

**Odpowiedzi**

- A. Patrz rysunki 3.17 i 3.18.
- B. Prąd bazy ( $I_B$ ) kontroluje przepływ prądu kolektora ( $I_C$ ).
- C.  $I_C$  będzie większy.
- D. 1,5 mA.
- E. 6 mA.

## Doświadczenie

**20** Celem tego doświadczenia jest znalezienie wartości parametru  $\beta$  dla konkretnego tranzystora. Eksperyment będzie polegać na zmierzeniu kilku wartości prądów bazy oraz prądów kolektora. Następnie wyznaczysz wartość symbolu  $\beta$ , dzieląc wartość prądu kolektora przez wartość prądu bazy. Należy spodziewać się, że wartości  $\beta$  będą do siebie bardzo zbliżone we wszystkich przypadkach, ponieważ  $\beta$  ma być wartością stałą dla tranzystora.

Po zmontowaniu układu zmierz także napięcie kolektora dla każdej wartości prądu. Będzie to doświadczalne potwierdzenie kilku właściwości tranzystorów, o których wspomniemy w dalszej części rozdziału. Prowadząc pomiary, zwróć uwagę, że wzrost prądu kolektora powoduje stopniowy spadek napięcia kolektora  $U_C$  do wartości 0 V.

Jeżeli nie masz warunków do zbudowania tego układu i nie dysponujesz sprzętem pozwalającym dokonać pomiarów, zapoznaj się z podanymi przez nas wartościami. Jeśli możesz wykonać to doświadczenie, przygotuj:

- jedną baterię do zasilania radia tranzystorowego o napięciu 9 V (bądź laboratoryjny generator);
- jeden miernik uniwersalny, którym zmierzysz prąd o natężeniu przynajmniej 100  $\mu\text{A}$ ;
- jeden miernik uniwersalny, którym zmierzysz prąd o natężeniu przynajmniej 10 mA;
- jeden miernik uniwersalny, którym zmierzysz napięcie rzędu co najmniej 10 V;
- opornik dekadowy, potencjometr 1 M $\Omega$  lub zestaw odpowiednich oporników (wartości podane w tabeli); jeśli zdecydujesz się korzystać z potencjometru, będziesz musiał użyć dodatkowego miernika, by sprawdzić wartość oporu po każdej zmianie ustawień;

**R<sub>6</sub>**

1 M $\Omega$
680 k $\Omega$
470 k $\Omega$
330 k $\Omega$
270 k $\Omega$
220 k $\Omega$
200 k $\Omega$
180 k $\Omega$
160 k $\Omega$
150 k $\Omega$
120 k $\Omega$
110 k $\Omega$
100 k $\Omega$



1. Wybierz największą wartość oporu  $R_B$ .
2. Zmierz i zapisz wartość  $I_B$ .
3. Zmierz i zapisz wartość  $I_C$ .
4. Zmierz i zapisz wartość  $U_C$ . Napięcie to nazywa się czasami także **napięciem kolektor – emiter** ( $U_{CE}$ ), ponieważ mierzy się je między stykami kolektora i emitera, gdy emiter jest uziemiony lub podłączony do ujemnego bieguna baterii.
5. Obniż wartość  $R_B$  tak, by zmienił się prąd  $I_B$ .
6. Zmierz i zapisz nowe wartości  $R_B$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  oraz  $U_C$ .
7. Obniż ponownie wartość  $R_B$  i zmierz nową wartość  $I_B$ .
8. Po raz kolejny zmierz i zapisz wartości  $R_B$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  oraz  $U_C$ .
9. Powtarzaj kroki 7. i 8. tak długo, aż  $U_C$  osiągnie wartość 0 V.
10. Dalsze obniżanie wartości  $R_B$  będzie zwiększać wartość  $I_B$ , ale nie zmieni już wartości  $I_C$  ani  $U_C$ .

Sprawdź zebrane wyniki i upewnij się, że widać w nich wyraźny schemat. Następnie porównaj je z danymi zaprezentowanymi w poniższej tabeli.

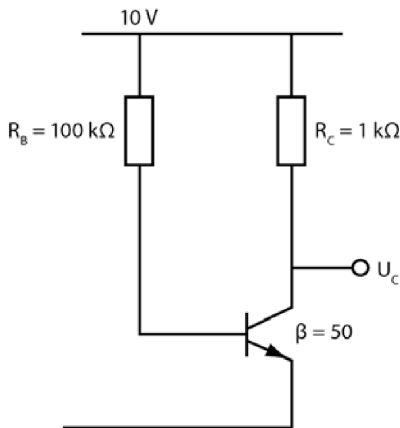
$R_B$	$I_B$	$I_C$	$U_C$	$\beta$
1 M $\Omega$	9 $\mu$ A	0,9 mA	8,1 V	100
680 k $\Omega$	13 $\mu$ A	1,3 mA	7,7 V	100
470 k $\Omega$	19 $\mu$ A	1,9 mA	7,1 V	100
330 k $\Omega$	27,3 $\mu$ A	2,8 mA	6,2 V	103
270 k $\Omega$	33,3 $\mu$ A	3,3 mA	5,7 V	99
220 k $\Omega$	40 $\mu$ A	4,1 mA	5,0 V	103
200 k $\Omega$	45 $\mu$ A	4,5 mA	4,5 V	100
180 k $\Omega$	50 $\mu$ A	5 mA	4,0 V	100
160 k $\Omega$	56 $\mu$ A	5,6 mA	3,4 V	100
150 k $\Omega$	60 $\mu$ A	6 mA	3 V	100
120 k $\Omega$	75 $\mu$ A	7,5 mA	1,5 V	100
110 k $\Omega$	82 $\mu$ A	8,0 mA	1,0 V	98
100 k $\Omega$	90 $\mu$ A	9 mA	0,3 V	100

Pomiary, które wykonywaliśmy na potrzeby tego doświadczenia, były prowadzone z zachowaniem najdalej idącej staranności. Korzystaliśmy z oporników precyzyjnych oraz tranzystora o symbolu handlowym 2N3643. Ty, używając oporników o tolerancji  $\pm 5\%$  i dowolnego innego tranzystora, powinieneś spodziewać się nieco innych wyników. Nie przejmuj się, jeśli nie zdołasz osiągnąć takiej dokładności pomiarów.

Wartości parametru  $\beta$  wynikające z przeprowadzonych obliczeń nie odbiegają znacznie od 100, co zgadza się z danymi podawanymi przez producenta.

Dysponujesz teraz wartościami prądów  $I_B$  oraz  $I_C$ , możesz zatem obliczyć wartość parametru  $\beta$  dla każdej z par, korzystając ze wzoru  $\beta = \frac{I_C}{I_B}$ . Uzyskane wyniki z pewnością będą się od siebie różnić, ale powinny rozkładać się równomiernie wokół pewnej wartości średniej. (Obliczenia prowadzone dla skrajnie dużych i skrajnie małych wartości  $I_B$  mogą dawać wyniki odbiegające od średniej wartości  $\beta$ , więc na razie je pomini). Czy udało Ci się wyznaczyć konkretną wartość  $\beta$ ? Czy zgadza się ona z parametrem podawanym przez producenta?

**21** W czasie doświadczenia mierzyłeś napięcie na kolektorze  $U_C$  i zapisywałeś je w wynikach pomiarów. Zobacz teraz, w jaki sposób można poznać to napięcie, gdy nie ma możliwości zmierzenia go bezpośrednio miernikiem.



**Rysunek 3.20**

Używając wartości podanych na rysunku 3.20, wykonaj obliczenia przedstawione w poniższych krokach.

1. Oblicz wartość  $I_C$ .
2. Określ spadek napięcia na oporniku  $R_C$ . Oznacz tę wartość  $U_R$ .
3. Odejmij wartość  $U_R$  od napięcia podawanego przez źródło. W ten sposób wyznaczysz napięcie na kolektorze.

Oto, jak powinieneś wykonać pierwszy krok obliczeń.

1. Aby odnaleźć  $I_C$ , musisz najpierw obliczyć  $I_B$ .

$$I_B = \frac{10 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 0,1 \text{ mA}.$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 0,1 \text{ mA} = 5 \text{ mA}.$$

Przeprowadź teraz samodzielnie pozostałe obliczenia.

**Zadania**

2.  $U_R =$

3.  $U_C =$

**Odpowiedzi**2. Aby odnaleźć  $U_R$ , należy przeprowadzić następujące obliczenia:

$$U_R = R_C \cdot I_C = 1 \text{ k}\Omega \cdot 5 \text{ mA} = 5 \text{ V}.$$

3. Aby obliczyć  $U_C$ , należy wykonać odejmowanie:

$$U_C = U - U_R = 10 \text{ V} - 5 \text{ V} = 5 \text{ V}.$$

**22** Oblicz teraz wielkości opisujące układ przedstawiony na rysunku 3.20, zakładając  $\beta = 75$ .**Zadania**

Oblicz następujące wartości:

A.  $I_C =$

B.  $U_R =$

C.  $U_C =$

**Odpowiedzi**

A.  $I_B = \frac{10 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 0,1 \text{ mA}.$

$$I_C = 75 \cdot 0,1 \text{ mA} = 7,5 \text{ mA}.$$

B.  $U_R = 1 \text{ k}\Omega \cdot 7,5 \text{ mA} = 7,5 \text{ V}.$

C.  $U_C = 10 \text{ V} - 7,5 \text{ V} = 2,5 \text{ V}.$

**23** Oblicz wielkości opisujące ten sam układ, zakładając  $R_B = 250 \text{ k}\Omega$  i  $\beta = 75$ .**Zadania**

Oblicz następujące wartości:

A.  $I_C =$

B.  $U_R =$

C.  $U_C =$

**Odpowiedzi**

$$\text{A. } I_B = \frac{10 \text{ V}}{250 \text{ k}\Omega} = 0,04 \text{ mA}.$$

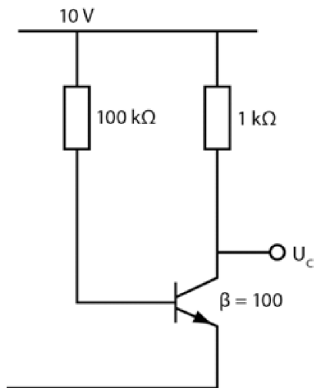
$$I_C = 75 \cdot 0,04 \text{ mA} = 3 \text{ mA}.$$

$$\text{B. } U_R = 1 \text{ k}\Omega \cdot 3 \text{ mA} = 3 \text{ V}.$$

$$\text{C. } U_C = 10 \text{ V} - 3 \text{ V} = 7 \text{ V}.$$

**24** Rozwiązanie poprzednich problemów powinno nauczyć Cię, że wartość  $U_C$  możesz dowolnie regulować, dobierając tranzystor o odpowiedniej wartości  $\beta$  lub wprowadzając do układu starannie dobraną wartość oporu  $R_B$ .

Spójrz teraz na schemat przedstawiony na rysunku 3.21. Twoim celem będzie znalezienie wartości  $U_C$ . By to zrobić, wykonaj kroki opisane w problemie 21.



**Rysunek 3.21**

**Zadania**

Oblicz następujące wielkości:

$$\text{A. } I_B =$$

$$I_C =$$

$$\text{B. } U_R =$$

$$\text{C. } U_C =$$

**Odpowiedzi**

$$\text{A. } I_B = \frac{10 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 0,1 \text{ mA}.$$

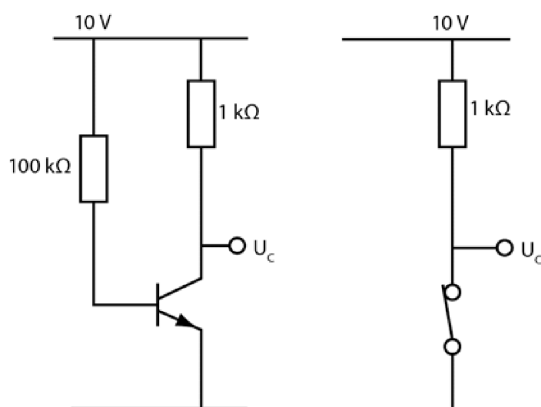
$$I_C = 100 \cdot 0,1 \text{ mA} = 10 \text{ mA}.$$

$$\text{B. } U_R = 1 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ mA} = 10 \text{ V}.$$

$$\text{C. } U_C = 10 \text{ V} - 10 \text{ V} = 0 \text{ V}.$$

W tym przypadku, przy tak określonych wartościach oporu kolektora i napięcia zasilającego, prąd bazy generuje napięcie kolektora o wartości 0 V i maksymalny możliwy prąd kolektora. Mówimy wtedy, że tranzystor wszedł w stan **nasycenia**.

**25** Spójrz na schematy dwóch obwodów przedstawione na rysunku 3.22. Porównaj napięcia  $U_C$  w tych obwodach.



**Rysunek 3.22**

Rozważmy teraz przypadek tranzystora o prądach bazy i kolektora dobranych w taki sposób, by napięcie kolektora wynosiło 0 V. Obwód o tak dobranych parametrach elementów zachowuje się tak samo jak obwód z wyłączonym przełącznikiem mechanicznym. Zatem tranzystory — tak jak przełączniki — mogą znajdować się w stanie włączonym bądź wyłączonym.

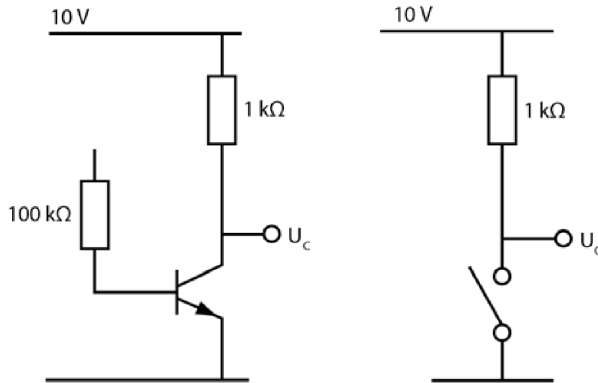
### Zadania

- A. Do czego można porównać włączony tranzystor?
- B. Jakie jest napięcie kolektora w tranzystorze w stanie włączonym?

### Odpowiedzi

- A. Do zamkniętego przełącznika mechanicznego.
- B. 0 V.

**26** Porównaj teraz obwody przedstawione na rysunku 3.23.



**Rysunek 3.23**

Ponieważ obwód bazy jest przerwany (nie jest połączony ze źródłem napięcia), przez układ nie popłynie prąd bazy.

### Zadania

- Jaki prąd kolektora popłynie w przedstawionym obwodzie?
- Jakie napięcie panuje na kolektorze?
- Jakie napięcie panuje w punkcie  $U_C$  w obwodzie z przełącznikiem mechanicznym?

### Odpowiedzi

- Żaden.
- Ponieważ przez opornik  $1\text{ k}\Omega$  nie płynie żaden prąd, przez co nie ma na nim spadku napięcia, zatem napięcie na kolektorze wynosi  $10\text{ V}$ .
- Napięcie w punkcie  $U_C$  wynosi  $10\text{ V}$ , ponieważ przez opornik  $1\text{ k}\Omega$  nie płynie żaden prąd.

**27** Z rozważań przeprowadzonych w problemie 26. wynika jasno, że tranzystor, w którym nie płynie prąd, może być porównany do otwartego przełącznika mechanicznego. Dlatego o tranzystorze, w którym nie płynie prąd kolektora, a napięcie na kolektorze jest równe napięciu podawanemu przez źródło, mówimy, że jest wyłączony.

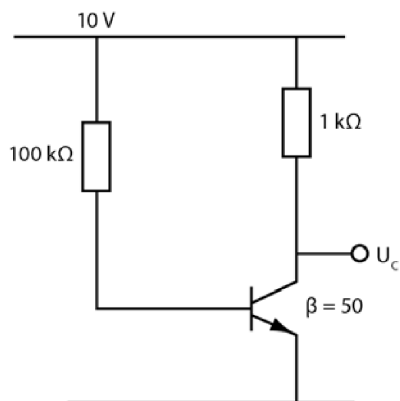
### Zadanie

Podaj dwie cechy charakterystyczne tranzystora w stanie wyłączonym.

**Odpowiedź**

Nie płynie przez niego prąd kolektora, a napięcie na kolektorze jest równe napięciu źródła zasilania.

**28** Oblicz teraz wielkości charakteryzujące obwód przedstawiony na rysunku 3.24 i porównaj wyniki z tymi, które otrzymałeś w problemach 26. i 27. Celem jest, ponownie, określenie wartości  $U_C$ .



Rysunek 3.24

**Zadania**

Oblicz następujące wielkości:

- A.  $I_B =$   
 $I_C =$   
 B.  $U_R =$   
 C.  $U_C =$

**Odpowiedzi**

A.  $I_B = \frac{10 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 0,1 \text{ mA}.$

$I_C = 50 \cdot 0,1 \text{ mA} = 5 \text{ mA}.$

B.  $U_R = 1 \text{ k}\Omega \cdot 5 \text{ mA} = 5 \text{ V}.$

C.  $U_C = 10 \text{ V} - 5 \text{ V} = 5 \text{ V}.$

**UWAGA** Napięcie wyjściowe wyznaczone w tym problemie jest dokładnie połową wartości napięcia zasilającego. Zapewnienie takiego warunku jest bardzo istotne w czasie zasilania obwodu prądem zmiennym. Do tego tematu powrócimy w rozdziale 8.

## Tranzystor polowy złączowy

**29** Do tej pory skupialiśmy się na opisie zagadnień związanych z wykorzystywaniem bipolarnych tranzystorów złączowych (BJT). Teraz zajmiemy się kolejnym popularnym typem tych elementów półprzewodnikowych — tranzystorami polowymi złączowymi (JFET). Tranzystory typu JFET są wykorzystywane w obwodach, podobnie jak tranzystory BJT, w roli przełączników lub w celu realizowania wzmocnienia. Tranzystory JFET stosuje się przede wszystkim, gdy układ ma charakteryzować się wysoką impedancją wejściową. Tranzystory typu BJT mają w porównaniu z tranzystorami JFET stosunkowo niską impedancję wejściową. W tranzystorach JFET wyróżniamy trzy styki — źródło, dren i bramkę. Pełnią one funkcje zbliżone do funkcji emitera, kolektora i bazy.

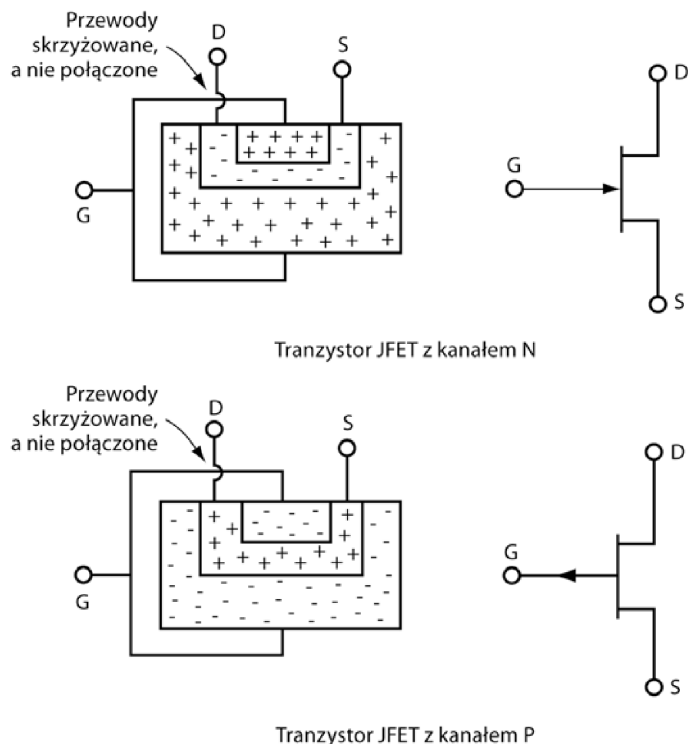
### Zadania

- A. Powiedz, ile styków ma tranzystor typu JFET i jak się one nazywają.
- B. Który ze styków tranzystora typu JFET można porównać do bazy tranzystora BJT?

### Odpowiedzi

- A. Tranzystory JFET mają trzy styki — źródło, dren i bramkę.
- B. Bramka tranzystora JFET pełni funkcję analogiczną do funkcji bazy tranzystora BJT.

**30** Podstawowy projekt tranzystora JFET zakłada wykonanie w materiale półprzewodnikowym jednego typu kanału z materiału półprzewodnikowego przeciwnego typu. Elementy z kanałem wykonanym z materiału typu N nazywamy tranzystorami JFET z kanałem N, natomiast elementy z kanałem wykonanym z materiału typu P nazywamy tranzystorami JFET z kanałem P. Rysunek 3.25 przedstawia schematyczny układ warstw półprzewodników N i P w tranzystorze JFET oraz symbol, jakim ten element jest oznaczany w obwodzie. Napięcie przykładane do bramki pozwala kontrolować przepływ prądu przez dren i źródło przez zwiększenie bądź zmniejszenie czynnej szerokości kanału. W ten sposób napięcie na bramce kontroluje prąd drenu, tak jak napięcie bazy kontrolowało prąd kolektora w tranzystorach BJT.



Rysunek 3.25

### Zadania

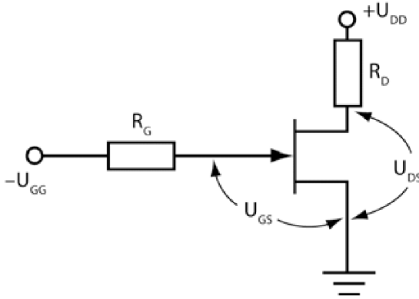
- A. W których tranzystorach typu JFET głównym nośnikiem prądu drenu są elektrony?
- B. Jak zmieni się działanie tranzystora JFET po zmianie napięcia przykładowego do bramki?

### Odpowiedzi

- A. W tranzystorach z kanałem N, ponieważ elektrony są nośnikami prądu w półprzewodnikach typu N.
- B. Po zmianie napięcia bramki zmieni się prąd drenu. Napięcie przykładane do bramki reguluje szerokość kanału w tranzystorze JFET.

**31** Kontrola pracy tranzystora JFET z kanałem N odbywa się poprzez przyłożenie do drenu napięcia dodatniego w stosunku do napięcia podawanego ze źródła. Zapewnienie takiego warunku wywoła przepływ prądu przez kanał. Gdy do bramki przyłożymy napięcie 0 V, przez kanał popłynie największy prąd

drenu umożliwiającą bezpieczne działanie tranzystora. Można wtedy powiedzieć, że tranzystor pracuje w stanie „włączony”. Gdy do bramki przyłożysz napięcie ujemne, prąd drenu zmniejszy się. Dalsze obniżanie napięcia przyłożonego do bramki spowoduje zmniejszanie prądu drenu aż do zupełnego ustania przepływu nośników, co doprowadzi w efekcie do przejścia tranzystora w tryb „wyłączony”. Rysunek 3.26 przedstawia typowy układ polaryzujący tranzystor JFET z kanałem N. W przypadku posługiwania się tranzystorem JFET z kanałem P należy odwrócić polaryzację źródeł zasilania.



Rysunek 3.26

### Zadanie

Porównaj działanie tranzystora JFET w charakterze przełącznika z tą samą rolą tranzystora BJT.

### Odpowiedź

Tranzystor JFET wprowadza się w stan włączenia poprzez przyłożenie zerowego napięcia do bramki, natomiast tranzystor BJT włącza się, przykładając niezerowe napięcie do bazy. Aby wyłączyć tranzystor JFET, trzeba przyłożyć niezerowe napięcie do bramki, z kolei wyłączenie tranzystora BJT polega na przyłożeniu zerowego napięcia do bazy. Tranzystory JFET są „normalnie włączone”, a tranzystory BJT są „normalnie wyłączone”. Tranzystory JFET (tak samo jak BJT) mogą pełnić funkcję przełącznika.

**32** Gdy napięcie pomiędzy bramką a źródłem wynosi  $0\text{ V}$  ( $U_{GS} = 0$ ), w tranzystorze JFET przedstawionym na rysunku 3.26 popłynie maksymalny prąd, tak zwany prąd nasycenia. Oznacza to, że opór kanału wykonanego z półprzewodnika typu N jest wtedy najniższy — utrzymuje się na poziomie od 5 do 200 omów. Gdy opór  $R_D$  jest znacznie większy, przyjmuje się, że wewnętrzna rezystancja  $r_{DS}$  jest tak mała, iż się ją pomija.

**Zadania**

- A. Któremu z położeń przełącznika mechanicznego odpowiadałby opisany tu stan tranzystora i jakie będzie wtedy napięcie dren – źródło ( $U_{DS}$ )?
- B. Gdy potencjał bramki spada względem źródła, oporność kanału N wzrasta aż do chwili osiągnięcia punktu odcięcia. Przyjmuje się, że oporność kanału staje się w tym punkcie nieskończona. Jakiemu położeniu przełącznika mechanicznego odpowiada taki stan? Ile będzie wynosić w nim napięcie dren – źródło?
- C. Jak zachowuje się tranzystor zasilany prądem o wartości leżącej w przedziale między prądem nasycenia a prądem odcięcia?

**Odpowiedzi**

- A. Odpowiada on przełącznikowi zamkniętemu. Napięcie  $U_{DS}$  jest równe zeru lub bardzo bliskie tej wielkości.
- B. Odpowiada on przełącznikowi otwartemu. Napięcie  $U_{DS}$  jest równe napięciu  $U_{DD}$ .
- C. Tranzystor działa wtedy jak opornik z możliwością zmiany rezystancji.

**Podsumowanie**

To odpowiedni moment, by porównać właściwości przełączników mechanicznych z właściwościami obydwu rodzajów tranzystorów. Wyniki analizy znajdziesz w poniższej tabeli.

Przełącznik	Tranzystor BJT	Tranzystor JFET
Wyłączony (otwarty)		
Nie płynie prąd.	Nie płynie prąd kolektora.	Nie płynie prąd rdzenia.
Napięcie źródłowe pomiędzy stykami.	Napięcie źródłowe pomiędzy kolektorem i emiterem.	Napięcie źródłowe pomiędzy drenem i źródłem.
Włączony (zamknięty)		
Płynie prąd.	Prąd płynie w całym obwodzie.	Prąd płynie w całym obwodzie.
Brak napięcia pomiędzy stykami.	Napięcie pomiędzy kolektorem a emiterem wynosi 0 V.	Napięcie pomiędzy drenem a źródłem wynosi 0 V.

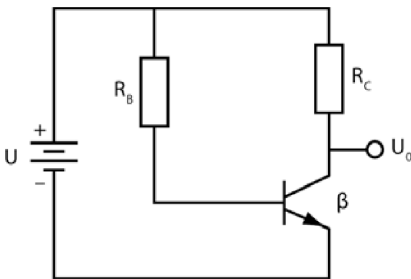
Pojęcia „włączony” i „wyłączony” (ON i OFF) są stosowane w elektronice cyfrowej do opisanego wspomnianych przed chwilą stanów tranzystora. Zachowanie tranzystora analogiczne do zachowania przełącznika mechanicznego jest wykorzystywane w wielu obwodach. W rozdziale 4. wyjaśnimy bardziej

szczegółowo zagadnienia związane z tym trybem pracy tranzystora. Ten rozdział stanowi pierwszy krok na drodze do zrozumienia elektroniki cyfrowej. W rozdziale 8. przedstawimy zachowanie tranzystora pracującego w warunkach przypadających między stanami ON i OFF. Tranzystor pracujący w takim trybie działa jak opornik z możliwością zmiany rezystancji i jest wykorzystywany jako wzmacniacz.

## Test zrozumienia

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień przedstawionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń i rysowania wykresów oraz schematów obwodów użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

1. Narysuj symbole, jakimi w schematach układów elektronicznych oznacza się tranzystory *npn* i *pnp*. Opisz ich styki.
2. Zaznacz na rysunku 3.27 przepływ prądu bazy i prądu kolektora.



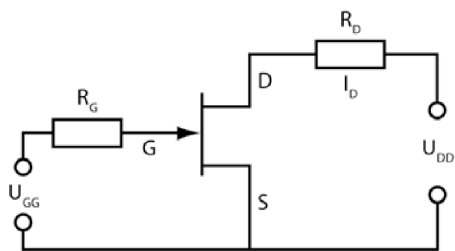
Rysunek 3.27

3. Co powoduje przepływ prądu kolektora?
4. Co rozumie się pod pojęciem **wzmocnienie prądowe**? Jakim symbolem oznacza się tę wielkość? Podaj opisujący ją wzór.

Zadania 5 – 10 dotyczą obwodu przedstawionego na rysunku 3.27.

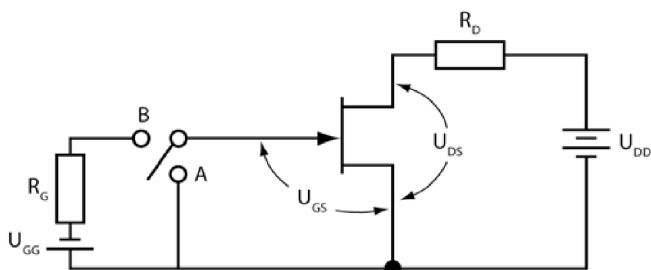
5. Załóż, że w obwodzie znajduje się tranzystor krzemowy. Przyjmij  $R_B = 27 \text{ k}\Omega$  i  $U = 3 \text{ V}$ . Znajdź  $I_B$ .
6. Znajdź  $I_B$ , jeżeli  $R_B = 220 \text{ k}\Omega$  i  $U = 10 \text{ V}$ .
7. Znajdź  $U_0$ , jeżeli  $R_B = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $U = 10 \text{ V}$ ,  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ , a  $\beta = 50$ .
8. Znajdź  $U_0$ , jeżeli  $R_B = 200 \text{ k}\Omega$ ,  $U = 10 \text{ V}$ ,  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ , a  $\beta = 50$ .
9. Użyj podanych wartości, by wyznaczyć  $U_0$ .  $R_B = 47 \text{ k}\Omega$ ,  $U = 10 \text{ V}$ ,  $R_C = 500 \Omega$ ,  $\beta = 65$ .

10. Wykorzystaj podane wartości, by znaleźć  $U_0$ .  $R_B = 68 \text{ k}\Omega$ ,  $U = 10 \text{ V}$ ,  $R_C = 820 \text{ }\Omega$ ,  $\beta = 75$ .
11. Narysuj symbole, jakimi w obwodach oznaczamy obydwie rodzaje tranzystorów polowych złączowych, i opisz ich styki.
12. Powiedz, co pozwala kontrolować przepływ prądu przez tranzystory typu JFET i BJT.
13. Określ polaryzację źródeł napięć w typowym obwodzie zawierającym tranzystor JFET, przedstawionym na rysunku 3.28. Zaznacz przepływ prądu drenu.



Rysunek 3.28

14. Skoro przez włączony tranzystor BJT płynie prąd bazy, dlaczego przez włączony tranzystor JFET nie płynie prąd bramki?
15. Spójrz na obwód przedstawiony na rysunku 3.29 i odpowiedz na następujące pytania:



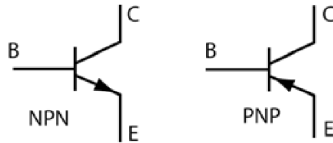
Rysunek 3.29

- A. Jaki będzie prąd rdzenia, gdy przełącznik mechaniczny znajdzie się w położeniu A? Uzasadnij odpowiedź.
- B. Wyjaśnij, jak zmieni się prąd drenu, gdy przy odpowiednim napięciu bramki przełącznik znajdzie się w pozycji B. Odpowiedź uzasadnij.
- C. Jakie napięcie panuje pomiędzy drenem a źródłem w obydwu pozycjach przełącznika?

### Odpowiedzi do testu zrozumienia

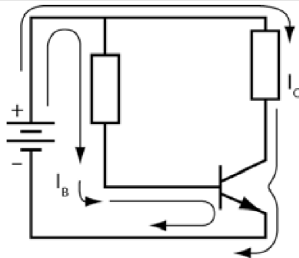
Jeśli otrzymane odpowiedzi nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdziesz do następnego rozdziału.

1. Patrz rysunek 3.30. (problemy 4. i 5.)



Rysunek 3.30

2. Patrz rysunek 3.31. (problemy 13. i 15.)



Rysunek 3.31

3. Prąd bazy. (problem 15.)

4. Wzmocnienie prądowe to stosunek prądu kolektora do prądu bazy. Wielkość tę oznacza się symbolem  $\beta$ . Opisuje ją wzór

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

5.  $I_B = \frac{U - 0,7V}{R_B} = \frac{(3V - 0,7V)}{27k\Omega} = \frac{2,3V}{27k\Omega} = 85\mu A$ . (problem 7.)

6.  $I_B = \frac{10V}{220k\Omega} = 45,45\mu A$ . (problem 7.)

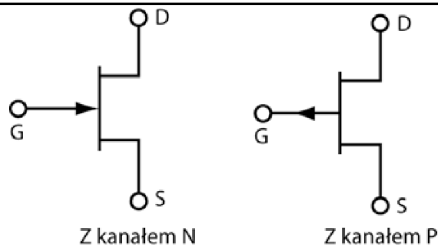
7. 5 V. (problemy 21 – 24)

8. 7,5 V. (problemy 21 – 24)

9. 3,1 V. (problemy 21 – 24)

10. 1 V. (problemy 21 – 24)

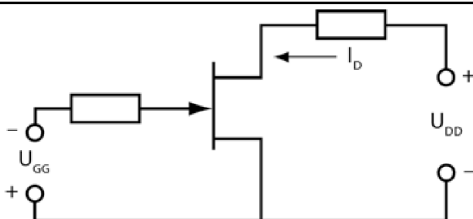
11. Patrz rysunek 3.32. (problem 30.)



Rysunek 3.32

12. Przepływ prądu drenu kontroluje się, dobierając odpowiednio napięcie bramki. Przypomina to kontrolowanie prądu kolektora napięciem bazy w tranzystorach BJT. (problem 30.)

13. Patrz rysunek 3.33. (problem 31.)



Rysunek 3.33

14. Tranzystor JFET jest elementem o wysokiej impedancji i nie pobiera prądu z obwodu bramki. Tranzystor BJT jest elementem o stosunkowo niskiej impedancji, przez co do działania potrzebuje zasilania prądem bazy. (problem 29.)

15. A. Prąd drenu osiągnie największą wartość. W opisywanym przypadku jego natężenie będzie równe ilorazowi  $U_{DD}$  i  $R_D$ , ponieważ wolno Ci pominąć spadek napięcia na tranzystorze JFET. Napięcie pomiędzy bramką a źródłem wynosi 0 V, co zmniejsza rezystancję kanału do wartości bliskiej zeru. (problem 32.)

B. Prąd rdzenia spadnie do wartości 0 A, ponieważ rezystancja kanału wzrasta do bardzo dużej (zakłada się, że nieskończonej) wartości, uniemożliwiając elektronom przepływ przez kanał.

C. Przy ustawieniu A  $U_{DS}$  wynosi około 0 V. Przy ustawieniu B  $U_{DS} = U_{DD}$ .

## Tranzystor jako przełącznik

Tranzystory są wszędzie, masz z nimi do czynienia w każdej chwili swojego życia. Znajdziesz je w większości urządzeń elektrycznych, najprawdopodobniej nawet odtwarzacz muzyki, którego używasz, telewizor i wieża stereo mają tranzystorowe przełączniki.

Z rozdziału 3. wiesz już, że tranzystor można włączać i wyłączać tak samo jak zwykły przełącznik mechaniczny. Podstawą działania komputerów jest logika boolowska posługująca się dwoma stanami — prawda i fałsz — które można przedstawiać za pomocą dwóch znanych Ci stanów tranzystora — włączony i wyłączony. Nie dziwi zatem, że przełączniki tranzystorowe są podstawą działania komputerów. Logiczna warstwa mikroprocesora (mózgu komputera) jest w całości zbudowana z przełączników tranzystorowych.

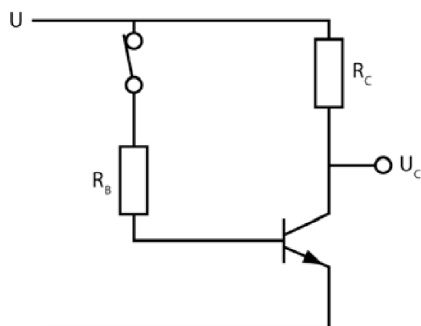
W tym rozdziale zajmiemy się najprostszą i jednocześnie najpopularniejszą z funkcji tranzystorów — przełączaniem. Większość przykładów będzie obejmować stosowanie bipolarnych tranzystorów złączowych (BJT).

Po zakończeniu pracy z tym rozdziałem będziesz umiał:

- obliczać rezystancję bazy i na tej podstawie przełączać tranzystor pomiędzy stanami ON i OFF;
- wyjaśnić, w jaki sposób jeden tranzystor może włączyć bądź wyłączyć inny tranzystor;
- obliczać prądy i rezystancje w prostych obwodach przełączających z tranzystorem;
- obliczać prądy i rezystancje w prostych obwodach przełączających z dwoma tranzystorami;
- porównać zasadę działania tranzystora polowego złączowego wykorzystywanego w charakterze przełącznika z zasadą działania podobnie używanego tranzystora bipolarnego.

## Włączanie tranzystora

**1** Zastanów się, jak włączyć tranzystor wbudowany w prosty obwód przedstawiony na rysunku 4.1. W zadaniach z rozdziału 3. zazwyczaj podawaliśmy wartość oporu  $R_B$ , a Ty miałeś określić wartość prądu kolektora i odpowiednich napięć. Teraz wykonaj proces odwrotny — zacznij od wyznaczenia prądu przepływającego przez opornik  $R_C$ , a następnie znajdź wartość oporu  $R_B$ , która umożliwi przepływ prądu kolektora, czyli włączy tranzystor.



Rysunek 4.1

### Zadanie

Które wartości prądów są Ci potrzebne do wyznaczenia wartości oporu  $R_B$ ?

#### Odpowiedź

Natężenia prądu bazy i prądu kolektora.

**2** Teraz w obwodzie opornik przy kolektorze zastąpimy lampą. W tak skonstruowanych układach opór  $R_C$  (opór lampy) nazywa się **obciążeniem**, a prąd  $I_C$  (płynący przez lampę) — **prądem obciążenia**.

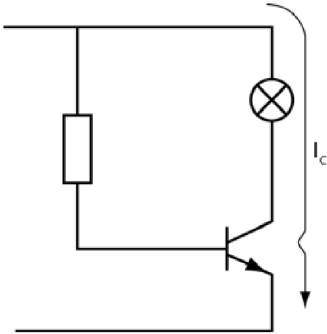
### Zadania

- Prąd obciążenia jest odpowiednikiem prądu bazy czy prądu kolektora?
- Którędy popłynie prąd kolektora w obwodzie z problemu 1.? Zaznacz na rysunku przepływ prądu.

#### Odpowiedzi

- Prądu kolektora.

B. Spójrz na rysunek 4.2. Zamiast symbolu opornika pojawia się na nim symbol lampy jarzeniowej.



Rysunek 4.2

**3** Aby tranzystor mógł skutecznie pełnić funkcję przełącznika ustawionego w położeniu zamkniętym, napięcie na kolektorze musi być równe napięciu na emiterze. Wtedy tranzystor jest włączony.

### Zadania

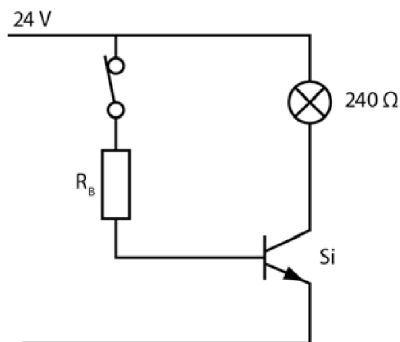
- A. Przy jakim napięciu kolektora tranzystor jest włączony?
- B. Jaki inny znany Ci element obwodów można porównać do włączonego tranzystora?

### Odpowiedzi

- A. Przy napięciu równym napięciu emitera, które w omawianym przypadku wynosi 0 V.
- B. Można porównać go do zamkniętego przełącznika mechanicznego.

**UWAGA** W rzeczywistości pomiędzy emiterem a kolektorem występuje niewielka różnica potencjałów. To tak zwane napięcie nasycenia, czyli najmniejszy spadek napięcia notowany na tranzystorze w stanie „najsilniejszego” włączenia. W zagadnieniach, z którymi będziesz mieć do czynienia w tym rozdziale, przyjmujemy, że wartość ta jest tak mała, iż można ją pominąć, czyli napięcie na kolektorze ma wartość zerową. To rozsądne założenie w przypadku układów, w których liczy się sam fakt przeprowadzenia przełączenia.

**4** W obwodzie przedstawionym na rysunku 4.3 zamiast opornika  $R_C$  wstawiono lampę o oporności 240  $\Omega$ .



Rysunek 4.3

Na rysunku podano wartości napięcia zasilającego i oporu przy kolektorze. Znając je, możesz wykorzystać prawo Ohma, by obliczyć prąd obciążenia (nazywany też **prądem kolektora**):

$$I_L = I_C = \frac{U}{R_C} = \frac{24 \text{ V}}{240 \Omega} = 100 \text{ mA} .$$

Oznacza to, że przez kolektor musi popłynąć prąd o natężeniu 100 mA, aby lampa zaświeciła się z pełną jasnością. Z rozdziału 3. wiesz, że prąd kolektora nie popłynie, dopóki w obwodzie nie pojawi się prąd bazy.

### Zadania

- A. Dlaczego w obwodzie musi popłynąć prąd bazy?
- B. W jaki sposób wywołać przepływ prądu bazy?

### Odowiedzi

- A. Aby mógł popłynąć w nim prąd kolektora, dzięki któremu zaświeci się lampa.
- B. Zamykając przełącznik mechaniczny w obwodzie bazy.

**5** Możesz obliczyć natężenie prądu bazy płynącego w obwodzie. Przyjmij, że wzmacnienie prądowe  $\beta = 100$  (normalnie sprawdziłbyś jego wartość w danych udostępnianych przez producenta tranzystora).

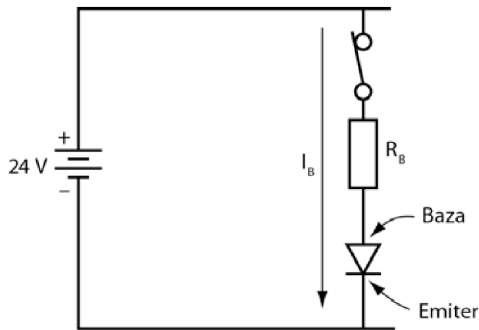
### Zadanie

Jakie jest natężenie prądu bazy  $I_B$ ?

**Odpowiedź**

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{100 \text{ mA}}{100} = 1 \text{ mA}.$$

**6** Prąd bazy płynie w kierunku zaznaczonym na rysunku 4.4. Przepływa przez złącze baza-emiter tak samo, jak przepływałby przez spolaryzowaną w kierunku przewodzenia diodę.



Rysunek 4.4

**Zadania**

- A. Jaki spadek napięcia zanotujemy na diodzie baza-emiter?
- B. Jaki spadek napięcia pojawi się na oporniku  $R_B$ ?

**Odpowiedzi**

- A. Rzędu 0,7 V, ponieważ w obwodzie znajduje się tranzystor krzemowy.
- B. Jeżeli pominiemy spadek napięcia na tranzystorze — 24 V. Jeżeli uwzględnisz 0,7 V spadku napięcia na tranzystorze — 23,3 V.

**7** Następnym krokiem jest obliczenie wartości  $R_B$ . Prąd płynący przez opornik  $R_B$  to prąd bazy  $I_B$ , a spadek napięcia na oporze przy bazie wyznaczałeś w problemie 6.

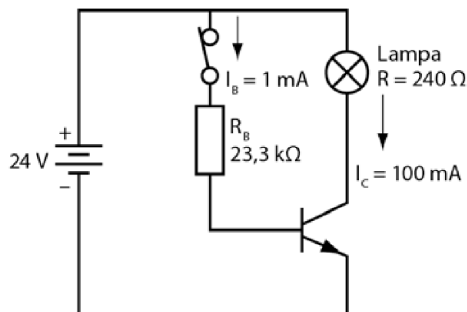
**Zadanie**

Oblicz opór  $R_B$ .

**Odpowiedź**

$$R_B = \frac{23,3 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 23\,300 \ \Omega$$

Ostatecznie obwód, który obliczasz, prezentuje się w sposób przedstawiony na rysunku 4.5. Zaznaczono na nim wszystkie wyznaczone dotąd wielkości.



**Rysunek 4.5**

**8** Wykorzystaj podane niżej kroki do wyznaczenia wartości  $I_B$  oraz  $R_B$ , potrzebnych do włączenia tranzystora.

1. Określ niezbędny do włączenia tranzystora prąd kolektora.
2. Oblicz wartość  $\beta$ .
3. Korzystając z wyników otrzymanych w krokach 1. i 2., wyznacz wartość  $I_B$ .
4. Oblicz wartość  $R_B$ .
5. Narysuj obwód i zaznacz na nim wartości parametrów poszczególnych elementów.

**Zadania**

- A. Oblicz  $I_B$ .
- B. Oblicz  $R_B$ .

**Odpowiedzi**

A. Znając natężenie prądu kolektora i wzmacnienie prądowe  $\beta$ , można obliczyć prąd bazy:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{50 \text{ mA}}{75} = 0,667 \text{ mA}.$$

$$\text{B. } R_B = \frac{28 \text{ V}}{0,667 \text{ mA}} = 42 \text{ k}\Omega.$$

W obliczeniach przyjęliśmy, że  $U_{BE}$  jest tak małe, iż zostanie pominięte.

**9** Załóżmy teraz, że w obwodzie zasilanym źródłem o napięciu  $U = 9 \text{ V}$  znajduje się lampa wymagająca przepływu prądu o natężeniu  $50 \text{ mA}$ . W układzie znajduje się także tranzystor o wzmacnieniu prądowym  $\beta = 75$ .

### Zadanie

Oblicz  $R_B$ .

### Odpowiedź

$$R_B = 31,1 \text{ k}\Omega.$$

W obliczeniach uwzględniliśmy wartość  $U_{BE}$ .

**10** W praktyce jeśli napięcie zasilania jest znacznie wyższe od spadku napięcia na złączu baza-emiter ( $0,7 \text{ V}$  dla tranzystorów krzemowych), upraszcza się obliczenia, pomijając wartość tego ostatniego i przyjmując, że jedyny odnotowywany spadek napięcia pojawia się na oporniku bazy  $R_B$ . (Rezystancja większości oporników i tak waha się o  $\pm 5\%$  podawanej przez producenta wartości). Jeżeli jednak napięcie zasilania jest mniejsze niż  $10 \text{ V}$ , nie powinienś pomijać  $0,7 \text{ V}$  spadku napięcia na złączu baza-emiter.

### Zadania

Oblicz  $R_B$  w następujących problemach, pomijając spadek napięcia na złączu baza-emiter w tych przypadkach, w których jest to uzasadnione.

A. Dziesięciowoltowa lampa pobierająca prąd  $10 \text{ mA}$ ;  $\beta = 100$ .

B. Pięciowoltowa lampa pobierająca prąd  $100 \text{ mA}$ ;  $\beta = 50$ .

### Odpowiedzi

$$\text{A. } I_B = \frac{10 \text{ mA}}{100} = 0,1 \text{ mA}.$$

$$R_B = \frac{10 \text{ V}}{0,1 \text{ mA}} = 100 \text{ k}\Omega.$$

$$\text{B. } I_B = \frac{100 \text{ mA}}{50} = 2 \text{ mA}.$$

$$R_B = \frac{5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = \frac{4,3 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 2,15 \text{ k}\Omega.$$

## Wyłączanie tranzystora

**11** Do tej pory zajmowaliśmy się zagadnieniami związanymi z włączaniem tranzystora, by działał w obwodzie jak zamknięty przełącznik mechaniczny. Teraz poznasz metodę wyłączania tranzystora, czyli zmuszania go do pracy w trybie porównywalnym z otwartym przełącznikiem mechanicznym. Gdy tranzystor jest wyłączony, przez obciążenie nie płynie prąd (w obwodzie brak prądu kolektora).

### Zadania

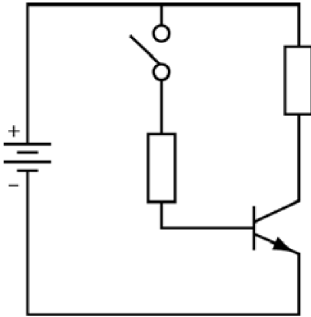
- Powiedz, czy na końcówkach otwartego przełącznika pojawia się różnica potencjałów, czy też na obydwu panuje ten sam potencjał.
- Czy przez otwarty przełącznik płynie prąd?
- Jaki prąd bazy jest potrzebny, by wyłączyć tranzystor, czyli zmusić go do pracy w sposób właściwy dla otwartego przełącznika mechanicznego?

### Odpowiedzi

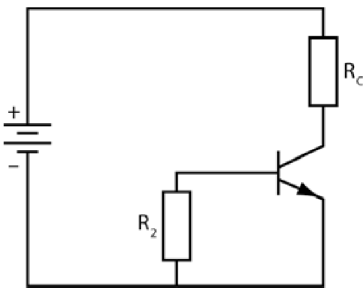
- Na końcówkach pojawiają się różne potencjały: potencjał podawany przez źródło zasilania i potencjał uziemienia.
- Nie.
- Tranzystor jest wyłączony, gdy nie płynie przez niego prąd bazy.

**12** W obwodzie przedstawionym na rysunku 4.6 przy otwartym przełączniku mechanicznym na pewno nie popłynie prąd bazy.

Jeżeli chcesz, by tranzystor pozostał wyłączony, gdy baza nie jest podłączona do źródła zasilania, musisz wprowadzić do obwodu opornik (na rysunku 4.7 oznaczony symbolem  $R_2$ ). Baza tranzystora jest uziemiona przez opornik (czyli podłączona do zerowego potencjału), zatem w obwodzie nie może popłynąć prąd bazy.



Rysunek 4.6



Rysunek 4.7

### Zadania

- A. Dlaczego w przedstawionym obwodzie przez złącze baza-emiter nie popłynie prąd ze źródła zasilania?
- B. Jaki prąd popłynie z kolektora do bazy?
- C. Dlaczego z kolektora do bazy nie popłynie prąd przez uziemienie  $R_2$ ?
- D. Dlaczego na bazie tranzystora panuje napięcie 0 V, gdy w obwodzie znajduje się opornik  $R_2$ ?

### Odpowiedzi

- A. Złącze baza-emiter nie ma połączenia ze źródłem napięcia, więc nie może popłynąć przez nie żaden prąd.
- B. Żaden.
- C. Uniemożliwia to wewnętrzna struktura tranzystora, ponieważ złącze kolektor-baza jest odpowiednikiem diody spolaryzowanej w kierunku zaporowym.
- D. Ponieważ przez opornik  $R_2$  nie płynie żaden prąd, nie ma na nim spadku napięcia, więc tranzystor jest uziemiony (połączony z potencjałem zerowym).

**13** Ponieważ przez opornik  $R_2$  nie płynie prąd, w tym miejscu obwodów wprowadza się elementy o różnych opornościach. Najczęściej stosuje się oporniki o rezystancji z przedziału  $1\text{ k}\Omega$  do  $1\text{ M}\Omega$ .

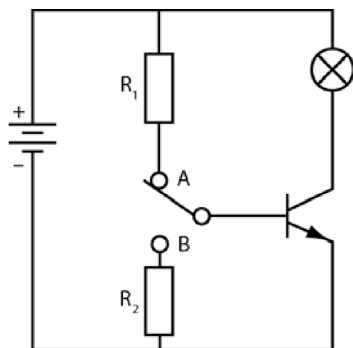
### Zadanie

Które z oporników można wprowadzić do układu, by utrzymać tranzystor w stanie wyłączonym —  $1\ \Omega$ ,  $2\text{ k}\Omega$ ,  $10\text{ k}\Omega$ ,  $20\text{ k}\Omega$ ,  $50\text{ k}\Omega$ ,  $100\text{ k}\Omega$ ,  $250\text{ k}\Omega$ ,  $500\text{ k}\Omega$ ?

### Odpowiedź

Nadadzą się wszystkie z wyjątkiem opornika o wartości  $1\text{ oma}$ , ponieważ oporności pozostałych mieszczą się w przedziale od  $1\text{ k}\Omega$  do  $1\text{ M}\Omega$ .

**14** Rysunek 4.8 przedstawia obwód z dwoma opornikami —  $R_1$  i  $R_2$ . Zauważ, że pojawia się w nim także przełącznik dwupozycyjny, za pomocą którego możesz włączać i wyłączać tranzystor.



Rysunek 4.8

### Zadania

- Czy tranzystor jest włączony, czy wyłączony, gdy przełącznik znajduje się w położeniu przedstawionym na rysunku 4.8?
- Które z położzeń przełącznika — A czy B — sprawi, że nie popłynie prąd kolektora?

### Odpowiedzi

- Tranzystor jest włączony (dioda baza-emiter jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia), więc popłynie przez niego prąd.

B. Aby przez tranzystor nie płynął prąd, przełącznik powinien znajdować się w położeniu B. Wtedy baza tranzystora jest uziemiona, więc tranzystor jest wyłączony.

## Dlaczego używamy tranzystora w charakterze przełącznika?

**15** Tranzystor pracujący jako przełącznik może służyć do wykonywania prostych operacji, na przykład włączania i wyłączania lampy (co demonstrowały poprzednie przykłady). Choć wprowadzanie tranzystora między lampę i przełącznik mechaniczny jest bardzo częstą praktyką, nie jest to jedyne wykorzystanie tranzystorów.

Poniżej podajemy kilka przykładów uzasadniających wykorzystanie tranzystorów w charakterze przełączników w obwodach z prądem.

- **Przykład 1.** Załóżmy, że planujesz używanie lampy w nieprzyjaznym środowisku, na przykład w komorze, w której występuje promieniowanie. Oczywiście przełącznik pozwalający sterować pracą takiej lampy powinien znajdować się z dala od niej, w bezpiecznym miejscu. Zatem przełącznik mechaniczny mógłby znajdować się poza komorą i sterować pracą tranzystora — włączać go i wyłączać.
- **Przykład 2.** Przełącznik sterujący działaniem sprzętu wymagającego zasilania prądem o dużym natężeniu musiałby być połączony z urządzeniem przewodami zdolnymi przewodzić prąd o takim natężeniu. Ponieważ przełączanie tranzystora może być realizowane za pomocą niskich napięć i niewielkich prądów, można połączyć go z przełącznikiem mechanicznym przewodami nadającymi się do przewodzenia niewielkich prądów. W ten sposób niewielki prąd pozwala sterować przepływem większego prądu. Gdy przełącznik mechaniczny musi znajdować się w pewnej odległości od sprzętu, którego pracę chcesz kontrolować, użycie cieńszych przewodów pozwoli Ci zaoszczędzić i czas, i pieniądze.
- **Przykład 3.** Głównym problemem w sterowaniu przepływem prądu o dużym natężeniu jest to, że taki prąd powoduje znaczne zakłócenia w sygnałach przesyłanych sąsiednimi przewodami. W urządzeniach komunikacyjnych, na przykład aparatach nadawczo-odbiorczych, to sytuacja niedopuszczalna. Aby uniknąć tego rodzaju komplikacji, większy prąd można kontrolować za pomocą tranzystora sterowanego z pewnej odległości, zmniejszając tym samym prąd potrzebny do przełączenia klucza montowanego w układzie nadawczo-odbiorczym.
- **Przykład 4.** W urządzeniach przenośnych (na przykład sterowanych zdalnie modelach samolotów) przełączniki tranzystorowe pozwalają zmniejszyć masę, wymiary układu sterującego oraz zapotrzebowanie na moc.

### Zadanie

Które cechy tranzystorów, wymienione w podanych przykładach, sprawiają, że elementy te wykorzystuje się często jako przełączniki?

### Odpowiedź

Pracą tranzystora w charakterze przełącznika można sterować zarówno poprzez odpowiedni impuls elektryczny, jak i za pomocą przełącznika mechanicznego umieszczonego w obwodzie bazy. Dzięki temu można pozwolić sobie na dużą swobodę w projektowaniu obwodów i znacznie uprościć elektryczne sterowanie pracą układu. Poza tym tranzystory pozwalają wprowadzać bezpieczniejsze rozwiązania, ograniczyć zakłócenia, zastosować sterowanie zdalne oraz obniżyć koszty projektowania i przygotowywania układów.

**16** Poniżej znajdziesz inne powody, dla których tranzystory cieszą się taką popularnością.

- **Przykład 1.** Realizowanie przełączania za pomocą tranzystora umożliwia precyzję, która nie jest dostępna podczas wykorzystywania przełączników mechanicznych. Jest to szczególnie istotne na przykład w fotografii — czas naświetlania filmu bądź oświetlania obiektu są bardzo ważne. Urządzenia wykorzystujące tranzystory sprawdzają się w takich przypadkach znacznie lepiej niż jakiegokolwiek inne, ponieważ pozwalają na znacznie większą dokładność.
- **Przykład 2.** Tranzystor można włączać i wyłączać miliony razy w ciągu jednej sekundy, a mimo tak intensywnego wykorzystywania wytrzyma on wiele lat pracy. Tranzystory są jednymi z najbardziej trwałych i najsolidniejszych elementów półprzewodnikowych. Przełączniki mechaniczne psują się zazwyczaj już po kilku tysiącach operacji.
- **Przykład 3.** Większość przemysłowych urządzeń sterujących generuje sygnały cyfrowe. Zazwyczaj jest to po prostu większe lub mniejsze napięcie, które doskonale nadaje się do włączania i wyłączania tranzystora.
- **Przykład 4.** Możliwości technologiczne pozwoliły nam posunąć miniaturyzację do tego stopnia, że w jednej kości mieści się wiele (setki milionów) tranzystorów. Krzemowe kości zawierające tranzystory (oraz inne elementy elektroniczne) nazywa się **układami scalonymi**. Układy scalone, małe, czarne płaskie elementy, pojawiają się we wszystkich wytwarzanych masowo urządzeniach elektronicznych. Tylko im zawdzięczamy to, że wszystkie urządzenia elektroniczne są coraz mniejsze i lżejsze.

**Zadanie**

Jakie jeszcze cechy tranzystorów, poza wymienionymi w poprzednim problemie, wynikają z przedstawionych tu przykładów?

**Odpowiedź**

Pracą tranzystorów można sterować z niebywałą precyzją, przełączanie jest realizowane bardzo szybko, a same elementy zużywają się powoli, są małe i nie pobierają dużej mocy. Można je wytwarzać w dużych ilościach, a produkcja jest wyjątkowo tania.

**17** Pora rozważyć pomysł wykorzystania jednego tranzystora do włączania i wyłączania drugiego, który z kolei sterowałby pracą lampy bądź innego obciążenia. (Zagadnieniem tym będziemy zajmować się w następnym podrozdziale).

Jeżeli musisz włączać i wyłączać wiele obciążeń pracujących pod dużym natężeniem, możesz zastosować przełącznik, który będzie jednocześnie sterować pracą kilku tranzystorów.

**Zadania**

- A.** Jak zmieni się prąd płynący przez główny przełącznik po dodaniu dodatkowych przełączników — zmniejszy się czy zwiększy w stosunku do prądu płynącego przez obciążenia?
- B.** Jak sądzisz, w jaki sposób umieszczenie w obwodzie dodatkowego tranzystora wpłynie na następujące zagadnienia?
1. Bezpieczeństwo.
  2. Wygoda użytkowania.
  3. Wydajność i płynność pracy.

**Odpowiedzi**

- A.** Przez główny przełącznik popłynie mniejszy prąd niż przez obciążenie.
- B.** 1. Bezpieczeństwo pracy zwiększy się, a osoba odpowiedzialna za sterowanie pracą układu będzie mogła przebywać w odizolowanym, bezpiecznym pomieszczeniu.
2. Przełączniki można umieścić blisko siebie na jednym panelu lub w dowolny inny sposób wygodny dla użytkownika. Miejsce pracy osoby obsługującej urządzenie nie powinno być uzależnione od położenia przełącznika.

3. Jeden przełącznik może sterować wieloma procesami, czego przykładem są panele sterujące oświetleniem studia telewizyjnego lub sceny teatralnej.

**18** Ten problem ma pozwolić Ci lepiej przyswoić idee przedstawione w problemach 15., 16. i 17.

### Zadania

Powiedz, z jakich powodów warto wykorzystywać tranzystory w charakterze przełączników.

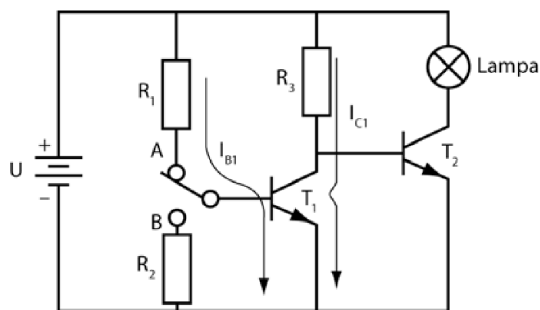
- A. Aby bezpiecznie sterować pracą urządzenia umieszczonego w nieprzyjaznych warunkach.
- B. Aby sterować przepływem prądu o niskim natężeniu i zmieniać niskie napięcia.
- C. Aby zmniejszyć poziom zakłóceń, który może występować na przykład w obwodach nadawczo-odbiorczych.
- D. Aby zwiększyć liczbę przełączników.
- E. Aby budować urządzenia działające szybciej i pewniej niż przełączniki mechaniczne.

### Odpowiedzi

A, C i E.

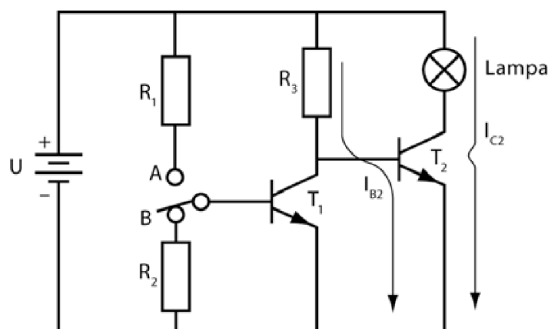
**19** W wielu układach elektronicznych występują wielopoziomowe przełączniki tranzystorowe. Układy tego rodzaju charakteryzują się tym, że jeden tranzystor jest wykorzystywany do włączania i wyłączania innych tranzystorów. Działanie takich układów zilustrujemy przykładem, w którym funkcję obciążenia będzie ponownie pełnić lampa, a elementem inicjującym będzie przełącznik mechaniczny. Obwód przedstawiony na rysunku 4.9 zawiera układ dwóch tranzystorów włączających i wyłączających lampę.

Gdy przełącznik mechaniczny znajduje się w położeniu A, złącze baza-emiter tranzystora  $T_1$  jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, więc przez opornik  $R_1$  oraz przez złącze baza-emiter tranzystora płynie prąd  $I_{B1}$ . Oznacza to, że tranzystor  $T_1$  jest włączony. Płynący przez niego prąd kolektora  $I_{C1}$  sphywa do uziemienia, co sprawia, iż napięcie na kolektorze spada do zera, zatem tranzystor  $T_1$  zachowuje się jak zamknięty przełącznik. Ponieważ baza tranzystora  $T_2$  jest połączona z kolektorem tranzystora  $T_1$ , napięcie na niej spada do zera. To sprawia, że tranzystor  $T_2$  jest wyłączony, więc lampa się nie świeci.



Rysunek 4.9

Przełączamy teraz przełącznik mechaniczny do pozycji B, co ilustruje rysunek 4.10. Baza tranzystora  $T_1$  jest uziemiona, zatem panuje na niej zerowe napięcie — tranzystor jest wyłączony. Oznacza to, że nie płynie przez niego prąd kolektora. Do bazy tranzystora  $T_2$  przyłożone jest napięcie dodatnie, a więc dioda emiter-baza tego tranzystora jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia, dzięki czemu przez opornik  $R_3$  oraz samo złącze emiter-baza tego tranzystora płynie prąd. Tranzystor  $T_2$  jest włączony, więc w obwodzie płynie prąd kolektora ( $I_{C1}$ ) zapalający lampę.



Rysunek 4.10

Teraz, gdy znasz już zasadę działania takiego układu, postaraj się rozwiązać następujące zadania. Przyjmij początkowo, że przełącznik mechaniczny znajduje się w położeniu A, jak ma to miejsce w obwodzie przedstawionym na rysunku 4.9.

### Zadania

- A. W jaki sposób natężenie prądu  $I_{B1}$  wpływa na pracę tranzystora  $T_1$ ?
- B. Jak zmieniają się poniższe wartości po włączeniu tranzystora  $T_1$ ?
  1. Prąd kolektora  $I_{C1}$ .
  2. Napięcie kolektora  $U_{C1}$ .

- C. Jaki wpływ na podane niżej parametry będzie mieć wspomniana w poprzednim pytaniu zmiana napięcia kolektora  $U_{C1}$ :
1. Na napięcie bazy tranzystora  $T_2$ ?
  2. Na tranzystor  $T_2$  (czy będzie włączony, czy wyłączony)?
- D. Dokąd popłynie prąd przepływający przez opornik  $R_3$ ?
- E. Czy lampa w obwodzie będzie włączona, czy wyłączona?

**Odpowiedzi**

- A. Prąd  $I_{B1}$  oraz część napięcia zasilania  $U$  (0,7 V, jeśli tranzystor jest wykonany z krzemu) włączają tranzystor  $T_1$ .
- B. (1) Prąd  $I_{C1}$  popłynie; (2) napięcie  $U_{C1}$  spadnie do wartości 0 V.
- C. (1) Napięcie na bazie tranzystora  $T_2$  spadnie do 0 V; (2) tranzystor  $T_2$  będzie wyłączony.
- D. Prąd  $I_{C1}$  popłynie przez tranzystor  $T_1$  do uziemienia.
- E. Lampa będzie wyłączona.

**20** Przyjmij teraz, że przełącznik mechaniczny znajduje się w położeniu B, jak pokazuje to rysunek 4.10, i odpowiedz na poniższe pytania.

**Zadania**

- A. Jaka część prądu bazy  $I_{B1}$  popłynie przez tranzystor  $T_1$ ?
- B. Czy tranzystor  $T_1$  jest włączony, czy wyłączony?
- C. Jaki prąd popłynie przez opornik  $R_3$ ?
- D. Czy tranzystor  $T_2$  jest włączony, czy wyłączony?
- E. Czy lampa jest włączona, czy wyłączona?

**Odpowiedzi**

- A. Żadna.
- B. Wyłączony.
- C.  $I_{B2}$ .
- D. Włączony.
- E. Włączona.

**21** Ponownie spójrz na obwody przedstawione na rysunkach 4.9 i 4.10. Odpowiedz na podane niżej pytania, przyjmując, że obwody są zasilane napięciem 10 V.

### Zadania

- A. Czy prąd płynący przez opornik  $R_3$  przepływa kiedykolwiek przez obydwa tranzystory jednocześnie? Uzasadnij swoją odpowiedź.
- B. Jakie napięcie panuje na kolektorze tranzystora  $T_2$ , gdy przełącznik znajduje się w położeniu A, a jakie, kiedy znajduje się w położeniu B?
- C. Jakie napięcie panuje na kolektorze tranzystora  $T_1$ , gdy przełącznik znajduje się w położeniu A, a jakie, kiedy znajduje się w położeniu B?

### Odpowiedzi

A. Nie. Gdy tranzystor  $T_1$  jest włączony, prąd płynący przez opornik spływa do uziemienia jako prąd kolektora. Jeśli tranzystor  $T_1$  jest wyłączony, prąd przepływa przez tranzystor  $T_2$  jako prąd bazy.

B. Gdy przełącznik jest w położeniu A, napięcie wynosi 10 V, ponieważ tranzystor jest wyłączony.

Gdy przełącznik jest w położeniu B, napięcie wynosi 0 V, ponieważ tranzystor jest włączony.

C. Gdy przełącznik jest w położeniu A, napięcie wynosi 0 V, ponieważ tranzystor jest włączony.

Gdy przełącznik jest w położeniu B, napięcie na kolektorze tranzystora  $T_1$  jest równe spadkowi napięcia na spolaryzowanym w kierunku przewodzenia złączu baza-emiter tranzystora  $T_2$ . Wynika to z faktu, że baza tranzystora  $T_2$  jest połączona równolegle z kolektorem tranzystora  $T_1$ . Spadek napięcia na spolaryzowanym w kierunku przewodzenia złączu baza-emiter nie osiągnie nigdy 10 V, natomiast bez trudu dojdzie do wartości 0,7 V, jeśli tranzystor jest wykonany z krzemu.

**22** Oblicz teraz wartości oporów  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$  dla przedstawionego obwodu. Obliczenia będą przebiegać analogicznie do prowadzonych poprzednio (w problemie 8.), z tym że tym razem będziesz musiał uzupełnić je o kroki niezbędne do wyznaczenia wielkości opisujących drugi tranzystor. Postępuj zgodnie z podanymi wskazówkami i oblicz wartości oporów  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$ :

1. Określ prąd obciążenia  $I_{C2}$ .
2. Wyznacz wartość  $\beta$  dla tranzystora  $T_2$ . Oznacz ją symbolem  $\beta_2$ .

3. Oblicz wartość prądu  $I_{B2}$  dla tranzystora  $T_2$ . Skorzystaj z zależności

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2}.$$

4. Oblicz wartość oporu  $R_3$ , który pozwala uzyskać ten prąd bazy. Skorzystaj

$$\text{z zależności } R_3 = \frac{U}{I_{B2}}.$$

5. Opór  $R_3$  jest jednocześnie obciążeniem tranzystora  $T_1$ , gdy ten jest włączony. Wynika stąd, że prąd kolektora w tranzystorze  $T_1$  ( $I_{C1}$ ) będzie miał tę samą wartość co prąd bazy tranzystora  $T_2$ . Prąd bazy tranzystora  $T_2$  wyznaczałeś w kroku 3.

6. Określ  $\beta_1$ , czyli wartość wzmocnienia prądowego dla tranzystora  $T_1$ .

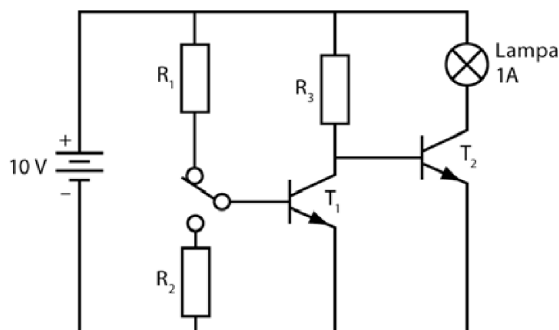
7. Oblicz prąd bazy płynący przez tranzystor  $T_1$ . Skorzystaj z zależności

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1}.$$

8. Wyznacz wartość oporu  $R_1$ . Wykorzystaj zależność  $R_1 = \frac{U}{I_{B1}}$ .

9. Dobierz wartość  $R_2$ . Dla wygody można przyjąć, że  $R_2 = R_1$ .

Wszystkie obliczenia będziesz prowadzić dla znanego Ci już obwodu. Dla przypomnienia przedstawiamy go na rysunku 4.11. Wykorzystaj podane wartości oraz dane przedstawione pod rysunkiem.



**Rysunek 4.11**

- Dziesięciowoltowa lampa pobiera prąd o natężeniu jednego ampera, zatem  $U = 10 \text{ V}$ ,  $I_{C2} = 1 \text{ A}$ .
- $\beta_2 = 20$ ,  $\beta_1 = 100$ .

Pomiń wszelkie spadki napięcia na tranzystorach.

**Zadania**

Oblicz następujące wielkości:

- A. Znajdź  $I_{B2}$  z zależności podanej w kroku 3.
- B. Znajdź  $R_3$  w sposób opisany w kroku 4.
- C. Oblicz prąd obciążenia tranzystora  $T_1$ , gdy jest on włączony. Skorzystaj z zależności opisanych w kroku 5.
- D. Znajdź prąd bazy płynący przez tranzystor  $T_1$ .
- E. Znajdź wartość oporu  $R_1$  w sposób opisany w kroku 8.
- F. Dobierz taką wartość  $R_2$ , by obwód działał poprawnie.

**Odpowiedzi**

Podane tu wyniki odpowiadają omówionym wcześniej krokom postępowania.

- A. 1. Podano, że  $I_{C2}$  ma wartość 1 A.
  2.  $\beta_2 = 20$  (to wartość podana). Jest to typowa wartość wzmocnienia prądowego dla tranzystora zdolnego przetwarzać prąd o natężeniu 1 A.

3.  $I_{B2} = \frac{1 \text{ A}}{20} = 50 \text{ mA} .$

- B. 4.  $R_3 = \frac{10 \text{ V}}{50 \text{ mA}} = 200 \Omega .$

Zauważ, że 0,7 V spadku napięcia na złączu baza-emiter zostało zignorowane.

- C. 5.  $I_{C1} = I_{B2} = 50 \text{ mA} .$

- D. 6.  $\beta_1 = 100 .$

7.  $I_{B1} = \frac{50 \text{ mA}}{100} = 0,5 \text{ mA} .$

- E. 8.  $R_1 = \frac{10 \text{ V}}{0,5 \text{ mA}} = 20 \text{ k}\Omega .$

Spadek napięcia na tranzystorze (0,7 V) został ponownie zignorowany.

- F. 9. Aby uprościć obliczenia, przyjmiemy, że wartość oporu  $R_2$  jest taka sama jak wartość oporu  $R_1$ , czyli 20 k $\Omega$ . W ten sposób ograniczamy liczbę różnych podzespołów w obwodzie. Ograniczenie liczby rodzajów elementów jest istotne, gdy przychodzi do ich przechowywania — im mniej będzie podzespołów, tym mniej będziesz musiał ich przechowywać. Oczywiście opornik  $R_2$  może mieć dowolną wartość z zakresu od 1 k $\Omega$  do 1 M $\Omega$ .

**23** Postępując zgodnie z opisaną procedurą, wyznacz ponownie wartości charakterystyczne obwodu przedstawionego na rysunku 4.11. Tym razem przyjmij, że znajduje się w nim 28 V lampa, która pobiera prąd o natężeniu 560 mA, a wzmocnienia prądowe wynoszą  $\beta_2 = 10$  i  $\beta_1 = 100$ .

### Zadania

Oblicz następujące wartości:

A.  $I_{B2} =$

B.  $R_3 =$

C.  $I_{C1} =$

D.  $I_{B1} =$

E.  $R_1 =$

F.  $R_2 =$

### Odpowiedzi

A. 56 mA.

B. 500  $\Omega$ .

C. 56 mA.

D. 0,56 mA.

E. 50 k $\Omega$ .

F. 50 k $\Omega$  z wyboru.

## Potrójny przełącznik tranzystorowy

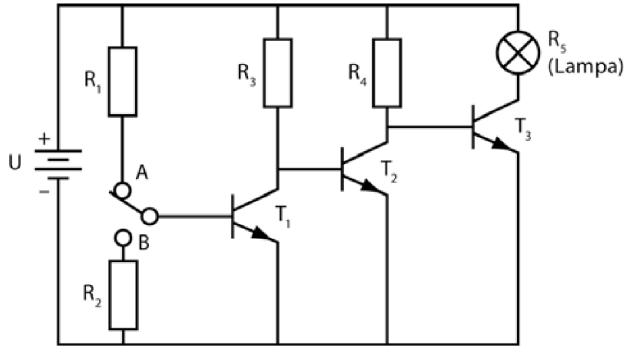
**24** W obwodzie przedstawionym na rysunku 4.12 znajdują się trzy tranzystory odpowiedzialne za włączanie i wyłączenie obciążenia układu. W przedstawionym przypadku tranzystor  $T_1$  służy do włączania i wyłączania tranzystora  $T_2$ , który z kolei steruje pracą tranzystora  $T_3$ . Obliczenia będą przypominać te, które musiałeś wykonać, by rozwiązać poprzednie zadania, ale żeby wyznaczyć wartości parametrów opisujących trzeci tranzystor, trzeba będzie dodać kilka kroków. Spójrz na schemat obwodu i rozwiąż poniższe zadania.

### Zadania

Powiedz, co dzieje się, gdy przełącznik znajduje się w położeniu A.

A. Czy tranzystor  $T_1$  jest włączony, czy wyłączony?

B. Czy tranzystor  $T_2$  jest włączony, czy wyłączony?



Rysunek 4.12

- C. Dokąd płynie prąd przepływający przez opornik  $R_4$ ?
- D. Czy tranzystor  $T_3$  jest włączony, czy wyłączony?

**Odpowiedzi**

- A. Włączony.
- B. Wyłączony.
- C. Do bazy tranzystora  $T_3$ .
- D. Włączony.

**25** Skorzystaj z tego samego schematu, który opisywałeś w problemie 24.

**Zadania**

Powiedz, co dzieje się, gdy przełącznik znajduje się w położeniu B.

- A. Czy tranzystor  $T_1$  jest włączony, czy wyłączony?
- B. Czy tranzystor  $T_2$  jest włączony, czy wyłączony?
- C. Dokąd płynie prąd przepływający przez opornik  $R_4$ ?
- D. Czy tranzystor  $T_3$  jest włączony, czy wyłączony?
- E. Które z położen przełącznika włączy lampę?
- F. Czym różnią się położenia włączony/wyłączony przełącznika w układzie z trzema tranzystorami od położen przełącznika włączony/wyłączony w obwodzie z dwoma tranzystorami?

**Odpowiedzi**

- A. Wyłączony.

- B. Włączony.
- C. Przez tranzystor  $T_2$  do uziemienia.
- D. Wyłączony.
- E. Położenie A.
- F. Są wobec siebie przeciwstawne. Oznacza to, że gdyby jeden przełącznik mechaniczny kontrolował dwa układy zapalające lampy — jeden z dwoma tranzystorami, a drugi z trzema — przełączenie przełącznika mechanicznego decydowałoby o tym, która lampa (bądź inne obciążenie) zostanie włączona.

**26** Wykonaj obliczenia dla tego przykładu. Twoje zadanie będzie polegało na odpowiedzeniu na te same pytania, na które odpowiadałeś w problemie 22. Kroki są podobne, choć oczywiście pojawiło się kilka dodatkowych poleceń.

1. Określ natężenie prądu obciążenia. Ta wartość bardzo często jest znana.
2. Wyznacz wartość wzmocnienia prądowego dla tranzystora  $T_3$ . Wartość ta, oznaczana jako  $\beta_3$ , jest zazwyczaj znana z góry.
3. Oblicz wartość prądu  $I_{B3}$ . Skorzystaj z zależności  $I_{B3} = \frac{I_{C3}}{\beta_3}$ .
4. Oblicz wartość oporu  $R_4$ . Skorzystaj z zależności  $R_4 = \frac{U}{I_{B3}}$ .
5. Załóż, że  $I_{C2} = I_{B3}$ .
6. Określ wartość  $\beta_2$ . Również ona jest najczęściej znana.
7. Oblicz natężenie  $I_{B2}$ . Skorzystaj ze wzoru  $I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2}$ .
8. Wyznacz wartość oporu  $R_2$ . Wykorzystaj zależność  $R_2 = \frac{U}{I_{B2}}$ .
9. Przyjmij  $I_{C1} = I_{B2}$ .
10. Określ wartość  $\beta_1$ .
11. Oblicz  $I_{B1}$ . Skorzystaj z zależności  $I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1}$ .
12. Wyznacz wartość oporu  $R_1$ . Wykorzystaj zależność  $R_1 = \frac{U}{I_{B1}}$ .
13. Dobierz wartość  $R_2$ .

Załącz, że w obwodzie pracuje dziesięciowoltowa lampa zasilana prądem 10 A. Przyjmij, że znasz podawane przez producenta tranzystorów wartości wzmocnień prądowych —  $\beta_1 = 100$ ,  $\beta_2 = 50$  i  $\beta_3 = 20$ . Teraz, postępując zgodnie z podanymi wytycznymi, oblicz szukane wartości. Po wyznaczeniu każdej z nich sprawdź jej poprawność z odpowiedzią.

**Zadania**

Oblicz następujące wartości:

A.  $I_{B3} =$

B.  $R_4 =$

C.  $I_{B2} =$

D.  $R_3 =$

E.  $I_{B1} =$

F.  $R_1 =$

G.  $R_2 =$

**Odpowiedzi**

Podane tu wyniki odpowiadają omówionym wcześniej krokom postępowania.

A. 1. Podana wartość prądu obciążenia wynosi 10 A.

2. Wartość wzmacnienia  $\beta_3$  jest podana i wynosi 20.

$$3. I_{B3} = \frac{I_{C3}}{\beta_3} = \frac{10 \text{ A}}{20} = 0,5 \text{ A} = 500 \text{ mA} .$$

$$B. 4. R_4 = \frac{10 \text{ V}}{500 \text{ mA}} = 20 \Omega .$$

C. 5.  $I_{C2} = I_{B3} = 500 \text{ mA}$ .

6. Wartość wzmacnienia  $\beta_2$  jest podana i wynosi 50.

$$7. I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} = \frac{500 \text{ mA}}{50} = 10 \text{ mA} .$$

$$D. 8. R_3 = \frac{10 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 1 \text{ k}\Omega .$$

E. 9.  $I_{C1} = I_{B2} = 10 \text{ mA}$ .

10. Wartość wzmacnienia  $\beta_1$  jest podana i wynosi 100.

$$11. I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} = \frac{10 \text{ mA}}{100} = 0,1 \text{ mA} .$$

$$F. 12. R_1 = \frac{10 \text{ V}}{0,1 \text{ mA}} = 100 \text{ k}\Omega .$$

G. 13. Możesz wybrać opornik  $R_2$ , tak by jego rezystancja również wynosiła 100 k $\Omega$ .

**27** Przeprowadź analogiczne obliczenia dla obwodu, w którym pracuje lampa 75 V, zasilana pobierająca prąd o natężeniu 6 A. Przyjmij następujące wartości wzmacnień prądowych:  $\beta_3 = 30$ ,  $\beta_2 = 100$  i  $\beta_1 = 120$ .

### **Zadania**

Oblicz następujące wartości, posługując się wskazówkami przedstawionymi w problemie 26.:

- A.  $I_{B3} =$
- B.  $R_4 =$
- C.  $I_{B2} =$
- D.  $R_3 =$
- E.  $I_{B1} =$
- F.  $R_1 =$
- G.  $R_2 =$

### **Odpowiedzi**

- A. 200 mA.
- B. 375  $\Omega$ .
- C. 2 mA.
- D. 37,5 k $\Omega$ .
- E. 16,7  $\mu$ A.
- F. 4,5 M $\Omega$ .
- G. Wybrany opornik  $R_2 = 1$  M $\Omega$ .

## **Alternatywny sposób realizowania przełączeń**

---

**28** W omawianych przykładach przełączanie było uruchamiane za pomocą mechanicznego przełącznika umieszczanego w obwodzie bazy pierwszego tranzystora. Tego rodzaju przełącznik musi mieć trzy końcówki i możliwość przełączania z pozycji A do pozycji B. (To tak zwany pojedynczy przełącznik dwupozycyjny). W tego rodzaju przełącznikach nie można mówić o ściśle określonej pozycji „włączony” lub „wyłączony”, jak ma to miejsce w przypadku zwykłych przełączników.

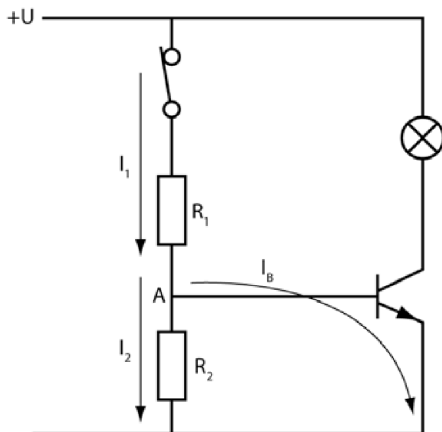
### Zadanie

Dlaczego w omawianych przykładach nie można było posłużyć się zwykajnym przełącznikiem o dwóch końcówkach?

#### Odpowiedź

Zwykły przełącznik umożliwia jedynie łączenie lub rozłączanie obwodu, więc nie można go używać do przełączania między położeniami A i B, jak zaprezentowano w obwodzie na rysunku 4.12.

**29** Jeżeli połączysz opory i przełącznik w sposób przedstawiony na rysunku 4.13, będziesz mógł zastosować w układzie zwykły wyłącznik z dwiema końcówkami. (To tak zwany pojedynczy przełącznik jednopozycyjny).



Rysunek 4.13

### Zadania

- Czy tranzystor  $T_1$  jest włączony, czy wyłączony, gdy przełącznik jest otwarty?
- Czy lampa jest włączona, gdy przełącznik znajduje się w pozycji zamkniętej, czy też wyłączona?

#### Odpowiedzi

- Wyłączony.
- Włączona.

**30** Gdy przełącznik jest zamknięty, prąd płynie przez opornik  $R_1$ , ale w punkcie A zaznaczonym na rysunku 4.13 rozpływa się na dwie ścieżki. Jedną z nich płynie prąd bazy  $I_B$ , drugą prąd oznaczony na schemacie symbolem  $I_2$ .

### Zadanie

Powiedz, w jaki sposób można wyznaczyć całkowity prąd w obwodzie  $I_1$ .

#### Odpowiedź

$$I_1 = I_B + I_2$$

**31** Następnym problemem dotyczy takiego doboru wartości oporów  $R_1$  i  $R_2$ , by prąd bazy wystarczył do włączenia tranzystora  $T_1$ .

### Zadanie

Zastanów się nad prostym przykładem. Załóżmy, że dziesięciowoltowa lampa potrzebuje zasilania prądem o natężeniu 100 mA, a wzmocnienie prądowe tranzystora wykorzystywanego w układzie wynosi 100. Oblicz wartość prądu bazy.

$$I_B =$$

#### Odpowiedź

$$I_B = \frac{100 \text{ mA}}{100} = 1 \text{ mA}.$$

### 32

Prąd  $I_1$  po przepłynięciu przez opornik  $R_1$  musi podzielić się tak, by 1 mA trafił do bazy jako  $I_B$ . Pozostała część prądu to  $I_2$ . Problem polega na tym, że w tej chwili nie potrafisz powiedzieć nic na temat natężeń prądów  $I_1$  oraz  $I_2$  — każde z nich może mieć dowolną wartość, pod warunkiem że będzie ona pozwalała na wydzielenie 1 mA prądu bazy.

Oznacza to, że musisz narzucić z góry obydwie te wartości. Z doświadczenia wynika, iż najlepiej jest przyjąć  $I_2$  dziesięciokrotnie większe od  $I_B$ . Taki stosunek gwarantuje stabilną pracę układu i znacznie ułatwia prowadzenie obliczeń:

$$I_2 = 10 \cdot I_B,$$

$$I_1 = 11 \cdot I_B.$$

### Zadanie

W problemie 31. wyznaczyłeś natężenie prądu bazy równe  $I_B = 1 \text{ mA}$ . Ile będzie w takim razie wynosić natężenie prądu  $I_2$ ?

#### Odpowiedź

$$I_2 = 10 \text{ mA.}$$

**33** Możesz teraz wyznaczyć wartość  $R_2$ . Spadek napięcia na oporniku  $R_2$  jest identyczny ze spadkiem napięcia na złączu baza-emiter tranzystora  $T_1$ . Przyjmij, że w obwodzie znajduje się tranzystor krzemowy, zatem wspomniane napięcie będzie wynosić  $0,7 \text{ V}$ .

### Zadania

A. Ile wynosi wartość oporu  $R_2$ ?

B. Ile wynosi wartość oporu  $R_1$ ?

#### Odpowiedzi

$$\text{A. } R_2 = \frac{0,7 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 70 \Omega.$$

$$\text{B. } R_1 = \frac{10 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{11 \text{ mA}} = \frac{9,3 \text{ V}}{11 \text{ mA}} = 800 \Omega \text{ (w przybliżeniu).}$$

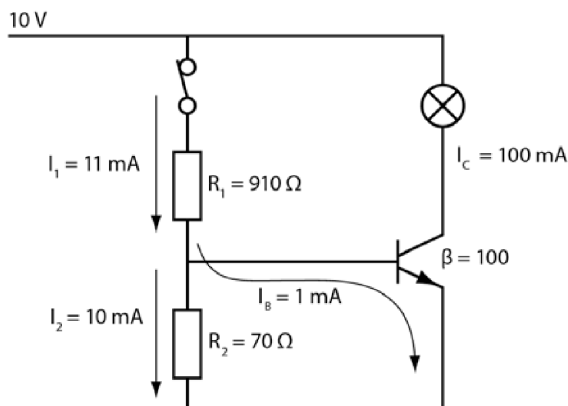
Możesz też zignorować spadek napięcia rzędu  $0,7 \text{ V}$ . Wtedy  $R_1$  wyniesie około  $910 \Omega$ .

**34** Wartości oporników, które wyznaczyłeś w problemie 33., gwarantują, że tranzystor się włączy oraz że popłynie przez niego prąd o wartości  $100 \text{ mA}$  ( $I_C$ ), niezbędny do włączenia lampy. Rysunek 4.14 przedstawia cały obwód z uwzględnionymi wartościami parametrów każdego z elementów.

### Zadania

Przeprowadź analogiczne obliczenia dla dwóch lamp o podanych niżej parametrach. Tak jak poprzednio wyznacz wartości oporów  $R_1$  i  $R_2$ .

A. Przeprowadź obliczenia dla  $28 \text{ V}$  lampy zasilanej prądem o natężeniu  $56 \text{ mA}$ . Wzmocnienie prądowe tranzystora wynosi w tym przypadku  $\beta = 100$ .



Rysunek 4.14

B. Przeprowadź obliczenia dla 12 V lampy zasilanej prądem o natężeniu 140 mA. Wzmocnienie prądowe tranzystora wynosi w tym przypadku  $\beta = 50$ .

### Odpowiedzi

A.  $I_B = \frac{56 \text{ mA}}{100} = 0,56 \text{ mA} .$

$I_2 = 5,6 \text{ mA} .$

$R_2 = \frac{0,7 \text{ V}}{5,6 \text{ mA}} = 125 \Omega .$

$R_1 = \frac{28 \text{ V}}{6,16 \text{ mA}} = 4,5 \text{ k}\Omega$

B.  $R_2 = 25 \Omega .$

$R_1 = 400 \Omega .$

**35** Przyjęte z góry założenie, że wartość prądu  $I_2$  ma być dziesięć razy większa od wartości  $I_B$ , może budzić wiele kontrowersji i wątpliwości oraz wywoływać dyskusję. Musisz pamiętać, że **tranzystory nie są urządzeniami precyzyjnymi, żaden z nich nie jest dokładną kopią innego**. Wiadomo, iż tranzystory jednego typu mają różne wartości wzmocnienia prądowego zależne od dokładności, z jaką wykonano dany element. To oczywiście powoduje, że układy elektroniczne są projektowane z pewną niedokładnością. Gdybyś chciał stosować w praktyce ściśle rozwiązania matematyczne, musiałbyś mierzyć się z naprawdę skomplikowanymi problemami. Na co dzień stosuje się zasady wypracowane metodą prób i błędów. Tworzono je przede wszystkim z myślą o uproszczeniu obliczeń i umożliwieniu łatwego dobierania parametrów elementów tak, by dobrze sprawdzały się one w projektowanych układach.

Ustalenie natężenia  $I_2 = 10 \cdot I_B$  jest właśnie przykładem takiej zasady. Czy tylko przy tej wartości prądu  $I_2$  układ zadziałałby poprawnie? Oczywiście, że nie. W zasadzie sprawdziłaby się dowolnie wybrana wartość  $I_2$  pięciokrotnie większa od wartości  $I_B$ . Zazwyczaj wybiera się wartość dziesięciokrotnie większą z trzech powodów.

- Jest ona bardzo wygodna z praktycznego punktu widzenia — działa zawsze.
- Ułatwia prowadzenie obliczeń.
- Łatwo ją zapamiętać, a jej wyznaczanie nie wymaga prowadzenia dodatkowych rachunków.

### Zadanie

W przykładzie opisanym w problemie 32.  $I_B$  wynosiło 1 mA, a  $I_2$  — 10 mA. Która z podanych niżej wartości prądu  $I_2$  pozwoliłaby układowi działać równie sprawnie?

- A. 5 mA.
- B. 8 mA.
- C. 175 mA.
- D. 6,738 mA.
- E. 1 mA.

### Odpowiedź

Prądy A, B i D mają odpowiednią wartość. Prąd D jest zbyt duży, by warto było go rozważać, natomiast prąd E jest zbyt mały, by układ mógł pracować poprawnie.

**36** Zanim zaczniesz zajmować się dalszymi problemami przedstawionymi w tym rozdziale, spróbuj odpowiedzieć na kilka przeglądowych pytań.

### Zadania

- A. Który z przełączników działa szybciej — tranzystor czy przełącznik mechaniczny?
- B. Którym z nich można przeprowadzać bardziej precyzyjne operacje?
- C. Którym z przełączników łatwiej steruje się z odległości?
- D. Który z nich jest pewniejszym rozwiązaniem?
- E. Który z nich jest bardziej trwały?

**Odpowiedzi**

- A. Tranzystor jest znacznie szybszy.
- B. Tranzystor.
- C. Tranzystor.
- D. Tranzystor.
- E. Tranzystory są znacznie bardziej trwałe, ponieważ nie mają żadnych ruchomych części. Przełączniki mechaniczne zazwyczaj psują się po kilkuset tysiącach operacji, natomiast tranzystory są zdolne wykonywać miliony operacji w ciągu sekundy przez kilka lat.

**Przełączanie tranzystorów JFET**

**37** Kilka następujących problemów będzie dotyczyć zagadnień związanych z realizacją przełączania w polowych tranzystorach złączowych. Jeśli chcesz przygotować się nieco do pracy nad nimi, przypomnij sobie materiał przedstawiony w problemach od 29. do 32. rozdziału 3.

Tranzystory typu JFET zaliczają się do grupy urządzeń „normalnie włączonych”, co oznacza, że przy braku napięcia przyłożonego do końcówki wejściowej (tak zwanej **bramki**) tranzystor jest włączony i może przewodzić prąd. Po przyłożeniu do bramki niezerowego napięcia urządzenie będzie przewodzić gorzej, ponieważ wzrasta oporność kanału łączącego dren ze źródłem. W pewnym momencie, gdy napięcie osiągnie odpowiednio dużą wartość, opór w kanale wzrasta tak bardzo, że przepływ prądu zostaje odcięty.

**Zadania**

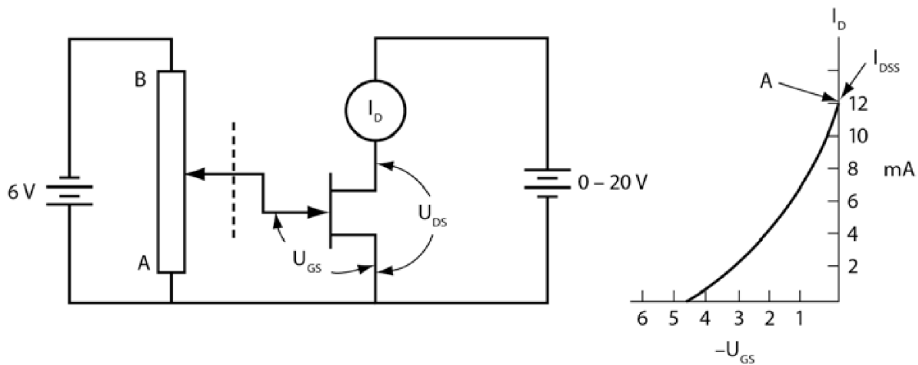
- A. Jak nazywamy styki tranzystora JFET? Które z nich pozwalają sterować pracą urządzenia?
- B. Co włącza i wyłącza tranzystor JFET?

**Odpowiedzi**

- A. Dren, źródło i bramka. Pracą tranzystora steruje bramka.
- B. Gdy napięcie na bramce jest zerowe (jej potencjał jest równy potencjałowi źródła), tranzystor jest włączony. Gdy różnica potencjałów między bramką a źródłem jest duża, tranzystor jest wyłączony.

## Tranzystor JFET — doświadczenie

**38** Celem przedstawionego poniżej doświadczenia jest wyznaczenie natężenia prądu drenu, który popłynie przez całkowicie włączony tranzystor, oraz napięcia na bramce potrzebnego do zupełnego wyłączenia tranzystora. Badany obwód został zaprezentowany na rysunku 4.15. Wartość napięcia bramki (a dokładnie różnicy napięć pomiędzy bramką a źródłem, czyli  $U_{GS}$ ) możesz regulować za pomocą potencjometru. Jednocześnie będziesz dokonywać pomiaru prądu przepływającego przez tranzystor z drenu do źródła ( $I_D$ ). Gdy tranzystor jest całkowicie wyłączony,  $I_D$  jest równy zero. Gdy tranzystor jest całkowicie włączony,  $I_D$  przyjmuje wartość maksymalną (oznaczaną  $I_{DSS}$ ).



Rysunek 4.15

Do przeprowadzenia pomiarów będziesz potrzebować następujących przyrządów:

- baterii sześciowoltowej;
- baterii dwunastowoltowej (albo generatora laboratoryjnego);
- miernika uniwersalnego, którym zmierzysz natężenie prądu;
- miernika uniwersalnego, którym zmierzysz napięcie;
- tranzystora JFET;
- potencjometru — jego wartość jest dowolna (jeżeli możesz, skorzystaj z potencjometru 10 k $\Omega$ );
- płytki prototypowej.

Jeśli nie masz możliwości przeprowadzenia tych pomiarów, przeczytaj po prostu, na czym ma polegać to doświadczenie.

Następnie wykonaj poniższe kroki:

1. Na tablicy prototypowej złóż układ przedstawiony na rysunku 4.15. Obwód drenu podłącz do baterii 12 V.

2. Ustaw na potencjometrze wartość oporu  $0 \Omega$  i odczytaj odpowiadające mu wartości  $U_{GS}$  oraz  $I_D$ . Wpisz je do podanej niżej tabeli.

$U_{GS}$	$I_D$

3. Zwiększ wartość oporu na potencjometrze i spisuj kolejny zestaw wartości napięcia i natężenia prądu. Powtarzaj ten krok tak długo, aż wartość  $I_D$  spadnie do  $0 \text{ mA}$ .
4. Nanieś zmierzone wartości na wykres w sposób przedstawiony na prawej ilustracji rysunku 4.15. Na pionowej osi umieść wartości  $I_D$ , na poziomej —  $U_{GS}$ . Między zaznaczonymi punktami poprowadź krzywą zależności natężenia prądu od podawanego napięcia.

Gdy potencjometr jest ustawiony w punkcie A (jego opór wynosi  $0 \Omega$ ), napięcie pomiędzy bramką a źródłem wynosi  $0 \text{ V}$ , dzięki czemu między drenem a źródłem przepływa prąd o maksymalnej wartości. Prąd ten jest nazywany **prądem nasycenia** ( $I_{DSS}$ ).

Na wykresie widocznym na rysunku 4.15 punkt nasycenia został oznaczony literą A. Wykres przedstawia charakterystykę przejściową tranzystora JFET. Tego rodzaju krzywe znajdziesz w dokumentacji tranzystorów udostępnianej przez producenta.

**UWAGA** Jeżeli obwód drenu będzie zasilany z generatora laboratoryjnego, ustaw go tak, by podawał napięcie  $12 \text{ V}$ . Jedną z cech prądu nasycenia jest to, że przy  $U_{GS} = 0 \text{ V}$ , czyli dla w pełni włączonego tranzystora, prąd nie przestaje płynąć, dopóki napięcie  $U_{DS}$  nie osiągnie wartości kilku woltów. Jeżeli dysponujesz źródłem zasilania o regulowanej wartości podawanego napięcia i zaczniesz pomiary przy  $U_{DS} = 12 \text{ V}$ , zdołasz określić taką wartość  $U_{DS}$ , dla której  $I_D$  zaczyna opadać. Zmniejszaj napięcie  $U_{DS}$  tak długo, aż zauważysz spadek prądu  $I_D$ .

## Zadania

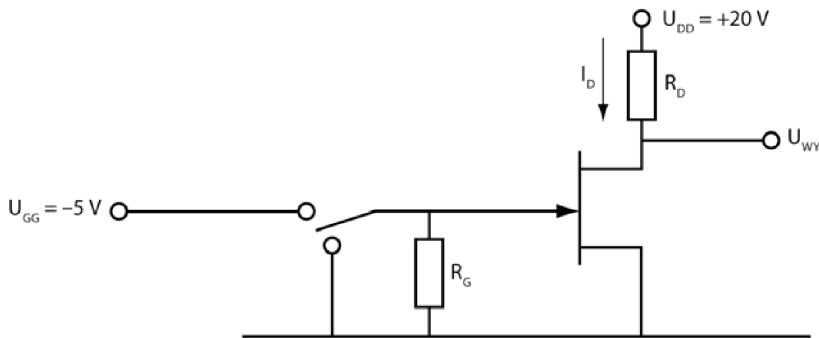
Korzystając z krzywej przejściowej, rozwiąż następujące zadania:

- Podaj wartość prądu drenu dla  $U_{GS}$  równego  $0 \text{ V}$ .
- Dlaczego tę wartość prądu drenu nazywamy prądem nasycenia?
- Ile wynosi napięcie odcięcia dla przedstawionej krzywej?
- Dlaczego wartość tę nazywamy napięciem odcięcia?

**Odpowiedzi**

- A. Na wykresie jest to 12 mA.  
 B. Słowo „nasylenie” na podkreślać fakt, że dla tego napięcia prąd przyjmuje wartość maksymalną.  
 C. Na wykresie jest to około  $-4,2$  V.  
 D. Określenie „napięcie odcięcia” oznacza taką wartość napięcia, przy której natężenie prądu drenu spada do zera.

**39** Przyjrzyj się teraz schematowi obwodu przedstawionemu na rysunku 4.16. Załóżmy, że charakterystyka tego tranzystora jest identyczna z pokazaną na rysunku 4.15.



**Rysunek 4.16**

Po uziemieniu bramki popłynie przez nią prąd o natężeniu 12 mA. Ponieważ opór dren – źródło jest tak mały, że można go pominąć, opór  $R_D$  możesz obliczyć z następującego wzoru:

$$R_D = \frac{U_{DD}}{I_{DSS}}.$$

Jeżeli znasz napięcie pomiędzy drenem a źródłem, możesz uwzględnić je w obliczeniach.

$$R_D = \frac{U_{DD} - U_{DS}}{I_{DSS}}.$$

**Zadanie**

Określ, jaki opór  $R_D$  należy dobrać, by w punkcie A otrzymać natężenie prądu  $I_{DSS}$  przedstawione na wykresie.

**Odpowiedź**

$$R_D = \frac{20\text{V}}{12\text{mA}} = 1,67\text{k}\Omega.$$

**40** Przyjmij, że tranzystor JFET przedstawiony na rysunku 4.16 przechodzi w stan nasycenia dla  $U_{DS} = 1\text{V}$ .

**Zadania**

- A. Jaka będzie wartość oporu  $R_D$ ?
- B. Jaka wartość przyjmie w tym przypadku oporność czynna pomiędzy drenem a źródłem ( $r_{DS}$ )?

**Odpowiedzi**

A.  $R_D = \frac{20\text{V} - 1\text{V}}{12\text{mA}} = 1583\ \Omega.$

B.  $r_{DS} = \frac{U_{DS}}{I_{DSS}} = \frac{1\text{V}}{12\text{mA}} = 83\ \Omega.$

**UWAGA** Jak widzisz, wartość  $R_D$  jest około 19 razy większa od  $r_{DS}$ , zatem przyjmowanie, że oporność czynna tranzystora jest równa zero, nie fałszuje nadmiernie wyników obliczania wartości  $R_D$ . Wynik 1,67 k $\Omega$  jest jedynie o 5% wyższy od wartości 1583  $\Omega$  uzyskiwanej przy obliczeniach uwzględniających oporność czynną.

**41** Teraz zajmiemy się warunkami, które wyłączają tranzystor JFET. Aby osiągnąć ten stan, należy podać na bramce napięcie  $-4,2\text{V}$ , co widać dokładnie na wykresie krzywej przejściowej. Jeżeli ustalisz napięcie bramki równe  $-5\text{V}$ , tranzystor będzie na pewno wyłączony. Zadaniem opornika  $R_G$  jest uziemienie bramki w chwilach zmieniania napięcia z jednej wartości na inną. Do tego celu należy stosować duże wartości oporów. W ten sposób zabezpieczysz układ przed przepływem większych prądów z bramki.

**Zadanie**

Jaki prąd drenu popłynie, gdy na bramce będzie panować potencjał  $-5\text{V}$ ? Jakie będzie napięcie wyjściowe?

**Odpowiedź**

$I_D = 0 \text{ A}$ ,  $U_{WY} = U_{DS} = 20 \text{ V}$ , co jest równe wartości  $U_{DD}$ .

**Podsumowanie**

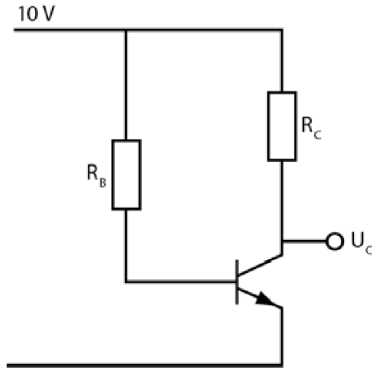
W tym rozdziale przedstawiliśmy zasadę działania przełączników tranzystorowych. Powinieneś umieć już obliczać wartości oporów potrzebnych do poprawnego działania obwodu.

- Funkcję obciążenia w obwodzie pełniła lampa, ponieważ użycie tego rodzaju elementu pozwala w wygodny sposób obserwować działanie przełącznika. Wszystkie przedstawione tu obwody zadziałają, jeśli złożysz je na płycie prototypowej, a wyniki pomiarów napięcia i natężenia prądu będą bardzo zbliżone do wartości prezentowanych w tekście.
- Zaprezentowane tu zagadnienia nie wyczerpują tematu stosowania tranzystorów w charakterze przełączników. Nie wiesz na przykład, jaki prąd może popłynąć przez tranzystor, zanim ten ulegnie spaleniu, nie znasz też maksymalnego napięcia, jakie można przyłożyć do tranzystora, ani nie wiesz, jak szybko przełącza się taki układ ze stanu włączonego do wyłączonego. Wszystkie te dane znajdziesz w dokumentacji elementów przygotowywanych przez producenta, dlatego nie zajmowaliśmy się tutaj metodami ich wyznaczania.
- Tranzystory JFET nie są tak szybkimi przełącznikami jak tranzystory BJT, ale mają pewne zalety związane z dużą opornością wejściową. Tranzystor JFET, by działać, nie potrzebuje prądu z układu kontrolnego. Z kolei tranzystor BJT potrzebuje zasilania prądem z układu kontrolnego, ponieważ ma małą rezystancję wejściową.

**Test zrozumienia**

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień przedstawionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń i rysowania wykresów oraz schematów obwodów użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

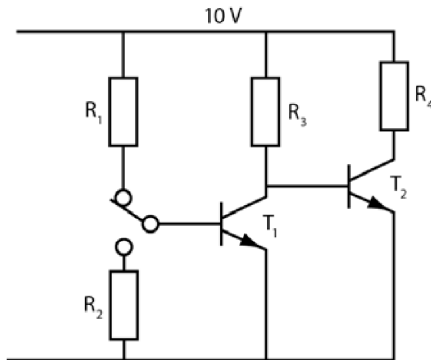
Pierwsze trzy zadania będą dotyczyć obwodu przedstawionego na rysunku 4.17. Będziesz musiał wyznaczyć wartość oporu  $R_B$ , która pozwoli włączyć tranzystor. Wiesz już, że tranzystory są wytwarzane w pewnych „wartościach standardowych”. Zatem po dokładnym wyznaczeniu wartości oporu musisz wybrać najbliższą jej wartość dostępną w ofercie handlowej (wartości te znajdziesz w dodatku D).



Rysunek 4.17

1.  $R_C = 1\Omega$ ,  $\beta = 100$ ,  $R_B =$
2.  $R_C = 4,7\text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 50$ ,  $R_B =$
3.  $R_C = 22\text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 75$ ,  $R_B =$

Problemy przedstawione w zadaniach 4 – 6 odnoszą się do układu z rysunku 4.18. Wyznacz wartości oporów  $R_3$ ,  $R_2$  oraz  $R_1$ , przy których tranzystor  $T_2$  będzie włączony lub wyłączony, gdy przełącznik mechaniczny znajdzie się w odpowiednim położeniu. Parametry oporników wyznaczaj w podanej tu kolejności. Po przeprowadzeniu obliczeń sprawdź najbliższe wartości standardowe.



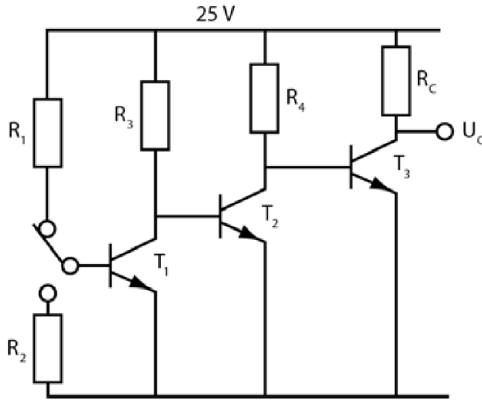
Rysunek 4.18

**UWAGA** Pamiętaj, że zaokrąglenia, które robisz w czasie obliczeń, oraz zaokrąglenie ostatecznego wyniku mogą dać nieco inne odpowiedzi.

4.  $R_4 = 100\ \Omega$ ,  $\beta_1 = 100$ ,  $\beta_2 = 20$ .  
 $R_3 =$  \_\_\_\_\_,  $R_1 =$  \_\_\_\_\_,  $R_2 =$  \_\_\_\_\_
5.  $R_4 = 10\ \Omega$ ,  $\beta_1 = 50$ ,  $\beta_2 = 20$ .  
 $R_3 =$  \_\_\_\_\_,  $R_1 =$  \_\_\_\_\_,  $R_2 =$  \_\_\_\_\_

6.  $R_4 = 250 \Omega$ ,  $\beta_1 = 75$ ,  $\beta_2 = 75$ .  
 $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

W zadaniach 7 – 9 masz znaleźć takie wartości oporu elementów obwodu przedstawionego na rysunku 4.19, by tranzystor  $T_3$  włączał się i wyłączał przy zmianie położenia przełącznika mechanicznego. Po przeprowadzeniu obliczeń dobierz odpowiednie wartości oporów z tabeli producenta.

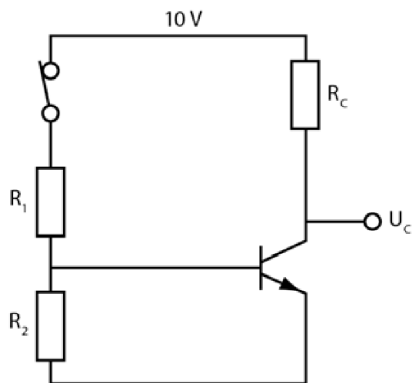


Rysunek 4.19

7.  $R_C = 10 \Omega$ ,  $\beta_3 = 20$ ,  $\beta_2 = 50$ ,  $\beta_1 = 100$ .  
 $R_4 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$   
 $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$
8.  $R_C = 28 \Omega$ ,  $\beta_3 = 10$ ,  $\beta_2 = 75$ ,  $\beta_1 = 75$ .  
 $R_4 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$   
 $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$
9.  $R_C = 1 \Omega$ ,  $\beta_3 = 10$ ,  $\beta_2 = 50$ ,  $\beta_1 = 75$ .  
 $R_4 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$   
 $R_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$

Zadania 10 – 12 dotyczą układu z rysunku 4.20. Wyznacz wartości oporów  $R_1$  oraz  $R_2$ , przy których tranzystor będzie włączony przy zamkniętym i wyłączony przy otwartym przełączniku.

10.  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 100$ .  
 $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
11.  $R_C = 22 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 75$ .  
 $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$
12.  $R_C = 100 \Omega$ ,  $\beta = 30$ .  
 $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ ,  $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$



Rysunek 4.20

13. Tranzystor JFET z kanałem N charakteryzuje się krzywą przejściową o następujących parametrach: gdy  $U_{GS} = 0$  V, przez tranzystor płynie prąd nasycenia  $I_{DSS} = 10,5$  mA; napięcie odcięcia wynosi  $-3,8$  V. Zaprojektuj układ polaryzacji, który będzie przełączać tranzystor JFET ze stanu ON w stan OFF.

### Odpowiedzi do testu zrozumienia

Zadania przedstawione w tym teście zrozumienia odpowiadają typowym obliczeniom wykonywanym w czasie projektowania układów elektronicznych, a otrzymywane w nich wyniki są również zbliżone do tych, z którymi ma się do czynienia w rzeczywistości. Standardową praktyką jest zatem stosowanie w rzeczywistych układach rezystorów o oporze standardowym dobranym jednak tak, by był jak najbliższy wyznaczonej wartości. Jeśli odpowiedzi, które otrzymałeś, nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdziesz do następnego rozdziału.

1.	100 k $\Omega$ .	(problem 8.)
2.	235 k $\Omega$ . Wybierz opornik o standardowej wartości 240 k $\Omega$ .	(problem 8.)
3.	1,65 M $\Omega$ . Wybierz opornik o standardowej wartości 1,6 M $\Omega$ .	(problem 8.)
4.	$R_3 = 2$ k $\Omega$ , $R_1 = 200$ k $\Omega$ , $R_2 = 200$ k $\Omega$ . Użyj oporników o tych wartościach.	(problem 22.)
5.	$R_3 = 200$ $\Omega$ , $R_1 = 10$ k $\Omega$ , $R_2 = 10$ k $\Omega$ . Użyj oporników o tych wartościach.	(problem 22.)
6.	$R_3 = 18,8$ k $\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 18 k $\Omega$ .	(problem 22.)
	$R_1 = 1,41$ M $\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 1,5 M $\Omega$ .	
	W miejsce $R_2$ wstaw opornik o wartości 1 M $\Omega$ .	
7.	$R_4 = 200$ $\Omega$ , $R_3 = 10$ k $\Omega$ , $R_2 = 1$ M $\Omega$ , $R_1 = 1$ M $\Omega$ . Użyj oporników o tych wartościach.	(problem 26.)

<b>8.</b>	$R_4 = 280 \Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 270 $\Omega$ . $R_3 = 21 \text{ k}\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 22 $\text{k}\Omega$ . $R_2 = 1,56 \text{ M}\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 1,5 $\text{M}\Omega$ lub 1,6 $\text{M}\Omega$ . $R_1 = 1,56 \text{ M}\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 1,5 $\text{M}\Omega$ lub 1,6 $\text{M}\Omega$ .	(problem 26.)
<b>9.</b>	$R_4 = 10 \Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 10 $\Omega$ . $R_3 = 500 \Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 510 $\Omega$ . $R_2 = 37,5 \text{ k}\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 39 $\text{k}\Omega$ . $R_1 = 37,5 \text{ k}\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 39 $\text{k}\Omega$ .	(problem 26.)
<b>10.</b>	$R_2 = 700 \Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 680 $\Omega$ lub 720 $\Omega$ . $R_1 = 8,45 \text{ k}\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 8,2 $\text{k}\Omega$ . Jeżeli zignorujesz napięcie na tranzystorze 0,7 V, $R_1 = 9,1 \Omega$ .	(problemy 31 – 33)
<b>11.</b>	$R_2 = 11,7 \text{ k}\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 12 $\text{k}\Omega$ . $R_1 = 141 \text{ k}\Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 140 $\text{k}\Omega$ lub 150 $\text{k}\Omega$ .	(problemy 31 – 33)
<b>12.</b>	$R_2 = 21 \Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 22 $\Omega$ . $R_1 = 273 \Omega$ . Użyj opornika o standardowej wartości 270 $\Omega$ .	(problemy 31 – 33)
<b>13.</b>	Wykorzystaj obwód przedstawiony na rysunku 4.16. Na bramce podaj napięcie nieco niższe niż $-3,8 \text{ V}$ (wartość $-4 \text{ V}$ powinna sprawdzić się dobrze). Wbuduj w układ opornik $R_G = 1 \text{ M}\Omega$ . Wartość opornika $R_D$ powinna wynosić $(20 \text{ V})/(10,5 \text{ mA})$ , co daje w wyniku 1,9 $\text{k}\Omega$ . Aby uzyskać taką oporność, możesz połączyć szeregowo opornik standardowy 1 $\text{k}\Omega$ z opornikiem 910 $\Omega$ , co da w efekcie zbliżoną wartość 1,91 $\text{k}\Omega$ .	(problemy 39. i 41.)



# Powtórzenie informacji o prądzie zmiennym i test wstępny

Aby zajmować się elektroniką, musisz dysponować podstawową wiedzą dotyczącą zagadnień związanych z prądem zmiennym. To z kolei wymaga poznania cech charakterystycznych sinusoidy, czyli wykresu funkcji sinusoidalnej.

**Sinusoida** przypomina kształtem falę na wodzie. Funkcja sinusoidalna jest wykorzystywana w elektronice do opisu zachowań napięcia i prądu o zmiennych amplitudach. Niektóre z sygnałów podawanych do układów prądu zmiennego (na przykład dostarczanych z sieci domowej) są opisywane funkcją sinusoidalną. Jej wykres pokazuje charakter zmian napięcia narastającego od wartości 0 woltów do wartości maksymalnej, a następnie spadek — również przez wartość zerową — do wartości minimalnej i powrót do wartości wyjściowej. W ciągu sekundy następuje pięćdziesiąt takich zmian, co oznacza, że częstotliwość sygnału wynosi 50 Hz (herców).

Podobną charakterystykę mają dźwięki wydawane przez instrumenty muzyczne. Występ orkiestry symfonicznej jest w rzeczywistości niczym innym, jak tylko generatorem bardzo skomplikowanych fal akustycznych, będących złożeniem wielu fal sinusoidalnych o różnych częstotliwościach.

Poznawanie tematyki prądu zmiennego należy rozpocząć od zapoznania się z cechami funkcji sinusoidalnych. Później dowiesz się, w jaki sposób układy elektroniczne mogą generować fale sinusoidalne i jak mogą je zmieniać.

W tym rozdziale zajmiemy się następującymi zagadnieniami:

- zasadą pracy generatora,
- charakterystyką funkcji sinusoidalnej,
- napięciem międzyszczytowym i skutecznym,
- zachowaniem oporników w obwodach prądu zmiennego,
- reaktancją pojemnościową i indukcyjną,
- rezonansem.

## Generator

**1** Źródłem prądu w obwodach prądu stałego jest zazwyczaj bateria (czasami bateria słoneczna) podająca do układu stałe napięcie i prąd o stałym natężeniu.

W obwodach prądu zmiennego źródłem napięcia jest najczęściej **generator** podający napięcie w postaci regularnego sygnału, na przykład opisanego funkcją sinus.

### Zadania

Narysuj pełny okres funkcji sinus.

#### Odpowiedź

Patrz rysunek 5.1.



Rysunek 5.1

**2** W laboratorium stosuje się różne źródła zmiennego napięcia. W dalszych rozważaniach będziemy się posługiwać określeniem **generator**, mając na myśli źródło napięcia opisywanego funkcją sinus. Urządzenia te pozwalają zmieniać napięcie i częstotliwość generowanej fali za pomocą przycisku lub pokrętki. Określa się je różnymi nazwami, w zależności od sposobu generowania zmiennego napięcia bądź zastosowania do badań. Największą popularnością cieszą się tak zwane **generatory funkcji** wytwarzające napięcia o różnych falach, na przykład kwadratowej czy trójkątnej. Generator funkcji przydaje się bardzo do testowania obwodów.

Generatory oznacza się w schematach symbolem przedstawionym na rysunku 5.2. Kształt sinusoidy wewnątrz kółka oznacza, że jest to źródło prądu zmiennego o charakterze sinusoidalnym.



Rysunek 5.2

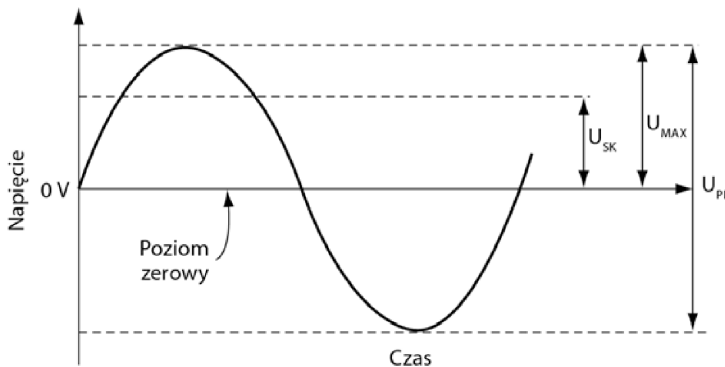
**Zadania**

- A. Jak nazywa się najpopularniejsze urządzenie laboratoryjne wykorzystywane do generowania przebiegu sygnału?
- B. Co oznacza skrót AC?
- C. Jak rozumieć znak sinusoidy wewnątrz symbolu generatora w schemacie obwodu?

**Odpowiedzi**

- A. Generator funkcji.
- B. Prąd zmienny.
- C. Tak oznaczony generator wytwarza sygnały sinusoidalne.

**3** Na rysunku 5.3 przedstawiliśmy niektóre z parametrów opisujących funkcję sinus. Na osiach wykresu dokłada się odpowiednio napięcie i czas.



**Rysunek 5.3**

**Poziom zerowy** jest wygodnym punktem odniesienia do dokonywania pomiarów napięcia.

**Zadania**

- A. Po co wprowadza się poziomy zerowy?
- B. W jakim punkcie najczęściej rozpoczyna się pomiar czasu?

**Odpowiedzi**

- A. To punkt odniesienia do pomiarów napięcia.

**B.** Pomiar czasu trwania zjawiska można rozpocząć w dowolnym punkcie przebiegu funkcji zmienności, ale najczęściej wybiera się któryś z punktów charakterystycznych, na przykład przecięcia krzywej z osią poziomu zerowego.

**4** W pomiarach napięcia szczególną uwagę zwraca się na trzy wielkości — napięcie szczytowe (MAX), napięcie międzyszczytowe (PP) oraz napięcie skuteczne (SK).

Podane niżej równania ujmują zależności pomiędzy napięciami szczytowym, międzyszczytowym oraz skutecznym w funkcji o przebiegu sinusoidalnym. Dla innych przebiegów (na przykład dla fali kwadratowej) zależności te są opisane innymi wzorami.

$$U_{MAX} = \sqrt{2} \cdot U_{SK},$$

$$U_{PP} = 2 \cdot U_{MAX} = 2\sqrt{2} \cdot U_{SK},$$

$$U_{SK} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_{MAX} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{PP}}{2}.$$

Zapamiętaj też następujące zależności:

$$\sqrt{2} = 1,414, \quad \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707.$$

### Zadanie

Znajdź napięcie skuteczne, jeśli napięcie międzyszczytowe wynosi 10 V.

#### Odpowiedź

$$U_{SK} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{PP}}{2} = 0,707 \cdot \frac{10 \text{ V}}{2} = 3,535 \text{ V}.$$

**5** Przeprowadź obliczenia dla napięcia opisywanego funkcją sinus.

### Zadanie

Znajdź napięcie międzyszczytowe, jeśli napięcie skuteczne wynosi 2 V.

#### Odpowiedź

$$U_{PP} = 2\sqrt{2} \cdot U_{SK} = 2 \cdot 1,414 \cdot 2 \text{ V} = 5,656 \text{ V}.$$

6 Przeprowadź obliczenia dla napięcia opisywanego funkcją sinus.

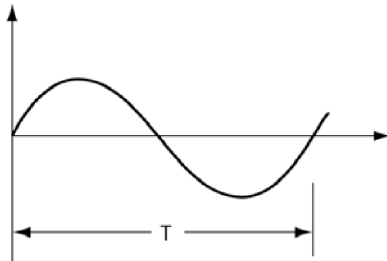
### Zadania

- A. Znajdź  $U_{SK}$ , gdy  $U_{PP} = 230 \text{ V}$ .  
 B. Znajdź  $U_{PP}$ , gdy  $U_{SK} = 120 \text{ V}$ .

### Odpowiedzi

- A. 81,33 V.  
 B. 340 V.

7 Funkcję okresową o przebiegu sinusoidalnym opisuje się charakterystycznym parametrem czasowym. Pełny przebieg funkcji dokonuje się po tak zwanym **okresie**. Sytuację tę ilustruje rysunek 5.4. Wszystkie inne pomiary czasowe są wielokrotnością okresu bądź jego ułamkiem.



Rysunek 5.4

### Zadania

- A. Jak nazywa się pełny przebieg funkcji sinusoidalnej?  
 B. Jak nazywa się czas pełnego przebiegu funkcji sinusoidalnej?  
 C. Jakim wzorem wyraża się zależność częstotliwości funkcji od czasu pełnego przebiegu?  
 D. Co jest jednostką częstotliwości?  
 E. Określ częstotliwość fali sinusoidalnej o okresie 0,5 ms. Jaka będzie częstotliwość fali o okresie 40  $\mu\text{s}$ ?  
 F. Podaj okres fali o częstotliwości 60 Hz. Ile wynoszą okresy fal sinusoidalnych o częstotliwościach 12,5 Hz oraz 1 MHz?

**Odpowiedzi**

- A. Cykl.
- B. Okres, oznacza się go symbolem  $T$ .
- C.  $f = \frac{1}{T}$ .
- D. Podstawową jednostką częstotliwości jest jeden herc (Hz). Jeden herc jest równy jednemu cyklowi na sekundę.
- E. 2 kHz, 25 kHz.
- F. 16,7 ms, 80  $\mu$ s, 1  $\mu$ s.

**8** Wskaż poprawne stwierdzenia.

**Zadanie**

Która z funkcji może opisywać sygnał prądu zmiennego?

- A. Funkcja o przebiegu sinusoidalnym.
- B. Funkcja będąca złożeniem wielu fal sinusoidalnych o różnych częstotliwościach i amplitudach.
- C. Linia prosta.

**Odpowiedzi**

A i B.

**Opornik w obwodzie prądu zmiennego**

**9** Prąd zmienny może przepływać przez różne elementy układu, tak jak prąd stały. Oporniki w obwodzie reagują na przepływ prądu zmiennego tak samo jak na przepływ prądu stałego.

**Zadanie**

Załóżmy, że do obwodu podawany jest sygnał zmienny o napięciu międzyszczytowym 10 V, przepływający przez dziesięciomowy opornik. Jaki prąd popłynie przez ten opornik?

**Odpowiedź**

Skorzystaj z prawa Ohma:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10 \text{ V}}{10 \Omega} = 1 \text{ A}_{\text{pp}}.$$

Ponieważ podano napięcie międzyszczytowe, obliczony prąd jest również wielkością międzyszczytową.

**10** Do obwodu z dwudziestoomowym opornikiem podawany jest sygnał o napięciu skutecznym 10 V.

**Zadanie**

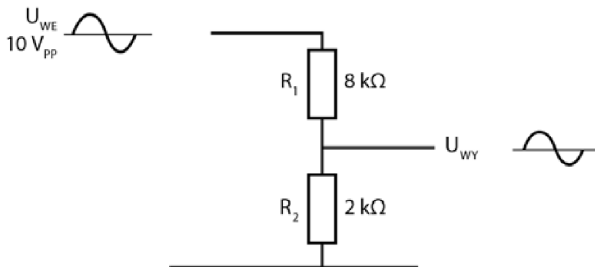
Oblicz prąd płynący przez opornik.

**Odpowiedź**

$$I = \frac{10 \text{ V}}{20 \Omega} = 0,5 \text{ A}_{\text{SK}}.$$

Ponieważ w zadaniu podano napięcie skuteczne, wyznaczona wartość natężenia jest również wartością skuteczną.

**11** Do obwodu z dzielnikiem napięcia podawany jest sygnał zmienny o napięciu międzyszczytowym równym 10 V (rysunek 5.5).



Rysunek 5.5

**Zadanie**

Określ napięcie wyjściowe  $U_{\text{WY}}$ .

**Odpowiedź**

$$U_{WY} = U_{WE} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \text{ V} \cdot \frac{2 \text{ k}\Omega}{8 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ V} \cdot \frac{2 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ V}_{PP}.$$

**Kondensator w obwodzie prądu zmiennego**

**12** Kondensator stawia opór przepływowi prądu zmiennego.

**Zadania**

- A. Jak nazywa się opór stawiany przepływowi prądu przez kondensator?  
 B. Do jakiej wielkości charakteryzującej obwody prądu stałego można przyrównać ten parametr?

**Odpowiedzi**

- A. Reaktancja.  
 B. Można porównać ją do rezystancji.

**13** Reaktancję, tak samo jak rezystancję, opisuje się odpowiednim wzorem.

**Zadania**

- A. Podaj wzór na reaktancję.  
 B. Opisz zmienne użyte w równaniu.  
 C. W jaki sposób zmienia się reaktancja kondensatora, gdy częstotliwość sygnału rośnie?

**Odpowiedź**

- A.  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ .  
 B.  $X_C$  — reaktancja pojemnościowa podawana w omach,  
 $f$  — częstotliwość sygnału podawana w hercach,  
 $C$  — pojemność kondensatora podawana w faradach.  
 C. Wraz ze wzrostem częstotliwości reaktancja kondensatora spada.

**14** Przyjmij, że pojemność kondensatora wynosi  $1 \mu\text{F}$ , a częstotliwość sygnału podawanego przez generator —  $1 \text{ kHz}$ .

### Zadanie

Znajdź reaktancję kondensatora. (Uwaga:  $\frac{1}{2\pi}$  to około  $0,159$ ).

#### Odpowiedź

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

$$f = 1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz},$$

$$C = 1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}.$$

Zatem:

$$X_C = \frac{0,159}{10^3 \cdot 10^{-6}} = 160 \Omega.$$

**15** Przeprowadź teraz dwa proste obliczenia. Wyznacz reaktancję kondensatora  $X_{C1}$  dla sygnału o częstotliwości  $1 \text{ kHz}$  oraz reaktancję  $X_{C2}$  dla drugiej, podanej w zadaniu częstotliwości.

### Zadania

Oblicz  $X_{C1}$  oraz  $X_{C2}$ .

A.  $C = 0,1 \mu\text{F}$ ,  $f = 100 \text{ Hz}$

B.  $C = 100 \mu\text{F}$ ,  $f = 2 \text{ kHz}$

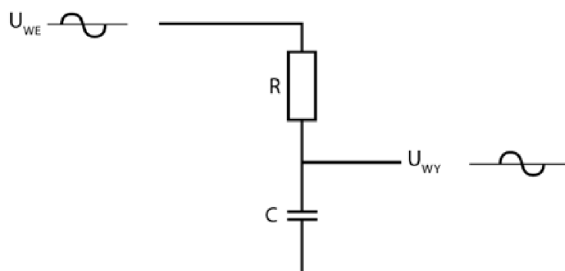
#### Odpowiedzi

A. Dla częstotliwości  $f = 100 \text{ kHz}$   $X_{C1} = 1600 \Omega$ , dla częstotliwości  $f = 100 \text{ Hz}$   $X_{C2} = 16\,000 \Omega$ .

B. Dla częstotliwości  $f = 100 \text{ kHz}$   $X_{C1} = 1,6 \Omega$ , dla częstotliwości  $f = 2 \text{ kHz}$   $X_{C2} = 0,8 \Omega$ .

Układ zawierający szeregowo połączone opornik i kondensator (w sposób przedstawiony na rysunku 5.6) działa jako dzielnik napięcia.

Wprawdzie ten dzielnik podaje na wyjściu zmniejszone napięcie, tak samo jak dzielnik zbudowany z dwóch oporników, ale różni się od tego ostatniego jedną zasadniczą cechą. Gdybyś sprawdził sygnały wejściowy i wyjściowy na



Rysunek 5.6

oscyloskopie, przekonałbyś się, że są one przesunięte w stosunku do siebie. O takich sygnałach mówimy, że są „przesunięte w fazie”. **Faza** to bardzo istotne pojęcie, niezbędne do zrozumienia pewnych aspektów działania układów elektronicznych. W rozdziale 6. omówimy szczegółowo związek pojęcia fazy i wybranych obwodów prądu zmiennego. Do zagadnień związanych z fazą powrócimy też podczas dyskusji o wzmacnianiu sygnałów.

## Cewka w obwodzie prądu zmiennego

**16** Cewka indukcyjna, zwana też zwojnicą, jest zazwyczaj wykonana z drutu nawiniętego na rdzeń z miękkiego żelaza. Czasami zwoje umieszcza się na rdzeniu z materiału nieprzewodzącego.

### Zadania

- Powiedz, czy reaktancja cewki w obwodzie prądu zmiennego jest duża, czy mała. Odpowiedź uzasadnij.
- Czy rezystancja cewki w obwodzie prądu stałego jest duża, czy mała?
- Co łączy reaktancję w obwodzie prądu zmiennego z rezystancją w obwodzie prądu stałego?
- Podaj wzór na obliczanie reaktancji indukcyjnej.

### Odpowiedzi

- Reaktancja cewki ( $X_L$ ) w obwodzie prądu zmiennego potrafi przyjmować dość wysokie wartości, ponieważ wokół cewki powstaje pole elektromagnetyczne, które generuje prąd płynący w kierunku przeciwnym do prądu będącego źródłem pola.
- Rezystancja cewki ( $r$ ) umieszczonej w obwodzie prądu stałego jest zazwyczaj dosyć niska, równa oporowi drutu, z którego wykonany jest ten element.

C. Nic.

D.  $X_L = 2\pi fL$ , gdzie  $L$  — indukcyjność cewki wyrażana w henrach. Zgodnie z równaniem reaktancja cewki będzie rosła wraz ze wzrostem częstotliwości przepływającego przez nią sygnału.

**17** Przyjmij, że indukcyjność cewki wynosi 10 H, a częstotliwość sygnału to 100 Hz.

### Zadanie

Oblicz reaktancję cewki.

### Odpowiedź

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 100 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ H} = 6280 \Omega.$$

**18** Spróbuj rozwiązać teraz następujące dwa zadania. W każdym przypadku znajdź reaktancję cewki dla 1 kHz  $X_{L1}$  oraz reaktancję  $X_{L2}$  dla drugiej podanej częstotliwości.

### Zadania

A.  $L = 1 \text{ mH}$  (0,001 H),  $f = 10 \text{ kHz}$ .

B.  $L = 0,01 \text{ mH}$ ,  $f = 5 \text{ MHz}$ .

### Odpowiedzi

A.  $X_{L1} = 6,28 \cdot 10^3 \cdot 0,001 = 6,28 \Omega.$

$$X_{L2} = 6,28 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,001 = 62,8 \Omega.$$

B.  $X_{L1} = 6,28 \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot 10^{-3} = 0,0628 \Omega.$

$$X_{L2} = 6,28 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,01 \cdot 10^{-3} = 314 \Omega.$$

Obwód zawierający cewkę i opornik połączone szeregowo działa jak dzielnik napięcia, tak samo jak miało to miejsce w przypadku połączonych ze sobą szeregowo opornika i kondensatora. Także w tym przypadku zależność pomiędzy napięciem wejściowym a napięciem wyjściowym nie jest tak prosta jak przy dzielniku zbudowanym z samych oporników. Tego rodzaju obwody omówimy szczegółowo w rozdziale 6.

## Rezonans

**19** Obliczenia, które wykonywałeś w poprzednio omówionych zadaniach, wykazały, że reaktancja pojemnościowa spada ze wzrostem częstotliwości sygnału, natomiast reaktancja indukcyjna wzrasta, gdy częstotliwość sygnału rośnie. Dla połączonych szeregowo cewki i kondensatora istnieje jedna częstotliwość sygnału, przy której ich reaktancje są sobie równe.

### Zadania

- A. Jak nazywa się ta częstotliwość?  
 B. Podaj wzór pozwalający obliczyć jej wartość. Aby go poznać, przyjmij  $X_L = X_C$  i wyznacz z niego częstotliwość.

### Odpowiedzi

A. Częstotliwość rezonansowa.

B.  $2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$ . Po przekształceniu tego równania i wyznaczeniu z niego  $f$  otrzymasz wzór pozwalający obliczyć częstotliwość rezonansową  $f_R$ :

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

**20** Kondensator i cewka połączone równolegle również dzielą pewną częstotliwość rezonansową, jednak w tym przypadku wyznaczenie jej nie jest tak proste jak przy połączeniu szeregowym. Analizowanie połączenia równoległego jest utrudnione, ponieważ cewka zawsze charakteryzuje się pewną opornością wewnętrzną, co utrudnia prowadzenie obliczeń. Jednak w określonych warunkach analiza połączenia równoległego staje się podobna do analizy połączenia szeregowego. Ma to miejsce, gdy reaktancja cewki wyrażona w omach jest przynajmniej dziesięć razy większa od wewnętrznego oporu tego elementu ( $r$ ). Wtedy wzór pozwalający wyznaczyć częstotliwość rezonansową przyjmuje postać identyczną z tym wyznaczanym dla połączenia szeregowego. W dalszych rozważaniach będziesz często korzystać z tego przybliżenia.

### Zadania

Sprawdź, czy dla podanych parametrów cewek ich reaktancja jest dziesięciokrotnie wyższa od ich wewnętrznej rezystancji. Częstotliwość rezonansowa jest podana w zadaniu.

- A.  $f_R = 25 \text{ kHz}$ ,  $L = 2 \text{ mH}$ ,  $r = 20 \ \Omega$ .  
 B.  $f_R = 1 \text{ kHz}$ ,  $L = 33,5 \text{ mH}$ ,  $r = 30 \ \Omega$ .

### Odpowiedzi

- A.  $X_L = 314 \ \Omega$ , co oznacza, że reaktancja jest przeszło dziesięć razy większa od oporu wewnętrznego.  
 B.  $X_L = 210 \ \Omega$ , co oznacza, że reaktancja jest mniej niż dziesięć razy większa od oporu wewnętrznego.

**UWAGA** W rozdziale 7. znajdziesz informacje dotyczące połączeń równoległych i szeregowych obwodów rezonansowych. Przedstawimy wtedy wiele przydatnych sposobów rozwiązywania tych problemów.

**21** Określ częstotliwość rezonansową ( $f_R$ ) dla podanych cewek i kondensatorów przy połączeniu szeregowym i równoległym. Przyjmij, że opór wewnętrzny cewek jest tak mały, że można go pominąć.

### Zadania

Wyznacz wartość  $f_R$ .

- A.  $C = 1 \ \mu\text{F}$ ,  $L = 1 \text{ H}$ .  
 B.  $C = 0,2 \ \mu\text{F}$ ,  $L = 3,3 \text{ H}$ .

### Odpowiedzi

$$\text{A. } f_R = \frac{0,159}{\sqrt{10^{-6} \cdot 1}} = 160 \text{ Hz}.$$

$$\text{B. } f_R = \frac{0,159}{\sqrt{3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}}} = 6,2 \text{ kHz}.$$

**22** Rozwiąż teraz dwa ostatnie zadania.

### Zadania

Wyznacz wartość  $f_R$ .

- A.  $C = 10 \ \mu\text{F}$ ,  $L = 1 \text{ H}$ .  
 B.  $C = 0,0033 \ \mu\text{F}$ ,  $L = 0,5 \text{ H}$ .

**Odpowiedzi**

- A.  $f_R = 50 \text{ Hz}$  (w przybliżeniu).  
 B.  $f_R = 124 \text{ kHz}$ .

Znajomość zagadnienia rezonansu staje się niezbędna, jeżeli chcesz analizować bardziej złożone układy elektroniczne, na przykład filtry czy oscylatory.

**Filtry** to obwody elektroniczne mogące blokować wybrane częstotliwości lub przekazywać dalej sygnały o określonych częstotliwościach. Stosuje się je powszechnie między innymi w radioodbiornikach i odbiornikach telewizyjnych. **Oscylatory** to obwody generujące ciągły sygnał wyjściowy bez konieczności podawania im sygnału wejściowego. Oscylatory stosowane w obwodach rezonansowych wytwarzają fale o przebiegu sinusoidalnym. (Więcej na temat oscylatorów dowiesz się z rozdziału 9.)

**Podsumowanie**

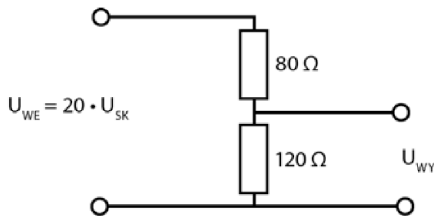
Poniżej znajdziesz zestawienie najważniejszych informacji z tego rozdziału.

- W obwodach prądu zmiennego bardzo często wykorzystuje się sygnały o przebiegu sinusoidalnym.
- Najczęściej stosowanym generatorem sygnałów jest tak zwany generator funkcji.
- $U_{MAX} = \sqrt{2} \cdot U_{SK}, U_{PP} = 2\sqrt{2} \cdot U_{SK}$ .
- $f = \frac{1}{T}$ .
- $I_{PP} = \frac{U_{PP}}{R}, I_{SK} = \frac{U_{SK}}{R}$ .
- Reaktancja pojemnościowa jest opisywana wzorem  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ .
- Reaktancję indukcyjną oblicza się z równania  $X_L = 2\pi fL$ .
- Częstotliwość rezonansowa jest opisywana wzorem  $f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

## Test zrozumienia

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień przedstawionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

- Na podstawie podanych wartości maksymalnych i międzyszczytowych wyznacz wartości skuteczne danych wielkości.
  - $U_{MAX} = 12 \text{ V}$ ,  $U_{SK} =$
  - $U_{MAX} = 80 \text{ mV}$ ,  $U_{SK} =$
  - $U_{PP} = 100 \text{ V}$ ,  $U_{SK} =$
- Na podstawie podanej wartości skutecznej wyznacz odpowiednie wartości międzyszczytowe i maksymalne.
  - $U_{SK} = 120 \text{ V}$ ,  $U_{MAX} =$
  - $U_{SK} = 100 \text{ mV}$ ,  $U_{MAX} =$
  - $U_{SK} = 12 \text{ V}$ ,  $U_{PP} =$
- Na podstawie danej wartości wyznacz okres lub częstotliwość.
  - $T = 16,7 \text{ ms}$ ,  $f =$
  - $f = 15 \text{ kHz}$ ,  $T =$
- Znajdź całkowity prąd płynący przez przedstawiony na rysunku 5.7 układ oraz spadek napięcia na oporniku  $R_2$  ( $U_{WY}$ ).



**Rysunek 5.7**

- Wyznacz reaktancję dla podanych elementów.
  - $C = 0,16 \mu\text{F}$ ,  $f = 12 \text{ kHz}$ ,  $X_C =$
  - $L = 5 \text{ mH}$ ,  $f = 30 \text{ kHz}$ ,  $X_L =$
- Znajdź częstotliwość rezonansową podanych elementów.
  - $C = 1 \mu\text{F}$ ,  $X_C = 200 \Omega$ ,  $f =$
  - $L = 50 \mu\text{H}$ ,  $X_L = 320 \Omega$ ,  $f =$
- Ile będzie wynosić częstotliwość rezonansowa kondensatora i cewki połączonych szeregowo i opisanych wartościami z podpunktów A i B zadania 5.?

8. Ile wyniosłaby częstotliwość rezonansowa kondensatora i cewki połączonych równolegle i opisanych wartościami z podpunktów A i B zadania 6.? Przy jakim założeniu otrzymany wynik będzie poprawny?

### Odpowiedzi do testu zrozumienia

Jeśli otrzymane odpowiedzi nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdziesz do następnego rozdziału.

1.	A. 8,5 V (wartość skuteczna).	(problemy 4 – 6)
	B. 56,6 V (wartość skuteczna).	
	C. 35,4 V (wartość skuteczna).	
2.	A. 169,7 V (wartość maksymalna).	(problemy 4 – 6)
	B. 141,4 mV (wartość maksymalna).	
	C. 33,9 V (wartość międzyszczytowa).	
3.	A. 60 Hz.	(problem 7.)
	B. 66,7 $\mu$ s.	
4.	I = 0,1 A (wartość skuteczna). U <sub>wy</sub> = 12 V (wartość skuteczna).	(problemy 9 – 11)
5.	A. 82,9 $\Omega$ .	(problemy 14. i 17.)
	B. 942,5 $\Omega$ .	
6.	A. 795,8 Hz.	(problemy 14. i 17.)
	B. 1,02 kHz.	
7.	5,63 kHz.	(problem 19.)
8.	711,8 Hz. Należy założyć, że wewnętrzny opór cewki jest tak mały, iż można go pominąć.	(problem 20.)

# Prąd zmienny w elektronice

Pewne rodzaje układów elektronicznych można znaleźć niemal w każdym urządzeniu. Ich zadaniem jest przetwarzanie sygnałów prądu zmiennego. Jednymi z najczęściej używanych są **filtry**, o których napiszemy szerzej w tym rozdziale. Filtr jest zbudowany z oporników i kondensatorów (tak zwany układ RC) lub z oporników i cewek (układ RL). Filtry (czyli przede wszystkim ich działanie na sygnały prądu zmiennego) są niezbędne do prawidłowego działania urządzeń komunikacyjnych, elektroniki użytkowej i przemysłowych układów sterowania.

Po zakończeniu pracy z tym rozdziałem będziesz potrafił:

- obliczać napięcie wyjściowe sygnału prądu zmiennego po przejściu przez górnoprzepustowy filtr RC;
- obliczać napięcie wyjściowe sygnału prądu zmiennego po przejściu przez dolnoprzepustowy filtr RC;
- obliczać napięcie wyjściowe sygnału prądu zmiennego po przejściu przez górnoprzepustowy filtr RL;
- obliczać napięcie wyjściowe sygnału prądu zmiennego po przejściu przez dolnoprzepustowy filtr RL;
- rysować przebieg sygnału zmiennego lub będącego połączeniem sygnału zmiennego i stałego po przejściu przez obwód filtrujący;
- obliczać proste kąty fazowe i różnice fazowe.

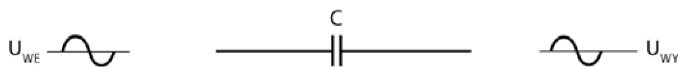
## Kondensatory w obwodach prądu zmiennego

---

**1** Sygnał prądu zmiennego zmienia się z każdą chwilą niezależnie od tego, czy jego przebiegiem jest prosta funkcja sinus, czy też jest on złożeniem wielu fal sinusoidalnych. Gdy taki sygnał dotrze do jednej z okładek kondensatora,

po chwili zostanie wyindukowany na drugiej okładce. Mówimy, że kondensator „przekazuje” sygnał prądu zmiennego, co zostało przedstawione na rysunku 6.1.

**UWAGA** Kondensator nie przekazuje sygnałów prądu stałego. Należy też pamiętać, że kondensator *nie* wywołuje zwarcia w obwodzie prądu zmiennego.



Rysunek 6.1

### Zadania

- A. Na czym polega główna różnica w działaniu kondensatora w układach prądu stałego i prądu zmiennego?
- B. Powiedz, czy w układzie prądu zmiennego kondensator tworzy układ otwarty, czy układ zwarcia.

### Odpowiedzi

- A. W układzie prądu zmiennego kondensator przekaże sygnał dalej, natomiast w układzie prądu stałego napięcie nie zostanie przekazane do dalszej części układu.
- B. Kondensator nie tworzy żadnego z podanych tu układów.

**2** Kondensator stawia w pewnym stopniu opór przepływającemu przez niego sygnałowi zmiennemu. Opór ten, co wiesz już z rozdziału 5., nazywamy **reaktancją pojemnościową**.

Reaktancja jest pojęciem zbliżonym do rezystancji, przy czym musisz pamiętać, że jej wartość zmienia się w zależności od częstotliwości sygnału płynącego przez kondensator. Reaktancję kondensatora oblicza się ze wzoru podanego w rozdziale 5.

### Zadanie

Zapisz wzór na reaktancję pojemnościową.

### Odpowiedź

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

**3** Z tego wzoru jasno wynika, że reaktancja kondensatora jest zależna od częstotliwości docierającego do niego sygnału.

### Zadanie

Jak zmieni się reaktancja, gdy częstotliwość sygnału wzrośnie?

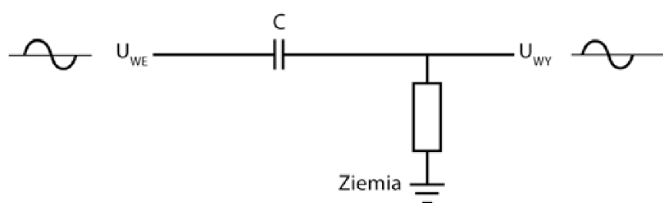
#### Odpowiedź

Reaktancja zmaleje.

Jeśli odpowiadanie na postawione tu pytania sprawiło Ci problem, powinieneś raz jeszcze przejrzeć materiał zawarty w rozdziale 5.

## Kondensatory i oporniki łączone szeregowo

**4** Dla uproszczenia rozważań przyjmiemy, że wszystkie sygnały wejściowe mają przebieg czysto sinusoidalny. Obwód przedstawiony na rysunku 6.2 pokazuje zachowanie fali sinusoidalnej po przejściu przez kondensator.



Rysunek 6.2

### Zadanie

Jaki sygnał będzie wychodził z układu, jeżeli wprowadzany jest do niego sygnał o czystym przebiegu sinusoidalnym?

#### Odpowiedź

Sygnał wyjściowy też będzie sinusoidalny.

**5** Częstotliwość sygnału przechodzącego przez kondensator nie zmienia się, musisz jednak pamiętać, że kondensator w układach prądu zmiennego zachowuje się podobnie jak opornik — wykazuje pewien opór względem

przepływającego przez niego sygnału. Wartość tego oporu zależy od pojemności kondensatora i częstotliwości sygnału wejściowego. Oznacza to, że amplituda fali wyjściowej będzie mniejsza od amplitudy fali wejściowej.

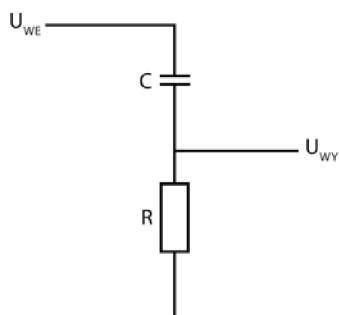
### Zadanie

Jak zachowuje się kondensator w opisanym tu prostym układzie prądu zmiennego?

#### Odpowiedź

Kondensator wykazuje pewnego rodzaju opór przeciwdziałający przepływającemu przez niego prądowi, podobny do rezystancji oporników.

**6** Szeregowe połączenie kondensatora z opornikiem (rysunek 6.3) tworzy dzielnik napięcia.



Rysunek 6.3

### Zadanie

Jakim wzorem posłużyłbyś się, aby obliczyć napięcie wyjściowe w układzie dwóch połączonych ze sobą szeregowo oporników?

#### Odpowiedź

$$U_{WY} = U_{WE} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

**7** Wiedząc, że w układzie znajdują się dwa połączone ze sobą szeregowo oporniki, możesz policzyć całkowity opór układu.

**Zadanie**

Jakim wzorem wyraża się całkowity opór układu połączonych szeregowo oporników?

**Odpowiedź**

$$R_Z = R_1 + R_2.$$

**8** W układzie połączonych ze sobą szeregowo opornika i kondensatora też można wyznaczyć opór zastępczy. Parametr ten nazywa się **impedancją**, a oblicza się go z następującego wzoru:

$$Z = \sqrt{X_C^2 + R^2},$$

gdzie:

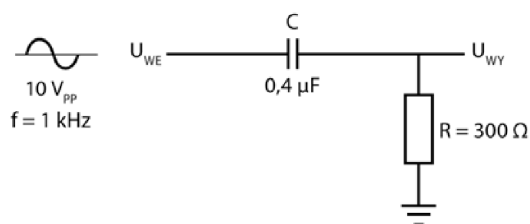
Z — impedancja układu podawana w omach,

$X_C$  — reaktancja kondensatora podawana w omach,

R — rezystancja opornika podawana w omach.

**Zadania**

Wykonaj następujące kroki, by obliczyć impedancję układu przedstawionego na rysunku 6.4 i wyznaczyć przepływający przez niego prąd.



**Rysunek 6.4**

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

B.  $Z = \sqrt{X_C^2 + R^2} =$

C.  $I = \frac{U}{Z} =$

**Odpowiedzi**

A. 400 Ω.

- B.  $500 \Omega$ .  
C.  $20 \text{ mA}_{pp}$ .

**9** Przeprowadź teraz analogiczne obliczenia dla układu przedstawionego na rysunku 6.4, używając podanych niżej wartości.

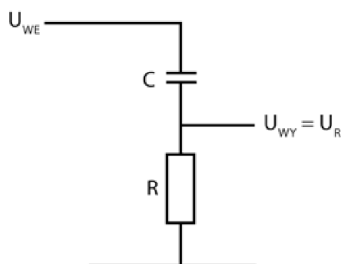
### Zadania

- A.  $C = 530 \mu\text{F}$ ,  $R = 12 \Omega$ ,  $U_{WE} = 26 \text{ V}_{pp}$ ,  $f = 60 \text{ Hz}$ .  
B.  $C = 1,77 \mu\text{F}$ ,  $R = 12 \Omega$ ,  $U_{WE} = 150 \text{ V}_{pp}$ ,  $f = 10 \text{ kHz}$ .

### Odpowiedzi

- A.  $Z = 13 \Omega$ ,  $I = 2 \text{ A}_{pp}$ .  
B.  $Z = 15 \Omega$ ,  $I = 10 \text{ A}_{pp}$ .

**10** Napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  w układzie przedstawionym na rysunku 6.5 da się wyznaczyć ze wzoru podobnego do tego, z którego w rozdziale 5. obliczałeś napięcie wyjściowe w dzielniku zbudowanym z dwóch oporników.



Rysunek 6.5

Napięcie wyjściowe w tym układzie oblicza się ze wzoru:

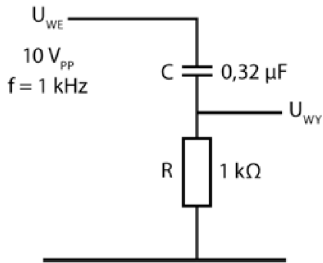
$$U_{WY} = U_{WE} \cdot \frac{R}{Z}$$

### Zadania

Oblicz napięcie wyjściowe w obwodzie przedstawionym na rysunku 6.6, posługując się podanymi na nim wartościami parametrów.

- A. Znajdź  $X_C$ :  
B. Znajdź  $Z$ :

C. Oblicz z podanego wzoru  $U_{WY}$ :



Rysunek 6.6

### Odpowiedzi

- A.  $X_C = 500 \Omega$  (w przybliżeniu).
- B.  $Z = 1120 \Omega$  (w przybliżeniu).
- C.  $U_{WY} = 8,9 V_{PP}$ .

**11** Określ teraz napięcie wyjściowe dla obwodu przedstawionego na rysunku 6.5, korzystając z podanych wartości pojemności, napięcia i częstotliwości.

- A.  $C = 0,16 \mu\text{F}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{WE} = 10 V_{PP}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ .
- B.  $C = 0,08 \mu\text{F}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{WE} = 10 V_{PP}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ .

### Odpowiedzi

- A.  $U_{WY} = 7,1 V_{PP}$ .
- B.  $U_{WY} = 4,5 V_{PP}$ .

**UWAGA** Od tej chwili, gdy w zadaniu pojawi się wartość międzyszczytowa napięcia, możesz przyjmować, że w odpowiedzi także pojawiają się wartości międzyszczytowe.

**12** Mówi się, że napięcie wejściowe jest **osłabiane** w dzielnikach napięcia, czyli takich układach, z jakimi miałeś do czynienia w problemach 10. i 11. Porównaj napięcia wejściowe i wyjściowe we wspomnianych problemach.

### Zadanie

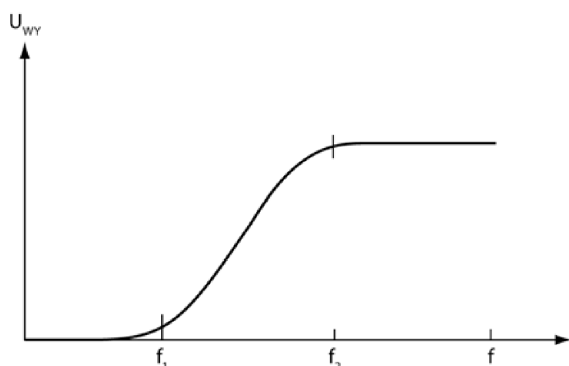
Na czym polega **osłabianie sygnału**?

**Odpowiedź**

Oslabianie sygnału polega na zmniejszaniu amplitudy lub wielkości sygnału (napięcie wyjściowe jest mniejsze niż napięcie wejściowe).

**13** Zanim przystąpiłeś do obliczania napięcia wyjściowego w zadaniach z problemów 10. i 11., musiałeś określić wartość reaktancji  $X_C$ . Jednak reaktancja zmienia się wraz ze zmianą sygnału, natomiast rezystancja pozostaje niezmienna. Oznacza to, że zmiana częstotliwości sygnału będzie miała także wpływ na wartość impedancji  $Z$  oraz amplitudę sygnału wyjściowego  $U_{wy}$ .

Wykres zależności zmian napięcia wyjściowego od częstotliwości został przedstawiony na rysunku 6.7.

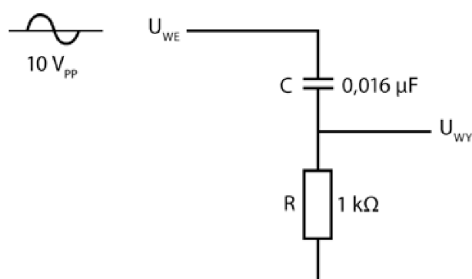


**Rysunek 6.7**

Wartości częstotliwości  $f_1$ , przy której krzywa zaczyna się wznosić, oraz  $f_2$ , przy której krzywa zaczyna się stabilizować, zależą od pojemności kondensatora i oporności opornika.

**Zadania**

Oblicz napięcie wyjściowe w obwodzie przedstawionym na rysunku 6.8 dla częstotliwości sygnału 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz i 100 kHz.

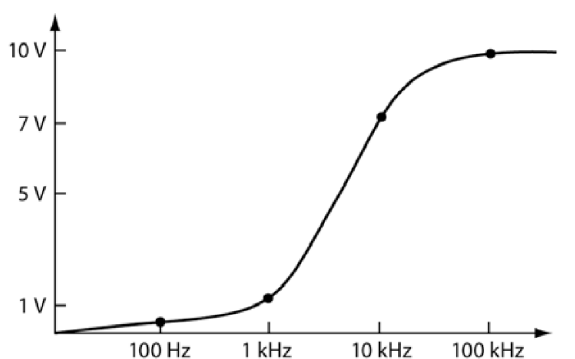


**Rysunek 6.8**

- A. 100 Hz:  
 B. 1 kHz:  
 C. 10 kHz:  
 D. 100 kHz:  
 E. Nanieś uzyskane wartości  $U_{WY}$  w zależności od wartości częstotliwości i poprowadź między tak otrzymanymi punktami krzywą. Wykres narysuj na osobnej kartce papieru.

### Odpowiedzi

- A.  $U_{WY} = 0,1 \text{ V}$ .  
 B.  $U_{WY} = 1 \text{ V}$ .  
 C.  $U_{WY} = 7,1 \text{ V}$ .  
 D.  $U_{WY} = 10 \text{ V}$ .  
 E. Krzywa została przedstawiona na rysunku 6.9.



(Na osi częstotliwości zastosowaliśmy skalę logarymiczną)

Rysunek 6.9

**UWAGA** Wykres wyraźnie wskazuje, że napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  jest równe napięciu wejściowemu  $U_{WE}$  jedynie dla największych częstotliwości, natomiast dla niskich częstotliwości jest niemalże równe zero. Tego rodzaju obwód jest tak zwanym filtrem *górnoprzepustowym*, ponieważ przenosi sygnały o wysokich częstotliwościach, a osłabia — czy w skrajnych przypadkach wręcz blokuje — sygnały o niskich częstotliwościach.

## Filtr górnoprzepustowy — doświadczenie

**14** W tym doświadczeniu będziesz badać zmiany napięcia wyjściowego  $U_{WY}$  w zależności od zmieniającej się częstotliwości sygnału wejściowego. Obwód układu filtrującego został przedstawiony na rysunku 6.8. Dla każdej

z częstotliwości wyznaczysz też wartości reaktancji  $X$  oraz impedancji  $Z$ , aby zaobserwować zależność między zmianami napięcia wyjściowego a wartością impedancji.

Do wykonania doświadczenia będą Ci potrzebne następujące przyrządy:

- jeden opornik o wartości 1 k $\Omega$ ;
- jeden kondensator o pojemności 0,016  $\mu\text{F}$ ;
- jeden generator funkcji;
- jeden oscyloskop (możesz zastąpić go miernikiem uniwersalnym i zamiast napięcia międzyszczytowego mierzyć na wyjściu napięcie skuteczne);
- jedna płytki prototypowa.

Jeżeli nie masz dostępu do takiego sprzętu, przeczytaj opis przebiegu doświadczenia.

Aby przeprowadzić eksperyment, wykonaj następujące kroki.

1. Na płytce prototypowej połącz układ zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 6.8.
2. Ustaw generator funkcji tak, by podawał do układu sygnał sinusoidalny o napięciu międzyszczytowym 10 V i częstotliwości 25 Hz, zmierz napięcie wyjściowe i zapisz dane w poniższej tabeli.

$f_{WE}$	$X_C$	$Z$	$U_{WY}$
25 Hz			
50 Hz			
100 Hz			
250 Hz			
500 Hz			
1 kHz			
3 kHz			
5 kHz			
7 kHz			
10 kHz			
20 kHz			
30 kHz			
50 kHz			
100 kHz			

3. Zwiększ częstotliwość sygnału wejściowego do wartości  $f_{WE}$  podanej w następnym wierszu tabeli, zmierz odpowiadającą jej wartość napięcia sygnału wyjściowego  $U_{WY}$  i zapisz wynik. Powtarzaj te czynności, dopóki nie osiągniesz ostatniej z podanych wartości częstotliwości.

4. Oblicz wartości  $X_C$  i  $Z$  dla każdego zestawu danych.
5. Narysuj wykres zależności  $U_{WY}$  od  $f_{WE}$ . Na pionowej osi umieść wartości napięcia, na osi poziomej — częstotliwości (wykres wykonaj na papierze milimetrowym ze skalą logarytmiczną na osi X). Krzywa powinna mieć ten sam kształt, co krzywa na rysunku 6.9, ale niewielkie przesunięcia wykresu w prawą lub w lewą stronę są jak najbardziej dopuszczalne.

### Zadanie

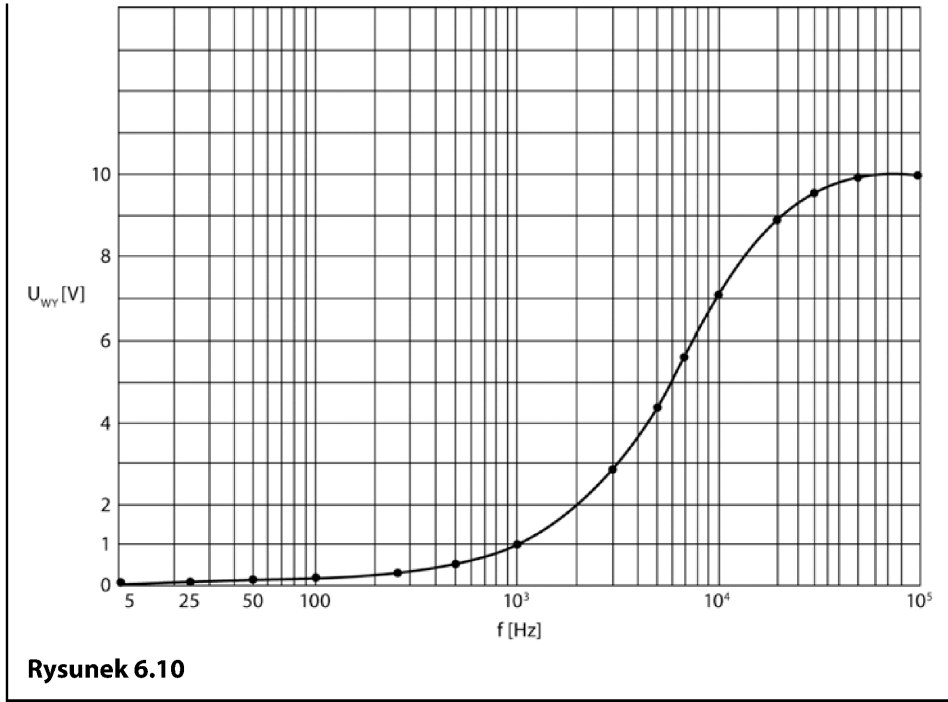
Co może powodować niewielkie przesunięcia wykresu w prawo bądź w lewo?

### Odповідź

Jeżeli wartości oporu i pojemności elementów zastosowane przez Ciebie w układzie różnią się nieco od wartości, jakie zastosowaliśmy, krzywa, którą otrzymasz, będzie różnić się nieco od wykresu przedstawionego na rysunku 6.10. Tego rodzaju przesunięcia są jak najbardziej dopuszczalne i uzasadnione dokładnością, z jaką producent podaje parametry elementów.

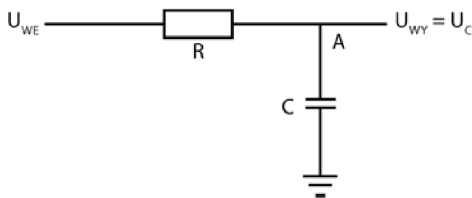
Wartości zebrane w czasie pomiarów powinny być zbliżone do danych zestawionych w tabeli, a wykres, który przygotowałeś, powinien przypominać krzywą z rysunku 6.10.

$f_{WE}$	$X_C$	$Z$	$U_{WY}$
25 Hz	400 k $\Omega$	400 k $\Omega$	0,025 V
50 Hz	200 k $\Omega$	200 k $\Omega$	0,05 V
100 Hz	100 k $\Omega$	100 k $\Omega$	0,1 V
250 Hz	40 k $\Omega$	40 k $\Omega$	0,25 V
500 Hz	20 k $\Omega$	20 k $\Omega$	0,5 V
1 kHz	10 k $\Omega$	10 k $\Omega$	1 V
3 kHz	3,3 k $\Omega$	3,5 k $\Omega$	2,9 V
5 kHz	2 k $\Omega$	2,2 k $\Omega$	4,47 V
7 kHz	1,4 k $\Omega$	1,7 k $\Omega$	5,8 V
10 kHz	1 k $\Omega$	1,414 k $\Omega$	7,1 V
20 kHz	500 $\Omega$	1,12 k $\Omega$	8,9 V
30 kHz	330 $\Omega$	1,05 k $\Omega$	9,5 V
50 kHz	200 $\Omega$	1,02 k $\Omega$	9,8 V
100 kHz	100 $\Omega$	1 k $\Omega$	10 V



Rysunek 6.10

**15** Układ przedstawiony na rysunku 6.11 jest stosowany w wielu urządzeniach elektronicznych.



Rysunek 6.11

W obwodzie tym dokonuje się pomiaru napięcia wyjściowego na kondensatorze, zamiast mierzyć je na oporniku (pomiędzy punktem A a ziemią).

Impedancja tego obwodu jest opisywana tym samym wzorem, z którego korzystałeś w poprzednich zadaniach. Układ nadal będzie pracować jak dzielnik napięcia i w dalszym ciągu możesz obliczyć napięcie wyjściowe, korzystając ze wzoru, którego używałeś do analizowania filtrów górnoprzepustowych, ale przez zamianę miejscami opornika z kondensatorem, jak przedstawia to rysunek 6.11, sprawiasz, że inne częstotliwości będą osłabiane. Obwód pokazany na rysunku 6.11 to tak zwany filtr dolnoprzepustowy. Najbliższe zadania są poświęcone badaniu jego charakterystyki.

**Zadania**

- A. Podaj wzór na impedancję obwodu.  
 B. Podaj wzór na napięcie wyjściowe.

**Odpowiedzi**

A.  $Z = \sqrt{X_C^2 + R^2}$  .  
 B.  $U_{WY} = U_{WE} \cdot \frac{X_C}{Z}$  .

**16** Przyjmij, że podane niżej wartości opisują układ przedstawiony na rysunku 6.11:

$$U_{WE} = 10 \text{ V}_{PP}, f = 2 \text{ kHz},$$

$$C = 0,1 \text{ } \mu\text{F}, R = 1 \text{ k}\Omega.$$

**Zadania**

Wyznacz następujące wielkości:

- A.  $X_C$ :  
 B.  $Z$ :  
 C.  $U_{WY}$ :

**Odpowiedzi**

- A.  $795 \text{ } \Omega$ .  
 B.  $1277 \text{ } \Omega$ .  
 C.  $6,24 \text{ V}$ .

**17** Ponownie odwołaj się do schematu przedstawionego na rysunku 6.11 i rozwiąż następujące zadanie.

**Zadanie**

Oblicz napięcie na oporniku, korzystając z wartości podanych w problemie 16. oraz z wyznaczonej w nim impedancji.

**Odpowiedź**

$$U_R = U_{WE} \cdot \frac{R}{Z} = 10 \cdot \frac{1000}{1277} = 7,83 V_{PP}.$$

**18** Na podstawie informacji uzyskanych w czasie rozwiązywania problemów 16. i 17. postaraj się odpowiedzieć na poniższe pytanie.

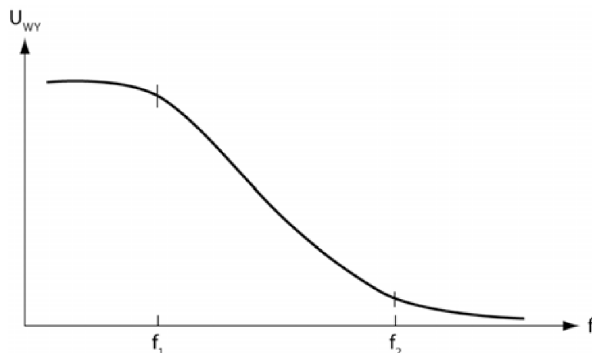
**Zadanie**

Podaj wzór pozwalający wyznaczyć napięcie wejściowe  $U_{WE}$  na podstawie znanych wartości spadków napięcia na kondensatorze i oporniku.

**Odpowiedź**

Wielkość tę wyznacza się ze wzoru:  $U_{WE}^2 = U_C^2 + U_R^2$ .

**19** Napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  w obwodzie przedstawionym na rysunku 6.11 zmienia się wraz ze zmianą częstotliwości sygnału wejściowego. Rysunek 6.12 pokazuje wykres zależności napięcia wyjściowego  $U_{WY}$  od częstotliwości.



Rysunek 6.12

**Zadanie**

Od jakich wielkości zależą wartości  $f_1$  i  $f_2$ ?

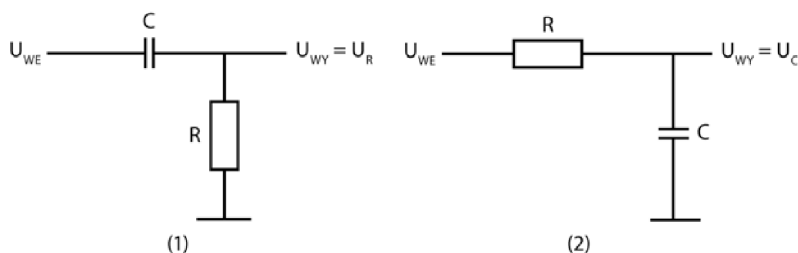
**Odpowiedź**

Od pojemności kondensatora i oporności opornika.

**UWAGA** Z wykresu przedstawionego na rysunku 6.12 wynika, że dla niskich częstotliwości  $U_{WY}$  ma dużą wartość, natomiast dla wysokich częstotliwości wartość napięcia wyjściowego spada prawie do zera. Tego rodzaju obwody nazywamy filtrami dolno-przepustowymi, ponieważ przenoszą niemal bez straty sygnały o niskich częstotliwościach, a osłabiają te o wysokich częstotliwościach.

## Przesunięcie fazowe w obwodzie RC

**20** W obydwu zaprezentowanych na rysunku 6.13 obwodach napięcie wyjściowe różni się od napięcia wejściowego.



Rysunek 6.13

### Zadanie

Czym różnią się od siebie sygnały wejściowy i wyjściowy?

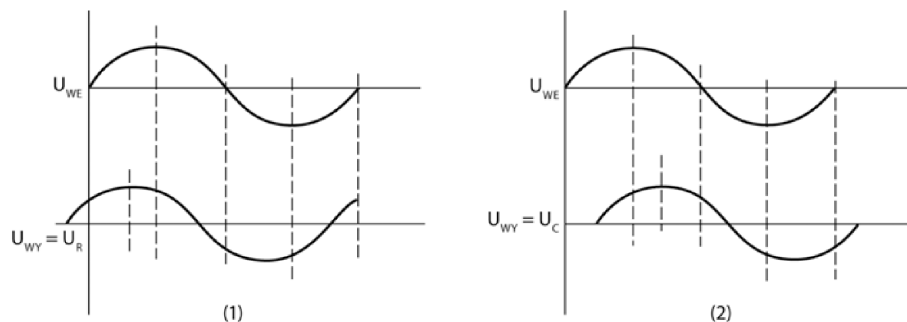
#### Odpowiedź

Sygnał wyjściowy jest słabszy. Poziom osłabienia zależy od częstotliwości sygnału wejściowego.

**21** To nie jedyna zmiana, jakiej doświadcza napięcie. Po przejściu przez kondensator napięcie rośnie i opada z tą samą częstotliwością, która charakteryzowała sygnał wejściowy, ale jego maksima i minima przypadają w innych punktach na osi czasu. Porównaj wykresy napięcia wejściowego  $U_{WE}$  i wyjściowego  $U_{WY}$  przedstawione na rysunku 6.14.

### Zadania

- Przeanalizuj wykres (1). Powiedz, czy napięcie wyjściowe jest przesunięte w prawo, czy w lewo w stosunku do sygnału wejściowego.
- Przeanalizuj wykres (2). Powiedz, czy napięcie wyjściowe jest przesunięte w prawo, czy w lewo w stosunku do sygnału wejściowego.



Rysunek 6.14

**UWAGA** Numery wykresów z rysunku 6.14 odpowiadają numerom obwodów z rysunku 6.13.

### Odpowiedzi

- A. W lewo.
- B. W prawo.

**22** Mówi się, że przebieg sygnału napięcia wyjściowego przedstawiony na wykresie (1) rysunku 6.14 **wyprzedza przebieg sygnału napięcia wejściowego**, natomiast przebieg sygnału wyjściowego z wykresu (2) jest **opóźniony w stosunku do przebiegu sygnału wejściowego**. Opóźnienie bądź wyprzedzenie sygnału wyjściowego w stosunku do sygnału wejściowego jest podawane w stopniach. Każde maksimum bądź minimum funkcji sinus jest oddalone o  $90^\circ$  od jej punktu przecięcia z osią poziomą. Wiedząc to, możesz określić, o ile stopni napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  wyprzedza sygnał wejściowy bądź o ile jest w stosunku do niego opóźnione. Wielkość ta jest nazywana **przesunięciem fazowym** bądź **różnicą faz**.

### Zadania

- A. Ile w przybliżeniu wynosi różnica faz sygnałów pokazanych na wykresach?
- B. Czy różnica faz zależy od częstotliwości sygnału?
- C. Czy sygnał wyjściowy mierzony w dzielniku napięcia na kondensatorze będzie opóźniony, czy przyspieszony względem sygnału wejściowego?

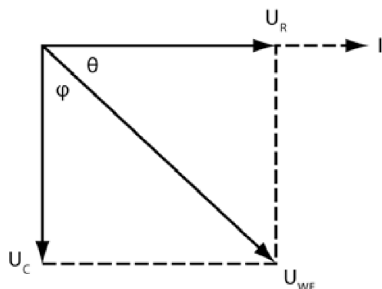
### Odpowiedzi

- A. Około  $35^\circ$ .
- B. Różnica faz zależy od częstotliwości, ponieważ wartości reaktancji i impedancji zależą od częstotliwości.

C. Będzie opóźniony, co widać na wykresie (2).

**23** Prąd płynący przez kondensator jest przesunięty w fazie w stosunku do napięcia na kondensatorze. Prąd wyprzedza napięcie o  $90^\circ$ . Dla opornika wielkości te pozostają w fazie, co oznacza, że nie są przesunięte względem siebie.

Rysunek 6.15 to wektorowe przedstawienie zależności między napięciami w szeregowym układzie RC. Kąt  $\theta$  to kąt przesunięcia fazowego, o jaki napięcie  $U_R$  wyprzedza sygnał wejściowy  $U_{WE}$ . Z kolei kąt  $\varphi$  to przesunięcie fazowe, o jakie sygnał  $U_C$  jest opóźniony względem  $U_{WE}$ .



Rysunek 6.15

**UWAGA** Wprowadźcie napięcie na oporniku jest w fazie z płynącym przez niego prądem, ale obydwie wielkości są przesunięte w fazie względem sygnału wejściowego.

Przesunięcie fazowe oblicza się z następującego wzoru:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{U_C}{U_R} = \frac{1}{2\pi fRC} = \frac{X_C}{R}.$$

Zapoznaj się teraz z przykładem obliczania przesunięcia fazowego dla sygnału wejściowego o częstotliwości 160 Hz płynącego przez opornik  $3,9 \text{ k}\Omega$  połączony szeregowo z kondensatorem o pojemności  $0,1 \text{ }\mu\text{F}$ .

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 160 \cdot 3,9 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 2,564.$$

Używając kalkulatora, możesz wyznaczyć wartość funkcji arcus tangens dla 2,564 i poznać w ten sposób odpowiadający jej kąt. W tym przypadku wartość kąta wynosi  $68,7^\circ$ , co oznacza, że sygnał  $U_R$  wyprzedza sygnał  $U_{WE}$  o  $68,7^\circ$ . Jednocześnie można stwierdzić, że  $U_C$  jest opóźnione w stosunku do  $U_{WE}$  o  $21,3^\circ$ .

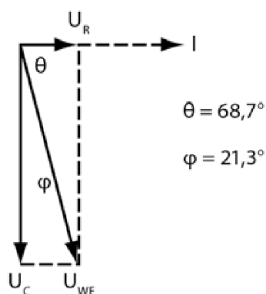
Wykres przedstawiony na rysunku 6.15 nazywa się **wykresem wskazowym (wskazem, fazorem)**, ale korzysta z tego samego mechanizmu matematycznego, jakiego używa się przy dodawaniu wektorów.

**Zadanie**

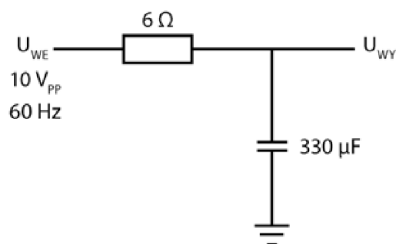
Narysuj wykres wskazowy dla kątów  $\theta$  i  $\varphi$  otrzymanych w wyniku prowadzonych wcześniej obliczeń. Rysunek wykonaj na osobnej kartce papieru.

**Odpowiedź**

Twój rysunek powinien wyglądać podobnie do wykresu przedstawionego na rysunku 6.16. Zwróć też uwagę, że z wykresu wskazowego wynika, iż wartość  $U_C$  jest większa od wartości  $U_R$ .

**Rysunek 6.16**

**24** Korzystając z wartości wskazanych na rysunku 6.17, znajdź podane niżej wielkości.

**Rysunek 6.17****Zadania**

- A.  $X_C$ :
- B.  $Z$ :
- C.  $U_{WY}$ :
- D.  $U_R$ :
- E. Prąd płynący przez obwód:
- F. Kąt przesunięcia fazowego:

**Odpowiedzi**

$$\text{A. } X_C = \frac{1}{2\pi fC} = 8 \Omega.$$

$$\text{B. } Z = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \Omega.$$

$$\text{C. } U_{WY} = U_C = U_{WE} \cdot \frac{X_C}{Z} = 8 \text{ V}.$$

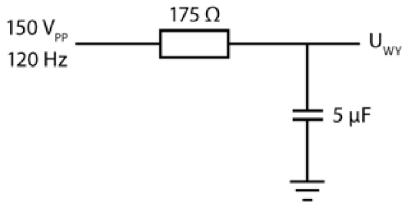
$$\text{D. } U_R = U_{WE} \cdot \frac{R}{Z} = 6 \text{ V}.$$

$$\text{E. } I = \frac{U}{Z} = \frac{10 \text{ V}_{PP}}{10 \Omega} = 1 \text{ A}.$$

$$\text{F. } \operatorname{tg} \theta = \frac{X_C}{R} = \frac{8 \Omega}{6 \Omega} = 1,33.$$

Stąd  $\theta = 53,13^\circ$ .

**25** Przeprowadź obliczenia dla obwodu przedstawionego na rysunku 6.18.



**Rysunek 6.18**

**Zadania**

- A.  $X_C$ :
- B.  $Z$ :
- C.  $U_{WY}$ :
- D.  $U_R$ :
- E. Prąd płynący przez obwód:
- F. Kąt przesunięcia fazowego:

**Odpowiedzi**

$$\text{A. } X_C = 265 \Omega.$$

$$\text{B. } Z = \sqrt{175^2 + 265^2} = 317,57 \Omega.$$

C.  $U_C = 125 \text{ V}$ .

D.  $U_R = 83 \text{ V}$ .

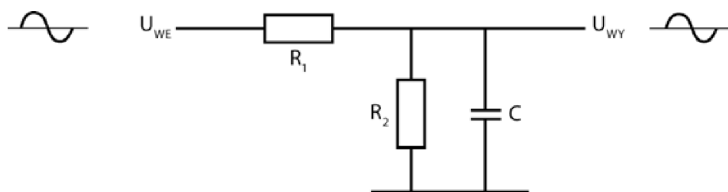
E.  $I = 0,472 \text{ A}$ .

F.  $\text{tg } \theta = \frac{265 \Omega}{175 \Omega} = 1,5$ .

Stąd  $\theta = 56,56^\circ$ .

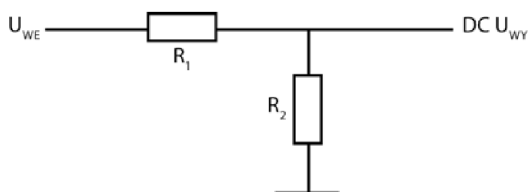
## Opornik i kondensator połączone równolegle

**26** Obwód przedstawiony na rysunku 6.19 to odmiana filtra dolnoprzepustowego, o którym pisaliśmy w problemie 15.



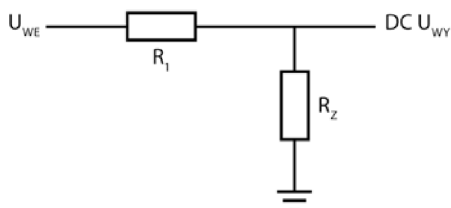
**Rysunek 6.19**

W przypadku zasilania źródłem prądu stałego sygnał nie przepłynie przez kondensator i obwód zadziała tak jak układ przedstawiony na rysunku 6.20.



**Rysunek 6.20**

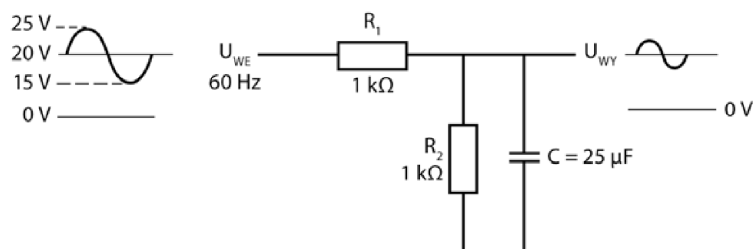
Sygnał o zmiennym napięciu zdoła przepłynąć zarówno przez kondensator, jak i przez opornik  $R_2$ . Cały układ można traktować jak obwód zawierający opornik o oporze  $R_Z$ , przy czym  $R_Z$  będzie opornością zastępczą połączonych równolegle  $R_2$  oraz  $X_C$ . Układ taki przedstawiliśmy na rysunku 6.21.



**Rysunek 6.21**

Obliczanie wartości oporu zastępczego jest bardzo złożone i zdecydowanie wykracza poza zakres materiału prezentowanego w tej książce, dlatego żeby pokazać przydatność prezentowanego tu układu, wprowadzimy pewne uproszczenia. Załóżmy, że mamy do czynienia z układem, w którym  $X_C$  stanowi zaledwie jedną dziesiątą oporu  $R_2$  (lub nawet jeszcze mniej). Tego rodzaju układ jest stosowany nader często w praktyce, ponieważ pozwala osłabiać inaczey sygnały zmienne i stałe.

Prześledź działanie tego układu na poniższym przykładzie. W podanych zadaniach będziesz obliczać wartości napięć wyjściowych dla prądu stałego i zmiennego. Postępuj zgodnie z określonymi niżej wytycznymi i oblicz napięcia dla wartości podanych na rysunku 6.22.



Rysunek 6.22

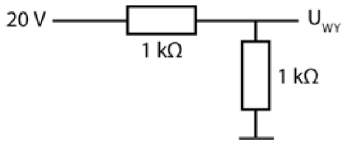
### Zadania

- Oblicz  $X_C$ . Sprawdź, czy rzeczywiście ma wartość mniejszą od jednej dziesiątej  $R_2$ .
- Określ, przez które elementy obwodu przedstawionego na rysunku 6.22 popłynie prąd stały. Następnie skorzystaj ze wzoru opisującego dzielnik napięcia i wyznacz wartość  $U_{WY}$  dla prądu stałego.
- Określ, przez które elementy obwodu przedstawionego na rysunku 6.22 popłynie prąd zmienny. Następnie skorzystaj ze wzoru opisującego dzielnik napięcia i wyznacz wartość  $U_{WY}$  dla prądu zmiennego.
- Porównaj wartości napięć wyjściowych dla prądu stałego i zmiennego.

### Odpowiedzi

- $X_C = 106 \Omega$  i  $R_2 = 1000 \Omega$ , więc  $X_C$  jest wystarczająco bliskie jednej dziesiątej  $R_2$ .
- Część układu, przez który popłynie prąd stały, została zaznaczona na rysunku 6.23.

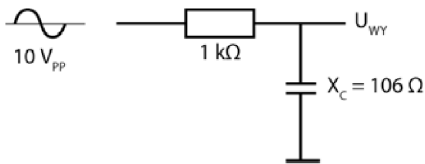
$$U_{WY} = 20 \cdot \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 1 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ V}$$



Rysunek 6.23

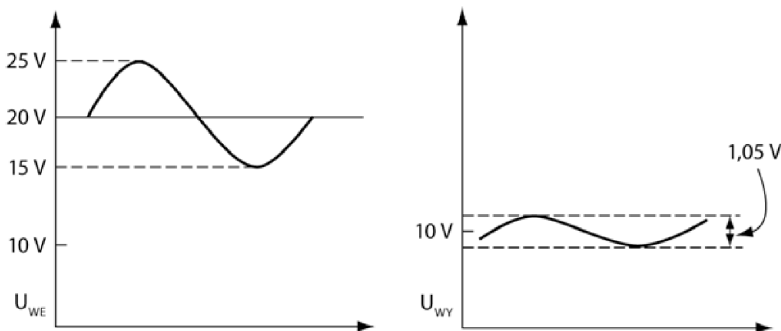
C. Część układu, przez który popłynie prąd zmienny, została zaznaczona na rysunku 6.24.

$$U_{WY} = 10 \cdot \frac{106}{\sqrt{1000^2 + 106^2}} = 1,05 \text{ V}.$$



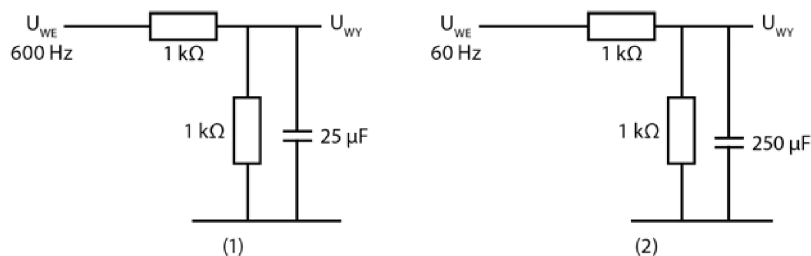
Rysunek 6.24

D. Rysunek 6.25 przedstawia przebieg sygnału wejściowego (po lewej) oraz wyjściowego (po prawej). Wykresy wyraźnie pokazują, że dla prądu stałego napięcie spadło z 20 V do 10 V, natomiast dla prądu zmiennego — z 10 V do 1,05 V.



Rysunek 6.25

**27** Rysunek 6.26 przedstawia dwie odmiany obwodu omawianego w problemie 26. W pierwszym przypadku zmieniliśmy częstotliwość sygnału wejściowego, w drugim zmieniła się pojemność kondensatora. Obydwa układy są zasilane napięciem o wartości 20 V<sub>PP</sub>. Postępując zgodnie z krokami, które wykonywałeś w zadaniach z problemu 26., wyznacz napięcia wyjściowe w tych dwóch przypadkach i porównaj je ze sobą.



Rysunek 6.26

### Zadania

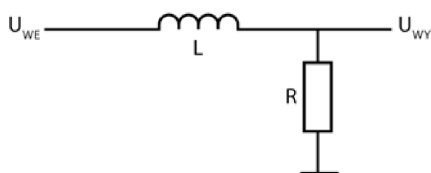
1. A.  $X_C =$   
 B. DC  $U_{WY} =$   
 C. AC  $U_{WY} =$   
 D. Osłabienie:
2. A.  $X_C =$   
 B. DC  $U_{WY} =$   
 C. AC  $U_{WY} =$   
 D. Osłabienie:

### Odpowiedzi

1. A.  $X_C = 10,6 \Omega$ .  
 B. DC  $U_{WY} = 10 \text{ V}$ .  
 C. AC  $U_{WY} = 0,1 \text{ V}$ .  
 D. W tym przypadku osłabienie prądu stałego jest identyczne z tym w problemie 26., natomiast napięcie prądu zmiennego zmaleje z powodu wzrostu częstotliwości sygnału wejściowego.
2. A.  $X_C = 10,6 \Omega$ .  
 B. DC  $U_{WY} = 10 \text{ V}$ .  
 C. AC  $U_{WY} = 0,1 \text{ V}$ .  
 D. I tym razem osłabienie sygnału w przypadku prądu stałego nie zmienia się, natomiast sygnał zmienny osłabnie, ponieważ zwiększyła się pojemność kondensatora w układzie.

## Elementy indukcyjne w układach prądu zmiennego

**28** Rysunek 6.27 przedstawia schemat dzielnika napięcia, w którym zamiast kondensatora wykorzystano cewkę indukcyjną.



Rysunek 6.27

Tak jak w poprzednich problemach przyjmij, że sygnał podawany do obwodu to idealna fala sinusoidalna. Cewka, tak samo jak kondensator, nie zmienia częstotliwości fali, natomiast zmniejsza amplitudę napięcia wyjściowego.

Prosty układ przedstawiony na rysunku 6.27 przeciwstawia się przepływowi prądu.

### Zadania

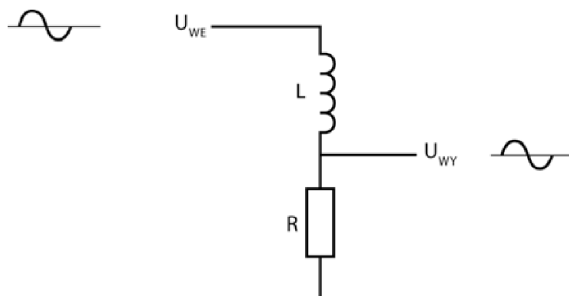
- Jak nazywa się czynnik przeciwdziałający przepływowi prądu?
- Podaj wzór opisujący reaktancję cewki.
- Zapisz wzór definiujący przeciwdziałanie przepływowi prądu w tym obwodzie.

### Odpowiedzi

- Impedancja.
- $X_L = 2\pi fL$ .
- $Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$ .

Rezystancja cewki pracującej w obwodzie prądu stałego jest zazwyczaj niewielka, więc będziemy zakładać, że jest ona zerowa. Wykorzystaj to założenie w dwóch poniższych problemach.

**29** Korzystając ze wzoru opisującego pracę dzielnika napięcia, oblicz napięcie wyjściowe w obwodzie przedstawionym na rysunku 6.28.



Rysunek 6.28

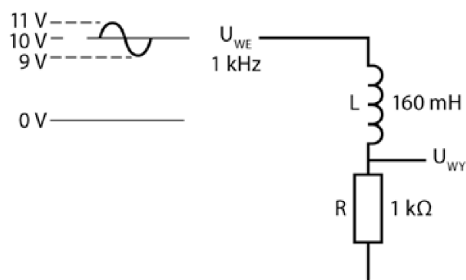
### Zadanie

Podaj wzór na wyznaczenie napięcia wyjściowego  $U_{wy}$ .

### Odpowiedź

$$U_{wy} = U_{we} \cdot \frac{R}{Z}$$

**30** Znajdź napięcie wyjściowe w układzie przedstawionym na rysunku 6.29.



**Rysunek 6.29**

Obliczenia wykonuj w następujących krokach:

### Zadania

A. Określ napięcie wyjściowe dla stałego sygnału wejściowego. Skorzystaj ze wzoru opisującego dzielnik napięcia.

$$\text{DC } U_{wy} =$$

B. Znajdź reaktancję induktora.

$$X_L =$$

C. Znajdź impedancję dla sygnału zmiennego.

$$Z =$$

D. Znajdź napięcie wyjściowe sygnału zmiennego.

$$\text{AC } U_{wy} =$$

E. Połącz sygnały wyjściowe, by znaleźć rzeczywistą wartość napięcia wyjściowego. Narysuj przebieg sygnału wyjściowego i zaznacz na osi wykresu charakterystyczne wartości napięcia. Skorzystaj z wykresu na rysunku 6.30.



Rysunek 6.30

**Odpowiedzi**

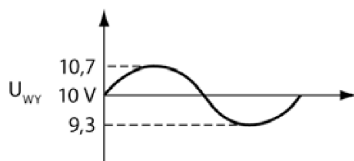
A. DC  $U_{WY} = 10 \text{ V} \cdot \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 0} = 10 \text{ V}.$

B.  $X_L = 1 \text{ k}\Omega$  (w przybliżeniu).

C.  $Z = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2} = 1,414 \text{ k}\Omega.$

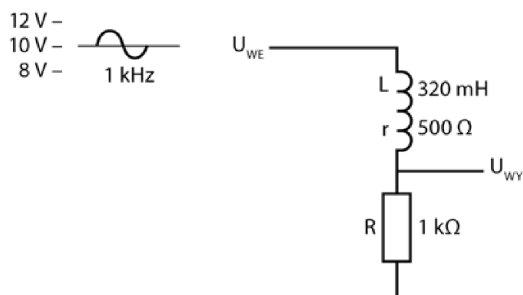
D. AC  $U_{WY} = 2 V_{PP} \cdot \frac{1 \text{ k}\Omega}{1,414 \text{ k}\Omega} = 1,414 V_{PP}.$

E. Przebieg sygnału został przedstawiony na rysunku 6.31.



Rysunek 6.31

**31** W schemacie przedstawionym na rysunku 6.32 oporność cewki przy zasilaniu układu napięciem stałym jest na tyle duża, że należy uwzględnić ją w obliczeniach.



Rysunek 6.32

### Zadania

Oblicz napięcia wyjściowe sygnału stałego i zmiennego podawanych do obwodu przedstawionego na rysunku 6.32. Obliczenia poprowadź zgodnie z krokami wymienionymi w problemie 30.

A. DC  $U_{WY} =$

B.  $X_L =$

C.  $Z =$

D. AC  $U_{WY} =$

E. Narysuj przebieg sygnału i opisz oś napięcia na wykresie przedstawionym na rysunku 6.33.



Rysunek 6.33

### Odpowiedzi

A. DC  $U_{WY} = 10 \text{ V} \cdot \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 500 \text{ k}\Omega} = 6,67 \text{ V}.$

**UWAGA** W obliczeniach uwzględniono opór  $500 \Omega$  stawiany przez cewkę.

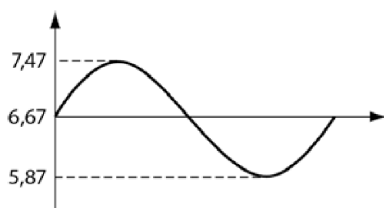
B.  $X_L = 2 \text{ k}\Omega.$

C.  $Z = \sqrt{1,5^2 + 2^2} = 2,5 \text{ k}\Omega.$

**UWAGA** W obliczeniach uwzględniono opór  $500 \Omega$  stawiany przez cewkę.

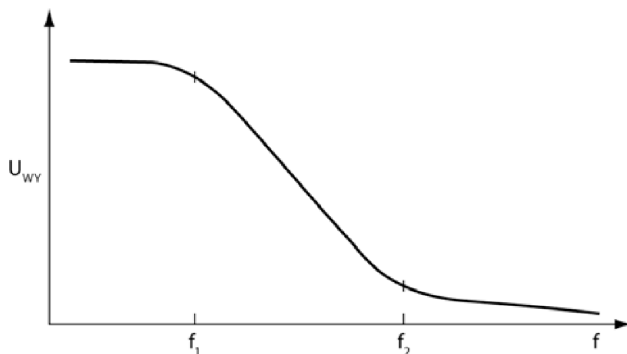
D. AC  $U_{WY} = 1,6 \text{ V}_{PP}.$

E. Przebieg sygnału został przedstawiony na rysunku 6.34.



Rysunek 6.34

**32** Aby obliczyć  $U_{WY}$  w problemach 30. i 31., musiałeś wcześniej wyznaczyć wartość  $X_L$ . Pamiętaj jednak, że  $X_L$  zależy od częstotliwości sygnału wejściowego, zatem impedancja i amplituda sygnału wyjściowego  $U_{WY}$  również zmieniają się, gdy zmienia się częstotliwość sygnału wejściowego. Wykres zmian napięcia wyjściowego  $U_{WY}$  w zależności od częstotliwości został przedstawiony na rysunku 6.35.



**Rysunek 6.35**

Wartość częstotliwości, przy której  $U_{WY}$  zaczyna opadać ( $f_1$ ) i przy której stabilizuje się na poziomie bliskim zeru ( $f_2$ ), zależy od parametrów cewki i opornika.

Krzywa przedstawiona na rysunku 6.35 dowodzi, że układ opornika i cewki z rysunku 6.29 działa jak znany Ci z problemów 15. i 19. filtr dolnoprzepustowy.

### Zadanie

Od czego zależą wartości częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$ ?

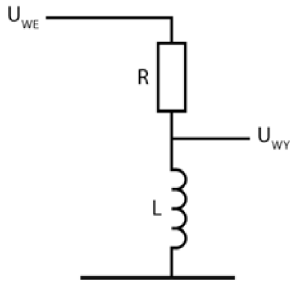
#### Odpowiedź

Wartości te zależą od indukcyjności cewki i oporności opornika.

**33** Zbadaj obwód przedstawiony na rysunku 6.36. Napięcie wyjściowe jest w nim równe spadkowi napięcia na cewce.

### Zadania

- Jaki wzór opisuje napięcie wyjściowe w tym układzie?
- Jaki kształt będzie mieć krzywa zależności napięcia wyjściowego od częstotliwości? Narysuj ją na osobnej kartce papieru.

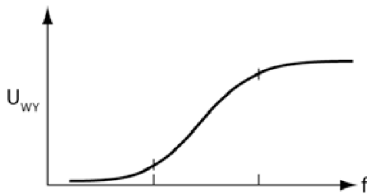


Rysunek 6.36

**Odpowiedzi**

A.  $U_{WY} = U_{WE} \cdot \frac{X_L}{Z}$ .

B. Patrz rysunek 6.37.



Rysunek 6.37

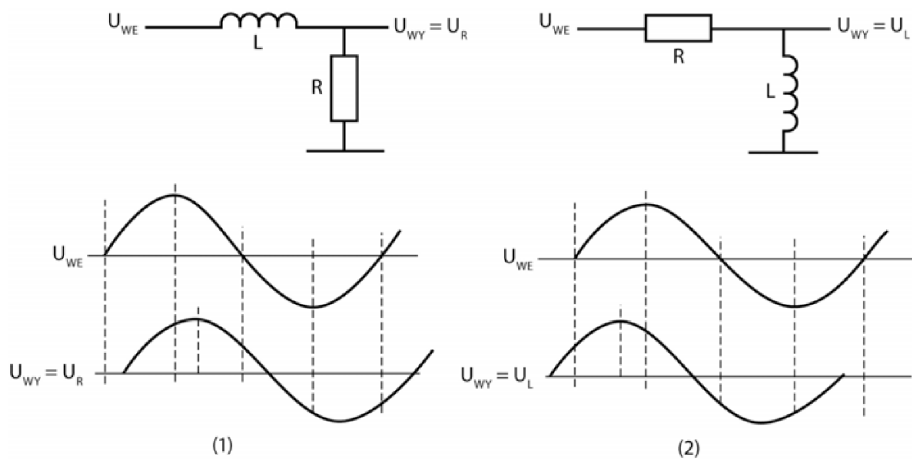
Krzywa przedstawiona na rysunku 6.37 dowodzi, że układ z rysunku 6.36 działa jak filtr górnoprzepustowy znany Ci już z problemów 6. i 13.

## Przesunięcie fazowe w obwodzie RL

**34** Obwody filtrujące (na przykład te, które przedstawiliśmy na rysunku 6.38) wytwarzają sygnał przesunięty w fazie względem sygnału wejściowego, tak jak miało to miejsce w przypadku obwodów filtrujących z kondensatorem. Przesunięcia wytwarzane w obwodach zostały pokazane na rysunku 6.38. Górne wykresy opisują sygnał wejściowy, dolne — wyjściowy.

**Zadanie**

W którym z obwodów sygnał wyjściowy jest opóźniony w stosunku do wejściowego, a w którym go wyprzedza?

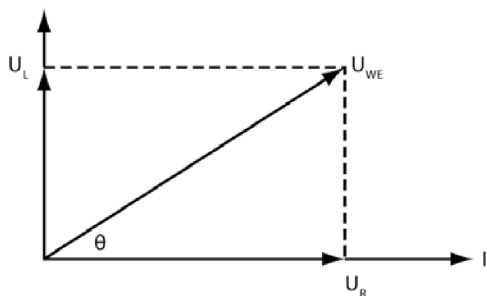


Rysunek 6.38

**Odpowiedź**

Napięcie wyjściowe na wykresie (1) jest opóźnione w stosunku do sygnału wejściowego, natomiast napięcie wyjściowe na wykresie (2) wyprzedza sygnał wejściowy.

**35** Rysunek 6.39 przedstawia wykres wskazowy dla obydwu obwodów z rysunku 6.38. Prąd płynący przez cewkę jest opóźniony w stosunku do napięcia o  $90^\circ$ .



Rysunek 6.39

Kąt przesunięcia fazowego można łatwo wyznaczyć z następującej zależności:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{U_L}{U_R} = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi fL}{R}.$$

**Zadanie**

Oblicz kąt przesunięcia fazowego dla obwodu przedstawionego w problemie 30.

**Odpowiedź**

45°.

**36** Spójrz na obwód przedstawiony w problemie 31.

**Zadanie**

Oblicz kąt fazowy.

**Odpowiedź**

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{X_L}{R} = \frac{2 \text{ k}\Omega}{1,5 \text{ k}\Omega} = 1,33 .$$

Zatem  $\theta = 53,1^\circ$ .

**Podsumowanie**

W tym rozdziale omówiliśmy zagadnienia związane z kondensatorami, opornikami i cewkami pracującymi w obwodach dzielących i filtrujących napięcie. Dowiedziałeś się, jak:

- zmienia się napięcie wyjściowe sygnału zmiennego po przejściu przez górnoprzepustowy obwód filtrujący RC;
- zmienia się napięcie wyjściowe sygnału zmiennego po przejściu przez dolnoprzepustowy obwód filtrujący RC;
- zmienia się napięcie wyjściowe sygnału zmiennego po przejściu przez górnoprzepustowy obwód filtrujący RL;
- zmienia się napięcie wyjściowe sygnału zmiennego po przejściu przez dolnoprzepustowy obwód filtrujący RL;
- wygląda przebieg sygnału zmiennego lub AC-DC po przejściu przez układ filtrujący;
- wyznaczać kąty fazowe i różnice fazowe.

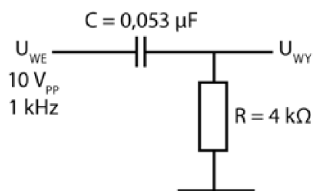
## Test zrozumienia

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień omówionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

Wyznacz podane parametry dla układów przedstawionych na rysunkach w zadaniach 1 – 3.

- A.  $X_C$ .
- B.  $Z$ .
- C.  $U_{WY}$ .
- D.  $I$ .
- E.  $\text{tg } \theta$  i  $\theta$ .

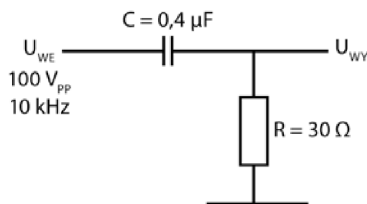
1. Przeanalizuj układ z rysunku 6.40.



Rysunek 6.40

- A. \_\_\_\_\_
- B. \_\_\_\_\_
- C. \_\_\_\_\_
- D. \_\_\_\_\_
- E. \_\_\_\_\_

2. Przeanalizuj układ z rysunku 6.41.



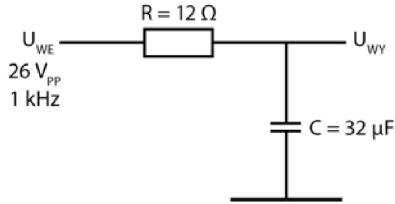
Rysunek 6.41

- A. \_\_\_\_\_
- B. \_\_\_\_\_
- C. \_\_\_\_\_

D. \_\_\_\_\_

E. \_\_\_\_\_

3. Przeanalizuj układ z rysunku 6.42.



Rysunek 6.42

A. \_\_\_\_\_

B. \_\_\_\_\_

C. \_\_\_\_\_

D. \_\_\_\_\_

E. \_\_\_\_\_

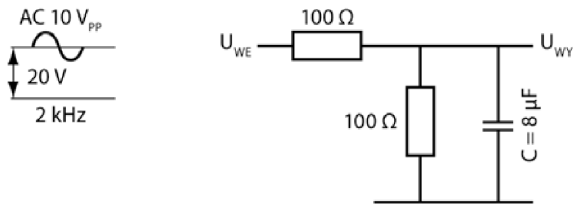
Wyznacz podane parametry dla układów przedstawionych na rysunkach w zadaniach 4 – 6.

A.  $X_C$ .

B. AC  $U_{WY}$ .

C. DC  $U_{WY}$ .

4. Przeanalizuj układ z rysunku 6.43.



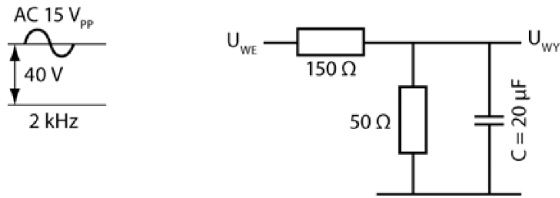
Rysunek 6.43

A. \_\_\_\_\_

B. \_\_\_\_\_

C. \_\_\_\_\_

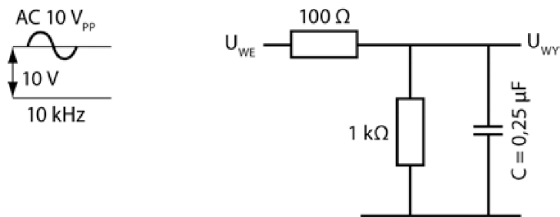
5. Przeanalizuj układ z rysunku 6.44.



Rysunek 6.44

- A. \_\_\_\_\_
- B. \_\_\_\_\_
- C. \_\_\_\_\_

6. Przeanalizuj układ z rysunku 6.45.



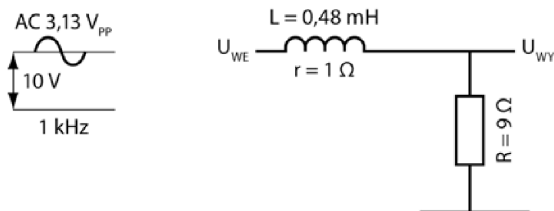
Rysunek 6.45

- A. \_\_\_\_\_
- B. \_\_\_\_\_
- C. \_\_\_\_\_

Wyznacz podane parametry dla układów przedstawionych na rysunkach w zadaniach 7 – 9.

- A. DC  $U_{WY}$ .
- B.  $X_L$ .
- C.  $Z$ .
- D. AC  $U_{WY}$ .
- E.  $\text{tg } \theta$  i  $\theta$ .

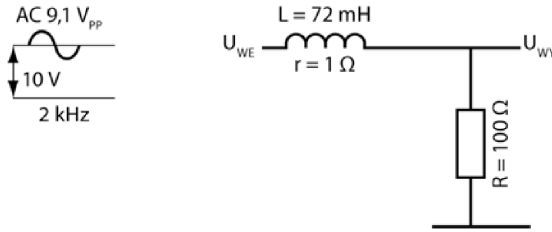
7. Przeanalizuj układ z rysunku 6.46.



Rysunek 6.46

- A. \_\_\_\_\_
- B. \_\_\_\_\_
- C. \_\_\_\_\_
- D. \_\_\_\_\_
- E. \_\_\_\_\_

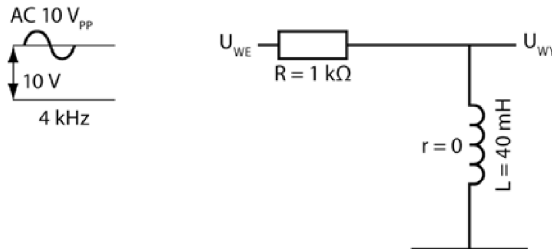
8. Przeanalizuj układ z rysunku 6.47.



Rysunek 6.47

- A. \_\_\_\_\_
- B. \_\_\_\_\_
- C. \_\_\_\_\_
- D. \_\_\_\_\_
- E. \_\_\_\_\_

9. Przeanalizuj układ z rysunku 6.48.



Rysunek 6.48

- A. \_\_\_\_\_
- B. \_\_\_\_\_
- C. \_\_\_\_\_
- D. \_\_\_\_\_
- E. \_\_\_\_\_

**Odpowiedzi do testu zrozumienia**

Jeśli otrzymane odpowiedzi nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdziesz do następnego rozdziału.

<b>1. A.</b>	3 k $\Omega$ .	(problemy 8., 9., 10., 23.)
<b>B.</b>	5 k $\Omega$ .	
<b>C.</b>	8 V.	
<b>D.</b>	2 A.	
<b>E.</b>	36,87°.	
<b>2. A.</b>	40 $\Omega$ .	(problemy 8., 9., 23.)
<b>B.</b>	50 $\Omega$ .	
<b>C.</b>	60 V.	
<b>D.</b>	2 A.	
<b>E.</b>	53,13°.	
<b>3. A.</b>	5 $\Omega$ .	(problemy 8., 9., 23.)
<b>B.</b>	13 $\Omega$ .	
<b>C.</b>	10 V.	
<b>D.</b>	2 A.	
<b>E.</b>	22,63°.	
<b>4. A.</b>	10 $\Omega$ .	(problemy 26. i 27.)
<b>B.</b>	1 V.	
<b>C.</b>	10 V.	
<b>5. A.</b>	4 $\Omega$ .	(problemy 26. i 27.)
<b>B.</b>	0,4 V.	
<b>C.</b>	10 V.	
<b>6. A.</b>	64 $\Omega$ .	(problemy 26. i 27.)
<b>B.</b>	5,4 V.	
<b>C.</b>	9,1 V.	
<b>7. A.</b>	9 V.	(problemy 28 – 30, 35.)
<b>B.</b>	3 $\Omega$ .	
<b>C.</b>	10,4 $\Omega$ .	
<b>D.</b>	2,7 V.	
<b>E.</b>	16,7°.	
<b>8. A.</b>	10 V.	(problemy 28 – 30, 35.)
<b>B.</b>	904 $\Omega$ .	
<b>C.</b>	910 $\Omega$ .	
<b>D.</b>	1 V.	
<b>E.</b>	83,69°.	
<b>9. A.</b>	0 V.	(problemy 28 – 30, 35.)
<b>B.</b>	1 k $\Omega$ .	
<b>C.</b>	1,414 k $\Omega$ .	
<b>D.</b>	5 V.	
<b>E.</b>	45°.	

# Obwody rezonansowe

Wiesz już, że zarówno kondensator, jak i cewka przeciwstawiają się przepływowi prądu zmiennego. Wiesz także, że wartość ich reaktancji zależy od częstotliwości podawanego do obwodu sygnału.

Gdy w jednym obwodzie umieścimy cewkę i kondensator, wystąpi w nim bardzo pożyteczne zjawisko, tak zwany **rezonans**. (Pojawia się on zarówno w połączeniach szeregowych, jak i równoległych). Rezonans zachodzi przy częstotliwości, przy której reaktancja kondensatora jest równa reaktancji cewki.

W tym rozdziale poznasz niektóre właściwości układów rezonansowych. Skupimy się szczególnie na tych zagadnieniach, które wiążą się z zasadą działania układów drgających. O tych ostatnich wspomnimy pod koniec tego rozdziału i poświęcimy im cały rozdział 9.

Po zakończeniu pracy z prezentowanymi tu problemami będziesz potrafił:

- określić impedancję w szeregowym obwodzie LC;
- obliczyć częstotliwość rezonansową dla połączonych szeregowo elementów obwodu LC;
- naszkicować wykres zmienności napięcia wyjściowego w obwodzie szeregowych elementów LC;
- określić impedancję w równoległym obwodzie LC;
- obliczyć częstotliwość rezonansową dla połączonych równoległe elementów obwodu LC;
- naszkicować wykres zmienności napięcia wyjściowego w obwodzie równoległych elementów LC;
- obliczyć szerokość pasma i dobroć dla prostych połączeń szeregowych i równoległych w obwodach LC;
- obliczyć częstotliwość drgań oscylatora.

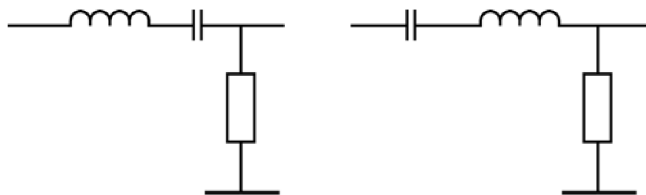
## Szeregowe łączenie kondensatorów i cewek

**I** Wiele układów elektronicznych zawiera połączone szeregowo kondensator i cewkę (rysunek 7.1).



Rysunek 7.1

Szeregowe połączenie kondensatora, cewki i opornika daje tak zwany dzielnik napięcia. Przykłady takich układów zostały przedstawione na rysunku 7.2. Obwód zawierający element oporowy (R), element indukcyjny (L) oraz element pojemnościowy (C) nazywa się obwodem RLC. Zauważ, że choć kolejność łączenia cewki z kondensatorem w układach pokazanych na rysunku 7.2 jest inna, obydwa obwody zadziałają w ten sam sposób.



Rysunek 7.2

Aby ułatwić obliczenia, przyjmij w kilku najbliższych problemach, że oporność cewki w porównaniu z opornością opornika jest tak mała, iż można ją pominąć, dzięki czemu będziesz mógł ją zignorować, analizując problemy dotyczące prądu stałego.

Gdy układy przedstawione na rysunku 7.2 będą zasilane prądem zmiennym, reaktancje cewki i kondensatora będą ściśle zależeć od częstotliwości sygnału.

### Zadania

- A. Jakiego wzoru użyłbyś do wyznaczenia reaktancji cewki?
- B. Jakiego wzoru użyłbyś do wyznaczenia reaktancji kondensatora?

### Odpowiedzi

A.  $X_L = 2\pi fL$ .

B.  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ .

**2** Wypadkową reaktancję połączonych szeregowo kondensatora i cewki wyznacza się z następującego wzoru:

$$X = X_L - X_C.$$

Impedancja obwodu RLC przedstawionego na rysunku 7.2 jest opisana wzorem:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Pamiętaj, że wielkość  $X^2$  pojawiająca się w tym wzorze to  $(X_L - X_C)^2$ .

Oblicz wypadkową reaktancję i impedancję szeregowego obwodu RLC z rysunku 7.2, wykorzystując w tym celu podane niżej wartości:

$$f = 1 \text{ kHz},$$

$$L = 100 \text{ mH},$$

$$C = 1 \text{ }\mu\text{F},$$

$$R = 500 \text{ }\Omega.$$

### Zadania

Wykonaj następujące obliczenia:

A. Wyznacz  $X_L$ :

B. Wyznacz  $X_C$ :

C. Wyznacz wypadkową reaktancję, wiedząc, że  $X = X_L - X_C$ :

D. Wiedząc, że  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ , znajdź wypadkową impedancję:

### Odpowiedzi

A.  $X_L = 628 \text{ }\Omega$ .

B.  $X_C = 160 \text{ }\Omega$ .

C.  $X = 468 \text{ }\Omega$  (indukcyjna).

D.  $Z = 685 \text{ }\Omega$ .

**3** Oblicz wypadkową reaktancję i impedancję szeregowego obwodu RLC przedstawionego na rysunku 7.2, wykorzystując w tym celu poniższe wartości:

$$f = 100 \text{ Hz},$$

$$L = 0,5 \text{ H},$$

$$C = 5 \text{ }\mu\text{F},$$

$$R = 8 \text{ }\Omega.$$

**Zadania**

Postępując tak samo jak w problemie 2., oblicz następujące wartości:

- A.  $X_L =$
- B.  $X_C =$
- C.  $X =$
- D.  $Z =$

**Odpowiedzi**

- A.  $X_L = 314 \Omega$ .
- B.  $X_C = 318 \Omega$ .
- C.  $X = -4 \Omega$  (pojemnościowa).
- D.  $Z = 9 \Omega$ .

Przyjmuje się, że jeśli wypadkowa reaktancja ma wartość ujemną, nazywa się ją pojemnościową.

**4** Oblicz wypadkową reaktancję i impedancję szeregowego obwodu RLC przedstawionego na rysunku 7.2, wykorzystując w tym celu poniższe wartości:

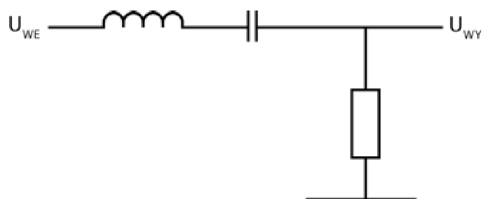
**Zadania**

- A.  $f = 10 \text{ kHz}$ ,  $L = 15 \text{ mH}$ ,  $C = 0,01 \mu\text{F}$ ,  $R = 494 \Omega$ .  
 $X =$   
 $Z =$
- B.  $f = 2 \text{ MHz}$ ,  $L = 8 \mu\text{H}$ ,  $C = 0,001 \mu\text{F}$ ,  $R = 15 \Omega$ .  
 $X =$   
 $Z =$

**Odpowiedzi**

- A.  $X = -650 \Omega$  (pojemnościowa),  $Z = 816 \Omega$ .
- B.  $X = 21 \Omega$  (indukcyjna),  $Z = 25,8 \Omega$ .

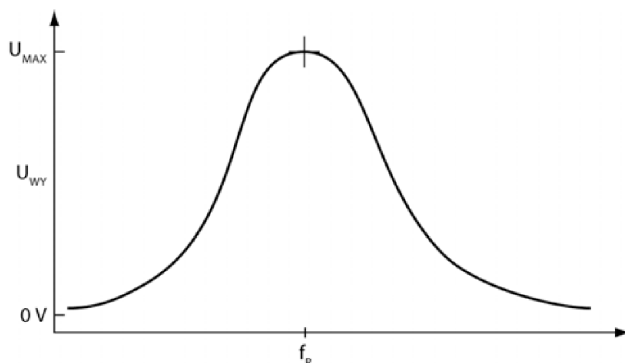
**5** Napięcie wyjściowe w obwodzie przedstawionym na rysunku 7.3 jest równe spadkowi napięcia na oporniku.



Rysunek 7.3

W zadaniach z problemów 1 – 4 reaktancja połączonych szeregowo cewki i kondensatora zmienia się wraz ze zmianą częstotliwości sygnału wejściowego. Oznacza to, że zmiana częstotliwości musi wywoływać zmianę spadku napięcia na oporniku oraz zmianę amplitudy napięcia wyjściowego  $U_{WY}$ .

Gdybyś narysował wykres zależności napięcia wyjściowego  $U_{WY}$  od częstotliwości dla wielkości mierzonych w układzie z rysunku 7.3, miałby on kształt taki, jak przedstawiliśmy na rysunku 7.4.



Rysunek 7.4

Największa wartość napięcia zaznaczona na wykresie  $U_{MAX}$  (tak zwane napięcie szczytowe) jest nieco mniejsza od wartości napięcia wejściowego  $U_{WE}$ . Niewielkie osłabienie sygnału wejściowego wynika z oporu, jaki cewka stawia przepływającemu przez nią prądowi stałemu.

Maksimum napięcia wejściowego przypada dla częstotliwości  $f_R$ , dla której wypadkowa reaktancja połączonych szeregowo kondensatora i cewki ma najmniejszą wartość. Dla sygnałów o tej częstotliwości spadek napięcia na cewce i kondensatorze jest bardzo mały, zatem większość napięcia wejściowego odkłada się na oporniku, przez co napięcie wyjściowe przyjmuje wartość maksymalną.

### Zadanie

Jaka musiałaby być wartość  $X_L$ , aby w warunkach idealnych i przy  $X_C = 10,6 \Omega$  wypadkowa reaktancja ( $X$ ) układu przedstawionego na rysunku 7.3 była równa zero?

**Odpowiedź**

$X = X_L - X_C = 0$ , zatem:

$$X_L = X_C + X = 10,6 \, \Omega + 0 \, \Omega = 10,6 \, \Omega.$$

**6** Aby wyznaczyć częstotliwość, dla której  $X_L - X_C = 0$ , podstaw do tego warunku wzory opisujące  $X_L$  i  $X_C$ , a następnie wyznacz z równania zmienną  $f$ :

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Stąd:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

gdzie  $f_R$  jest częstotliwością rezonansową obwodu.

**Zadanie**

W jaki sposób wartość częstotliwości rezonansowej zależy od oporności opornika wstawionego do obwodu?

**Odpowiedź**

Nie zależy od niej w żaden sposób.

**7** Oblicz częstotliwość rezonansową dla obwodu z rysunku 7.3, wykorzystując wartości podane w zadaniach.

**Zadania**

A.  $C = 1 \, \mu\text{F}$ ,  $L = 1 \, \text{mH}$ .

$$f_R =$$

B.  $C = 16 \, \mu\text{F}$ ,  $L = 1,6 \, \text{mH}$ .

$$f_R =$$

**Odpowiedzi**

$$\text{A. } f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}} = 5,0 \, \text{kHz}.$$

$$\text{B. } f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 10^{-6}}} = 1 \text{ kHz.}$$

**8** Oblicz częstotliwość rezonansową dla obwodu przedstawionego na rysunku 7.3, wykorzystując wartości podane w zadaniach.

### Zadania

A.  $C = 0,1 \mu\text{F}$ ,  $L = 1 \text{ mH}$ .

$$f_R =$$

B.  $C = 1 \mu\text{F}$ ,  $L = 2 \text{ mH}$ .

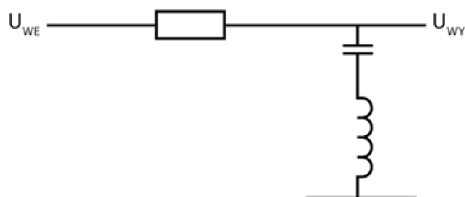
$$f_R =$$

### Odpowiedzi

A.  $f_R = 16 \text{ kHz}$ .

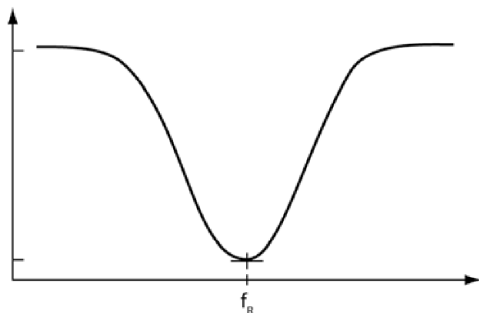
B.  $f_R = 3,6 \text{ kHz}$ .

**9** W układzie RLC przedstawionym na rysunku 7.5 napięcie wyjściowe jest równe spadkowi napięcia na kondensatorze i cewce.



Rysunek 7.5

Wykres zależności napięcia wyjściowego  $U_{WY}$  od częstotliwości dla układu z rysunku 7.5 został przedstawiony na rysunku 7.6.



Rysunek 7.6

Przy sygnale wejściowym o częstotliwości rezonansowej, którą obliczałeś w problemie 6., napięcie wyjściowe osiąga wartość minimalną. Dla tej częstotliwości wypadkowa reaktancja połączonych szeregowo cewki i kondensatora przyjmuje wartość najmniejszą. Oznacza to, iż na cewce i kondensatorze niemalże nie odnotowujemy żadnego spadku napięcia, co sprawia, że napięcie wyjściowe jest tak niskie.

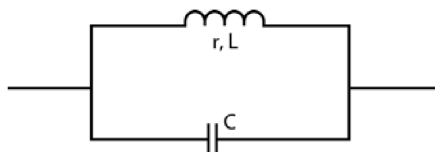
### Zadanie

Jak sądzisz, jaką wartość przyjmuje minimalne napięcie wyjściowe?

#### Odpowiedź

Zerową lub bliską zero.

**10** Kondensator i cewka mogą być także połączone równoległe, co przedstawiono na rysunku 7.7.



Rysunek 7.7

Częstotliwość rezonansową tego układu oblicza się, korzystając z podanego niżej wzoru:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{L}}$$

Pojawiająca się we wzorze zmienna  $r$  jest oporem cewki, przez którą przepływa prąd stały. Jeśli jednak w badanym układzie wielkość ta jest przynajmniej dziesięciokrotnie mniejsza od wartości reaktancji cewki, można ją pominąć. Wtedy wzór przyjmuje znacznie prostszą, znaną Ci już z problemów 7. i 8. postać:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Wprowadza się pojęcie dobroci układu ( $Q$ ) równej  $\frac{X_L}{r}$ . Jeżeli dobroć jest większa od 10 lub równa 10, częstotliwość rezonansową  $f_R$  można wyznaczyć z prostszego równania.

**Zadania**

- A. Którym wzorem powinieneś posłużyć się, by wyznaczyć częstotliwość rezonansową w obwodzie równoległym, jeśli dobroć cewki wynosi 20?
- B. Którego wzoru powinieneś użyć, jeśli  $Q = 8$ ?

**Odpowiedzi**

$$\text{A. } f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

$$\text{B. } f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{L}}.$$

**UWAGA** Częstotliwość rezonansową można też obliczyć z innej postaci podanego wcześniej wzoru, jeśli znasz dobroć cewki:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{Q^2}{1+Q^2}}.$$

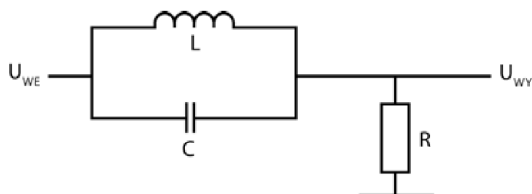
**11** Korzystając z podanych niżej wzorów, możesz obliczyć całkowitą impedancję połączonych równolegle kondensatora i cewki (opór, jaki stawiają przepływającemu prądowi) w układzie rezonującym:

$Z_{MAX} = Q^2 r$ , jeżeli  $Q$  jest większe od 10 bądź równe 10 lub

$$Z_{MAX} = \frac{L}{rC} \text{ dla dowolnych wartości } Q.$$

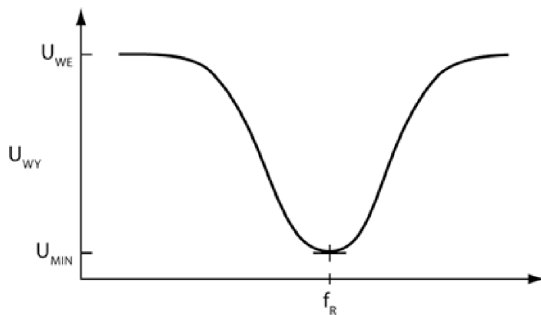
W układzie rezonującym połączonych równolegle kondensatora i cewki impedancja tych elementów jest największa.

Połączone równolegle kondensator i cewka tworzą dzielnik napięcia. Przedstawia go rysunek 7.8.



**Rysunek 7.8**

Gdybyś narysował wykres zależności napięcia wyjściowego  $U_{WY}$  od częstotliwości dla wielkości mierzonych w układzie z rysunku 7.8, miałby on kształt taki, jak przedstawiliśmy na rysunku 7.9.



Rysunek 7.9

### Zadania

- Jakim wzorem wyraża się całkowita impedancja dzielnika napięcia będącego w rezonansie?
- Jak nazywa się częstotliwość, dla której napięcie wyjściowe przyjmuje najmniejszą wartość?
- Dlaczego napięcie wyjściowe w obwodzie pozostającym w rezonansie ma najmniejszą wartość?

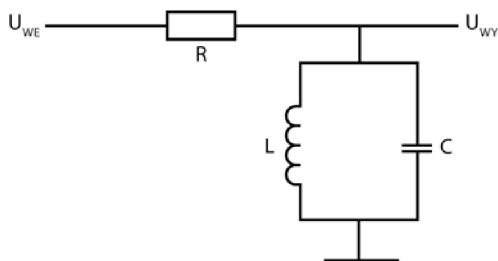
### Odpowiedzi

A.  $Z = Z_{MIN} + R$ .

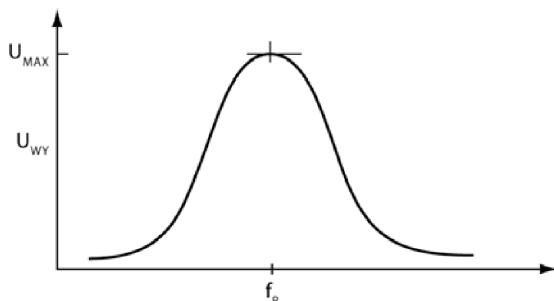
**UWAGA** Zależność podana tym wzorem zachodzi wyłącznie dla częstotliwości rezonansowej. W każdym innym przypadku całkowita impedancja układu jest opisywana w znacznie bardziej skomplikowany sposób wymagający przeanalizowania szeregu elementów  $r$  i  $L$ , połączonego równolegle z elementem pojemnościowym.

- Częstotliwość rezonansowa dla układu równoległego.
- Napięcie wyjściowe dla częstotliwości rezonansowej ma w tym układzie najmniejszą wartość, ponieważ impedancja elementów połączonych równolegle ma przy tej częstotliwości największą wartość.

**12** Napięcie wyjściowe w obwodzie przedstawionym na rysunku 7.10 jest równe spadkowi napięcia na cewce i kondensatorze połączonych równolegle. Wykres zależności  $U_{WY}$  od częstotliwości dla układu zaprezentowanego na rysunku 7.10 został przedstawiony na rysunku 7.11. Dla częstotliwości rezonansowej impedancja cewki i kondensatora połączonych równolegle ma największą wartość. Oznacza to, że spadek napięcia na tych elementach (będący jednocześnie napięciem wyjściowym) ma tu wartość największą.



Rysunek 7.10



Rysunek 7.11

**Zadanie**

Z jakiego wzoru wyznaczyłbyś częstotliwość rezonansową?

**Odpowiedź**

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \text{ jeżeli } Q \text{ jest większe od } 10 \text{ bądź równe } 10.$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{L}}, \text{ jeżeli } Q \text{ jest mniejsze od } 10.$$

**13** Znajdź częstotliwość rezonansową dla podanych niżej przypadków równoległego łączenia cewki i kondensatora. Przyjmij, że  $Q$  jest większe od 10.

**Zadania**

A.  $L = 5 \text{ mH}$ ,  $C = 5 \text{ }\mu\text{F}$ .

$$f_R =$$

B.  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ .

$$f_R =$$

**Odpowiedzi**

- A.  $f_R = 1 \text{ kHz}$  (w przybliżeniu).  
 B.  $f_R = 1600 \text{ Hz}$  (w przybliżeniu).

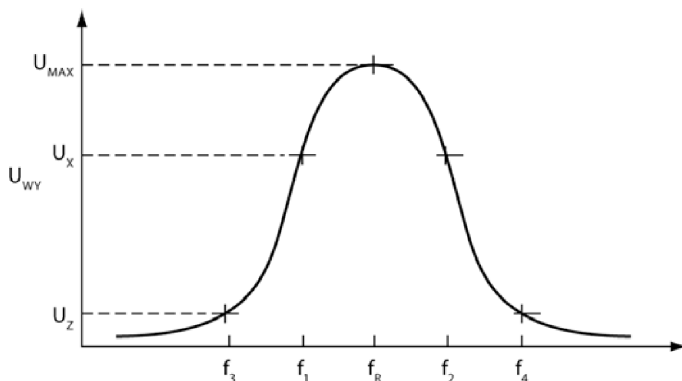
**Krzywa sygnału wyjściowego**

**14** Pora przyrzeć się bliżej krzywej sygnału wyjściowego. Spójrz na wykres przedstawiony na rysunku 7.12.

Do układu wchodzi sygnał o częstotliwości rezonansowej  $f_R$ . W obwodzie doznaje minimalnego osłabienia i opuszcza układ z napięciem równym napięciu  $U_{MAX}$  zaznaczonemu na wykresie.

Dla dwóch zaznaczonych na osi wykresu częstotliwości —  $f_1$  i  $f_2$  — sytuacja wygląda niemalże tak samo. Sygnał doznaje niewielkiego osłabienia, w związku z tym napięcie wyjściowe dla tych częstotliwości jest prawie tak samo duże, jak dla częstotliwości rezonansowej. Na wykresie wartości napięcia dla  $f_1$  i  $f_2$  zostały oznaczone jako  $U_X$ .

Sygnały wyjściowe dla częstotliwości  $f_3$  i  $f_4$  są już bardzo słabe.



**Rysunek 7.12**

Częstotliwości te nie są przenoszone — mówi się, że są **blokowane** lub **odrzućane**. Na wykresie odpowiadające im napięcia wyjściowe zostały oznaczone symbolem  $U_Z$ .

Krzywe sygnałów wyjściowych w obwodach rezonansowych, tak zwane odpowiedzi częstotliwościowe — zarówno dla połączeń szeregowych, jak i dla równoległych — są przy odpowiednio dużych wartościach dobroci ( $Q$ ) symetryczne. Można przyjąć z dobrym przybliżeniem, że jest tak zawsze, gdy  $Q$  jest większe od 10.

**Zadania**

- A. Co oznacza stwierdzenie, że dana częstotliwość jest przekazywana?
- B. Dlaczego sygnały o częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$  są przekazywane niemal tak samo dobrze, jak sygnał o częstotliwości rezonansowej?
- C. Co mamy na myśli, mówiąc, że częstotliwość jest blokowana?
- D. Które z częstotliwości przedstawionych na pokazanym wcześniej wykresie są blokowane?
- E. Czy krzywa sygnału wyjściowego wydaje się symetryczna? Jak należy interpretować jej kształt w odniesieniu do elementów obwodu?

**Odpowiedzi**

- A. Oznacza to, że odpowiadający jej sygnał wyjściowy jest osłabiany w minimalnym stopniu.
- B. Ponieważ ich częstotliwości są bliskie częstotliwości rezonansowej.
- C. Odpowiadające jej napięcie wyjściowe jest bardzo niskie.
- D. Wszystkie częstotliwości mniejsze od  $f_3$  i większe od  $f_4$  oraz o wartościach  $f_3$  i  $f_4$ .
- E. Krzywa wygląda na symetryczną. Oznacza to, że dobroć cewki musi być większa od 10.

**15** Pomiędzy wartościami częstotliwości  $f_R$  i  $f_3$  oraz  $f_R$  i  $f_4$  znajduje się punkt, poniżej którego sygnały są osłabiane do takiego poziomu, że można uznać je za zablokowane. Granicę ustala się na poziomie odpowiadającym połowie mocy maksymalnego sygnału wyjściowego w danym obwodzie. Wartość ta przypada dla napięcia stanowiącego około 70,7% napięcia maksymalnego. Dla krzywej przedstawionej w problemie 14. będzie to  $0,707 \cdot U_{MAX}$ . Różnicę wartości częstotliwości granicznych nazywamy **szerokością pałówkową**, natomiast same częstotliwości graniczne określa się mianem częstotliwości **górnjej i dolnej pasma przenoszenia**.

Jeżeli sygnał wyjściowy dla określonej częstotliwości jest większy od wartości odpowiadającej częstotliwościom granicznym lub jej równy, mówimy, iż jest przepuszczany czy też przyjmowany przez obwód. Jeśli ma wartość niższą, przyjmuje się, że układ go blokuje.

**Zadanie**

Założmy, że  $U_{MAX} = 10$  V. Ile będzie wynosić minimalna wartość napięcia przepuszczanego przez układ?

**Odpowiedź**

$$U = 0,707 \cdot 10 \text{ V} = 7,07 \text{ V.}$$

(Układ przepuszcza każdy sygnał o napięciu wyjściowym większym niż 7,07 V).

**16** Przyjmijmy, że sygnał wyjściowy dla częstotliwości rezonansowej jest równy 5 V. Dla innej częstotliwości wynosi 3,3 V.

**Zadanie**

Czy sygnały o drugiej częstotliwości będą przekazywane czy blokowane przez obwód?

**Odpowiedź**

$$U = 0,707 \cdot U_{\text{MAX}} = 0,707 \cdot 5 \text{ V} = 3,535 \text{ V.}$$

Ponieważ napięcie 3,3 V jest mniejsze od wartości granicznej 3,535 V, sygnał o częstotliwości odpowiadającej takiemu napięciu będzie blokowany.

**17** Podaj napięcie odpowiadające szerokości połówkowej dla podanych niżej wartości  $U_{\text{MAX}}$ .

**Zadania**

- A.  $U_{\text{MAX}} = 20 \text{ V}$
- B.  $U_{\text{MAX}} = 100 \text{ V}$
- C.  $U_{\text{MAX}} = 3,2 \text{ V}$

**Odpowiedzi**

- A. 14,14 V.
- B. 70,70 V.
- C. 2,262 V.

**18** Wprawdzie rozważania rozpoczęliśmy od wprowadzenia pojęcia częstotliwości rezonansowej, lecz nie obyło się bez zdefiniowania kilku dodatkowych pojęć związanych z częstotliwościami. W tej chwili mówimy już o całym zakresie częstotliwości, czyli o pewnym paśmie.

Z szerokością połówkową wiąże się dwie wartości częstotliwości, które oznaczaliśmy dotąd jako  $f_1$  i  $f_2$ . Ich różnica określa szerokość pasma częstotliwości przenoszonego przez układ. Wielkość tę nazywamy **szerokością pasma** lub po prostu **pasmem przenoszenia**. Wyznacza się ją z następującego wzoru:

$$\Delta f = f_2 - f_1.$$

Wszystkie częstotliwości należące do pasma przenoszenia są przekazywane przez układ, natomiast wszystkie wykraczające poza nie są wycinane. Tego rodzaju obwód (schemat został przedstawiony na rysunku 7.10) nazywamy **filtrem środkowoprzepustowym**.

### Zadanie

Określ, które z par częstotliwości zawierają w sobie większy zakres, innymi słowy, którym odpowiada szersze pasmo.

A.  $f_1 = 200$  Hz,  $f_2 = 100$  Hz.

B.  $f_1 = 20$  Hz,  $f_2 = 10$  Hz.

### Odpowiedź

Szersze pasmo odpowiada pierwszemu zakresowi częstotliwości.

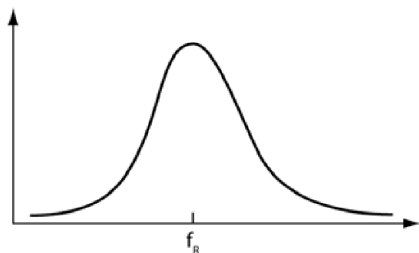
Włączone radio odbiera sygnał nadawany przez jedną stację radiową, a nie przez kilka zajmujących sąsiadujące ze sobą częstotliwości, to zaś oznacza, że pasmo przenoszenia odbiornika radiowego musi być bardzo wąskie, aby mógł on odbierać tylko wybraną częstotliwość.

Z kolei odbiornik telewizyjny musi przepuszczać sygnały o częstotliwościach z przedziału od 30 Hz do 4,5 MHz, czyli charakteryzować się szerszym pasmem przenoszenia. To, jak zaprojektujesz dany obwód, zależy przede wszystkim od częstotliwości pasma, którą chcesz osiągnąć, ona zaś wynika bezpośrednio z zastosowania przewidywanego przez Ciebie dla budowanego urządzenia.

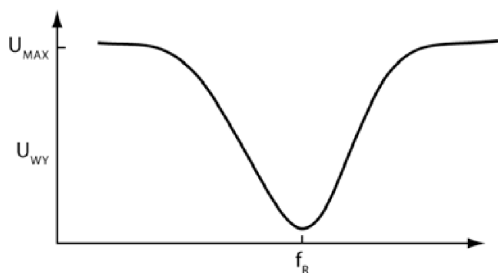
**19** W poprzednich problemach skupiliśmy się na analizie obwodów przenoszących sygnały o częstotliwości sąsiadującej z częstotliwością rezonansową (przykładowa krzywa została pokazana na rysunku 7.13).

Te same zasady i identyczne równania obowiązują, gdy obwód ma wycinać częstotliwości sąsiadujące z częstotliwością rezonansową, a przepuszczać pozostałe ich wartości. Przykład krzywej wyjściowej dla takiego przypadku pokazaliśmy na rysunku 7.14.

Obwód o charakterystyce przedstawionej na rysunku 7.14 (przykładem może być obwód z rysunku 7.8) to tak zwany **filtr środkowozaporowy**.



Rysunek 7.13



Rysunek 7.14

### Zadania

- A. Których punktów na krzywej z rysunku 7.14 użyłbyś do wyznaczenia szerokości pasma?
- B. Czy napięcie wyjściowe odpowiadające częstotliwości rezonansowej będzie większe, czy mniejsze od napięcia odpowiadającego częstotliwościom granicznym?

### Odpowiedzi

- A. Częstotliwości granicznych (dla  $0,707 \cdot U_{MAX}$ ).
- B. Napięcie wyjściowe odpowiadające częstotliwości rezonansowej przypada w minimum wykresu, co oznacza, że jest ona mniejsza od napięcia odpowiadającego wartościom granicznym częstotliwości.

**20** Aby określić szerokość pasma przenoszenia, musisz wyznaczyć wartości częstotliwości granicznych ( $f_1$  i  $f_2$ ), a następnie podstawić je do podanego niżej wzoru:

$$\Delta f = f_2 - f_1.$$

Możesz też, jeśli znasz dobroć obwodu, posłużyć się następującym wzorem:

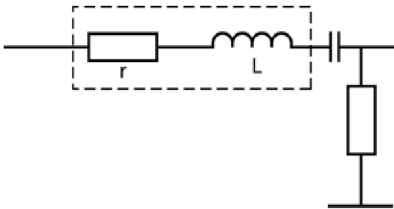
$$\Delta f = \frac{f_R}{Q},$$

gdzie:

$$Q = \frac{X_L}{R}.$$

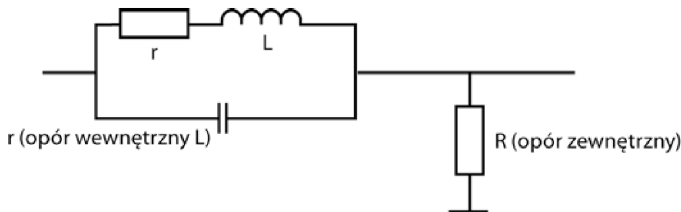
Z tego równania wynika, że z dwóch obwodów o identycznej częstotliwości rezonansowej węższe pasmo przenoszenia będzie miał ten o większej dobroci.

Wyznaczając dobroć obwodu, zawierającego cewkę i kondensator połączone szeregowo, oraz opór zewnętrzny (rysunek 7.15), załóż, że opór w układzie jest sumą wewnętrznego oporu cewki wyznaczanego dla prądu stałego ( $r$ ) i oporu opornika ( $R$ ).



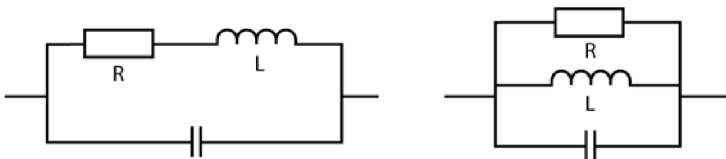
**Rysunek 7.15**

Gdy obliczasz dobroć obwodu, w którym połączone równolegle cewka i kondensator są przyłączane szeregowo do oporu zewnętrznego (rysunek 7.16), nie uwzględniaj w rachunkach wartości oporu zewnętrznego ( $R$ ). Do wzorów podstaw jedynie wartość oporu zwojnicy wyznaczaną dla prądu stałego ( $r$ ).



**Rysunek 7.16**

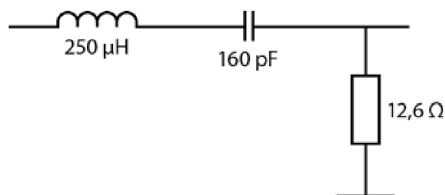
Obliczając dobroć układu z połączonymi równolegle cewką, kondensatorem i opornikiem (obydwa obwody na rysunku 7.17), uwzględniaj wartość oporu zewnętrznego ( $R$ ).



**Rysunek 7.17**

**Zadania**

Wyznacz częstotliwość rezonansową  $f_R$ , dobroć  $Q$  i pasmo przenoszenia  $\Delta f$  dla obwodu przedstawionego na rysunku 7.18.

**Rysunek 7.18**

$$f_R =$$

$$Q =$$

$$\Delta f =$$

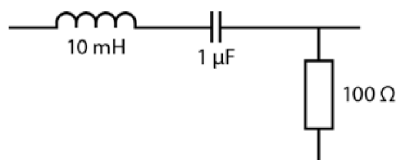
**Odpowiedzi**

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{250 \cdot 10^{-6} \cdot 160 \cdot 10^{-12}}} = 796 \text{ kHz}.$$

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} = \frac{2\pi \cdot 796 \text{ kHz} \cdot 250 \mu\text{H}}{12,6 \Omega} = 99,2.$$

$$\Delta f = \frac{f_R}{Q} = \frac{796 \text{ kHz}}{99,2} = 8 \text{ kHz}.$$

**21** Wykorzystaj dane oznaczone na schemacie z rysunku 7.19, by rozwiązać poniższe zadania.

**Rysunek 7.19****Zadania**

Wyznacz częstotliwość rezonansową  $f_R$ , dobroć  $Q$  i pasmo przenoszenia  $\Delta f$ , a następnie na osobnej kartce papieru narysuj krzywą wyjściową i zaznacz na niej zakres częstotliwości blokowanych i przenoszonych przez układ.

$$f_R =$$

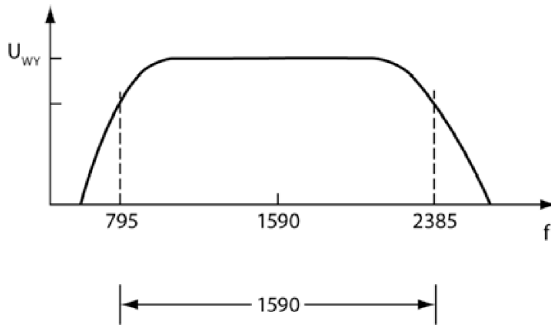
$$Q =$$

$$\Delta f =$$

**Odpowiedzi**

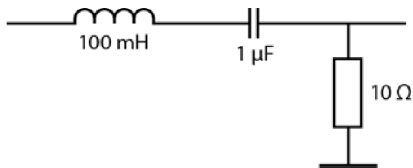
$$f_R = 1590 \text{ Hz}, Q = 1, \Delta f = 1590 \text{ Hz}.$$

Krzywa wyjściowa została przedstawiona na rysunku 7.20.



**Rysunek 7.20**

**22** Wykorzystaj dane zaznaczone na schemacie z rysunku 7.21, by rozwiązać podane niżej zadania.



**Rysunek 7.21**

**Zadania**

Wyznacz częstotliwość rezonansową  $f_R$ , dobroć  $Q$  i pasmo przenoszenia  $\Delta f$ , a następnie na osobnej kartce papieru narysuj krzywą.

$$f_R =$$

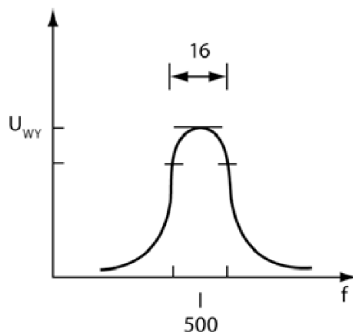
$$Q =$$

$$\Delta f =$$

**Odpowiedzi**

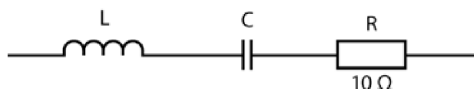
$$f_R = 500 \text{ Hz}, Q = 31,4, \text{ a } \Delta f = 16 \text{ Hz}.$$

Krzywa wyjściowa została przedstawiona na rysunku 7.22.



Rysunek 7.22

**23** Ten problem dotyczy obwodu przedstawionego na rysunku 7.23. Wiesz, że opór opornika ma wartość  $10 \Omega$ , ale nie znasz wartości parametrów opisujących pozostałe elementy obwodu.



Rysunek 7.23

### Zadania

Określ szerokość pasma przenoszenia oraz wyznacz wartości  $L$  i  $C$ , jeśli wiadomo, że częstotliwość rezonansowa tego obwodu wynosi  $1200 \text{ Hz}$ , a jego dobroć to  $80$ .

$$\Delta f =$$

$$L =$$

$$C =$$

### Odpowiedzi

$$\Delta f = 15 \text{ Hz.}$$

$$L = 106 \text{ mH.}$$

$$C = 0,166 \text{ }\mu\text{F.}$$

Poprawność odpowiedzi można sprawdzić, podstawiając wartości  $L$  i  $C$  do wzoru na częstotliwość rezonansową.

**24** Ten problem również dotyczy obwodu z rysunku 7.23. Wiesz, że opór opornika ma wartość  $10 \Omega$ , ale nie znasz wartości parametrów opisujących pozostałe elementy obwodu.

**Zadania**

Określ dobroć obwodu oraz wyznacz wartości  $L$  i  $C$ , jeśli wiadomo, że częstotliwość rezonansowa wynosi  $300 \text{ kHz}$ , a pasmo przenoszenia obwodu to  $80 \text{ kHz}$ .

$Q =$

$L =$

$C =$

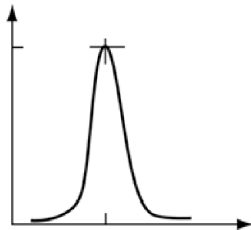
**Odpowiedzi**

$Q = 3,75.$

$L = 20 \mu\text{H}.$

$C = 0,014 \mu\text{F}.$

**25** Układ przenoszący (lub wycinający) wąski zakres częstotliwości ma **wysoką dobroć**. Rysunek 7.24 przedstawia krzywą rezonansową dla obwodu o wysokiej dobroci.

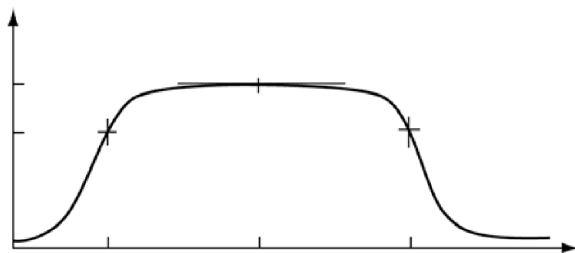


**Rysunek 7.24**

Ponieważ zakres przekazywanych częstotliwości w układach o wysokiej dobroci jest bardzo wąski, mówimy, że układy te są **selektywne**.

Układ przenoszący (lub wycinający) szeroki zakres częstotliwości ma niską dobroć. Rysunek 7.25 przedstawia krzywą rezonansową dla obwodu o niskiej dobroci.

Przypomnij sobie teraz rozważania dotyczące problemu 18. (porównywanie pasm przenoszenia odbiorników radiowych i telewizyjnych) i spróbuj odpowiedzieć na zadane poniżej pytania.



Rysunek 7.25

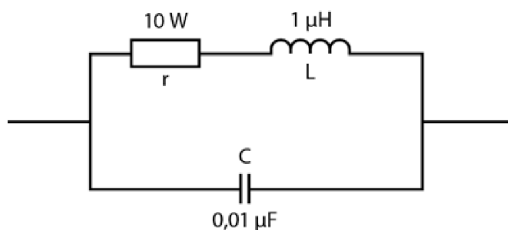
**Zadania**

- A. Który z odbiorników jest bardziej selektywny — radio czy telewizor?  
 B. W którym z nich powinien znaleźć się obwód o mniejszej dobroci?

**Odpowiedzi**

- A. Radio.  
 B. W telewizorze.

**26** Cewka i kondensator przedstawione na rysunku 7.26 zostały połączone równolegle, ale wartości częstotliwości rezonansowej  $f_R$ , dobroć układu  $Q$  oraz pasmo przenoszenia dla łączonych równolegle elementów LC oblicza się z tych samych wzorów, których używałeś w problemie 20. do opisu połączenia szeregowego.



Rysunek 7.26

**Zadania**

Dla układu przedstawionego na rysunku 7.26 wyznacz wartość częstotliwości rezonansowej  $f_R$ , dobroć  $Q$  oraz szerokość pasma.

- A.  $f_R =$   
 B.  $Q =$   
 C.  $\Delta f =$

**Odpowiedzi**

A.  $f_R = 1,6 \text{ MHz}$ .

B.  $X_L = 10 \ \Omega$ , zatem  $Q = \frac{10}{0,01} = 100$ . (Zauważ, że jedyną opornością uwzględnianą w tych rachunkach jest mały opór, jaki zwojnica stawia przepływającemu przez nią prądowi stałemu).

C.  $\Delta f = 16 \text{ kHz}$ . (To układ o dość wysokiej dobroci).

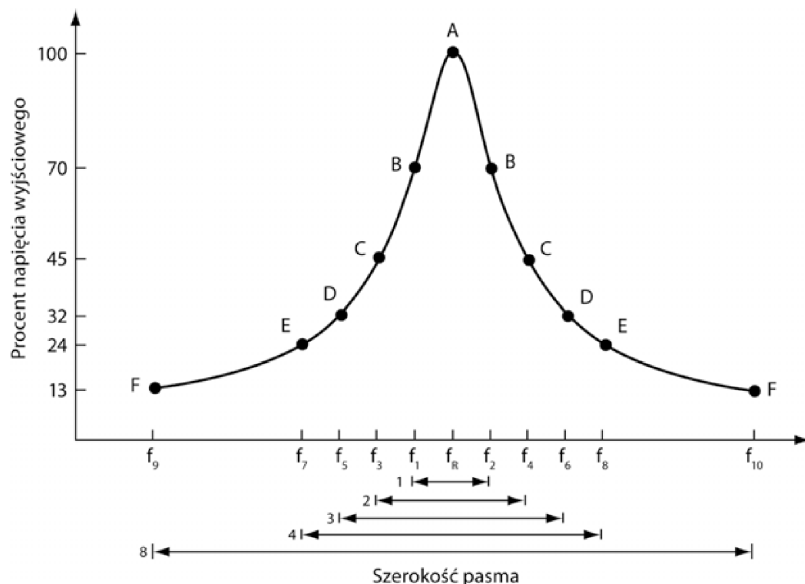
**27** Poprzednie problemy poświęciliśmy zagadnieniom związanym z wyznaczaniem częstotliwości rezonansowej, szerokości pasma przenoszenia oraz dobroci określonych obwodów elektrycznych. Zetknąłeś się także z zadaniami wymagającymi wyznaczenia parametrów charakterystycznych dla poszczególnych elementów układu przy znanych wartościach dobroci, częstotliwości i pasma przenoszenia.

Jeśli znasz częstotliwość rezonansową danego obwodu, jesteś w stanie naszkicować przybliżoną krzywą rezonansową. Proste obliczenia, których schemat przedstawimy Ci w tym problemie, pozwalają kreślić ją z dokładnością do jednego procenta.

Krzywą wyznaczoną na podstawie tego rodzaju obliczeń nazywamy **uniwersalną krzywą rezonansową**.

Napięcie wyjściowe dla kilku wybranych częstotliwości określa się w następujących krokach:

1. Załóż, że napięcie maksymalne  $U_{\text{MAX}}$  przypadające dla częstotliwości rezonansowej  $f_R$  to 100% sygnału wyjściowego. Wartości tej odpowiada punkt A na krzywej z rysunku 7.27.
2. Napięcia wyjściowe odpowiadające częstotliwościom granicznym  $f_1$  i  $f_2$  będą wynosić 0,707 maksymalnej wartości napięcia. Na rysunku 7.27 odpowiadają im punkty opisane literą B. Pamiętaj, że  $f_2 - f_1 = \Delta f$ , stąd zaś wynika, iż napięcie wynoszące 70,7% wartości maksymalnej przypada dla częstotliwości oddalonych od  $f_R$  o pół szerokości pasma.
3. Napięcia wyjściowe odpowiadające częstotliwościom  $f_3$  i  $f_4$  (na rysunku 7.27 oznaczone literami C) stanowią 44,7% wartości maksymalnej. Wiemy też, że  $f_4 - f_3 = 2 \cdot \Delta f$ , zatem punkty oznaczające 44,7% napięcia maksymalnego przypadają w odległości jednej szerokości pasma od częstotliwości rezonansowej.
4. Napięcia wyjściowe odpowiadające częstotliwościom  $f_5$  i  $f_6$  (na rysunku 7.27 oznaczone literami D) stanowią 32% wartości maksymalnej. Wiemy też, że  $f_6 - f_5 = 3 \cdot \Delta f$ , zatem punkty oznaczające ten ułamek napięcia maksymalnego znajdują się w odległości półtorej szerokości pasma od częstotliwości rezonansowej.

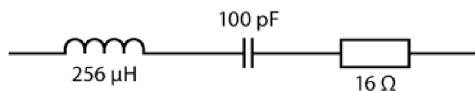


**Rysunek 7.27**

- Napięcia wyjściowe odpowiadające częstotliwościom  $f_7$  i  $f_8$  (na rysunku 7.27 oznaczone literami E) stanowią 24% wartości maksymalnej. Wiemy też, że  $f_8 - f_7 = 4 \cdot \Delta f$ , zatem punkty oznaczające ten ułamek napięcia maksymalnego znajdują się w odległości dwóch szerokości pasma od częstotliwości rezonansowej.
- Napięcia wyjściowe odpowiadające częstotliwościom  $f_9$  i  $f_{10}$  (na rysunku 7.27 oznaczone literami F) stanowią 13% wartości maksymalnej. Wiemy też, że  $f_{10} - f_9 = 8 \cdot \Delta f$ , zatem punkty oznaczające ten ułamek napięcia maksymalnego znajdują się w odległości czterech szerokości pasma od częstotliwości rezonansowej.

### Zadania

Oblicz  $f_R$ ,  $X_L$ ,  $Q$  i  $\Delta f$  dla obwodu przedstawionego na rysunku 7.28.



**Rysunek 7.28**

- $f_R =$   
 $X_L =$   
 $Q =$   
 $\Delta f =$

**Odpowiedzi**

$f_R = 1 \text{ MHz}$ .  
 $X_L = 1607 \ \Omega$ .  
 $Q = 100$ .  
 $\Delta f = 10 \text{ kHz}$ .

**28** Oblicz teraz częstotliwości odpowiadające każdej z wartości procentowych napięcia maksymalnego wspomnianych w krokach 1 – 6 problemu 27. (W razie potrzeby odwołaj się do rysunku 7.27).

**Zadania**

- A. Dla jakiej częstotliwości sygnał wyjściowy będzie maksymalny?
- B. Dla jakiej częstotliwości sygnał wyjściowy będzie stanowić 70% wartości maksymalnej?
- C. Dla jakiej częstotliwości sygnał wyjściowy będzie stanowić 45% wartości maksymalnej?
- D. Dla jakiej częstotliwości sygnał wyjściowy będzie stanowić 32% wartości maksymalnej?
- E. Dla jakiej częstotliwości sygnał wyjściowy będzie stanowić 24% wartości maksymalnej?
- F. Dla jakiej częstotliwości sygnał wyjściowy będzie stanowić 13% wartości maksymalnej?

**Odpowiedzi**

- A. 1 MHz.
- B. 995 kHz i 1005 kHz (1 MHz–5 kHz oraz 1 MHz+5 kHz).
- C. 990 kHz i 1010 kHz.
- D. 985 kHz i 1015 kHz.
- E. 980 kHz i 1020 kHz.
- F. 960 kHz i 1040 kHz.

**29** Wartości napięć wyjściowych odpowiadających każdej z częstotliwości będących odpowiedzią w zadaniu z problemu 28. wyznaczysz, mnożąc wartość napięcia maksymalnego przez właściwą danej częstotliwości wartość procentową.

**Zadanie**

Oblicz napięcie wyjściowe dla podanych częstotliwości, jeśli napięcie maksymalne wynosi 5 V.

A. Ile będzie wynosić napięcie wyjściowe dla sygnału o częstotliwości 995 kHz?

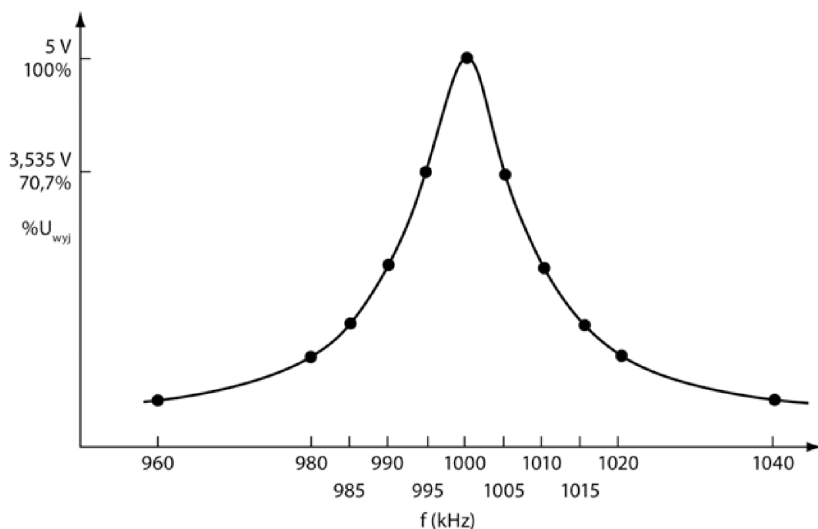
B. Ile będzie wynosić napięcie wyjściowe dla sygnału o częstotliwości 980 kHz?

**Odpowiedzi**

A.  $U = 0,70 \cdot 5 \text{ V} = 3,5 \text{ V}$ .

B.  $U = 0,24 \cdot 5 \text{ V} = 1,2 \text{ V}$ .

Rysunek 7.29 przedstawia krzywą rezonansową otrzymaną po naniesieniu na wykres wartości częstotliwości obliczonych w problemie 28. oraz odpowiadających im wartości napięcia wyznaczonych w poprzednim zadaniu.



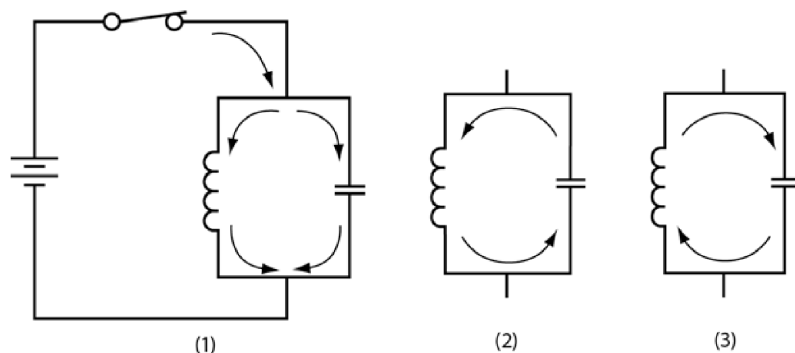
Rysunek 7.29

**Wprowadzenie do układów drgających**

Kondensatory i cewki znajdują także zastosowanie w **układach drgających**, tak zwanych oscylatorach.

Układy drgające są źródłem sygnałów o określonej częstotliwości. W wielu z nich pojawia się układ specjalnie dobieranych, łączonych równolegle elementów LC, które są źródłem fal sinusoidalnych. W tym podrozdziale zajmiemy się takimi właśnie oscylatorami.

**30** Po zamknięciu przełącznika mechanicznego w obwodzie przedstawionym na rysunku 7.30 prąd popłynie przez obydwie gałęzie połączenia równoległego.



**Rysunek 7.30**

Początkowo prąd ma większe trudności z pokonaniem gałęzi z cewką, ponieważ zwojnica natychmiast przeciwstawia się zmianie natężenia płynącego prądu. Z kolei dopóki okładki kondensatora nie naładują się, prąd nie napotyka większego oporu przy pokonywaniu tego elementu.

Jednak z czasem, gdy na okładkach kondensatora zbierze się już pewien ładunek, prąd płynący tą gałęzią obwodu zaczyna maleć. Jednocześnie rośnie prąd przepływający przez cewkę. Ostatecznie, z chwilą całkowitego naładowania kondensatora, przepływ prądu w tej gałęzi ustaje zupełnie. W gałęzi z cewką prąd płynie bez zaburzeń.

### Zadanie

Co stanie się z ładunkiem zgromadzonym w kondensatorze po otwarciu klucza?

#### **Odpowiedź**

Kondensator rozładuje się przez cewkę. Kierunek przepływu prądu w tym przypadku został zaznaczony na ilustracji (2) z rysunku 7.30.

**31** Po otwarciu przełącznika prąd będzie płynął w układzie do chwili pełnego rozładowania kondensatora.

### Zadanie

Jaki prąd popłynie przez cewkę, gdy kondensator zupełnie się rozładuje?

**Odpowiedź**

Żaden.

**32** Ponieważ przez cewkę nie płynie żaden prąd, pole magnetyczne, które tworzyło się dotąd wokół niej, zaczyna znikać. Niknące pole magnetyczne wywołuje w zwojnicy przepływ prądu elektrycznego. Jego kierunek pokrywa się z kierunkiem przepływu pierwotnego prądu w obwodzie (przypomnij sobie, że cewka przeciwstawia się zmianom natężenia prądu). Kierunek ten został oznaczony na ilustracji (2) z rysunku 7.30. Prąd ładuje kondensator, zmieniając polaryzację okładek na przeciwną do polaryzacji baterii.

**Zadanie**

Jaki prąd będzie płynął w obwodzie po całkowitym zniknięciu pola magnetycznego cewki?

**Odpowiedź**

Żaden.

**33** Kondensator znów zaczyna rozładowywać się poprzez cewkę, lecz tym razem prąd płynie w przeciwną stronę — ilustracja (3) z rysunku 7.30. Zmieniający się prąd elektryczny wytwarza w cewce pole magnetyczne, które przeciwdziała jego przepływowi. Indukcja pola osiąga wartość maksymalną w chwili pełnego rozładowania kondensatora.

Ponieważ w momencie rozładowania kondensatora w obwodzie przestaje płynąć prąd, pole magnetyczne cewki zaczyna słabnąć, co powoduje przepływ prądu w kierunku zaznaczonym na trzeciej ilustracji z rysunku 7.30.

**Zadanie**

Jak sądzisz, jak będzie spolaryzowany kondensator ładowany prądem indukowanym przez pole magnetyczne cewki?

**Odpowiedź**

Okładki kondensatora będą naładowane tak jak pierwotnie.

**34** Gdy pole magnetyczne zniknie całkowicie, kondensator przestanie się ładować i znów rozpocznie proces rozładowywania się. Tym samym ponownie wzbudzi przepływ prądu przez zwojnicę (w kierunku pokazanym na drugiej ilustracji rysunku 7.30). Tego rodzaju „huśtawka” będzie trwać wiecznie.

W wyniku przepływu prądu przez zwojnicę obserwujemy na niej spadek napięcia. Jego wartość będzie rosła i maleć wraz ze zmianami natężenia przepływającego prądu.

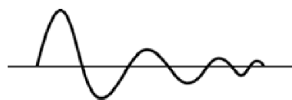
### Zadanie

Jak sądzisz, w jaki sposób wyglądałby przebieg sygnału wyjściowego na oscyloskopie?

#### Odpowiedź

Jak sinusoida.

**35** W układzie idealnym drgania te trwałyby w nieskończoność. W układach rzeczywistych zawsze występują pewne straty mocy na oporze wewnętrznym zwojniczy oraz pozostałych przewodów. W efekcie drgania sinusoidalne będą gasnąć, by po czasie równym kilku okresom wygasnąć zupełnie (rysunek 7.31).



Rysunek 7.31

### Zadanie

W jaki sposób można zapobiegać wygasaniu drgań?

#### Odpowiedź

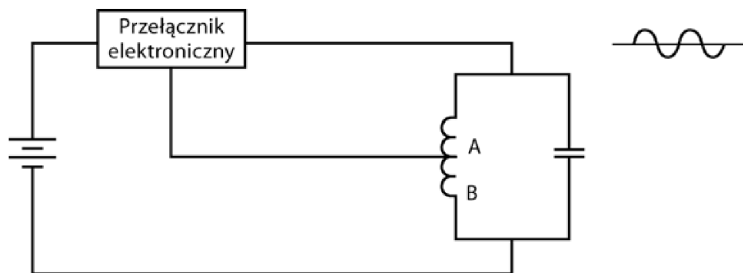
Dostarczając w każdym cyklu drgań odpowiednią porcję energii do układu.

Energię tę można dostarczać poprzez chwilowe zamykanie i otwieranie klucza w odpowiednich momentach — patrz ilustracja (1) z rysunku 7.30. Dzięki temu drgania w układzie będą zachodzić stale.

W układzie może pojawić się przełącznik elektroniczny (na przykład tranzystor). Podłączony do zwojniczy (rysunek 7.32) zamykałby obwód lub otwierał go, gdy napięcie na cewce zmalałoby do odpowiedniej wartości.

Pracę przełącznika elektronicznego reguluje spadek napięcia na kilku **zwojach** cewki (pomiędzy punktami A i B, czyli mniej więcej na połowie jej długości). Ten fragment cewki został oznaczony na rysunku 7.32.

Tęgo rodzaju sygnał — sprawdzanie napięcia wyjściowego w celu regulowania poziomu sygnału wejściowego — nazywa się **sprzężeniem zwrotnym**.



Rysunek 7.32

Właściwie zaprojektowany układ tego typu będzie nieustannie generować sinusoidalny sygnał wyjściowy. Taki obwód nazywa się **obwodem drgającym** bądź **oscylatorem**. Częstotliwość drgań jest w nim opisana tym samym wzorem, który pozwala wyznaczać częstotliwość rezonansową:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Prawa i zasady, które przedstawiliśmy w tym rozdziale, wykorzystuje się w praktyce w projektach obwodów generatorów drgań. Te omówimy szerzej w rozdziale 9.

## Podsumowanie

W tym rozdziale zawarliśmy pewne informacje dotyczące wielkości charakteryzujących obwody rezonansowe. Dowiedziałeś się z niego:

- w jaki sposób wraz z częstotliwością sygnału wejściowego zmienia się impedancja w szeregowych i równoległych łączeniach elementów LC;
- że dla częstotliwości rezonansowej impedancja w równoległych obwodach LC jest największa, natomiast w szeregowych obwodach LC ma najmniejszą wartość;
- w jaki sposób wyznaczyć napięcie wyjściowe dla różnych częstotliwości, gdy znamy szerokość pasma przesyłanych częstotliwości;
- jak działają filtry środkowoprzepustowe i środkowozaporowe;
- jak działa układ drgający.

## Test zrozumienia

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień przedstawionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń i rysowania wykresów oraz schematów obwodów użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

1. Podaj wzór opisujący impedancję w obwodzie szeregowym LC.
2. Jakim wzorem opisujemy impedancję w szeregowym obwodzie RLC (obwodzie zawierającym opornik, cewkę i kondensator)?
3. Jakim wzorem wyraża się zależność między  $X_C$  a  $X_L$  dla sygnałów o częstotliwości rezonansowej?
4. Czemu jest równe napięcie na oporniku w szeregowym układzie RLC zasilanym sygnałem o częstotliwości rezonansowej?
5. Czemu jest równe napięcie na oporniku połączonym szeregowo z równoległym układem LC zasilanym sygnałem o częstotliwości rezonansowej?
6. Ile wynosi impedancja w obwodzie szeregowym zasilanym sygnałem o częstotliwości rezonansowej?
7. Jakim wzorem opisuje się impedancję w łączonym równolegle obwodzie zasilanym sygnałem o częstotliwości rezonansowej?
8. Jakim wzorem opisujemy częstotliwość rezonansową obwodu?
9. Podaj wzór na szerokość pasma w obwodzie.
10. Podaj wzór opisujący dobroć obwodu.

Pytania 11 – 13 odnoszą się do układu zawierającego połączone szeregowo elementy LC. W każdym z zadań wyznacz wartości  $f_R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ ,  $Z$ ,  $Q$  i  $\Delta f$ , gdy znane są wartości  $L$ ,  $C$  i  $R$ . Dla każdego z przypadków narysuj krzywą sygnału wyjściowego.

11.  $L = 0,1 \text{ mH}$ ,  $C = 0,01 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $R = 10 \text{ }\Omega$ .

12.  $L = 4 \text{ mH}$ ,  $C = 6,4 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $R = 0,25 \text{ }\Omega$ .

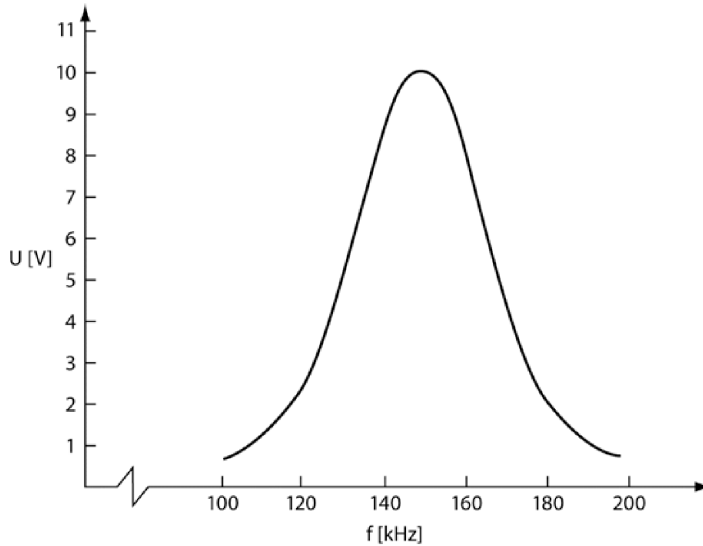
13.  $L = 16 \text{ mH}$ ,  $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $R = 20 \text{ }\Omega$ .

Pytania 14. i 15. odnoszą się do układu zawierającego połączone równolegle elementy LC. W danych nie uwzględniamy oporu  $R$ , natomiast podajemy wartość  $r$ . W każdym zadaniu wyznacz wartości  $f_R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ ,  $Z$ ,  $Q$  i  $\Delta f$ .

14.  $L = 6,4 \text{ mH}$ ,  $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $r = 8 \text{ }\Omega$ .

15.  $L = 0,7 \text{ mH}$ ,  $C = 0,04 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $r = 1,3 \text{ }\Omega$ .

16. Odpowiedz na podane niżej pytania, posługując się wykresem przedstawionym na rysunku 7.33.
  - A. Ile wynosi wartość maksymalna zaznaczona na wykresie krzywej wyjściowej?
  - B. Ile wynosi częstotliwość rezonansowa?
  - C. Ile wynosi napięcie odpowiadające szerokości połówkowej?
  - D. Ile wynoszą częstotliwości graniczne dla szerokości połówkowej?
  - E. Podaj szerokość pasma przenoszenia.
  - F. Ile wynosi dobroć obwodu?



Rysunek 7.33

### Odpowiedzi do testu zrozumienia

Jeśli otrzymane odpowiedzi nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdziesz do następnego rozdziału.

1.	$Z = X_L - X_C$ .	(problem 2.)
2.	$Z = \sqrt{(X_L - X_C)^2 + R^2}$ .	(problem 2.)
3.	$X_L = X_C$ .	(problem 5.)
4.	Maksymalnemu napięciu wyjściowemu.	(problem 5.)
5.	Minimalnemu napięciu wyjściowemu.	(problem 11.)
6.	Z przyjmuje wartość minimalną. W warunkach idealnych jest równe oporowi.	(problem 5.)
7.	$Z = \frac{L}{C \cdot r}$ , gdzie $r$ jest opornością cewki.	(problem 10.)
8.	$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .	(problem 6.)
9.	$\Delta f = \frac{f_R}{Q}$ .	(problem 20.)

10.	$Q = \frac{X_L}{R}$	(problem 20.)
	lub	
	$\frac{X_L}{r}$ .	
	Krzywe rysowane dla wartości obliczanych w zadaniach 11 – 13 powinny przypominać wykres przedstawiony na rysunku 7.27. Wykonaj rysunki na tej podstawie — nanieś na nie odpowiednie wartości pasma przenoszenia i częstotliwości.	
11.	$f_R = 160 \text{ kHz}, X_L = X_C = 100 \Omega, Q = 10, \Delta f = 16 \text{ kHz}, Z = 10 \Omega.$	(problemy 21 – 29)
12.	$f_R = 1 \text{ kHz}, X_L = X_C = 25 \Omega, Q = 100, \Delta f = 10 \text{ Hz}, Z = 0,25 \Omega.$	(problemy 21 – 29)
13.	$f_R = 400 \text{ Hz}, X_L = X_C = 40 \Omega, Q = 2, \Delta f = 200 \text{ Hz}, Z = 20 \Omega.$	(problemy 21 – 29)
14.	$f_R = 600 \text{ Hz}, X_L = 24 \Omega, X_C = 26,5 \Omega, Q = 3, \Delta f = 200 \text{ Hz}, Z = 80 \Omega.$	(problemy 21 – 29)
	Ponieważ Q nie zostało podane, do obliczenia częstotliwości rezonansowej powinieneś wykorzystać w obliczeniach bardziej złożony ze wzorów podanych w problemie 10.	
15.	$f_R = 30 \text{ Hz}, X_L = 132 \Omega, X_C = 132 \Omega, Q = 101,5, \Delta f = 300 \text{ Hz}, Z = 13,4 \Omega.$	(problemy 21 – 29)
16.		
	A. 10, 1 V.	(problemy 27. i 28.)
	B. 148 kHz.	(problemy 27. i 28.)
	C. $0,707 \cdot 10,1 \text{ V} = 7,14 \text{ V}.$	(problemy 27. i 28.)
	D. Około 135 kHz i 160 kHz (krzywa nie jest idealnie symetryczna).	(problemy 27. i 28.)
	E. $\Delta f = 25 \text{ kHz}.$	(problemy 27. i 28.)
	F. $Q = \frac{f_R}{\Delta f} \approx 5,9.$	(problemy 27. i 28.)



# Wzmacniacze tranzystorowe

Wiele spośród sygnałów, z jakimi będziesz mieć do czynienia w elektronice, jest bardzo małych. Na przykład sygnał odczytywany z płyty DVD nie mógłby zasilać głośnika, natomiast sygnał wychodzący z mikrofonu jest zbyt słaby, by mógł być bezpośrednio nadawany przez radio. W takich przypadkach sygnał musi zostać wzmacniony.

Najlepszym sposobem poznania podstawowych metod realizacji wzmacniania słabego sygnału jest przeanalizowanie zasady działania wzmacniacza jedno tranzystorowego. Gdy zrozumiesz, jak realizuje się wzmacnienie w tranzystorze, zdołasz bez trudu opanować technikę projektowania bloków wzmacniających znanych ze wszystkich urządzeń elektronicznych — telefonów komórkowych, odtwarzaczy muzyki czy popularnych ostatnimi czasy zestawów kina domowego.

Istnieje wiele schematów budowy wzmacniaczy. W tym rozdziale posłużymy się najprostszymi i najbardziej podstawowymi, ponieważ chcemy wyjaśnić Ci, w jaki sposób jest wzmacniany sygnał przechodzący przez tranzystor. Później przedstawimy Ci poszczególne etapy pracy nad projektem wzmacniacza.

Głównym tematem dyskusji w tym rozdziale będzie tranzystor BJT, o którym pisaliśmy już w rozdziałach 3. i 4. (były one poświęcone przede wszystkim wykorzystywaniu tranzystorów jako przełączników), jednak wspomnimy też o dwóch innych rodzajach wzmacniaczy — tranzystorze JFET (również omawianym krótko w rozdziałach 3. i 4.) oraz układzie scalonym, którym jest **wzmacniacz operacyjny**.

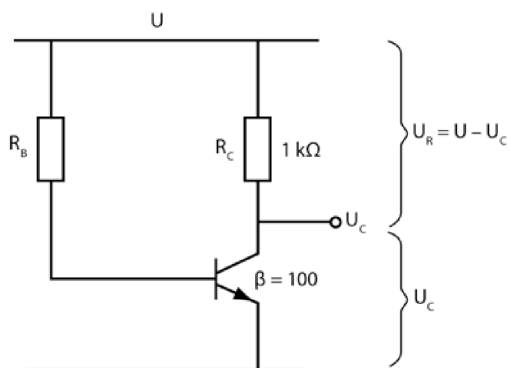
Po zakończeniu pracy z tym rozdziałem będziesz potrafił:

- obliczać wzmacnienie napięciowe wzmacniacza;
- obliczać napięcie sygnału stałego generowanego przez obwód wzmacniacza;

- dobierać wartości oporników w taki sposób, by otrzymać żądane wzmocnienie w układzie wzmacniacza;
- stosować kilka metod przeprowadzania wzmocnienia we wzmacniaczu jednotranzystorowym;
- odróżniać efekty pracy zwykłego wzmacniacza jednotranzystorowego od pracy wtórnika emiterowego (wzmacniacza pracującego w układzie wspólnego kolektora);
- zaprojektować prosty układ wtórnika emiterowego;
- przeprowadzić analizę prostego obwodu, by znaleźć w nim wyjściowe napięcie stałe oraz poziom wzmocnienia sygnału zmiennego;
- zaprojektować prosty układ wzmacniacza ze wspólnym źródłem (JFET);
- określić wzmocnienie sygnału zmiennego dla wzmacniacza JFET;
- rozpoznać wzmacniacz operacyjny i nazwać jego styki.

## Praca ze wzmacniaczami tranzystorowymi

**1** Z rozdziału 3. dowiedziałeś się, w jaki sposób włączać i wyłączać tranzystory. Wiesz już także, jak obliczać wartość oporników w układach wzmacniaczy, tak by napięcie stałe podawane do kolektora było połową napięcia wejściowego. Sprawdź teraz swoją wiedzę, przeprowadzając analizę obwodu przedstawionego na rysunku 8.1.



Rysunek 8.1

Poniżej znajduje się lista etapów prowadzenia obliczeń niezbędnych, by odnaleźć taką wartość oporu  $R_B$ , żeby napięcie kolektora ( $U_C$ ) spadło do połowy wartości podawanej przez źródło ( $U$ ).

1. Prąd kolektora obliczysz z podanego niżej wzoru:

$$I_C = \frac{U_R}{R_C} = \frac{U - U_C}{R_C}.$$

2. Prąd bazy wyraża się następującym równaniem:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}.$$

3. Opór wyznaczysz ze wzoru:

$$R_B = \frac{U}{I_B}.$$

### Zadanie

Korzystając z kroków 1 – 3 i znając wielkości opisujące układ, znajdź wartości  $R_B$ , które pozwolą osiągnąć na kolektorze napięcie 5 V.

$$U = 10 \text{ V}, R_C = 1 \text{ k}\Omega, \beta = 100.$$

A.  $I_C =$

B.  $I_B =$

C.  $R_B =$

### Odpowiedź

$$\text{A. } I_C = \frac{5 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ mA}.$$

$$\text{B. } I_B = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ mA}.$$

$$\text{C. } R_B = \frac{10 \text{ V}}{0,05 \text{ mA}} = 200 \text{ k}\Omega.$$

**2** Jak widzisz, zastosowanie opornika  $R_B$  o wartości 200 k $\Omega$  pozwala uzyskać na kolektorze napięcie 5 V. Procedura dobierania odpowiedniego poziomu stałego napięcia wyjściowego nazywa się **stabilizowaniem punktu pracy** (lub stabilizowaniem tranzystora). W problemie 1. ustabilizowałeś tranzystor do pracy z napięciem wyjściowym 5 V.

Na podstawie schematu przedstawionego na rysunku 8.1 oraz wzorów podanych w problemie 1. odpowiedz na zadane poniżej pytania.

### Zadania

A. Jak zmienią się wartości  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $U_R$  oraz jak przesunie się punkt pracy  $U_C$  tranzystora, jeśli zmniejszysz wartość oporu  $R_B$ ?

B. Jak zmienią się wartości  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $U_R$  oraz jak przesunie się punkt pracy  $U_C$  tranzystora, jeśli zwiększysz wartość oporu  $R_B$ ?

**Odpowiedzi**

- A. Wartości  $I_B$ ,  $I_C$  oraz  $U_R$  wzrosną, zatem  $U_C$  zmaleje.  
 B. Wartości  $I_B$ ,  $I_C$  oraz  $U_R$  zmaleją, zatem  $U_C$  wzrośnie.

**3** Rozwiązanie problemu 2. wykazało, że po zmianie wartości  $R_B$  w obwodzie przedstawionym na rysunku 8.1 wartość prądu  $I_B$  również ulegnie zmianie.

Tranzystor wzmacnia niewielkie zmiany natężenia  $I_B$ , zatem stopień zmian natężenia prądu  $I_C$  jest  $\beta$  razy większy od zmian wartości  $I_B$ .

Zmiany wartości  $I_C$  powodują zmianę spadku napięcia  $U_R$  na oporniku  $R_C$ , co z kolei wpływa na zmianę napięcia wyjściowego mierzonego na kolektorze.

**Zadania**

Oblicz podane niżej wartości dla obwodu przedstawionego na rysunku 8.1, jeśli wiadomo, że  $R_B = 168 \text{ k}\Omega$  i  $U = 10 \text{ V}$ .

- A.  $I_B = \frac{U}{R_B} =$   
 B.  $I_C = \beta \cdot I_B =$   
 C.  $U_R = I_C \cdot R_C =$   
 D.  $U_C = U - U_R =$

**Odpowiedzi**

- A.  $I_B = \frac{10 \text{ V}}{168 \text{ k}\Omega} = 0,059 \text{ mA}$ .  
 B.  $I_C = 100 \cdot 0,059 \text{ mA} = 5,9 \text{ mA}$ .  
 C.  $U_R = 1 \text{ k}\Omega \cdot 5,9 \text{ mA} = 5,9 \text{ V}$ .  
 D.  $U_C = 10 \text{ V} - 5,9 \text{ V} = 4,1 \text{ V}$ .

**4** Przeanalizuj obwód z rysunku 8.1 i odpowiedz na następujące pytania. Przyjmij  $U = 10 \text{ V}$ .

**Zadania**

Oblicz  $U_C$  dla podanych niżej wartości  $R_B$ .

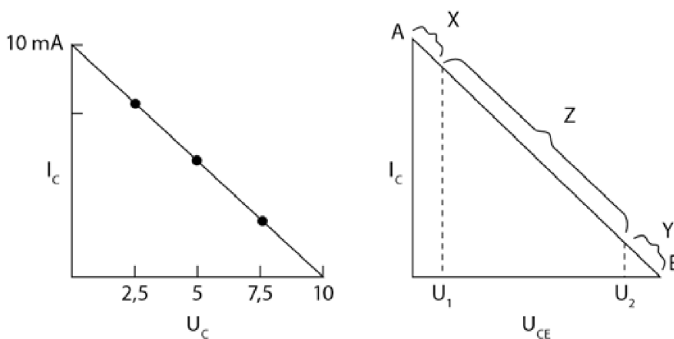
- A.  $100 \text{ k}\Omega$ .  
 B.  $10 \text{ M}\Omega$ .

- C. 133 k $\Omega$ .  
D. 400 k $\Omega$ .

**Odpowiedzi**

- A.  $I_B = 0,1 \text{ mA}$ ,  $I_C = 10 \text{ mA}$ ,  $U_C = 0 \text{ V}$ .  
B.  $I_B = 1 \text{ }\mu\text{A}$ ,  $I_C = 0,1 \text{ mA}$ ,  $U_C = 10 \text{ V}$  (w przybliżeniu).  
C.  $I_B = 0,075 \text{ mA}$ ,  $I_C = 7,5 \text{ mA}$ ,  $U_C = 2,5 \text{ V}$ .  
D.  $I_B = 0,025 \text{ mA}$ ,  $I_C = 2,5 \text{ mA}$ ,  $U_C = 7,5 \text{ V}$ .

**5** Na lewym z wykresów przedstawionych na rysunku 8.2 znajdziesz wartości obliczone w problemach 1. i 4. Prosta łącząca te wartości to tak zwana **prosta obciążenia**.



**Rysunek 8.2**

Na osi opisanej symbolem  $U_C$  znajdują się wartości napięcia mierzonego pomiędzy kolektorem a emiterem tranzystora, a nie pomiędzy kolektorem a ziemią, zatem należałoby opisać ją symbolem  $U_{CE}$ . Zmiana ta została wprowadzona na wykresie widocznym po prawej stronie. (W omawianym układzie zachodzi zależność  $U_{CE} = U_C$ , ponieważ między emiterem a ziemią nie ma żadnego opornika).

**Zadania**

- A. Któremu stanowi tranzystora — włączony czy wyłączony — odpowiada punkt A na wykresie widocznym po prawej stronie rysunku?  
B. Któremu stanowi odpowiada punkt B?

**Odpowiedzi**

- A. ON, czyli włączonemu, ponieważ przez obwód przepływa prąd. Tranzystor zachowuje się jak punkt zwarcia. Spadek napięcia na tranzystorze wynosi 0 V.
- B. OFF, czyli wyłączonemu, ponieważ początkowo przez obwód nie płynie prąd. Tranzystor zachowuje się wtedy niczym otwarty przełącznik, a spadek napięcia na nim ma wartość maksymalną (w tym przypadku 10 V).

**6** Punkt oznaczony na rysunku 8.2 jako A to tak zwany **punkt nasycenia** (lub punkt nasycony), gdyż odpowiada mu maksymalna wartość prądu kolektora przepływającego przez tranzystor.

Punkt oznaczony na wykresie jako B to tak zwany **punkt odcięcia**, gdyż dla tej wartości napięcia kolektor – emiter przez tranzystor nie płynie żaden prąd, co oznacza, że tranzystor jest wtedy wyłączony.

W obszarach oznaczonych jako X i Y wartość wzmocnienia prądowego ( $\beta$ ) zmienia się, dlatego nazywa się je **obszarami nieliniowymi**. Pamiętaj, że  $\beta = \frac{I_C}{I_B}$ , zatem  $\beta$  jest współczynnikiem kierunkowym prostej przedstawionej na tym wykresie.

Można z grubsza przyjąć, że  $U_1$  to mniej więcej 1 V, a  $U_2$  jest o około 1 V mniejsze niż napięcie w punkcie B.

**Zadanie**

Ile wynosi  $U_{CE}$  w punkcie B?

**Odpowiedź**

$U_{CE} = U$ , co w tym przypadku wynosi 10 V.

**7** W obszarze oznaczonym na rysunku 8.2 jako Z wzmocnienie prądowe  $\beta$  (czyli współczynnik kierunkowy prostej) ma stałą wartość. Oznacza to, że obszar ten jest obszarem zmian **liniowych**. Gdy tranzystor pracuje w obszarze liniowym, generowany przez niego sygnał wyjściowy jest pozbawiony zakłóceń.

**Zadanie**

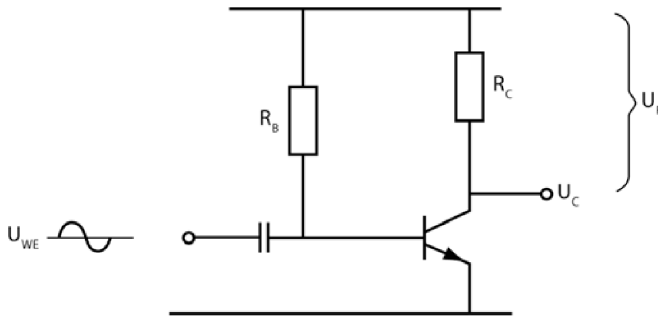
Dla której z podanych niżej par wartości  $I_C$  i  $U_C$  tranzystor opisany wykresem z rysunku 8.1 będzie generować niezakłócony sygnał wyjściowy?

- A.  $I_C = 9 \text{ mA}$ ,  $U_C = 1 \text{ V}$ .  
 B.  $I_C = 1 \text{ mA}$ ,  $U_C = 9 \text{ V}$ .  
 C.  $I_C = 6 \text{ mA}$ ,  $U_C = 4,5 \text{ V}$ .

### Odpowiedź

Tylko dla pary C. Pary A i B mieszczą się już w obszarach pracy nieliniowej.

**8** Gdy do ustabilizowanego tranzystora przyłoży się sygnał wejściowy zmienny o bardzo małych wahanach amplitudy (na rysunku 8.3 jest to sygnał sinusoidalny), zostaną w ten sposób wywołane niewielkie zmiany prądu bazy.



Rysunek 8.3

Zmiany natężenia prądu bazy zostaną wzmocnione o czynnik  $\beta$  i przełożą się na zmiany natężenia prądu kolektora, które z kolei wywołają odpowiednie zmiany napięcia kolektora.

Współczynnik  $\beta$  wyznaczony dla wzmocnienia prądu zmiennego nie jest tym samym  $\beta$ , które wyznaczaliśmy dla prądu stałego. Dla sygnałów zmiennych rozumie się go jako wartość współczynnika przenoszenia typowego prądu przewodzenia emitera. W tabelach danych udostępnianych przez producentów oznacza się go symbolem  $h_{FE}$ . Zawsze gdy będziesz musiał wyznaczyć wartość zmiennego sygnału wyjściowego dla danego zmiennego sygnału wejściowego lub obliczyć wahania prądu zmiennego, korzystaj ze współczynnika wzmocnienia zmiennoprądowego. Współczynnik wzmocnienia stałoprądowego wykorzystuj jedynie w obliczeniach stałych napięć bazy bądź kolektora. Musisz pamiętać, że istnieją dwie wartości współczynnika  $\beta$  i umieć używać w obliczeniach tej właściwej. Współczynnik wzmocnienia stałoprądowego jest czasami oznaczany symbolami  $h_{FE}$  lub  $\beta_{DC}$ .

Gdy  $U_{WE}$  wzrośnie, prąd bazy również wzrasta, co powoduje jednocześnie wzrost prądu kolektora. Z kolei wzrost prądu kolektora zwiększa spadek napięcia na oporniku  $R_C$ , a to skutkuje spadkiem napięcia  $U_C$ .

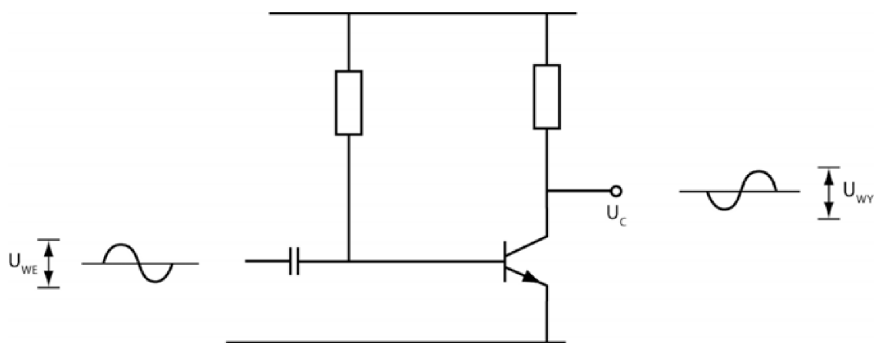
**UWAGA** Kondensator umieszczony na wejściu do obwodu uniemożliwia przepływ prądu stałego (ma nieskończoną reaktancję), natomiast bez trudu przepuszcza sygnały zmienne. Jest to bardzo popularna metoda izolowania wejścia i wyjścia układów prądu zmiennego.

### Zadania

- A. Jak zmieni się napięcie kolektora, jeśli sygnał wejściowy osłabnie?  
 B. Jaki sygnał wyjdzie z kolektora, jeśli do obwodu zawierającego tranzystor wprowadzimy sygnał sinusoidalny?

### Odpowiedzi

- A. Napięcie kolektora  $U_C$  wzrośnie.  
 B. Będzie również falą sinusoidalną, ale odwróconą w stosunku do sygnału wejściowego, co przedstawia rysunek 8.4.



Rysunek 8.4

**9** Rysunek 8.4 przedstawia układ wzmacniacza podłączony do zasilania sygnałem zmiennym.

Napięcie wejściowe  $U_{WE}$  jest wprowadzane do bazy (a mówiąc ściślej, jest ono przykładane do złącza baza-emiter). Zmiany napięcia kolektora uśredniają się do wartości  $U_C$ , punktu pracy dla prądu stałego. Są one znacznie większe niż zmiany podawanego napięcia wejściowego. Oznacza to, że sygnał wyjściowy jest większy od sygnału wejściowego (jest względem niego wzmacniony).

Tak przetworzony sygnał kolektora może już zasilac jakieś obciążenie (na przykład głośnik).

Aby odróżnić zmiany wyjściowego sygnału zmiennego od stałego poziomu pracy, zmienne napięcie wyjściowe oznacza się symbolem  $U_{WY}$ . W większości przypadków  $U_{WY}$  to wartość międzyszczytowa.

**Zadania**

- A. Co oznaczamy symbolem  $U_C$ ?  
 B. Co oznaczamy symbolem  $U_{WY}$ ?

**Odpowiedzi**

- A. Stałoprądowe napięcie kolektora, czyli tak zwany punkt pracy.  
 B. Zmienne napięcie wyjściowe.

Stosunek napięcia wyjściowego do napięcia wejściowego nazywamy wzmocnieniem napięciowym wzmacniacza:

$$A_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}}$$

Aby wyznaczyć wzmocnienie napięciowe, mierzy się obydwa napięcia —  $U_{WE}$  oraz  $U_{WY}$  — na oscyloskopie. Najczęściej są to wartości międzyszczytowe.

**10** Wzmocnienie napięciowe układu przedstawionego na rysunku 8.4 można obliczyć za pomocą następującego wzoru:

$$A_U = \beta \cdot \frac{R_L}{R_{WE}},$$

gdzie:

- $R_L$  — oporność obciążenia. W omawianym obwodzie opornością obciążenia jest  $R_C$ .
- $R_{WE}$  — oporność wejściowa tranzystora. Wartość oporności wejściowej  $R_{WE}$  znajdziesz w dokumentacji przygotowywanej przez producentów elementów elektronicznych (oznacza się ją bardzo często symbolem  $h_{ie}$ ). Większość tranzystorów charakteryzuje się opornością wejściową rzędu 1 k $\Omega$  lub 2 k $\Omega$ .

Napięcie wyjściowe wyznacza się, rozwiązując układ tych dwóch równań:

$$\begin{cases} A_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} \\ A_U = \beta \cdot \frac{R_L}{R_{WE}} \end{cases}$$

Stąd otrzymujemy warunek:

$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \beta \cdot \frac{R_L}{R_{WE}},$$

z którego można wyznaczyć wartość  $U_{WY}$ . Podane niżej przykładowe obliczenia zostały przeprowadzone dla wartości  $R_{WE} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{WE} = 1 \text{ mV}$ ,  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$  o  $\beta = 100$ .

$$U_{WY} = U_{WE} \cdot \beta \cdot \frac{R_L}{R_{WE}},$$

$$U_{WY} = 1 \text{ mV} \cdot 100 \cdot \frac{1 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega},$$

$$U_{WY} = 100 \text{ mV}.$$

### Zadania

- A. Oblicz wartość  $U_{WY}$ , jeżeli  $R_{WE} = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{WE} = 1 \text{ mV}$ ,  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$  i  $\beta = 100$ .  
 B. W obydwu przypadkach znajdź wzmocnienie napięciowe.

### Odpowiedzi

- A.  $U_{WY} = 50 \text{ mV}$ .  
 B.  $A_U = 100$  oraz  $A_U = 50$ .

Tego rodzaju prosty wzmacniacz może dawać nawet pięćsetkrotne wzmocnienie napięciowe, ale istnieje kilka wad takiej konstrukcji, które ograniczają jej zastosowanie.

- W zasadzie każdy tranzystor charakteryzuje się inną wartością współczynnika wzmocnienia  $\beta$ , zatem wartość  $U_C$  zmieniałyby się wraz ze zmianą tranzystora w obwodzie. Aby skompensować tę zmianę, należałoby regulować wartość  $R_B$ .
- Wartości  $R_{WE}$  (lub  $h_{ie}$ ) różnią się znacznie dla poszczególnych tranzystorów. Ponieważ ten sam problem dotyczy wartości wzmocnienia  $\beta$ , producenci nie są w stanie zagwarantować identycznych wzmocnień w tranzystorach jednego rodzaju.
- Zarówno  $R_{WE}$ , jak i  $\beta$  zależą silnie od temperatury, dlatego też właściwości wzmacniające tranzystorów zmieniają się gwałtownie wraz ze zmianą temperatury otoczenia. Na przykład zaprezentowany powyżej układ działałby doskonale latem na pustyni, natomiast zupełnie nie zdawałby egzaminu zimą na Alasce. Jeśli dany wzmacniacz sprawdzałby się w warunkach laboratoryjnych, zapewne nie chciałby działać na dworze w cieplejsze i zimniejsze dni.

**UWAGA** Wzmacniacze, dla których współczynnik wzmocnienia oraz punkt pracy zmieniają się w opisany powyżej sposób, nazywamy *niestabilnymi*. Wzmacniacz, by mógł działać poprawnie, powinien być jak najbardziej stabilny. Z dalszych problemów dowiesz się, jak projektować stabilne wzmacniacze.

## Wzmacniacz tranzystorowy — doświadczenie

W przedstawionym tu doświadczeniu zbudujesz prosty obwód wzmacniający, zmierzysz napięcie wyjściowe i wzmacnienie, a także określisz, jak zmieniają się te wartości pod wpływem temperatury.

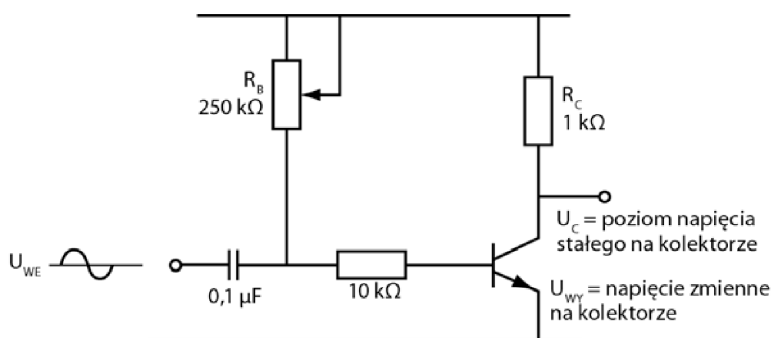
Do przeprowadzenia doświadczenia będziesz potrzebować następujących elementów:

- tranzystora,
- potencjometru (opornika o regulowanej wartości oporu) o maksymalnym oporze 250 k $\Omega$ ,
- opornika o oporze 1 k $\Omega$ ,
- opornika o oporze 10 k $\Omega$ ,
- kondensatora o pojemności 0,1  $\mu$ F,
- baterii o napięciu 9 V lub laboratoryjnego źródła zasilania,
- płytki prototypowej,
- generatora sygnałów lub oscylatora generującego fale sinusoidalne,
- oscyloskopu.

Jeśli nie dysponujesz odpowiednim sprzętem, przeczytaj po prostu opis doświadczenia.

Wykonaj opisane poniżej czynności.

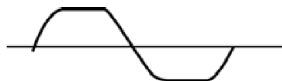
1. Zamontuj na płytce prototypowej układ przedstawiony na rysunku 8.5.



**Rysunek 8.5**

2. Dobierz taką wartość na potencjometrze, by poziom napięcia stałego mierzonego na kolektorze wynosił pomiędzy 4,5 V a 5 V.
3. Podłącz do układu generator sygnałów i ustaw go tak, by podawał do układu falę sinusoidalną o częstotliwości 1 kHz.
4. Dobierz poziom sygnału tak, by kolektor generował na wyjściu falę sinusoidalną. Upewnij się, że jej obraz na oscyloskopie nie jest zniekształcony.

Dla porównania na rysunku 8.6 przedstawiliśmy kształt sygnału zniekształconego — na oscyloskopie powinieneś obserwować pełną sinusoidę.



**Rysunek 8.6**

5. Zmierz wartości międzyszczytowe fali wejściowej i wyjściowej.
6. Korzystając ze wzoru  $A_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}}$ , określ wzmacnienie napięciowe.
7. Podgrzej teraz znajdujący się w układzie tranzystor. W tym celu umieść obok niego na 15 – 30 sekund grot lutownicy. Odnotuj zmiany poziomu napięcia stałego na kolektorze oraz zmiany wartości międzyszczytowej dla sygnału wyjściowego.
8. Powtórz kroki 2 – 7, używając innych tranzystorów. Określ zmiany wzmacnienia.

Odkryjesz zapewne, że nie jesteś w stanie określić kierunku zmian sygnału wyjściowego. Wynika to z faktu, iż wzajemne zależności między wartościami  $\beta$  i  $R_{WE}$  są inne dla poszczególnych tranzystorów i zmieniają się w różnym stopniu wraz ze wzrostem temperatury.

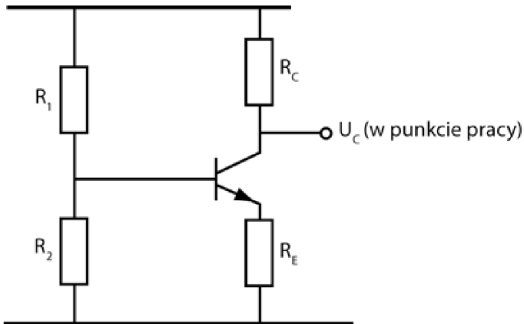
Musisz pamiętać o tym, że punkt pracy i wzmacnienie zmieniają się wraz z temperaturą. Oczywiście to w znaczący sposób ogranicza użyteczność badanego układu. Aby otrzymać stabilny wzmacniacz, należy wprowadzić do tego projektu kilka zmian i tym właśnie będziemy zajmować się w dalszych problemach tego rozdziału.

## Stabilny wzmacniacz

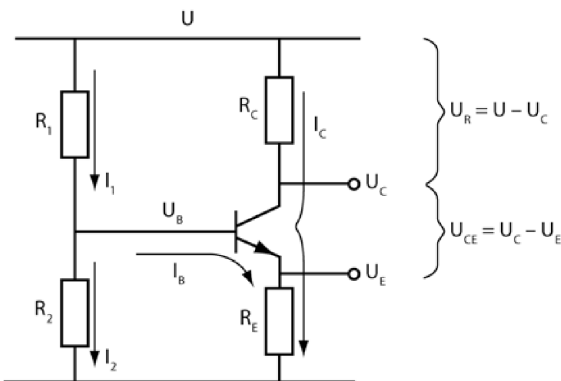
**11** Aby ustabilizować efekt wzmacniania omawiany we wcześniejszych problemach, wystarczy podłączyć do obwodu dwa dodatkowe oporniki. Rysunek 8.7 przedstawia układ rozbudowany o opory  $R_E$  i  $R_2$ . Umieszczenie w obwodzie oporów  $R_1$  (wcześniej oznaczanego jako  $R_B$ ) oraz  $R_2$  zapewni stabilizację punktu pracy.

Wprowadzenie do układu opornika  $R_E$  stabilizuje wzmacnienie napięcia zmiennego.

Opisy umieszczone na rysunku 8.8 określają prądy stałe płynące przez układ oraz stałe spadki napięć. Wielkości te będą potrzebne podczas analizy kilku najbliższych problemów.



Rysunek 8.7



Rysunek 8.8

### Zadanie

Projektując układ wzmacniacza, musisz dobrać odpowiednie wartości oporników. W jakich dwóch celach dobiera się je tak starannie?

### Odpowiedź

Opory mają stabilizować punkt pracy oraz wzmacnienie napięciowe.

**12** Najpierw zajmij się określeniem wzmacnienia napięciowego. Dla obwodu przedstawionego na rysunku 8.8 wyraża się ono wzorem:

$$A_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{R_C}{R_E}.$$

Wzór ten jest nieco zmodyfikowaną wersją równania z problemu 13. (Złożony dowód matematyczny prawdziwości tego zapisu nie jest dla Ciebie istotny). Założyliśmy przy tym, że wzmacnienie napięcia zmiennego jest niezależne od parametru  $\beta$  tranzystora oraz oporności wejściowej.

Ponieważ wartości tych dwóch wielkości zależą od temperatury i są inne dla każdego tranzystora, szczególnie istotne jest stworzenie metody określania wzmocnienia zmiennego napięcia, która byłaby od nich niezależna. Podany wyżej wzór jest takim właśnie narzędziem.

### Zadania

Przyjmij, że dla obwodu przedstawionego na rysunku 8.8  $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$  i odpowiedz na zadane poniżej pytania.

- A. Ile wynosi wzmocnienie napięcia zmiennego dla tranzystora o  $\beta = 100$ ?  
 B. Ile wynosi wzmocnienie napięcia zmiennego dla tranzystora o  $\beta = 500$ ?

### Odpowiedzi

- A. 10.  
 B. 10.

**13** Podane niżej zadania pomogą Ci zrozumieć, w jaki sposób oblicza się wzmocnienie napięciowe i związane z nim napięcie wyjściowe.

### Zadania

- A. Oblicz wzmocnienie napięciowe  $A_U$  obwodu wzmacniającego z rysunku 8.8, jeżeli  $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ , a  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ . Następnie wykorzystaj tę wartość, by obliczyć napięcie wyjściowe. Międzyszczytowe napięcie wejściowe wynosi  $2 \text{ mV}_{PP}$ .  
 B. Oblicz wzmocnienie napięciowe, jeżeli  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ , a  $R_E = 250 \Omega$ . Następnie wykorzystaj tę wartość, by obliczyć napięcie wyjściowe. Międzyszczytowe napięcie wejściowe wynosi  $1 \text{ V}_{PP}$ .

### Odpowiedzi

- A.  $A_U = \frac{R_C}{R_E} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 10$ .  
 $U_{WY} = 10 \cdot U_{WE} = 20 \text{ mV}$ .  
 B.  $A_U = \frac{1 \text{ k}\Omega}{250 \Omega} = 4$ .  
 $U_{WY} = 4 \text{ V}_{PP}$ .

Wprowadź układ wzmacniający przedstawiony na rysunku 8.8 daje stabilne wzmocnienie prądowe, ale nie generuje wysokich wartości wzmocnienia napięciowego. Z pewnych powodów wzmocnienie napięciowe jest ograniczone do co najwyżej 50. W dalszej części rozdziału pokażemy schematy układów mogących generować większe wzmocnienia.

**14** Zanim przejdziemy do dalszych rozważań, chcemy przedstawić Ci jeszcze jedną zależność związaną z obwodem wzmacniającym widocznym na rysunku 8.8 i podać dość często przyjmowane założenie. Prąd płynący przez opornik emitera możesz obliczyć z podanego niżej równania:

$$I_E = I_B + I_C.$$

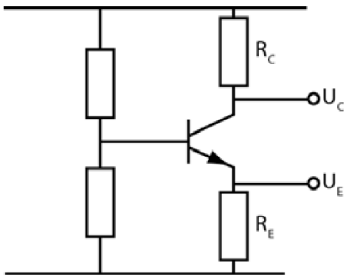
Wynika z niego, że prąd emitera jest sumą prądów bazy i kolektora.

Prąd kolektora jest znacznie większy od prądu bazy, zatem można przyjąć, że prąd emitera jest w dość dobrym przybliżeniu równy prądowi kolektora.

$$I_E = I_C.$$

### Zadanie

Oblicz wartości  $U_C$ ,  $U_E$  i  $A_U$  dla obwodu widocznego na rysunku 8.9, jeżeli  $U = 10 \text{ V}$ ,  $I_C = 1 \text{ mA}$ ,  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ , a  $R_E = 100 \Omega$ .



Rysunek 8.9

### Odpowiedzi

$$U_R = 1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ mA} = 1 \text{ V}.$$

$$U_C = U - U_R = 10 \text{ V} - 1 \text{ V} = 9 \text{ V}.$$

$$U_E = 100 \Omega \cdot 1 \text{ mA} = 0,1 \text{ V}.$$

$$A_U = \frac{R_C}{R_E} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{100 \Omega} = 10.$$

**15** Przyjmij teraz, że elementy obwodu pokazanego na rysunku 8.9 mają następujące wartości:  $U = 10 \text{ V}$ ,  $I_C = 1 \text{ mA}$ ,  $R_C = 2 \text{ k}\Omega$  i  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ .

**Zadanie**

Oblicz  $U_C$ ,  $U_E$  i  $A_U$ .

**Odpowiedzi**

$$U_R = 2 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ mA} = 2 \text{ V.}$$

$$U_C = 10 \text{ V} - 2 \text{ V} = 8 \text{ V.}$$

$$U_E = 1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ mA} = 1 \text{ V.}$$

$$A_U = \frac{R_C}{R_E} = \frac{2 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 2.$$

**16** Przyjmij teraz, że elementy obwodu przedstawionego na rysunku 8.9 mają następujące wartości:  $U = 10 \text{ V}$ ,  $I_C = 1 \text{ mA}$ .

**Zadania**

Oblicz  $U_C$ ,  $U_E$  i  $A_U$  dla podanych niżej wartości  $R_C$  i  $R_E$ .

A.  $R_C = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$ .

B.  $R_C = 4,7 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 220 \Omega$ .

**Odpowiedzi**

A.  $U_R = 5 \text{ V}$ ,  $U_C = 5 \text{ V}$ ,  $U_E = 1 \text{ V}$ ,  $A_U = 5$ .

B.  $U_R = 4,7 \text{ V}$ ;  $U_C = 5,3 \text{ V}$ ;  $U_E = 0,22 \text{ V}$ ;  $A_U = 21,36$ .

**Stabilizowanie**

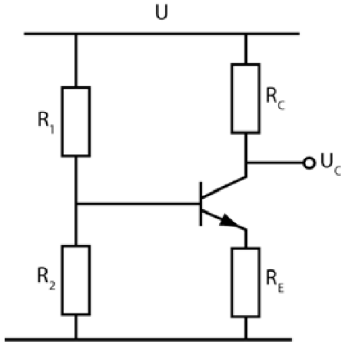
**17** W tym problemie poznasz kroki niezbędne do obliczenia wartości opornika stabilizującego układ wzmacniający przedstawiony na rysunku 8.10.

Wartości oporów  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_E$ , niezbędne do ustabilizowania pracy obwodu na określonym poziomie stałego napięcia wyjściowego oraz uzyskania konkretnego wzmocnienia napięciowego, wyznacza się w opisanych poniżej krokach.

Najpierw zapoznaj się ze szczegółami procedury wyznaczania poszczególnych wartości i przyswoj sobie niezbędne wzory, a następnie rozwiąż przykładowe zadania.

1. Rozpocznij od wyznaczenia wartości  $R_E$ , przekształcając w tym celu równanie:

$$A_U = \frac{R_C}{R_E}.$$



Rysunek 8.10

2. Wyznacz wartość  $U_E$ , wiedząc, że:

$$A_U = \frac{U_R}{U_E} = \frac{U - U_C}{U_E}.$$

3. Korzystając z podanego wzoru, oblicz napięcie  $U_B$ :

$$U_B = U_E + 0,7 \text{ V}.$$

4. Wyznacz natężenie  $I_C$  ze wzoru:

$$I_C = \frac{U - U_C}{R_C}.$$

5. Znając tę wartość, wyznacz  $I_B$  z poniższej zależności:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}.$$

6. Wyznacz wartość  $I_2$ , wiedząc, że  $I_2$  to  $10 \cdot I_B$ . (Odwołaj się tu do obwodu przedstawionego na rysunku 8.8). To bardzo przydatna zależność wypracowana doświadczalnie, znacznie ułatwiająca stabilizowanie punktu pracy.

7. Określ  $R_2$ , korzystając przy tym ze wzoru:

$$R_2 = \frac{U_B}{I_2}.$$

8. Znajdź wartość  $R_1$ , wiedząc, że:

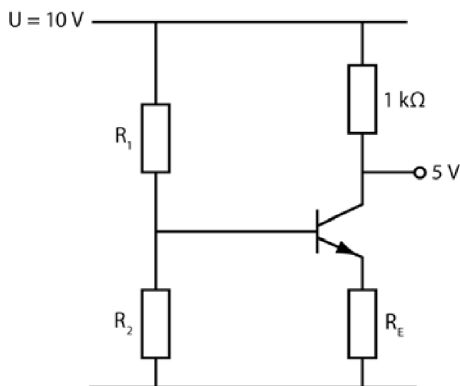
$$R_1 = \frac{U - U_B}{I_2 + I_B}.$$

9. Wartości  $R_1$  i  $R_2$  mogą różnić się od wartości oporników dostępnych na rynku, zatem budując układ, posłuż się najbliższymi im wartościami typowymi.
10. Użyj wzoru opisującego dzielnik napięcia, by określić, czy standardowe wartości oporników, które wybrałeś w kroku 9., dają wynik zbliżony do wartości  $U_B$  wyznaczonej w kroku 3. („Zbliżony” oznacza w tym przypadku „nieodbiegający” od wartości idealnej o 10%).

Omawiany tu sposób postępowania pozwala wyznaczyć wartości oporników niezbędne do zbudowania wzmacniacza o wartości napięcia stałego i wzmocnieniu napięciowym zbliżonych do wartości określonych na początku tego problemu.

### Zadania

Dla obwodu z rysunku 8.11 znajdź wartości określone w każdym z pytań, jeśli  $A_U = 10$ ,  $U_C = 5$  V,  $R_C = 1$  k $\Omega$ ,  $\beta = 100$ ,  $U = 10$  V.



Rysunek 8.11

W razie potrzeby odwołaj się do wzorów podanych w krokach 1 – 10.

1. Oblicz  $R_E$ .

$$A_U = \frac{R_C}{R_E}, \text{ zatem } R_E = \frac{R_C}{A_U} = \frac{1 \text{ k}\Omega}{10} = 100 \text{ k}\Omega.$$

2.  $U_E =$

3.  $U_B =$

4.  $I_C =$

5.  $I_B =$

6.  $I_2 =$

7.  $R_2 =$

8.  $R_1 =$

9. Dobierz standardowe wartości oporników, tak by były jak najbardziej zbliżone do wyliczonych wartości  $R_1$  i  $R_2$ .

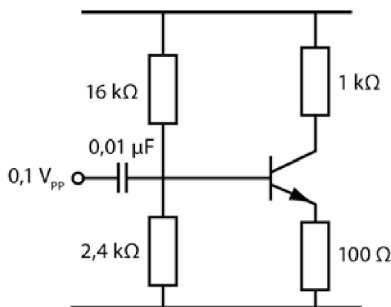
10. Wyznacz  $U_B$  dla dobranych standardowych wartości  $R_1$  i  $R_2$ :

**Odpowiedzi**

Powinieneś otrzymać wyniki zbliżone do podanych niżej.

1.  $100 \Omega$ .
2.  $0,5 \text{ V}$ .
3.  $1,2 \text{ V}$ .
4.  $5 \text{ mA}$ .
5.  $0,05 \text{ mA}$ .
6.  $0,5 \text{ mA}$ .
7.  $2,4 \text{ k}\Omega$ .
8.  $16 \text{ k}\Omega$ .
9. Wartości  $2,4 \text{ k}\Omega$  i  $16 \text{ k}\Omega$  to wartości standardowe (z dokładnością do 5%). Można też użyć oporników o wartościach  $2,2 \text{ k}\Omega$  i  $15 \text{ k}\Omega$ .
10. Napięcie  $U_B$  dla wartości  $2,4 \text{ k}\Omega$  i  $16 \text{ k}\Omega$  wynosi  $1,3 \text{ V}$ . Dla oporników  $2,2 \text{ k}\Omega$  oraz  $15 \text{ k}\Omega$   $U_B = 1,28 \text{ V}$ . Obydwie wartości nie odbiegają o więcej niż 10% od  $U_B$  wyznaczonego w kroku 3. obliczeń.

Rysunek 8.12 przedstawia obwód wzmacniacza z naniesionymi wartościami, które wyznaczyłeś w tym zadaniu.



**Rysunek 8.12**

**18** Postępuj zgodnie z wytycznymi podanymi w problemie 17. i odpowiedz na poniższe pytania.

**Zadania**

Znajdź wartości wypisanych poniżej parametrów elementów z obwodu przedstawionego na rysunku 8.11, wiedząc, że  $A_U = 15$ ,  $U_C = 6 \text{ V}$ ,  $\beta = 100$ ,  $R_C = 3,3 \text{ k}\Omega$  i  $U = 10 \text{ V}$ .

1.  $R_E =$
2.  $U_E =$
3.  $U_B =$
4.  $I_C =$
5.  $I_B =$
6.  $I_2 =$
7.  $R_2 =$
8.  $R_1 =$
9. Dobierz standardowe wartości oporników, tak by były jak najbardziej zbliżone do wyliczonych wartości  $R_1$  i  $R_2$ .
10. Wyznacz  $U_B$  dla dobranych standardowych wartości  $R_1$  i  $R_2$ .

### **Odpowiedzi**

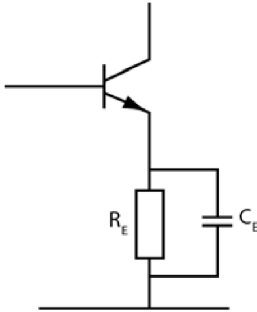
Powinieneś otrzymać wyniki zbliżone do podanych niżej.

1. 220  $\Omega$ .
2. 0,27 V.
3. 0,97 V (jeśli chcesz, możesz przyjąć do obliczeń wartość 1 V).
4. 1,2 mA.
5. 0,012 mA.
6. 0,12 mA.
7. 8,3 k $\Omega$ .
8. 68,2 k $\Omega$ .
9. Wyznaczone wartości oporów są zbliżone do wielkości standardowych 8,2 k $\Omega$  i 68 k $\Omega$ .
10. Napięcie  $U_B$  dla wartości standardowych wynosi 1,08 V. To wystarczająco dobre przybliżenie wartości określonej w kroku 3.

**19** Wzmocnienie napięciowe wytwarzane przez obwód zaprezentowany w problemie 18. wynosiło 10. Wcześniej dowiedziałeś się, że maksymalne wzmocnienie uzyskiwane w praktyce w obwodach takich jak ten, który przedstawiliśmy na rysunku 8.11, wynosi 50.

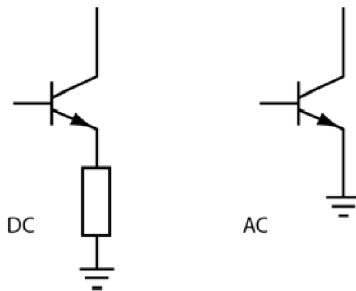
Jednocześnie w problemie 10. wspomnieliśmy, że niektóre obwody wzmacniaczy (rysunek 8.4) pozwalają uzyskiwać wzmocnienia napięciowe nawet rzędu 500. Oznacza to, iż ustabilizowanie punktu pracy dla napięcia stałego obniża zdolność wzmacniająca układu przedstawionego na rysunku 8.4.

Aby zbudować wzmacniacz ze stabilnym punktem pracy i jednocześnie nie tracić dużego wzmocnienia sygnału zmiennego, należy do opornika emitera dołączyć równolegle kondensator, co przedstawiliśmy na rysunku 8.13.



Rysunek 8.13

Jeśli reaktancja kondensatora będzie zdecydowanie mniejsza niż wartość  $R_E$ , prąd zmienny popłynie przez kondensator, a nie przez rezystor. Kondensator taki nazywamy **emiterowym**. Oznacza to, że sygnał zmienny porusza się po innym obwodzie niż sygnał stały, który jest blokowany przez kondensator, zatem musi płynąć przez opornik. Rysunek 8.14 przedstawia ten sam fragment obwodu „widziany” przez prąd stały i prąd zmienny.



Rysunek 8.14

Wzmocnienie napięciowe będzie dzięki temu znacznie bliższe wartościom właściwym obwodowi opisanemu w problemach 1 – 10.

### Zadania

- Jak zmienia się napięcie zmienne po wprowadzeniu do układu kondensatora?
- Jak zmieni się wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego po wprowadzeniu do układu kondensatora?
- Jaką postać przyjmie wzór pozwalający wyznaczyć wzmocnienie napięciowe dla sygnału zmiennego po wprowadzeniu do układu kondensatora?

**Odpowiedzi**

- A. Dodanie kondensatora sprawia, że emiter zachowuje się jak uziemienie, przez co układ przekształca się do postaci z rysunku 8.4.
- B. Wzmocnienie wzrasta.
- C. Wzmocnienie jest opisywane wzorem, który znasz już z problemu 10.:

$$A_U = \beta \cdot \frac{R_C}{R_{WE}}.$$

**20** Gdy zależy Ci na uzyskaniu jak największego wzmocnienia napięciowego dla sygnału zmiennego, zbuduj obwód według schematu przedstawionego na rysunku 8.13. Zazwyczaj w aplikacjach, w których trzeba uzyskać jak największe wzmocnienie, określanie jego dokładnej wartości nie jest aż tak istotne, zatem można przeboleć fakt, że równanie wykorzystane do wyznaczenia tej wartości nie jest dokładne. Jeżeli natomiast zależy Ci na dokładnym określeniu wartości wzmocnienia, musisz zbudować inny układ wzmacniający i zrezygnować z wielkości wzmocnienia na rzecz precyzji.

Pojemność kondensatora  $C_E$  wyznacza się w następujący sposób:

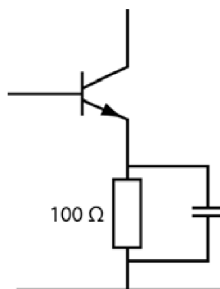
1. Określ najniższą częstotliwość sygnału, dla jakiej ma działać wzmacniacz.
2. Wyznacz  $X_C$  z podanego niżej wzoru:

$$X_C = \frac{R_E}{10}.$$

3. Wyznacz wartość  $C_E$  z podanego wzoru, podstawiając do niego najniższą możliwą częstotliwość pracy wzmacniacza (przyjętą w kroku 1.):

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Przeanalizuj układ znany Ci już z rysunku 8.12 z dodanym kondensatorem emiterowym (rysunek 8.15).



**Rysunek 8.15**

**Zadania**

Wykonaj obliczenia zgodnie z podanymi sugestiami. Przyjmij, że najniższa częstotliwość, przy jakiej może pracować dany wzmacniacz, to 50 Hz.

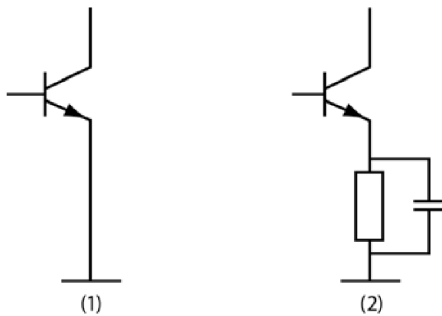
Najniższą częstotliwością niezbędną do poprawnej pracy wzmacniacza jest 50 Hz.

1.  $X_C =$
2.  $C_E =$

**Odpowiedzi**

1.  $X_C = 10 \Omega$ .
2.  $C_E = 320 \mu\text{F}$  (w przybliżeniu).

Wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego we wzmacniaczu z kondensatorem emiterowym (drugi obwód na rysunku 8.16) wyznacza się z tego samego wzoru co wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego dla wzmacniaczy omawianych w problemach 1 – 10 z uziemionym emiterem.

**Rysunek 8.16**

Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza jest opisane następującym wzorem:

$$A_U = \beta \cdot \frac{R_C}{R_{WE} + R_E}.$$

(We wzorze zamiast oporu  $R_L$  pojawia się opór  $R_C$ , ponieważ opornik przy kolektorze jest całkowitym obciążeniem wzmacniacza).

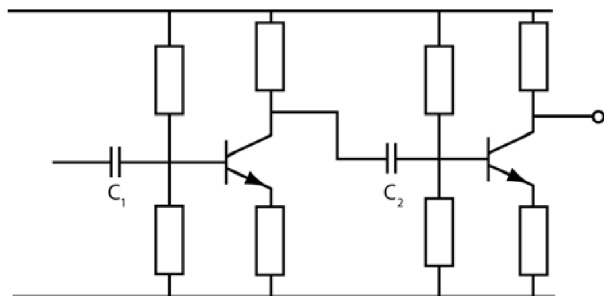
- **Obwód 1.** — w tym przypadku  $R_E = 0$ , zatem wzór na wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego przyjmuje postać:

$$A_U = \beta \cdot \frac{R_C}{R_{WE}}.$$

- **Obwód 2.** — w tym przypadku  $R_E = 0$  dla sygnału zmiennego, ponieważ jest on uziemiany przez kondensator, a opornik  $R_E$  pozostaje poza obwodem prądu zmiennego. Oznacza to, że wzór na wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego przyjmie postać:

$$A_U = \beta \cdot \frac{R_C}{R_{WE}}$$

- **21** Aby uzyskać jeszcze większe wzmocnienie, należy zbudować **kaskadę** dwóch wzmacniaczy tranzystorowych. Sygnał wyjściowy pierwszego wzmacniacza będzie w niej sygnałem wejściowym drugiego. Rysunek 8.17 przedstawia schemat wzmacniacza zbudowanego z dwóch tranzystorów, tak zwanego **wzmacniacza dwustopniowego**.



Rysunek 8.17

Całkowite wzmocnienie napięciowe takiego wzmacniacza wyznacza się, mnożąc wzmocnienia jego stopni. Przykładowo jeśli każdy ze wzmacniaczy podnosi swój sygnał wejściowy dziesięciokrotnie, to całkowite wzmocnienie dawane przez obwód będzie wynosić 100.

### Zadania

- A. Załóżmy, że tworzysz kaskadę ze wzmacniaczy o wzmocnieniach 15 i 25. Jakie będzie całkowite wzmocnienie sygnału w układzie?
- B. Ile wynosi całkowite wzmocnienie, jeśli poszczególne stopnie wzmacniacza dają wzmocnienia 13 i 17?

### Odpowiedzi

- A. 375.  
B. 221.

**22** Jeżeli na każdym stopniu wzmacniacza dwustopniowego znajdzie się kondensator emiterowy, ostatecznie może on dać bardzo duże wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego.

**Zadanie**

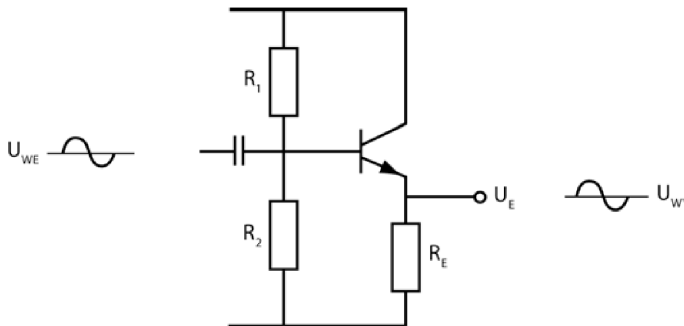
Ile wyniesie całkowite wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego, jeśli wzmocnienie na każdym ze stopni wyniosłoby 100?

**Odpowiedź**

Wzmocnienie wyniesie wtedy 10 000.

**Wtórnik emiterowy**

**23** Rysunek 8.18 przedstawia kolejny rodzaj obwodu wzmacniającego.



Rysunek 8.18

**Zadanie**

Czym różni się układ przedstawiony na rysunku 8.18 od układu omawianego w problemach 11 – 18?

**Odpowiedź**

W obwodzie tym nie ma opornika kolektora, a sygnał wyjściowy jest zbierany z emitera.

**24** Układ przedstawiony na rysunku 8.18 to tak zwany **wtórnik emiterowy**, czyli wzmacniacz pracujący w obwodzie **wspólnego kolektora**.

Sygnal wyjściowy generowany w takim układzie ma kilka interesujących cech charakterystycznych.

- Wartość międzyszczytowa napięcia wyjściowego jest w nim niemal taka sama, jak wartość międzyszczytowa sygnału wejściowego. Oznacza to, iż wzmacnienie wytwarzane w tym obwodzie wynosi nieco mniej niż 1, przy czym przyjmuje się, że jest ono równe 1.
- Sygnal wyjściowy jest zgodny w fazie z sygnałem wejściowym — nie jest odwrócony. W praktyce przyjmuje się, że sygnal wyjściowy jest identyczny z sygnałem wejściowym.
- Wzmacniacz ma bardzo wysoką rezystancję wejściową, a to oznacza, że pobiera bardzo mały prąd ze źródła zasilania.
- Rezystancja wyjściowa tego wzmacniacza jest bardzo mała, co sprawia, że wychodzący z niego sygnal przypomina sygnal baterii lub generatora o bardzo małym oporze wewnętrznym.

### Zadania

- A. Ile wynosi wzmacnienie napięciowe we wtórniku emiterowym?
- B. Czy sygnal wyjściowy jest odwrócony?
- C. Jaka jest oporność wejściowa wtórnika emiterowego?
- D. Jaka jest jego oporność wyjściowa?

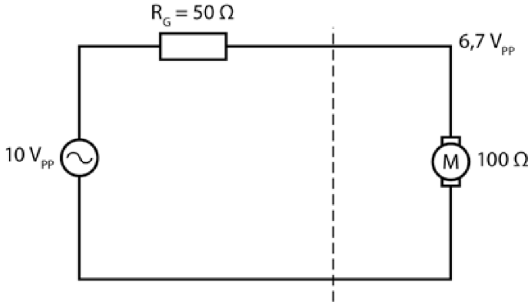
### Odpowiedzi

- A. 1.
- B. Nie.
- C. Duża.
- D. Mała.

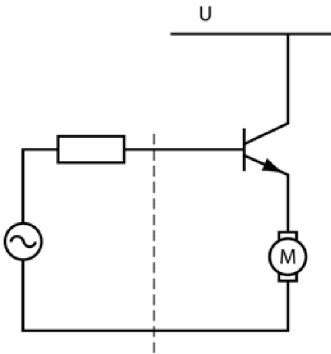
**25** Przypadek omawiany w tym problemie ma uzmysłwić Ci, jak ważnym układem jest obwód wtórnika emiterowego. W obwodzie przedstawionym na rysunku 8.19 znajduje się niewielki silnik prądu zmiennego o oporze  $100\ \Omega$ , napędzany napięciem  $10\ V_{PP}$  dostarczanym z generatora. Pięćdziesięciomowy opornik oznaczony na schemacie symbolem  $R_G$  to opór wewnętrzny generatora.

W przedstawionym obwodzie do silnika dociera jedynie  $6,7\ V_{PP}$ , reszta napięcia jest tracona na oporze  $R_G$ .

Rysunek 8.20 przedstawia ten sam układ z tranzystorem wprowadzonym pomiędzy generator a silnik. W ten sposób w obwodzie powstaje układ wtórnika emiterowego.



Rysunek 8.19



Rysunek 8.20

Podany niżej wzór pozwala obliczać przybliżony opór wejściowy tranzystora.

$$R_{WE} = \beta \cdot R_E = 100 \cdot 100 \, \Omega = 10 \, 000 \, \Omega \text{ (przy założeniu, że } \beta = 100 \text{)}.$$

Oznacza to, że wejściowe  $10 \, V_{PP}$  jest dzielone między  $10 \, 000 \, \Omega$  rezystancji wejściowej tranzystora i  $50 \, \Omega$  wewnętrznej rezystancji generatora. W tym momencie spadek napięcia na oporze  $R_G$  staje się tak mały, że można go pominąć, więc przyjmuje się, iż cały sygnał  $10 \, V_{PP}$  jest przekazywany do bazy tranzystora. Napięcie na emiterze jest niezmiennie równe  $10 \, V_{PP}$ .

Jednocześnie prąd wprowadzany do silnika jest teraz emitowany przez zasilacz, a nie przez generator. W tym układzie tranzystor pełni funkcję generatora o bardzo małej rezystancji wewnętrznej.

Opór wewnętrzny ( $R_W$ ) nazywamy **impedancją wyjściową** wtórnika emiterowego. Oblicza się go z następującego wzoru:

$$R_W = \frac{\text{opór wewnętrzny generatora}}{\beta}.$$

Dla obwodu przedstawionego na rysunku 8.20, przy założeniu, że  $R_G = 50 \, \Omega$ , a  $\beta = 100$ , impedancja wyjściowa to  $R_W = 0,5 \, \Omega$ . Stąd wynika, że obwód z rysunku 8.20 można traktować w praktyce jako generator sygnałów o wewnętrznym oporze równym  $0,5 \, \Omega$  zasilającym silnik o oporze  $100 \, \Omega$ . Co za tym idzie, na silniku utrzymuje się spadek napięcia  $10 \, V_{PP}$ .

**Zadania**

- A. Do czego wykorzystano w tym przykładzie wtórnik emiterowy?  
 B. Które dwie właściwości wtórnika emiterowego wykorzystano w tym zastosowaniu?

**Odpowiedzi**

- A. Aby zasilić obciążenie, którego nie można byłoby zasilić bezpośrednio z generatora.  
 B. Wysoką oporność wejściową i niską oporność wyjściową.

**26** Zadania z tego problemu są związane z układem wtórnika emiterowego omawianego w problemach 23 – 25.

**Zadania**

- A. Ile wynosi przybliżone wzmocnienie w obwodzie wtórnika emiterowego?  
 B. Jak zmienia się faza sygnału wyjściowego w stosunku do fazy sygnału wejściowego?  
 C. Która z oporności — wejściowa czy wyjściowa — ma większą wartość?  
 D. Czy wtórnik emiterowy sprawdza się lepiej jako wzmacniacz, czy też jako separator obciążeń?

**Odpowiedzi**

- A. 1.  
 B. Nie zmienia się w ogóle.  
 C. Wejściowa.  
 D. Jako separator obciążeń.

**27** Aby zaprojektować układ wtórnika emiterowego, postępuj zgodnie z podanymi niżej krokami.

1. Określ napięcie  $U_E$ , czyli poziom napięcia stałego — zazwyczaj przyjmuje się, że ma ono wartość połowy napięcia zasilającego.
2. Wyznacz wartość  $U_B$ . Skorzystaj ze wzoru  $U_B = U_E + 0,7 \text{ V}$ .
3. Określ wartość  $R_E$ . Bardzo często jest to wielkość narzucona z góry, szczególnie jeśli wtórnik ma zasilac silnik lub inne znane Ci urządzenie.

4. Wyznacz z podanego niżej wzoru natężenie prądu  $I_E$ :

$$I_E = \frac{U_E}{R_E}.$$

5. Oblicz natężenie prądu  $I_B$ :

$$I_B = \frac{I_E}{\beta}.$$

6. Wiedząc, że  $I_2 = 10 \cdot I_B$ , wyznacz  $I_2$ .

7. Z poniższego wzoru wyznacz  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{U_B}{I_2}.$$

8. Znajdź  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{U - U_B}{I_2 + I_B}.$$

Zazwyczaj  $I_B$  jest tak małe, że można je pominąć w tym wzorze.

9. Dobierz standardowe wartości oporów  $R_1$  i  $R_2$ .

10. Sprawdź, czy po uwzględnieniu standardowych wartości oporników napięcie  $U_B$  jest zbliżone do wyznaczonego teoretycznie. Skorzystaj ze wzoru opisującego dzielnik napięcia.

Spróbuj teraz przeprowadzić obliczenia dla prostego przykładu projektu układu. Skorzystaj z wartości podanych na rysunku 8.21.

### Zadania

Postępuj zgodnie z zaleceniami podanymi w punktach 1 – 10, by wyznaczyć wartości oporników stabilizujących układ.

1.  $U_E =$

2.  $U_B =$

3.  $R_E =$

4.  $I_E =$

5.  $I_B =$

6.  $I_2 =$

7.  $R_2 =$

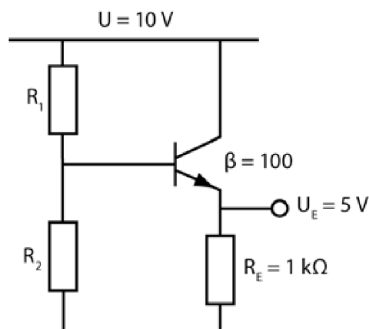
8.  $R_1 =$

9. Najbliższe wyliczonym wartości standardowe to:

$R_1 =$

$R_2 =$

10.  $U_B =$



Rysunek 8.21

**Odpowiedzi**

Powinieneś otrzymać wyniki zbliżone do podanych niżej.

1. 5 V (wartość ta jest podana na rysunku 8.21).
2. 5,7 V.
3. 1 kΩ (wartość ta jest podana na rysunku 8.21).
4. 5 mA.
5. 0,05 mA.
6. 0,5 mA.
7. 11,4 kΩ.
8. 7,8 kΩ.
9. Najbliższe wyznaczonym wartości standardowe to 8,2 kΩ i 12 kΩ.
10. Napięcie  $U_B$  dla wartości standardowych wynosi 5,94 V. To wartość nieco większa niż wyliczona w kroku 2., ale nadal mieszcząca się w granicach tolerancji.

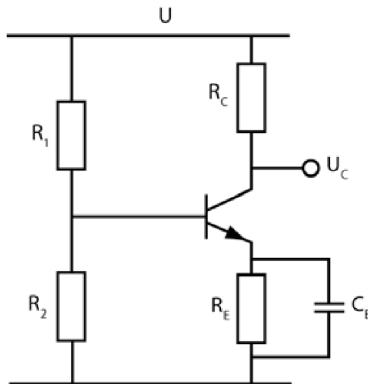
O wartości napięcia  $U_E$  decyduje dobór oporników stabilizacyjnych, zatem nie zależy ona w żaden sposób od wartości oporu  $R_E$ . Do opisanego tu układu można podłączyć niemal dowolną wartość  $R_E$  — minimalna jest określona prostym wzorem:

$$R_E = \frac{10 \cdot R_2}{\beta}.$$

## Analiza układu wzmacniającego

**28** Do tej pory zajmowaliśmy się projektowaniem prostych układów wzmacniających i omawianiem pracy wtórnika emiterowego. W tym rozdziale przedstawimy Ci metody „analizowania” gotowego układu. Analiza będzie polegać na obliczeniu stałego napięcia na kolektorze (wyznaczeniu punktu pracy) i znalezieniu wzmocnienia sygnału zmiennego. Analizowanie układu jest w zasadzie odwróceniem procesu projektowania.

Zacznij od zapoznania się z układem z rysunku 8.22.



**Rysunek 8.22**

Oto kroki, w jakich analizuje się układ:

1. Znajdź  $U_B$ , korzystając z zależności:

$$U_B = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

2. Znajdź  $U_E$ , jeśli  $U_E = U_B - 0,7 \text{ V}$ .

3. Oblicz  $I_C$  ze wzoru:

$$I_C = \frac{U_E}{R_E}.$$

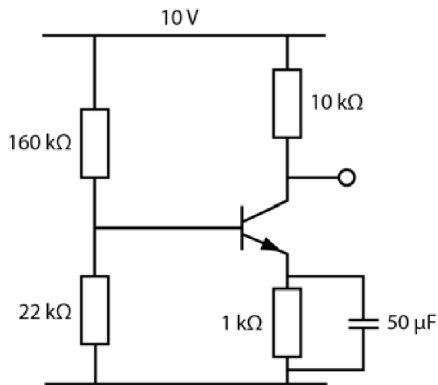
Zauważ, że  $I_C = I_E$ .

4. Wiedząc, że  $U_R = R_C \cdot I_C$ , wyznacz wartość  $U_R$ .
5. Określ wartość  $U_C$ , jeżeli  $U_C = U - U_R$ . To punkt pracy tranzystora.
6. Korzystając z jednego z podanych niżej wzorów, określ wartość  $A_U$ :

$$A_U = \frac{R_C}{R_E} \text{ lub } A_U = \beta \cdot \frac{R_C}{R_{WE}}.$$

Jeżeli chcesz skorzystać z drugiego z podanych tu wzorów, musisz odczytać wartość  $R_{WE}$  (czyli  $h_{ie}$ ) w tablicach podawanych przez producenta tranzystora.

Spójrz na układ przedstawiony na rysunku 8.23 i rozwiąż podane niżej zadania. Przyjmij  $\beta = 100$  i  $R_{WE} = 2 \text{ k}\Omega$ . Pozostałe wartości odczytaj ze schematu.



Rysunek 8.23

### Zadania

Oblicz wartości  $U_B$ ,  $U_E$ ,  $I_C$ ,  $U_R$ ,  $U_C$  i  $A_U$ . Postępuj zgodnie z wytycznymi podanymi w punktach 1 – 6 problemu.

1.  $U_B =$
2.  $U_E =$
3.  $I_C =$
4.  $U_R =$
5.  $U_C =$
6.  $A_U =$

### Odpowiedzi

1.  $U_B = 10 \cdot \frac{22 \text{ k}\Omega}{160 \text{ k}\Omega + 22 \text{ k}\Omega} = 1,2 \text{ V}.$
2.  $U_E = 1,2 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 0,5 \text{ V}.$
3.  $I_C = \frac{0,5 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 0,5 \text{ mA}.$
4.  $U_R = 10 \text{ k}\Omega \cdot 0,5 \text{ mA} = 5 \text{ V}.$
5.  $U_C = 10 \text{ V} - 5 \text{ V} = 5 \text{ V}$  (to punkt pracy tranzystora).
6. Z kondensatorem:  

$$A_U = 100 \cdot \frac{10 \text{ k}\Omega}{2 \text{ k}\Omega} = 500 \text{ (duże wzmacnienie).}$$

Bez kondensatora:

$$A_U = \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} = 10 \text{ (małe wzmacnienie).}$$

**29** Najniższą częstotliwość, przy której wzmacniacz będzie pracować poprawnie, wyznaczysz w następujących krokach:

1. Określ wartość  $R_E$ .

2. Oblicz częstotliwość, dla której  $X_C = \frac{R_E}{10}$ . Skorzystaj ze wzoru na reakcję kondensatora. (Podana tu zależność jest jedną z kilku reguł, które **można** udowodnić matematycznie, a które jednocześnie dają dobre wyniki).

### Zadania

Oblicz następujące wartości dla schematu przedstawionego na rysunku 8.23.

A.  $R_E =$

B.  $f =$

### Odpowiedzi

A.  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$  (wartość podana na schemacie obwodu).

B. Zgodnie z podaną wcześniej zasadą przyjmujemy, że  $X_C = 100 \Omega$ . Po podstawieniu do wzoru:

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

$$100 \Omega = \frac{0,16}{f \cdot 50 \mu\text{F}}, \text{ bo } \frac{1}{2\pi} = 0,16.$$

Stąd otrzymujemy:

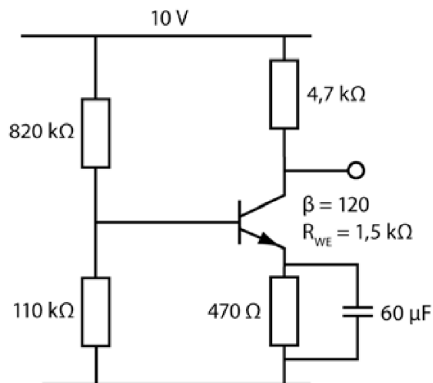
$$f = \frac{0,16}{100 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 32 \text{ Hz}.$$

**30** Przeprowadź teraz obliczenia opisane w problemach 28. i 29. dla obwodu z rysunku 8.24.

### Zadania

1.  $U_B =$

2.  $U_E =$



Rysunek 8.24

3.  $I_C =$
4.  $U_R =$
5.  $U_C =$
6. Z kondensatorem:  $A_U =$   
Bez kondensatora:  $A_U =$
7. Najniższa dopuszczalna częstotliwość:  $f =$

### Odpowiedzi

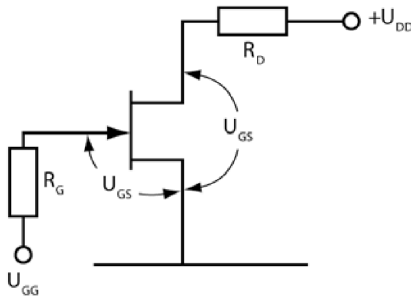
Wyznaczone wartości powinny być zbliżone do podanych niżej.

1. 1,18 V.
2. 0,48 V.
3. 1 mA.
4. 4,7 V.
5. 5,3 V (punkt pracy).
6. Z kondensatorem: 367.  
Bez kondensatora: 10.
7. 57 Hz (w przybliżeniu).

## Tranzystor JFET jako wzmacniacz

**31** W rozdziale 3., w problemach 29 – 32, i w rozdziale 4., w problemach 37 – 41, wspominaliśmy już o pewnych zagadnieniach związanych z tranzystorami polowymi złączowymi (JFET). Zanim zajmiesz się rozwiązywaniem

zadań z tego podrozdziału, warto, byś przypomniał sobie omówione wcześniej zagadnienia. Rysunek 8.25 przedstawia typowy układ stabilizujący pracę tranzystora JFET.



Rysunek 8.25

### Zadania

- Jaki rodzaj tranzystora JFET został przedstawiony na rysunku 8.25?
- Jakie napięcie  $U_{GS}$  włączy całkowicie ten tranzystor?
- Jaki prąd drenu popłynie przez tranzystor, gdy będzie on w pełni włączony?
- Jaka wartość napięcia  $U_{GS}$  byłaby potrzebna, żeby całkowicie wyłączyć tranzystor?
- W jakim charakterze pracuje w układzie tranzystor, który w zależności od warunków jest albo włączony, albo wyłączony?

### Odpowiedzi

- Jest to tranzystor JFET z kanałem  $N$ .
- Tranzystor jest włączony przy  $U_{GS} = 0$ .
- Popłynie przez niego prąd nasycenia ( $I_{DSS}$ ).
- Tranzystor JFET z kanałem  $N$  jest całkowicie wyłączony, jeżeli napięcie  $U_{GS}$  jest ujemne. Napięcie musi być większe lub równe napięciu odcięcia.
- Tranzystor pracuje jako przełącznik.

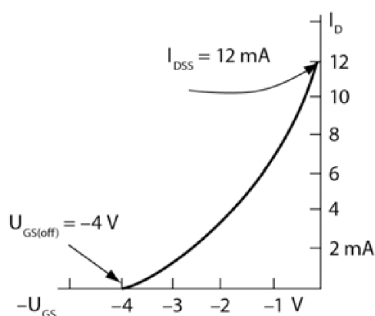
**32** Tranzystor JFET może wzmacniać sygnały, jeśli zostanie ustabilizowany przez podanie do bramki napięcia wejściowego równego połowie różnicy napięć odpowiadających stanom ON i OFF. Prąd drenu płynący przez tranzystor ustabilizowany określonym napięciem  $U_{GS}$  wyznacza się ze wzoru opisującego krzywą przejściową:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2.$$

W równaniu tym  $I_{DSS}$  oznacza wartość prądu nasycenia, a  $U_{GS(off)}$  to napięcie odcięcia na bramce. Obydwie wartości zostały oznaczone na rysunku 8.26, przedstawiającym krzywą przejściową.

W przypadku zilustrowanym rysunkiem 8.26 wartości te wynoszą odpowiednio 12 mA i -4 V. Oznacza to, że napięcie rzędu -2V ustabilizuje pracę tranzystora i zapewni przepływ prądu o natężeniu:

$$I_D = 12 \text{ mA} \left( 1 - \frac{-2}{-4} \right)^2 = 12 \text{ mA} \cdot 0,5^2 = 3 \text{ mA}.$$



Rysunek 8.26

### Zadania

Oblicz prąd drenu dla podanych wartości:

- A.  $U_{GS} = -1,5 \text{ V}$ .
- B.  $U_{GS} = -0,5 \text{ V}$ .

### Odpowiedzi

- A. 4,7 mA.
- B. 9,2 mA.

**UWAGA** Zakresy wartości natężeń  $I_{DSS}$  oraz napięć  $U_{GD(off)}$  podawane przez producentów dla konkretnych typów tranzystorów JFET potrafią być bardzo szerokie, dlatego niejednokrotnie będziesz musiał wyznaczyć te wartości doświadczalnie w sposób przedstawiony w problemie 38. rozdziału 4.

**33** Ustal wartość napięcia dren-źródło  $U_{DS}$  dla obwodu przedstawionego na rysunku 8.25, a następnie oblicz wartość opornika obciążenia  $R_D$ , stosując równanie:

$$R_D = \frac{U_{DD} - U_{DS}}{I_D}$$

Przyjmij, że prąd drenu  $I_D = 3 \text{ mA}$ , natomiast napięcie wprowadzane do drenu  $U_{DD} = 24 \text{ V}$ . Wyznacz wartość  $R_D$ , która pozwoli uzyskać określoną w zadaniu wartość napięcia  $U_{DS}$ , będącą jednocześnie stałym napięciem wyjściowym danym przez wzmacniacz.

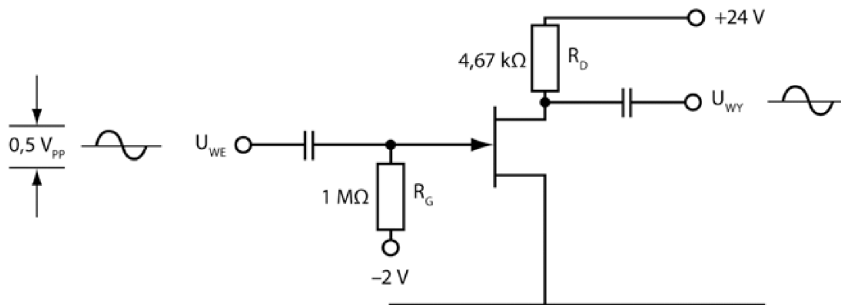
### Zadanie

Oblicz wartość  $R_D$ , przy której  $U_{DS} = 10 \text{ V}$ .

### Odpowiedź

$$R_D = \frac{U_{DD} - U_{DS}}{I_D} = \frac{24 \text{ V} - 10 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = \frac{14 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 4,67 \text{ k}\Omega$$

**34** W obwodzie przedstawionym na rysunku 8.27 (tak zwany **wzmacniacz JFET pracujący w układzie wspólnego źródła**) do bramki tranzystora JFET trafia sygnał sinusoidalny o napięciu międzyszczytowym  $0,5 \text{ V}_{pp}$ . Sygnał wyjściowy pobierany z drenu jest wzmocnioną falą o przebiegu sinusoidalnym.



Rysunek 8.27

Na bramce tranzystora JFET wejściowy sygnał sinusoidalny sumuje się z napięciem stabilizującym równym  $-2 \text{ V}$ . Oznacza to, że zmienia się on od  $-1,75 \text{ V}$  do  $-2,25 \text{ V}$ .

### Zadanie

Ze wzoru podanego w problemie 32. oblicz natężenie prądu  $I_D$  dla minimalnej i maksymalnej wartości  $U_{GS}$ .

**Odpowiedź**

Dla  $U_{GS} = -1,75$  V natężenie prądu  $I_D = 3,8$  mA.

Dla  $U_{GS} = -2,25$  V natężenie prądu  $I_D = 2,3$  mA.

**35** Wraz ze zmianą prądu drenu zmienia się także napięcie mierzone na oporniku  $R_D$ ,  $U_{RD}$ .

**Zadanie**

Przeanalizuj układ z rysunku 8.27 i oblicz wartości  $U_{RD}$  dla minimalnej i maksymalnej wartości  $I_D$ , które wyznaczyłeś w problemie 34.

**Odpowiedź**

Dla  $I_D = 3,8$  mA napięcie  $U_{RD} = 3,8 \text{ mA} \cdot 4,67 \text{ k}\Omega = 17,7$  V.

Dla  $I_D = 2,3$  mA napięcie  $U_{RD} = 2,3 \text{ mA} \cdot 4,67 \text{ k}\Omega = 10,7$  V.

Wartości te odpowiadają napięciu międzyszczytowemu  $7 V_{PP}$  fali sinusoidalnej.

**36** Zmiana spadku napięcia na oporniku  $R_D$  wywołuje także zmianę napięcia wyjściowego.

**Zadanie**

Spójrz na obwód przedstawiony na rysunku 8.27 i wyznacz dla niego wartości napięcia wyjściowego  $U_{WY}$  odpowiadające minimalnej i maksymalnej wartości  $U_{RD}$ , które obliczyłeś w problemie 35.

**Odpowiedź**

Dla  $U_{RD} = 17,7$  V napięcie wyjściowe to

$$U_{WY} = U_{DD} - U_{RD} = 24 \text{ V} - 17,7 \text{ V} = 6,3 \text{ V}.$$

Dla  $U_{RD} = 10,7$  V napięcie wyjściowe to

$$U_{WY} = U_{DD} - U_{RD} = 24 \text{ V} - 10,7 \text{ V} = 13,3 \text{ V}.$$

Oznacza to, że sygnał wyjściowy jest falą sinusoidalną o napięciu międzyszczytowym wynoszącym  $7 V_{PP}$ .

**37** Tabela 8.1 zawiera zestawienie wyników obliczeń przeprowadzonych w problemach 34 – 36, łącznie z wartościami dla punktu pracy.

Tabela 8.1

$U_{GS}$	$I_D$	$U_{RD}$	$U_{WY}$
-1,75 V	3,8 mA	17,7 V	6,3 V
-2,0 V	3,0 mA	14,0 V	10,0 V
-2,25 V	2,3 mA	10,7 V	13,3 V

**Zadanie**

Opisz krótko charakterystykę zmiennego sygnału wyjściowego.

**Odpowiedź**

Sygnał wyjściowy ma przebieg sinusoidalny o napięciu międzyszczytowym  $7 V_{pp}$ . Jego częstotliwość nie zmienia się w stosunku do częstotliwości sygnału wejściowego. Warto zauważyć, że wraz ze wzrostem wartości  $U_{GS}$  (w kierunku wartości 0) sygnał wyjściowy maleje. Gdy napięcie wejściowe zmniejsza się (przyjmuje wartości bardziej ujemne), sygnał wyjściowy rośnie. Oznacza to, że jest on przesunięty w fazie względem sygnału wejściowego o  $180^\circ$ .

**38** Wzmocnienie napięcia zmiennego uzyskiwane w omawianym wzmacniaczu oblicza się ze wzoru:

$$A_U = \frac{-U_{WY}}{U_{WE}}$$

Znak minus przy wartości napięcia wyjściowego oznacza, że jest ono przesunięte o  $180^\circ$  względem napięcia wejściowego.

**Zadanie**

Oblicz wzmocnienie napięciowe dla wzmacniacza omawianego w problemach 34 – 37.

**Odpowiedź**

$$A_U = \frac{-7 V_{pp}}{0,5 V_{pp}} = -14.$$

**39** Wzmocnienie napięciowe można także wyznaczyć ze wzoru:

$$A_U = -G \cdot R_D.$$

Pojawiająca się w tym równaniu wielkość oznaczona symbolem  $G$  to **transkonduktancja**. Jest to wielkość charakterystyczna dla tranzystorów typu JFET. (Czasami określa się ją mianem **admitancji przejściowej**). Wartości parametru  $G$  są zazwyczaj podawane przez producenta tranzystorów. Dla badanego tranzystora możesz też wyznaczyć ją z danych zebranych w tabeli 8.1. Wykorzystaj w tym celu podany niżej wzór:

$$G = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} .$$

Użyty tu symbol  $\Delta$  oznacza zmianę wartości  $U_{GS}$  i odpowiadającą jej zmianę wartości natężenia prądu drenu. Transkonduktancję podaje się w simensach (S). Czasami spotyka się też oznaczenie spoza układu SI — mho.

### Zadania

- A. Na podstawie danych zawartych w tabeli 8.1 wyznacz transkonduktancję  $G$  tranzystora JFET pracującego w charakterze wzmacniacza.
- B. Wyznacz odpowiadające jej wzmocnienie napięciowe.

### Odpowiedzi

A.  $G = \frac{1,5 \text{ mA}}{0,5 \text{ V}} = 0,003 \text{ S} .$

B.  $A_U = -0,003 \cdot 4670 = -14$ , co odpowiada wynikowi uzyskanemu w rozwiązaniu problemu 38.

**40** Zaprojektuj wzmacniacz w układzie wspólnej bazy, wykorzystujący tranzystor JFET, w którym  $I_{DSS} = 14,8 \text{ mA}$ , a  $U_{GS(off)} = -3,2 \text{ V}$ . Przyjmij, że sygnał wejściowy to  $40 \text{ mV}_{PP}$ . Dren jest zasilany napięciem o wartości  $24 \text{ V}$ .

### Zadania

- A. Określ wartość napięcia  $U_{GS}$ , przy którym tranzystor będzie pracować stabilnie. Powinna być to wartość przypadająca w połowie krzywej przejściowej.
- B. Korzystając ze wzoru podanego w problemie 32., wyznacz natężenie prądu drenu odpowiadające napięciu  $U_{GS}$ , które obliczyłeś w kroku A tego zadania.
- C. Wybierz wartość napięcia  $U_{DS}$  i na podstawie wzoru podanego w problemie 33. wyznacz wartość  $R_D$ .
- D. Oblicz maksymalną i minimalną wartość  $U_{GS}$ , wynikającą z wartości sygnału wejściowego i odpowiadającą wartościom prądu drenu, które wyznaczyłeś w problemie 34.

- E. Oblicz minimalną i maksymalną wartość napięcia wyjściowego  $U_{WY}$ , wynikającą z podawanego sygnału wejściowego. Odpowiednie kroki opisaliśmy w problemach 35. i 36.
- F. Oblicz wzmocnienie wzmacniacza.

**Odpowiedzi**

A.  $U_{GS} = -1,6 \text{ V}$ .

B.  $I_D = 3,7 \text{ mA}$ .

C. Dla  $U_{DS} = 10 \text{ V}$

$$R_D = \frac{14 \text{ V}}{3,7 \text{ mA}} = 3780 \Omega.$$

D. Napięcie  $U_{GS}$  zmienia się od wartości  $-1,58 \text{ V}$  do  $-1,62 \text{ V}$ . Zmiany prądu drenu wyznacz z odpowiedniego wzoru. Jego natężenie będzie zmieniać się od  $3,79 \text{ mA}$  do  $3,61 \text{ mA}$ .

E. Napięcie  $U_{RD}$  zmienia się od wartości  $14,3 \text{ V}$  do  $13,6 \text{ V}$ , zatem napięcie wyjściowe będzie zmieniać się od  $9,7 \text{ V}$  do  $10,4 \text{ V}$ .

F.  $A_U = \frac{-0,7}{0,04} = -17,5$ .

**41** Wykorzystaj wyniki otrzymane w zadaniu D problemu 40., aby rozwiązać poniższe zadanie.

**Zadanie**

Oblicz transkonduktancję tranzystora JFET i wzmocnienie napięciowe, wykorzystując w tym celu wzory podane w problemie 39.

**Odpowiedź**

$$G = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} = \frac{0,18 \text{ mA}}{40 \text{ mV}} = 0,0045 \text{ S}.$$

$$A_U = -G \cdot R_D = -0,0045 \cdot 3780 = -17.$$

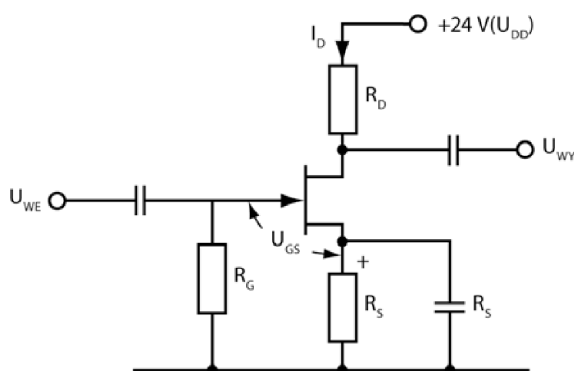
To wynik bardzo zbliżony do wartości otrzymanej w zadaniu F problemu 40.

**42** Rysunek 8.28 przedstawia tranzystor JFET pracujący w charakterze wzmacniacza podłączonego do jednego źródła zasilania. W problemach 34 – 41 przedstawialiśmy obwody, w których dren i bramka były zasilane osobno.

Napięcie stałe na bramce jest równe zero, ponieważ jest ona uziemiona przez opornik  $R_G$ . Oznacza to, że w tym obwodzie napięcie bramka – źródło jest równe spadkowi napięcia na oporze  $R_S$ . Aby zaprojektować taki układ, musisz najpierw wyznaczyć wartości  $R_S$  i  $R_D$ . Załóż, że punkt pracy tego tranzystora jest identyczny z tym, który wyznaczyłeś w problemach 34 – 41:  $U_{GS} = -2$  V, a odpowiadający mu prąd drenu to  $I_D = 3$  mA. Poniżej znajdziesz wskazówki dotyczące prowadzenia obliczeń.

1. Oblicz wartość  $R_S$ , korzystając z podanego niżej wzoru, skoro  $U_{RS} = U_{GS}$ .

$$R_S = \frac{U_{RS}}{I_D} = \frac{U_{GS}}{I_D}.$$



Rysunek 8.28

2. Korzystając z podanego niżej wzoru, wyznacz  $R_D$ . Przyjmij, że  $U_{DS} = 10$  V, czyli że jest to ta sama wartość, którą posługiwałeś się, rozwiązując zadania z problemów 34 – 41.

$$R_D = \frac{U_{DD} - U_{DS} - U}{I_D}.$$

3. Oblicz wartość  $X_{CS}$  ze wzoru:

$$X_{CS} = \frac{R_S}{10}.$$

Teraz oblicz wartość  $C_S$ , wiedząc że:

$$X_{CS} = \frac{1}{2\pi f C_S}.$$

4. Oblicz wartość wyjściowego napięcia międzyszczytowego, stosując metody przedstawione w problemach 34 – 36.
5. Oblicz wzmacnienie napięcia zmiennego:

$$A_U = \frac{-U_{WY}}{U_{WE}}.$$

**UWAGA** Pojemność kondensatora  $C_S$  dobierz tak, by jego reaktancja była mniejsza niż 10% wartości oporności  $R_S$  dla najniższej wzmacnianej częstotliwości. Obciążenie tranzystora zasilanego sygnałem stałym jest równe  $R_S + R_D$ . Przy zasilaniu sygnałem zmiennym jest ono równe wyłącznie  $R_D$ , ponieważ sygnał zmienny jest przekazywany przez kondensator  $C_S$ , więc omija opornik  $R_S$ . Ten ostatni umożliwia utrzymanie tranzystora w stałym punkcie pracy dla sygnału stałego. Wprowadzenie do układu kondensatora  $C_S$  zmniejsza nieco wzmacnienie, gdyż wyjściowy sygnał zmienny jest obliczany dla mniejszej wartości oporu (samo  $R_D$ ).

### Zadania

- Ile wynosi wartość oporu  $R_S$ ?
- Ile wynosi wartość oporu  $R_D$ ?
- Ile wynosi pojemność  $C_S$ ? Przyjmij  $f = 1$  kHz.
- Oblicz wyjściowe napięcie międzyszczytowe  $U_{WY}$  dla napięcia wejściowego  $U_{WE} = 0,5$  V<sub>PP</sub>.
- Ile wynosi wzmacnienie napięciowe?

### Odpowiedzi

A.  $R_S = \frac{2 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 667 \Omega$ .

B.  $R_D = \frac{12 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 4 \text{ k}\Omega$ .

C.  $X_{CS} = 66,7 \Omega$ ,  $C_S = 2,4 \mu\text{F}$ .

D. Prąd drenu będzie wahać się od wartości 3,8 mA do 2,3 mA, jak miało to miejsce w problemie 37. Spadek napięcia na oporze  $R_D$  wynosi teraz 6 V<sub>PP</sub>, ponieważ  $R_D$  ma wartość 4 k $\Omega$ . Napięcie wyjściowe wynosi 6 V<sub>PP</sub>.

E.  $A_U = \frac{-6}{0,5} = -12$ .

Wzmacnienie wynosi 12.

## Wzmacniacz operacyjny

**43** Wzmacniacze operacyjne, z którymi mamy dziś do czynienia, to tak zwane układy scalone, czyli urządzenia zawierające wiele tranzystorów i innych elementów wewnątrz jednej kości krzemowej. Tak przygotowany wzmacniacz jest znacznie mniejszy od analogicznego układu zbudowanego z elementów dyskretnych, przez co znajduje znacznie więcej zastosowań.

Wzmacniacze operacyjne umieszcza się w różnego rodzaju obudowach. Można znaleźć modele pracujące w metalowych opakowaniach typu TO,

w płaskich puszkach czy obudowach typu DIP. Spotyka się także układy dwóch (dual) lub czterech (quad) wzmacniaczy ukrytych w jednej kości.

Poręczne rozmiary, niskie ceny oraz szerokie zastosowanie sprawiły, iż wzmacniacze operacyjne są dziś tak popularne, że stawia się je w jednym rzędzie z elementami układu, choć w rzeczywistości jeden wzmacniacz tego rodzaju może zawierać przeszło dwadzieścia tranzystorów. Charakterystyka wzmacniacza operacyjnego jest mocno zbliżona do charakterystyki wzmacniacza idealnego, to znaczy:

- cechuje go wysoka impedancja wejściowa (nie wymaga zasilania prądem wejściowym),
- zapewnia duże wzmocnienie (wykorzystuje się go do wzmacniania małych sygnałów),
- ma niską impedancję wyjściową (obciążenie nie wpływa na jego pracę).

### Zadania

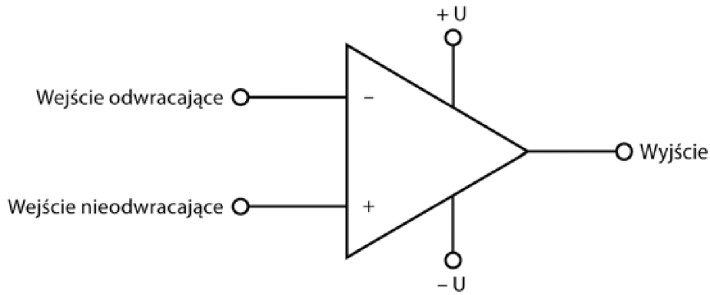
- A. Wymień zalety wzmacniaczy operacyjnych.
- B. Dlaczego wzmacniacze operacyjne produkuje się w postaci układów scalonych?

#### Odpowiedzi

- A. Niewielkie rozmiary, przystępne ceny, wiele możliwości stosowania, wysoka impedancja wejściowa, duży stopień wzmocnienia i niska impedancja wyjściowa.
- B. Do wytworzenia wzmacniacza operacyjnego potrzeba wielu tranzystorów oraz innych elementów, zatem jeśli wzmacniacz ma być odpowiednio mały, wszystkie one muszą znaleźć się na jednej kości układu scalonego.

**44** Rysunek 8.29 przedstawia symbol, którym oznacza się wzmacniacz operacyjny w obwodach.

Wprowadzenie do wzmacniacza sygnału wejściem odwracającym skutkuje uzyskaniem na wyjściu sygnału przesuniętego względem niego o  $180^\circ$ . Sygnał wprowadzony wejściem nieodwracającym opuści wzmacniacz bez przesunięcia w fazie. Aby wzmacniacz działał prawidłowo, trzeba zasilac go dodatnim i ujemnym napięciem. Ich wartości są podawane przez producentów dla każdego modelu. Dane te zawierają także szczegółowy schemat konkretnego wzmacniacza, z którego dowiesz się, w jaki sposób podłączać do niego zew-



Rysunek 8.29

nętrne komponenty, by uzyskać określony efekt. Schematy te (przedstawiające konkretne zastosowania danego wzmacniacza) są cennym źródłem wiedzy dla każdego projektanta czy hobbisty.

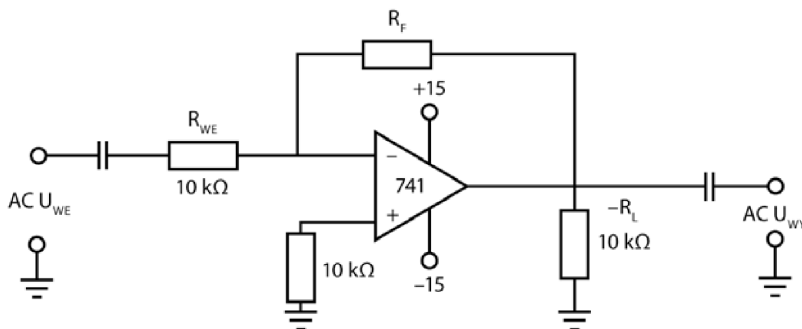
### Zadania

- A. Ile końcówek ma wzmacniacz operacyjny? Jakie są ich funkcje?
- B. Czym charakteryzuje się sygnał wyjściowy, jeśli sygnał wejściowy został wprowadzony do wzmacniacza wejściem odwracającym?

### Odpowiedzi

- A. Wzmacniacz operacyjny ma pięć styków — dwa wejściowe, jeden wyjściowy i dwie końcówki zasilające.
- B. Sygnał wyjściowy jest przesunięty w fazie o  $180^\circ$  względem sygnału wejściowego.

**45** Rysunek 8.30 przedstawia prosty układ ze wzmacniaczem operacyjnym. Sygnał wejściowy jest wprowadzany wejściem odwracającym, oznaczonym na rysunku znakiem minus. Oznacza to, że sygnał wyjściowy będzie odwrotnością sygnału wejściowego.



Rysunek 8.30

Wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego przechodzącego przez wzmacniacz operacyjny jest określone wzorem:

$$A_U = \frac{-R_F}{R_{WE}}.$$

Opornik  $R_F$  jest nazywany opornikiem **sprężenia zwrotnego**, ponieważ tworzy ścieżkę zwrotną dla sygnału wyjściowego wprowadzanego z powrotem do wejścia. Wiele wzmacniaczy operacyjnych działa w obwodzie sprzężenia zwrotnego. Ze względu na duży stopień wzmocnienia łatwo jest nasycić je (doprowadzić do maksymalnego wzmocnienia sygnału) nawet przy niewielkiej różnicy napięć pomiędzy obydwooma końcówkami wejściowymi. Pętla sprzężenia zwrotnego obniża nieco poziom wzmocnienia, pozwalając jednocześnie na wprowadzanie do wzmacniacza napięć wejściowych z większego zakresu. Gdy będziesz projektować układ, możesz wybrać taką wartość opornika sprzężenia zwrotnego, która pozwoli Ci osiągnąć konkretne wzmocnienie napięciowe. Kondensatory widoczne na schemacie wycinają sygnał stały.

### Zadania

- A. Oblicz wartość oporu  $R_F$ , przy którym wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego będzie wynosić 120 V.
- B. Oblicz zmienne napięcie wyjściowe AC  $U_{WY}$ , jeśli napięcie wejściowe AC  $U_{WE}$  wynosi 5 mV<sub>SK</sub>.

#### Odpowiedzi

- A.  $R_F = 120 \cdot 10 \text{ k}\Omega = 1,2 \text{ M}\Omega$ .
- B.  $U_{WY} = 120 \cdot 5 \text{ mV} = 0,6 \text{ V}_{SK}$ .

**46** Popatrz na układ przedstawiony na rysunku 8.30. Oblicz parametry wzmacniacza, który na wyjściu poda sygnał o wartości 12 V<sub>PP</sub>, jeśli wzmocnienie układu wynosi 50, a  $R_{WE} = 6,8 \text{ k}\Omega$ .

### Zadania

- A. Oblicz wartość  $R_F$ .
- B. Oblicz wartość  $U_{WE}$  niezbędnego do uzyskania podanego wcześniej sygnału wyjściowego.

#### Odpowiedzi

- A.  $R_F = 50 \cdot 6,8 \text{ k}\Omega = 340 \text{ k}\Omega$ .

$$\text{B. } U_{WE} = \frac{12 V_{PP}}{50} = 0,24 V_{PP}, \text{ czyli } 0,168 V_{SK}.$$

## Podsumowanie

W tym rozdziale przedstawiliśmy najpopularniejsze rodzaje wzmacniaczy, jakie pojawiają się w budowanych wspólnie układach — tranzystor BJT pracujący w układzie wspólnego emitera, tranzystor JFET pracujący w układzie wspólnego źródła oraz wzmacniacz operacyjny. Nie ukrywamy przy tym, że treść tego rozdziału jedynie w niewielkim stopniu porusza zagadnienia związane z działaniem wzmacniaczy i metodami ich wykorzystywania. Istnieje tyle odmian i typów wzmacniaczy, że ten rozdział może stanowić zaledwie wprowadzenie w zakresie stosowanej terminologii oraz podejścia do projektowania tego rodzaju układów. Mamy nadzieję, że będzie on stanowić dobrą bazę do dalszych działań.

Z zaprezentowanej tu treści dowiedziałeś się:

- jak zaprojektować prosty wzmacniacz o znanym punkcie pracy i danym wzmocnieniu;
- jak zaprojektować wtórnik emiterowy, gdy znamy jego punkt pracy i wzmocnienie;
- jak analizować układy wzmacniaczy.

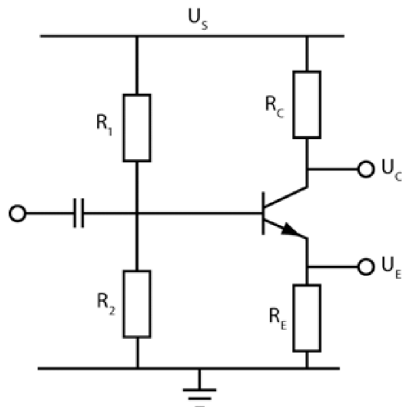
## Test zrozumienia

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień przedstawionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń i rysowania wykresów oraz schematów obwodów użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

1. Na czym polega główny problem z obwodem wzmacniacza przedstawionego na rysunku 8.1?
2. Jakim wzorem opisuje się wzmocnienie tego układu?
3. Czy układ ten charakteryzuje się dużym, czy małym wzmocnieniem?

Zadania 4 – 8 dotyczą układu przedstawionego na rysunku 8.31.

4. Zaprojektuj wzmacniacz tak, by jego punkt pracy wypadł dla napięcia 5 V, a wzmocnienie napięciowe sygnału zmiennego wynosiło 15. Przyjmij  $\beta = 75$ ,  $R_{WE} = 1,5 \text{ k}\Omega$ ,  $U = 10 \text{ V}$  i  $R_C = 2,4 \text{ k}\Omega$ . Wprowadź do układu kondensator  $C_E$  i wyznacz taką jego wartość, by utrzymać maksymalne wzmocnienie sygnału zmiennego dla sygnału wejściowego o częstotliwości 50 Hz. Ile w przybliżeniu będzie wynosić to wzmocnienie?



Rysunek 8.31

5. Powtórz obliczenia z zadania 4. dla wartości  $U = 28 \text{ V}$ ,  $\beta = 80$ ,  $R_{WE} = 1 \text{ k}\Omega$  i  $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ . Punkt pracy tranzystora ma przypadać na wartość  $14 \text{ V}$ , a wzmacnienie sygnału zmiennego ma wynosić 20.
6. Powtórz obliczenia z zadania 4. dla wartości  $U = 14 \text{ V}$ ,  $\beta = 250$ ,  $R_{WE} = 1 \text{ k}\Omega$  i  $R_C = 15 \text{ k}\Omega$ . Punkt pracy tranzystora ma przypadać na wartość  $7 \text{ V}$ , a wzmacnienie sygnału zmiennego ma wynosić 50.
7. Zaprojektuj układ wtórnika emiterowego, wiedząc, że  $U = 12 \text{ V}$ ,  $R_E = 100 \Omega$ ,  $\beta = 35$ ,  $U_E = 7 \text{ V}$ , a  $R_C = 0 \Omega$ .
8. Zaprojektuj układ wtórnika emiterowego, wiedząc, że  $U = 28 \text{ V}$ ,  $R_E = 100 \Omega$ ,  $\beta = 35$ ,  $U_E = 7 \text{ V}$ , a  $R_C = 0 \Omega$ .

W zadaniach 9 – 11 podane są wartości  $\beta$  i oporów. Przeanalizuj obwód i wyznacz punkt pracy oraz wzmacnienie.

9.  $R_1 = 16 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 100 \Omega$ ,  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 100$ ,  $U = 10 \text{ V}$ .
10.  $R_1 = 36 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 3,3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 110 \Omega$ ,  $R_C = 2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 50$ ,  $U = 12 \text{ V}$ .
11.  $R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 90 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 20 \Omega$ ,  $R_C = 300 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 30$ ,  $U = 50 \text{ V}$ .
12. Załóżmy, że obwody opisane w zadaniach 4. i 5. zostały połączone we wzmacniacz dwustopniowy. Ile będzie wynosić jego wzmacnienie, jeśli obydwa tranzystory będą połączone z kondensatorami emiterowymi? Ile będzie wynosić wzmacnienie bez kondensatorów w obwodzie?
13. Zaprojektuj wzmacniacz z tranzystorem JFET, wzorując się na schemacie przedstawionym na rysunku 8.27, jeżeli tranzystor charakteryzuje się następującymi parametrami:  $I_{DSS} = 20 \text{ mA}$  i  $U_{GS(off)} = -4,2 \text{ V}$ . Napięcie  $U_{DS}$  ma wynieść  $14 \text{ V}$ . Określ wartość  $R_D$ .
14. Ile wynosi wzmacnienie tranzystora JFET użytego w zadaniu 13., jeżeli jego transkonduktancja jest równa  $0,0048 \text{ S}$ ?
15. Ile powinien wynosić sygnał wejściowy, jeśli sygnał wyjściowy wzmacniacza z zadań 13. i 14. wynosi  $8 \text{ V}_{pp}$ ?

16. Zaprojektuj wzmacniacz z tranzystorem JFET zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 8.28. Tranzystor jest opisany następującymi wartościami:  $I_{DSS} = 16 \text{ mA}$  i  $U_{GS(off)} = -2,8 \text{ V}$ . Wiedząc, że  $U_{DS} = 10 \text{ V}$ , znajdź wartości  $R_S$ ,  $C_S$  i  $R_D$ .
17. Przyjmij, że do tranzystora z zadania 16. jest wprowadzany sygnał o wartości  $20 \text{ mV}_{PP}$ . Oblicz napięcie wyjściowe i wzmocnienie.
18. Znajdź napięcie wyjściowe dla układu wzmacniacza operacyjnego przedstawionego na rysunku 8.30. Sygnał wejściowy to  $50 \text{ mV}$ , a opornik sprzężenia zwrotnego ma wartość  $750 \text{ k}\Omega$ .

### Odpowiedzi do testu zrozumienia

Jeśli otrzymane odpowiedzi nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdziesz do następnego rozdziału.

1.	Wzmacniacz nie ma ustalonego punktu pracy, więc dawane przez niego wzmocnienie będzie zmieniać się wraz ze wzrostem temperatury. Poza tym wartość wzmocnienia jest nieznana.	(problem 10.)
2.	$A_U = \beta \cdot \frac{R_C}{R_{WE}}$	(problem 10.)
3.	Zazwyczaj wzmocnienie jest dość wysokie.	(problem 10.)
W rozwiązaniach zadań 4 – 6 podaliśmy odpowiednie wartości wyników. Twoje wyniki powinny być do nich zbliżone.		
4.	$R_1 = 29 \text{ k}\Omega$ , $R_2 = 3,82 \text{ k}\Omega$ , $R_E = 160 \Omega$ , $C_E = 200 \mu\text{F}$ , $A_U = 120$ .	(problemy 17 – 22)
5.	$R_1 = 138 \text{ k}\Omega$ , $R_2 = 8 \text{ k}\Omega$ , $R_E = 500 \Omega$ , $C_E = 64 \mu\text{F}$ , $A_U = 800$ .	(problemy 17 – 22)
6.	$R_1 = 640 \text{ k}\Omega$ , $R_2 = 45 \text{ k}\Omega$ , $R_E = 300 \Omega$ , $C_E = 107 \mu\text{F}$ , $A_U = 750$ .	(problemy 17 – 22)
7.	$R_1 = 8 \text{ k}\Omega$ , $R_2 = 11,2 \text{ k}\Omega$ .	(problem 27.)
8.	$R_1 = 922 \Omega$ , $R_2 = 385 \Omega$ .	(problem 27.)
9.	$U_C = 5 \text{ V}$ , $A_U = 10$ .	(problemy 28 – 30)
10.	$U_C = 6 \text{ V}$ , $A_U = 20$ .	(problemy 28 – 30)
11.	$U_C = 30 \text{ V}$ , $A_U = 15$ .	(problemy 28 – 30)
12.	Gdy w układzie pracuje kondensator, $A_U = 120 \cdot 800 = 96\,000$ . Gdy w układzie nie ma kondensatora, $A_U = 15 \cdot 20 = 300$ .	(problemy 17 – 22)
13.	$U_{GS} = -2,1 \text{ V}$ , $I_D = 5 \text{ mA}$ , $R_D = 2 \text{ k}\Omega$ .	(problemy 31 – 33)
14.	$A_U = -9,6$ .	(problem 39.)
15.	$U_{WE} = 83 \text{ mV}_{PP}$ .	(problem 38.)
16.	$U_{GS} = -1,4 \text{ V}$ , $I_D = 4 \text{ mA}$ . $R_S = 350 \Omega$ . $C_S = 4,5 \mu\text{F}$ (przyjmij $f = 1 \text{ kHz}$ ). $R_D = 3,15 \text{ k}\Omega$ .	(problem 42.)
17.	Napięcie $U_{GS}$ zmienia się od wartości $-1,39 \text{ V}$ do $-1,41 \text{ V}$ . Prąd $I_D$ zmienia się od $4,06 \text{ mA}$ do $3,94 \text{ mA}$ . Napięcie wyjściowe będzie wynosić $400 \text{ mV}_{PP}$ , $A_U = \frac{-400}{20} = -20$ .	(problem 42.)
18.	$A_U = -75$ , $U_{WY} = 3,75 \text{ V}$ .	(problem 45.)



## Generatory drgań

W tym rozdziale poznasz układy drgające, czyli tak zwane generatory drgań (oscylatory). **Generator drgań** to układ wytwarzający ciągły sygnał wyjściowy. W urządzeniach elektronicznych pojawiają się generatory różnych typów. Każdy z nich może generować innego rodzaju drgania — sinusoidalne, kwadratowe czy trójkątne.

Gdy sygnał wyjściowy ma kształt fali sinusoidalnej o stałej częstotliwości, obwód generujący go nazywamy **oscylatorem sinusoidalnym**. Sygnały nadajników radiowych i telewizyjnych to fale sinusoidalne rozchodzące się w powietrzu, napięcie 230 V podawane w gniazdkach w Twoim domu to również fala sinusoidalna. Z tego rodzaju drganiami będziesz spotykać się w elektronice bardzo często.

W tym rozdziale omówimy trzy podstawowe typy oscylatorów sinusoidalnych. Wszystkie one działają dzięki odpowiedniemu wykorzystaniu obwodu rezonansowego LC, który opisaliśmy w rozdziale 7. On właśnie będzie określać częstotliwość drgań generowanych przez oscylator.

Po zakończeniu pracy z tym rozdziałem będziesz potrafił:

- wymienić najważniejsze elementy obwodu generatora;
- wskazać różnice pomiędzy ujemnym a dodatnim sprzężeniem zwrotnym;
- określić rodzaj sprzężenia, dzięki któremu dany układ drga;
- podać przynajmniej dwa sposoby realizowania sprzężenia zwrotnego w układzie drgającym;
- wyjaśnić, dlaczego układ rezonansowy LC decyduje o częstotliwości drgań generatora;
- zaprojektować prosty układ generatora drgań.

## Jak działa generator drgań?

**1** Każdy generator drgań składa się z trzech ściśle określonych części — wzmacniacza, połączeń sprzężenia zwrotnego i elementów odpowiadających za określanie częstotliwości drgań.

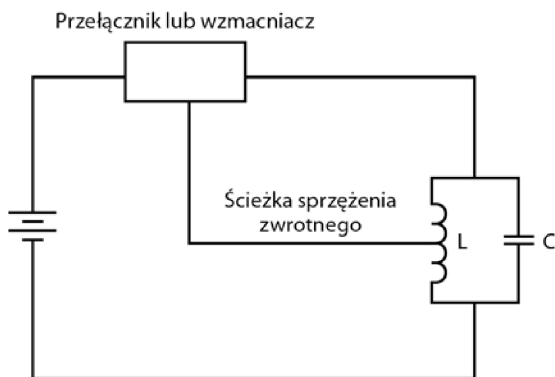
W miejsce przełącznika obwodu drgającego znanego Ci z problemu 35. z rozdziału 7. (rysunek 7.32) wstaw wzmacniacz.

### Zadanie

Narysuj układ oscylatora i opisz jego części. Rysunek przygotuj na osobnej kartce.

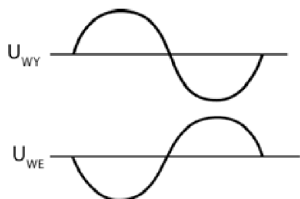
### Odpowiedź

Patrz rysunek 9.1.



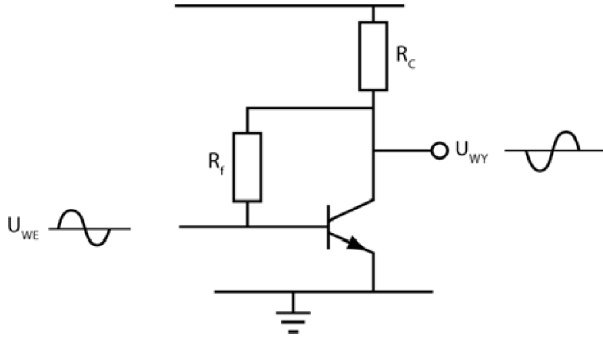
Rysunek 9.1

**2** Pętlę sprzężenia zwrotnego tworzy się, wprowadzając sygnał wyjściowy wzmacniacza do wejścia wzmacniacza. Jeżeli sygnał sprzężenia jest w przeciwfazie w stosunku do sygnału wejściowego, mówimy wtedy o **ujemnym** sprzężeniu zwrotnym (rysunek 9.2).



Rysunek 9.2

Gdy sygnał trafia z kolektora do bazy tranzystora, przechodząc przy tym przez opornik  $R_F$ , jak ma to miejsce w układzie przedstawionym na rysunku 9.3, pozostaje on w przeciwfazie do sygnału wejściowego. Oznacza to, że układ realizuje ujemne sprzężenie zwrotne.



Rysunek 9.3

Ujemne sprzężenie zwrotne pozwala ustabilizować pracę wzmacniacza dźwięku, ponieważ:

- zapobiega zmianom punktu pracy i wartości wzmocnienia w wyniku zmian temperatury pracy tranzystora;
- zmniejsza zniekształcenia generowane przez wzmacniacz, co znacznie podnosi jakość dźwięku.

### Zadania

- A. Dlaczego we wzmacniaczach dźwięku stosuje się sprzężenie zwrotne?
- B. Jakie sprzężenie zwrotne pojawia się w tego rodzaju wzmacniaczach?

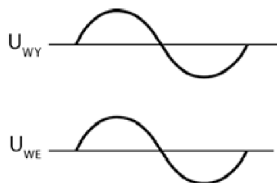
### Odpowiedzi

- A. Aby ograniczyć zniekształcenia.
- B. Ujemne sprzężenie zwrotne.

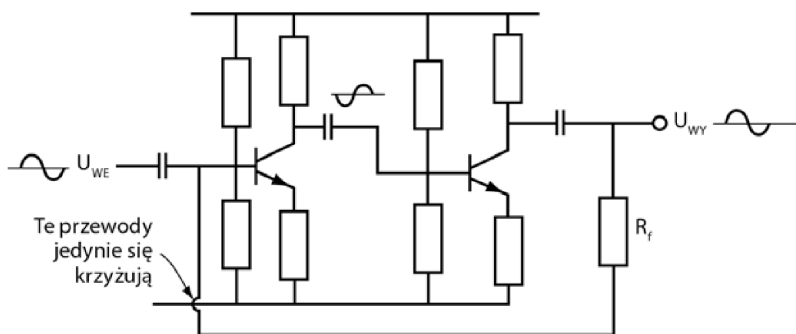
**3** Jeżeli sygnał sprzężenia jest w tej samej fazie co sygnał wejściowy, mówimy wtedy o  **dodatnim**  sprzężeniu zwrotnym (rysunek 9.4).

W obwodzie przedstawionym na rysunku 9.5 kolektor drugiego tranzystora jest połączony z bazą pierwszego. Ponieważ sygnał wyjściowy podawany przez kolektor drugiego tranzystora jest w tej samej fazie co sygnał wejściowy na bazie pierwszego tranzystora, ten układ realizuje dodatnie sprzężenie zwrotne.

Dodatnie sprzężenie zwrotne wywołuje w układzie drgania, nawet jeśli nie wchodzi do niego  **żaden sygnał zewnętrzny** .



Rysunek 9.4



Rysunek 9.5

### Zadania

- Jakiego rodzaju sprzężenie zwrotne jest wykorzystywane do stabilizowania wzmacniacza?
- Jakiego rodzaju sprzężenie jest wykorzystywane w generatorach drgań?
- Które części wzmacniacza należy połączyć, by wytworzyć sprzężenie zwrotne?

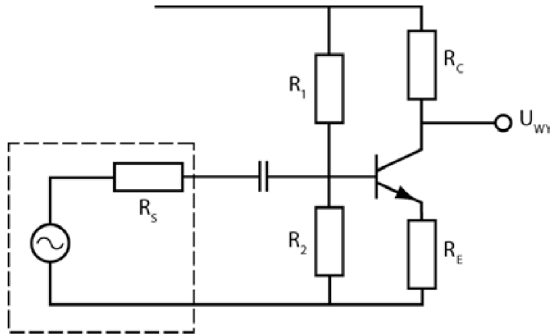
### Odpowiedzi

- Ujemne.
- Dodatnie.
- Łączy się wyjście wzmacniacza z jego wejściem.

**4** Wzmacniacz przedstawiony na rysunku 9.6 to obwód tego samego rodzaju, jaki badałeś w problemach 11 – 18 rozdziału 8. To tak zwany **wzmacniacz** pracujący w układzie **wspólnego emitera**.

### Zadania

- Jaki efekt uzyskaloby się, wywołując w tym obwodzie ujemne sprzężenie zwrotne?



Rysunek 9.6

- B. Jaki efekt uzyskaloby się, wywołując w tym obwodzie dodatnie sprzężenie zwrotne?

**Odpowiedzi**

- A. Układ zostanie ustabilizowany, spadnie poziom wzmocnienia i zmniejszą się zniekształcenia.  
 B. Układ zacznie drgać.

- 5** W układzie przedstawionym na rysunku 9.6 sygnał wejściowy podawany do bazy tranzystora dozna wzmocnienia.

**Zadania**

- A. Jakim wzorem opisuje się wzmocnienie napięciowe wzmacniacza?  
 B. Jakim wzorem opisuje się wzmocnienie napięciowe wzmacniacza przedstawionego na rysunku 9.6?

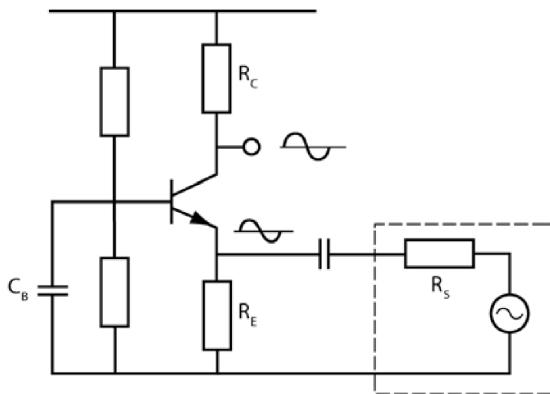
**Odpowiedzi**

A.  $A_U = \beta \cdot \frac{R_L}{R_{WE}}$

B.  $A_U = \frac{R_L}{R_E} = \frac{R_C}{R_E}$

(zgodnie z wyjaśnieniami zawartymi w problemie 12. rozdziału 8.).

**6** W obwodzie z rysunku 9.7 sygnał wejściowy jest wprowadzany nie — jak do tej pory — do bazy tranzystora, ale do jego emitera. Tego rodzaju układ nazywa się **wzmacniaczem wspólnej bazy**.



Rysunek 9.7

**UWAGA** Sygnał wprowadzony do emitera zmienia spadek napięcia na diodzie baza-emiter, tak jak zrobiłby to sygnał podany do bazy. Oznacza to, że sygnał podany do emitera zmieni prąd bazy oraz prąd kolektora w sposób, w jaki byłoby to zrealizowane po wprowadzeniu sygnału do bazy.

Wzór opisujący wzmocnienie napięciowe w tego rodzaju wzmacniaczach można znacznie uprościć, ponieważ impedancja wejściowa wzmacniacza, w którym sygnał jest wprowadzany do emitera, jest tak niska, że można pominąć ją w obliczeniach. W efekcie wzmocnienie napięciowe jest wyznaczane ze wzoru znanego Ci już z układu o wspólnej bazie:

$$A_U = \frac{R_L}{R_S}$$

Opór  $R_S$  to opór wyjściowy, czyli impedancja źródła lub generatora. Bardzo często nazywa się go także **impedancją wewnętrzną źródła**.

### Zadanie

Jakim wzorem opisuje się wzmocnienie napięciowe w układzie przedstawionym na rysunku 9.7?

#### Odpowiedź

$$A_U = \frac{R_L}{R_S} = \frac{R_C}{R_S} \quad (\text{bo } R_C \text{ jest obciążeniem układu}).$$

**7** Zauważ, że sygnały sinusoidalne, wejściowy i wyjściowy, zaznaczone na rysunku 9.7 pozostają w fazie. Sygnał wyjściowy, mimo że wzmacniony, nie jest odwrócony.

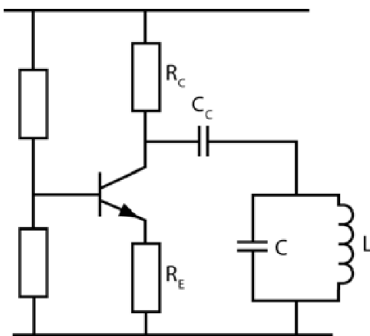
**Zadania**

- A. Jak zmienia się sygnał po przejściu przez wzmacniacz, jeśli został wprowadzony do emitera zamiast do bazy?
- B. Czy impedancja wejściowa wzmacniacza wspólnej bazy jest większa, czy mniejsza od impedancji wejściowej wzmacniacza wspólnego emitera?
- C. Jakim wzorem jest opisywane wzmacnienie napięciowe w układzie wspólnej bazy?

**Odpowiedzi**

- A. Sygnał jest wzmacniony, ale nie odwrócony.
- B. Mniejsza.
- C.  $A_U = \frac{R_L}{R_S} = \frac{R_C}{R_S}$ .

**8** Rysunek 9.8 przedstawia układ wzmacniacza z połączonymi równolegle cewką i kondensatorem, które znalazły się między kolektorem tranzystora a uziemieniem. Równoległe połączenie elementów LC nazywa się czasami **obciążeniem rezonansowym**.



**Rysunek 9.8**

Stały sygnał przepływający przez cewkę odczuwa bardzo niewielki opór, dlatego stałe napięcie na kolektorze spada niemal do zera. Po wprowadzeniu do obwodu kondensatora  $C_C$  sygnał zmienny może przepływać przez obwód LC bez ryzyka, że napięcie kolektora spadnie do zera.

**Zadania**

- A. Jak określa się obciążenie w przedstawionym obwodzie?  
 B. Czy w tym momencie układ zawiera wszystkie trzy elementy składające się na generator drgań?

**Odpowiedzi**

- A. To obciążenie rezonansowe.  
 B. Nie, brak w nim pętli sprzężenia zwrotnego.

**UWAGA** W obwodzie przedstawionym na rysunku 9.8 ani do emitera, ani do bazy nie trafia sygnał wejściowy. Gdy poprowadzisz ścieżkę sprzężenia zwrotnego do równoległe połączonych elementów LC, baza lub emiter zyskają sygnał wejściowy. Dokładniejsze wyjaśnienie znajdziesz w dalszej części rozdziału.

**9** Podaj wzory opisujące wzmocnienie napięciowe w opisanych poniżej przykładach. W razie potrzeby odwołaj się do opisów układów zamieszczonych w problemach 4 – 6.

**Zadania**

- A. Obwód wspólnego emitera:  
 B. Obwód wspólnej bazy:

**Odpowiedzi**

- A.  $A_U = \frac{R_C}{R_E}$ .  
 B.  $A_U = \frac{R_C}{R_S}$ .

**10** Wzmacniacze o wspólnym emiterze oraz wspólnej bazie są często wykorzystywane w układach drgających. Jednak w każdym przypadku dodaje się do takiego układu jeszcze jeden kondensator.

We wzmacniaczu pracującym w obwodzie wspólnego emitera wprowadza się kondensator  $C_E$ . Umieszcza się go pomiędzy emiterem a uziemieniem. Powody i skutki takiej modyfikacji zostały omówione w problemach 19. i 20. rozdziału 8.

We wzmacniaczu pracującym w obwodzie wspólnej bazy wprowadza się kondensator  $C_B$ . Umieszcza się go pomiędzy bazą a uziemieniem, co ilustruje rysunek 9.7.

### Zadanie

Jaki ogólny efekt osiąga się w obydwu przypadkach?

#### Odpowiedź

W ten sposób uzyskuje się wzrost wzmocnienia we wzmacniaczu.

Stopień wzmocnienia podnosi się do momentu osiągnięcia poziomu „dostatecznie dobrego”, by użyć wzmacniacza w obwodzie generatora. Po wprowadzeniu kondensatorów do wzmacniaczy pracujących w układach wspólnej bazy bądź wspólnego emitera zazwyczaj nie trzeba już wyznaczać wzmocnienia wzmacniacza.

**11** Obwód LC ma pewną częstotliwość rezonansową, którą można wyznaczyć, stosując metody opisane w problemach 6 – 12 rozdziału 7. Gdy obwód LC pracuje jako generator drgań, generowany przez niego sygnał będzie miał właśnie częstotliwość rezonansową obwodu LC.

### Zadanie

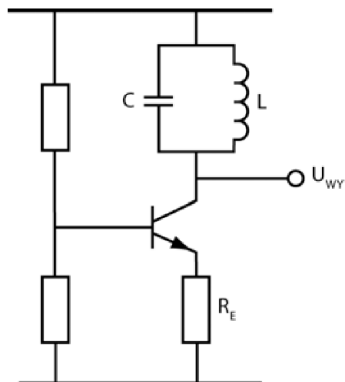
Podaj wzór wyrażający częstotliwość rezonansową drgań.

#### Odpowiedź

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Pamiętaj, że częstotliwość wyznaczana w czasie pomiarów nigdy nie równa się dokładnie obliczonej wartości. Wartości pojemności i indukcyjności nie są nigdy podawane ściśle, a każdy dodatkowo zmagazynowany ładunek elektryczny również wpływa na częstotliwość. Jeżeli zależy Ci na uzyskaniu precyzyjnie określonej wartości częstotliwości, musisz użyć kondensatora o regulowanej pojemności lub cewki o regulowanej indukcyjności.

**12** Rysunek 9.9 przedstawia obwód LC wstawiony między kolektor tranzystora a źródło napięcia, a nie — jak miało to miejsce w poprzednim przykładzie (rysunek 9.8) — między kolektor a uziemienie.



Rysunek 9.9

Obwody przedstawione na rysunkach 9.8 i 9.9 pozwalają wzmacniać wybraną częstotliwość w stopniu znacznie większym niż inne.

### Zadania

- Jak sądzisz, o którą częstotliwość chodzi?
- Zapisz wzór na impedancję obwodu pracującego z częstotliwością rezonansową.
- Jakim wzorem wyraża się wzmocnienie napięciowe dla tej częstotliwości?

### Odpowiedzi

A. O częstotliwość rezonansową.

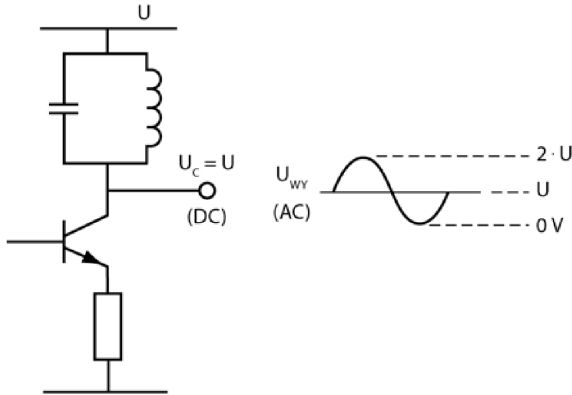
B.  $Z = \frac{L}{C \cdot r}$ , gdzie  $r$  jest oporem stawianym sygnałowi stałemu przez cewkę.

C.  $A_U = \frac{Z}{R_E}$ .

**13** Ponieważ cewka charakteryzuje się bardzo niską opornością wobec sygnału stałego, napięcie stałe na kolektorze jest zazwyczaj bardzo bliskie napięciu  $U$  podawanemu przez źródło. Dodatkowo zmienne napięcie wyjściowe może przekraczać poziom stałego napięcia zasilania. Jeśli sygnał wyjściowy będzie odpowiednio mocny, jego maksimum może osiągnąć nawet wartość  $2 \cdot U$ , co pokazaliśmy na rysunku 9.10.

### Zadanie

Wskaż, która z odpowiedzi dobrze opisuje układ przedstawiony na rysunku 9.10.



Rysunek 9.10

- A. Generator drgań.
- B. Wzmacniacz rezonansowy.
- C. Obwód o wspólnej bazie.
- D. Obwód o wspólnym emiterze.

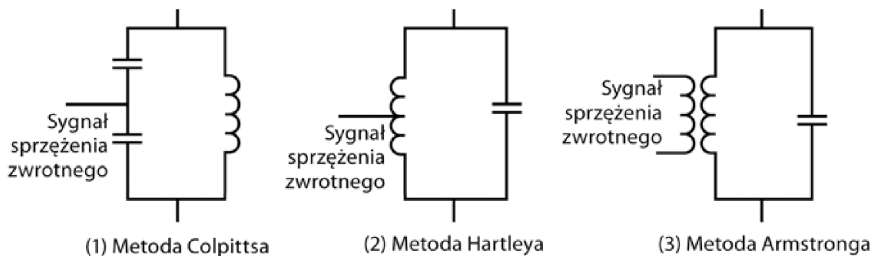
**Odpowiedź**

B.

**Sprężenie zwrotne**

**14** Aby wzmacniacz mógł pracować w charakterze generatora drgań, część sygnału wyjściowego musi zostać wprowadzona z powrotem do wejścia. Sygnał sprzężenia zwrotnego musi pozostawać w fazie z sygnałem wywołującym drgania.

Rysunek 9.11 przedstawia trzy metody dostarczania sygnału sprzężenia zwrotnego do równoległego obwodu LC. Każdy z tych projektów został nazwany nazwiskiem jego autora.



Rysunek 9.11

Metoda **Colpittsa** zakłada wprowadzanie sygnału sprzężenia zwrotnego, który jest pobierany spomiędzy dwóch kondensatorów. Kondensatory te tworzą dzielnik napięcia. Metoda **Hartleya** zakłada pobieranie sygnału z odczepu cewki. W tym rozwiązaniu to indukcyjny dzielnik napięcia określa wartość napięcia zwrotnego. W metodzie **Armstronga** sprzężenie jest realizowane poprzez transformator obniżający napięcie (cewkę o mniejszej liczbie zwojów niż na cewce głównej). Każda z tych metod zakłada wykorzystanie sygnału zwrotnego mieszczącego się w przedziale od jednej dziesiątej do połowy sygnału wyjściowego.

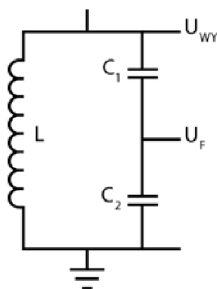
### Zadania

- A. Skąd jest pobierany sygnał sprzężenia zwrotnego w generatorze Colpittsa?
- B. Który z generatorów wykorzystuje w pętli sprzężenia zwrotnego napięcie pobierane z odczepu cewki?
- C. Który z generatorów nie korzysta z dzielnika napięcia?

### Odpowiedzi

- A. Z pojemnościowego dzielnika napięcia.
- B. Generator Hartleya.
- C. Generator Armstronga.

**15** Napięcie wyjściowe pojawia się na jednym z końców obwodu LC (rysunek 9.12). Drugi koniec jest uziemiony. Napięcie sprzężenia zwrotnego  $U_F$  jest pobierane spomiędzy obydwu kondensatorów.



Rysunek 9.12

### Zadanie

Wyznacz  $U_F$ , posługując się równaniem dzielnika napięcia.

**Odpowiedź**

$$U_F = \frac{U_{WY} \cdot X_{C2}}{X_{C1} + X_{C2}},$$

co przekształca się do postaci

$$U_F = \frac{U_{WY} \cdot C_1}{C_1 + C_2}.$$

**16** Aby określić częstotliwość rezonansową tego układu, musisz najpierw wyznaczyć pojemność zastępczą  $C_Z$  obydwu połączonych szeregowo kondensatorów. Potem będziesz mógł podstawić ją do wzoru opisującego częstotliwość rezonansową.

**Zadania**

- A. Podaj wzór na pojemność zastępczą w połączeniu szeregowym.  
 B. Jakim wzorem opisuje się częstotliwość rezonansową w generatorze Colpittsa?

**Odpowiedzi**

A.  $C_Z = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$

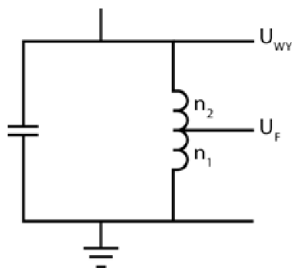
B.  $f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_Z}}$ , przy założeniu, że dobroć obwodu  $Q$  jest większa niż 10 bądź równa 10.

**UWAGA** Jeżeli dobroć obwodu jest mniejsza od 10, częstotliwość rezonansową połączonych równolegle elementów LC można wyznaczyć z jednego z podanych niżej wzorów:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2 \cdot C}{L}} \quad \text{lub} \quad f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{Q^2}{1 + Q^2}}.$$

**17** Rysunek 9.13 przedstawia obwód równolegle połączonych elementów LC, w którym napięcie sprzężenia zwrotnego jest pobierane z punktu dzielącego zwojnicę na dwa uzwojenia po  $n_1$  i  $n_2$  zwojów.

Wartość napięcia sprzężenia zwrotnego daje się w tym przypadku uzależnić od liczby zwojów na każdej z części zwojownicy. Po przekształceniu równania dzielnika napięcia uzyskujemy następującą zależność:



Rysunek 9.13

$$U_F = U_{WY} \cdot \frac{n_1}{n_1 + n_2}.$$

Wartości  $n_1$  i  $n_2$  powinny być podane w danych producenta generatora drgań.

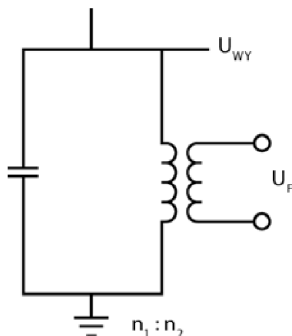
### Zadania

- Kto wymyślił tę metodę pobierania sygnału sprzężenia zwrotnego?
- Jaki wynik powinno dać podzielenie wartości  $U_F$  przez  $U_{WY}$ ?

### Odpowiedzi

- Hartley.
- Pomiędzy 0,1 a 0,5.

**18** Rysunek 9.14 przedstawia połączone równolegle cewkę i kondensator, z których napięcie sprzężenia zwrotnego pobiera się dzięki odpowiedniemu doborowi uzwojenia wtórnego transformatora. Wzór pozwalający obliczyć napięcie wyjściowe na drugim zwoju transformatora omówiliśmy szczegółowo w problemie 6. z rozdziału 10.



Rysunek 9.14

**Zadanie**

Kto wymyślił ten rodzaj generatora?

**Odpowiedź**

Armstrong.

**19** W każdej z opisywanych dotąd metod realizowania sprzężenia zwrotnego do wejścia generatora drgań jest wprowadzany sygnał będący częścią sygnału wyjściowego — waha się on od jednej dziesiątej do jednej drugiej  $U_{WY}$ .

Oznacza to, że aby układ drgał, iloczyn napięcia sprzężenia i wzmocnienia wytwarzanego przez wzmacniacz musi być większy od jedności:

$$A_U \cdot U_{WY} > 1.$$

Spełnienie tego warunku zazwyczaj nie nastręcza wielu trudności, gdyż wzmocnienie  $A_U$  jest przeważnie znacznie większe od 1.

Generator drgań nie potrzebuje do działania **zewnętrznego sygnału wejściowego**. Jego funkcję pełni niewielka część sygnału wyjściowego wprowadzanego z powrotem do obwodu w postaci sprzężenia zwrotnego. Jeżeli sygnał ten ma odpowiednią fazę i amplitudę, drgania rozpoczną się samoistnie i będą trwać, dopóki do układu będzie dostarczane napięcie zasilające.

Wzmacniacz tranzystorowy wzmacnia sygnał sprzężenia zwrotnego na tyle, by podtrzymać drgania, i przekształca sygnał stały z baterii lub zasilacza w zmienną moc drgań.

**Zadania**

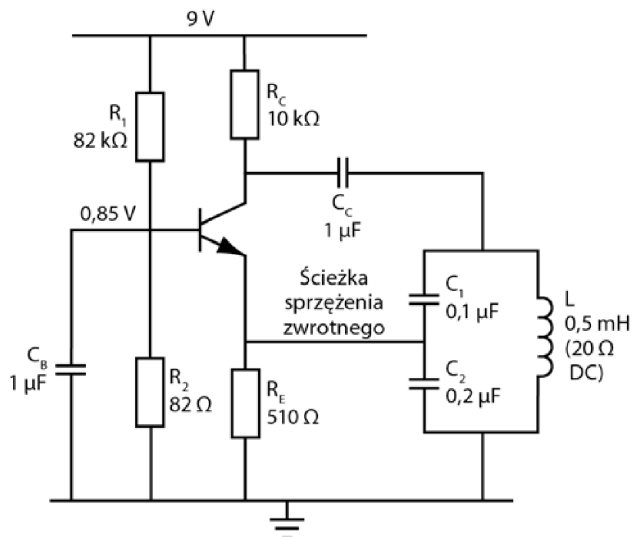
- A. Co przekształca układ wzmacniacza w generator drgań?  
 B. Jaki sygnał wejściowy jest potrzebny, by wzmacniacz stał się generatorem drgań?

**Odpowiedzi**

- A. Rezonansowy obwód LC z pętlą sprzężenia zwrotnego, który będzie dostarczać sygnał sprzężenia o odpowiedniej fazie i amplitudzie.  
 B. Żaden. Drgania pojawiają się spontanicznie, jeśli wprowadzany do wzmacniacza sygnał sprzężenia zwrotnego ma odpowiednie parametry.

## Generator Colpittsa

**20** Rysunek 9.15 przedstawia schemat budowy generatora Colpittsa, najprostszego z generatorów bazujących na drganiach obwodu LC.



**Rysunek 9.15**

Sygnal sprzężenia zwrotnego jest pobierany z pojemnościowego dzielnika napięcia, a następnie wprowadzany do emitera. Dzięki temu do emitera dociera sygnał będący w odpowiedniej fazie do wywołania dodatniego sprzężenia zwrotnego.

W omawianym obwodzie reaktancja kondensatora  $C_B$  jest na tyle niska, że sygnał zmienny woli przepływać przez kondensator niż przez opornik  $R_2$ . Reaktancja kondensatora  $C_B$ ,  $X_{CB}$ , powinna być mniejsza niż  $160 \Omega$  dla częstotliwości drgań. Jeżeli opór  $R_2$  będzie mniejszy niż  $1,6 \text{ k}\Omega$ , dobierz kondensator tak, by jego reaktancja była mniejsza niż jedna dziesiąta wartości  $R_2$ .

### Zadanie

Wyznacz pierwsze przybliżenie pojemności kondensatora  $C_B$ . Przyjmij, że  $f_R$  to  $1 \text{ kHz}$ , a  $X_C = 160 \Omega$ .

### Odpowiedź

$$X_{CB} = 160 \Omega = \frac{1}{2\pi f C_B} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot C_B}$$

Zatem  $C_B = 1 \mu\text{F}$ . Większe wartości  $C_B$  również będą sprawdzać się w tym obwodzie.

**21** Wykorzystaj wartości podane na rysunku 9.15, by odpowiedzieć na zadane niżej pytania.

### Zadania

A. Ile wynosi całkowita pojemność dwóch połączonych szeregowo kondensatorów pracujących w układzie rezonansowym?

$$C_T =$$

B. Ile wynosi częstotliwość drgań?

$$f_R =$$

C. Ile wynosi impedancja obwodu rezonansowego przy tej częstotliwości?

$$Z =$$

D. Jaka część sygnału wyjściowego jest wykorzystywana w sprzężeniu zwrotnym?

$$U_F =$$

E. Ile wynosi reaktancja kondensatora  $C_B$  dla wyznaczonej częstotliwości drgań?

$$X_{CB} =$$

### Odpowiedzi

A.  $C_T = 0,067 \mu\text{F}$ .

B. Ponieważ nie znamy dobroci obwodu, należy skorzystać ze wzoru, w którym pojawia się opór cewki (patrz problem 16.):

$$f_R = 26,75 \text{ kHz}.$$

Znając częstotliwość rezonansową obwodu, możesz wyznaczyć jego dobroć w sposób znany Ci z problemu 20. z rozdziału 8. Dla tego obwodu  $Q = 4,2$ , zatem użycie wzoru zależnego od oporności cewki było całkowicie uzasadnione.

C. Ze wzoru:

$$Z_T = \frac{L}{r \cdot C}$$

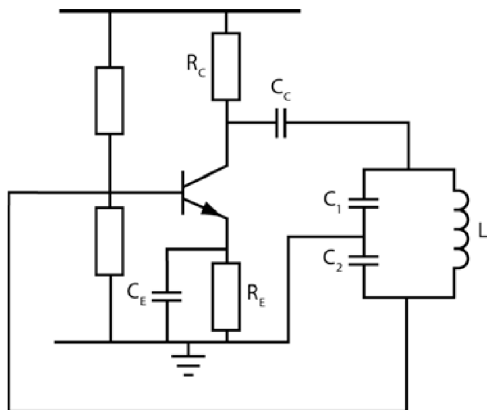
$$Z_T = 373 \Omega.$$

D. Ze wzoru opisującego pojemnościowy dzielnik napięcia:

$$U_F = U_{WY} \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{U_{WY}}{3}.$$

E. Reaktancja  $X_{CB}$  wynosi w przybliżeniu  $6 \Omega$ , co jest bardzo dobrym wynikiem (znacznie mniejszym niż opór  $8200 \Omega$  opornika  $R_2$ ).

**22** Rysunek 9.16 przedstawia schemat generatora Colpittsa, w którym sprzężenie zwrotne między połączonymi równolegle elementami LC i tranzystorem jest realizowane nieco inaczej.



Rysunek 9.16

### Zadanie

Podaj różnice między tym obwodem a układem znanym Ci z rysunku 9.15.

### Odpowiedź

Sygnal sprzężenia zwrotnego jest przekazywany do bazy, a nie do emitera, z kolei uziemienie prowadzi do środka pojemnościowego dzielnika napięcia. Dodatkowo w układzie znalazł się kondensator  $C_E$  (dzięki niemu sygnał ma właściwą fazę, by wywołać sprzężenie zwrotne).

**23** Reaktancja kondensatora  $C_E$  widocznego w układzie przedstawionym na rysunku 9.16 nie powinna przekraczać  $160 \Omega$  przy pracy w częstotliwości drgań. Jeżeli opornik emitera ( $R_E$ ) ma wartość mniejszą niż  $1,6 \text{ k}\Omega$ , pojemność  $C_E$  należy dobrać tak, by nie przekraczała jednej dziesiątej wartości oporu  $R_E$  dla drgań z częstotliwością rezonansową.

### Zadanie

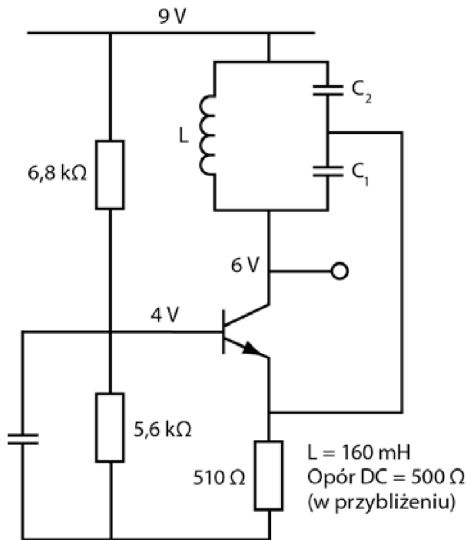
Jaką pojemność powinien mieć kondensator  $C_E$ , jeśli opornik emitera ma pojemność  $510 \Omega$ , a generator drga z częstotliwością  $1 \text{ kHz}$ ?

**Odpowiedź**

$$X_C = \frac{510}{10} = \frac{1}{2\pi f C_E} = \frac{0,16}{10^3 \cdot C_E}$$

Zatem  $C_E = 3,2 \mu\text{F}$ , co oznacza, że powinniśmy użyć kondensatora o pojemności większej niż  $3 \mu\text{F}$ .

**24** Rysunek 9.17 przedstawia generator Colpittsa z obwodem równoległe połączonych elementów LC włączonych pomiędzy kolektor i zasilacz. Również w tym obwodzie realizowane jest pozytywne sprzężenie zwrotne — sygnał o odpowiedniej fazie jest wprowadzany do emitera tranzystora.



**Rysunek 9.17**

Poniższa tabela zawiera wszystkie możliwe wartości pojemności kondensatorów  $C_1$  i  $C_2$ , jakie mogą być wykorzystane w układzie przedstawionym na rysunku 9.17.

$C_1$	$C_2$	$C_T$	$f_R$
0,01 $\mu\text{F}$	0,1 $\mu\text{F}$		
0,01 $\mu\text{F}$	0,2 $\mu\text{F}$		
0,01 $\mu\text{F}$	0,3 $\mu\text{F}$		
0,1 $\mu\text{F}$	1 $\mu\text{F}$		
0,2 $\mu\text{F}$	1 $\mu\text{F}$		

**Zadania**

- A. Dla każdej pary wartości  $C_1$  i  $C_2$  wyznacz wartości  $C_T$  i  $f_R$ .
- B. Jak zmienia się częstotliwość rezonansowa, gdy przy ustalonej wartości  $C_1$  zmienia się wartość  $C_2$  — rośnie czy maleje?
- C. Jaki wpływ na wartość częstotliwości rezonansowej ma zwiększanie pojemności  $C_1$ ?
- D. Jaki warunek musi być spełniony, by układ pracował z najwyższą możliwą częstotliwością rezonansową?
- E. Jaka byłaby wartość najwyższej częstotliwości rezonansowej, gdyby  $C_1 = 0,01 \mu\text{F}$ , a pojemność  $C_2$  zmieniałaby się od  $0,005 \mu\text{F}$  do  $0,5 \mu\text{F}$ ?

**Odpowiedzi**

A. Wartości  $C_T$  i  $f_R$  są przedstawione w tabeli.

$C_1$	$C_2$	$C_T$	$f_R$
0,01 $\mu\text{F}$	0,1 $\mu\text{F}$	0,009 $\mu\text{F}$	4,19 kHz
0,01 $\mu\text{F}$	0,2 $\mu\text{F}$	0,0095 $\mu\text{F}$	4,08 kHz
0,01 $\mu\text{F}$	0,3 $\mu\text{F}$	0,0097 $\mu\text{F}$	4,04 kHz
0,1 $\mu\text{F}$	1 $\mu\text{F}$	0,09 $\mu\text{F}$	1,33 kHz
0,2 $\mu\text{F}$	1 $\mu\text{F}$	0,167 $\mu\text{F}$	0,97 kHz

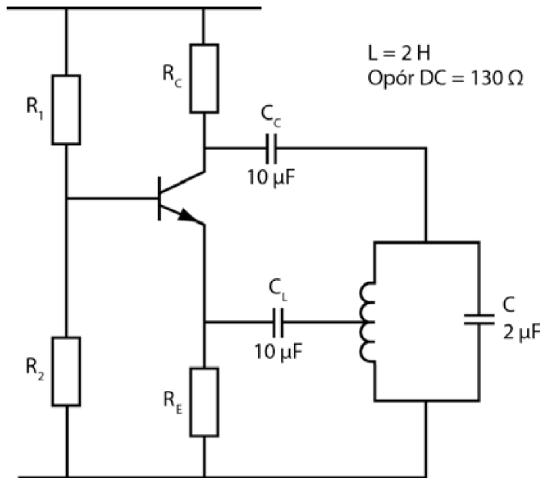
- B. Zwiększanie pojemności  $C_2$  zmniejsza częstotliwość rezonansową, zmniejszając w ten sposób częstotliwość sygnału generowanego przez oscylator.
- C. Zwiększanie pojemności  $C_1$  również zmniejsza częstotliwość rezonansową, a zatem i częstotliwość sygnału wyjściowego generatora.
- D. Gdy  $C_T$  ma najmniejszą możliwą wartość.
- E. Dla  $C_2$  równego  $0,005 \mu\text{F}$   $C_T$  wynosi  $0,0033 \mu\text{F}$ , co jest jego najmniejszą możliwą wartością. Oznacza to, że generowany sygnał ma wtedy największą możliwą częstotliwość, około 6,9 kHz. Najniższa częstotliwość drgań występuje dla  $C_2 = 0,5 \mu\text{F}$  (maksymalnej dopuszczalnej wartości).

**Doświadczenie dodatkowe**

Jeżeli dysponujesz oscyloskopem, możesz spróbować zbudować generator, którego schemat przedstawiliśmy na rysunku 9.17, i sprawdzić, czy wyniki pomiarów zgadzają się z przewidywaniami teoretycznymi. Jeśli uzyskane wyniki nie będą odbiegać od obliczeń o więcej niż 20%, możesz uznać je za dopuszczalne. Pamiętaj też, że czasami przebieg sygnału bywa zniekształcony.

## Generator Hartleya

**25** Rysunek 9.18 przedstawia schemat budowy generatora Hartleya. Sygnał sprzężenia zwrotnego jest w nim pobierany z odczepu cewki.



**Rysunek 9.18**

Kondensator  $C_L$  uniemożliwia zabicie stałego napięcia emitera do wartości 0 V. Reaktancja kondensatora  $C_L$  nie powinna być większa niż jedna dziesiąta oporu  $R_E$  ani nie powinna przekraczać  $160 \Omega$  dla podanej częstotliwości sygnału.

### Zadania

Wykonaj następujące obliczenia:

A. Wyznacz częstotliwość rezonansową.

$$f_R =$$

B. Ile w przybliżeniu wynosi impedancja obciążenia?

$$Z =$$

C. Jakich informacji brakuje, by obliczyć, jaka część sygnału wyjściowego jest przekazywana do wejścia w postaci sygnału sprzężenia zwrotnego?

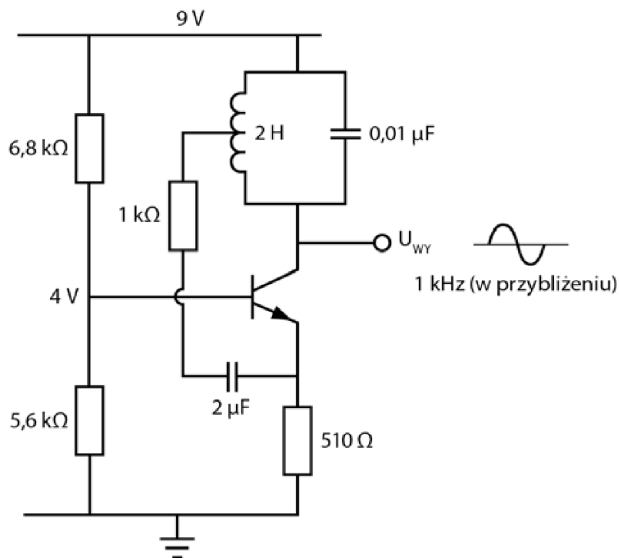
### Odpowiedzi

A. W przybliżeniu 80 Hz.

B. W przybliżeniu 7,7 k $\Omega$ .

C. Nie znasz liczby zwojów cewki i położenia odczepu.

Rysunek 9.19 przedstawia generator Hartleya z równolegle połączonymi elementami LC umieszczonymi między kolektorem a zasilaczem. Podobnie jak w przypadku obwodu przedstawionego na rysunku 9.18, również tutaj sygnał sprzężenia zwrotnego trafia do emitera z odczepu cewki. Jego faza pozwala na wywołanie dodatniego sprzężenia zwrotnego.



**Rysunek 9.19**

Dobieranie pojemności kondensatorów w generatorach Colpittsa jest wyjątkowo łatwe. Jeśli układ nie generuje drgań, wystarczy wymieniać kondensatory do momentu, w którym wzbudzą się w nim oscylacje. Potem można wymienić je na inne, o zbliżonych parametrach, które dadzą drgania o żądanej częstotliwości.

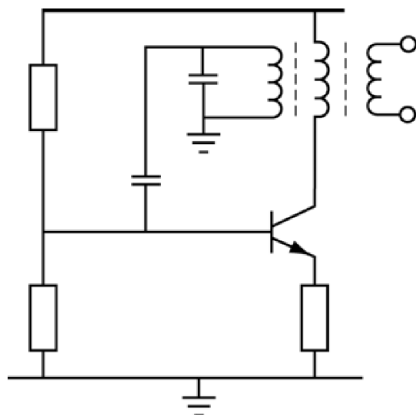
W generatorze Hartleya, w którym sygnał sprzężenia zwrotnego jest wyrowadzany odczepem zwojniczy, osiągnięcie różnych napięć sprzężenia nie jest tak proste. Współczynnik sprzężenia jest w nim wartością stałą, ponieważ nie ma możliwości dodania nowego odczepu czy zmienienia liczby zwojów.

## Generator Armstronga

Zaprojektowanie i zbudowanie generatora Armstronga (rysunek 9.20) jest nieco trudniejsze.

W tym układzie drgania zależą przede wszystkim od uzwojenia cewki.

Ponieważ na rynku dostępnych jest wiele modeli transformatorów i cewek, podanie prostego sposobu na zaprojektowanie generatora Armstronga jest



Rysunek 9.20

w zasadzie niemożliwe. Dlatego producenci ograniczają się do podania liczby zwojów cewek, która zapewni poprawne działanie układu w jego typowych warunkach pracy — przy wysokich częstotliwościach radiowych.

Z powodu tych utrudnień nie będziemy zajmować się dalej odmianami generatora Armstronga.

## Projektowanie generatora drgań

**26** W tym podrozdziale omówimy krótko praktyczne strony pracy nad generatorem drgań i często spotykane problemy.

Zanim zaczniesz czytać dalej, przypomnij sobie najważniejsze zagadnienia z tego rozdziału i rozwiąż podane niżej zadania.

### Zadania

- Z jakich trzech elementów składa się każdy generator?
- Jakie czynniki decydują o częstotliwości drgań sygnału wyjściowego generatora?
- Co zapewnia realizację sprzężenia zwrotnego?
- Ile metod realizowania sprzężenia zwrotnego w generatorach zaprezentowaliśmy w tym rozdziale?
- Co jest potrzebne do wywołania drgań w gotowym obwodzie generatora?

### Odpowiedzi

- Wzmacniacz, obwód rezonansowy LC (lub inne komponenty, których praca zależy od częstotliwości) i pętla sprzężenia zwrotnego.

- B. Częstotliwość sygnału wyjściowego jest równa częstotliwości rezonansowej.
- C. Dzielnik napięcia w układzie rezonansowym.
- D. Trzy — Colpittsa, Hartleya i Armstronga.
- E. Nic. Drgania powinny rozpocząć się spontanicznie, o ile komponenty układu zostały poprawnie dobrane.

Głównym problemem, z jakim spotkasz się, projektując generator, jest dobór odpowiedniej cewki. Producenci generatorów mogą pozwolić sobie na zaprojektowanie odpowiedniego elementu i zamówienie go w takiej postaci, w jakiej jest im potrzebny. Jednak w pracowni szkolnej lub domowym laboratorium buduje się tylko jeden układ, więc dobranie dokładnie takiego elementu indukcyjnego, jaki został określony w specyfikacji producenta, jest bardzo trudne, a czasami wręcz niemożliwe. Zazwyczaj zatem najpierw wybiera się cewkę — najczęściej tę najłatwiej dostępną — i do niej dobiera pozostałe elementy układu. W związku z tym powinieneś liczyć się z trzema podstawowymi problemami:

- możesz nie znać dokładnej wartości indukcyjności cewki;
- cewka, którą będziesz dysponować (a w zasadzie jej indukcyjność), może nie być odpowiednia dla wybranej częstotliwości;
- cewka może nie mieć odczepów ani możliwości dodawania zwojów, co powoduje pewne komplikacje — na przykład bez odczepów nie da się skonstruować generatora Hartleya.

Ponieważ najprościej jest zbudować generator Colpittsa, najłatwiej też wyjaśniać na jego przykładzie pewne praktyczne trudności w pracy nad tego typu układami, skupimy się teraz na tym rodzaju generatora.

Do zbudowania generatora Colpittsa nada się dowolna zwojnica, która będzie spełniać Twoje oczekiwania, jeśli chodzi o częstotliwość generowanego sygnału. Przykładowo cewka z odbiornika telewizyjnego nie nada się do zbudowania generatora drgań o częstotliwości 1 kHz, ponieważ jej indukcyjność będzie wykraczać poza zakres pozwalający na pracę w generatorze drgań o niskich częstotliwościach.

### Jak zaprojektować prosty generator drgań?

**27** Poniżej znajdziesz opisane krok po kroku czynności, które należy wykonać, by zaprojektować generator Colpittsa. Układ ten będzie wytwarzać drgania z szerokiego spektrum częstotliwości. (Bardzo podobnie buduje się generator Hartleya).

Postępując zgodnie z naszymi wskazówkami, zdołasz przygotować układ, który będzie sprawdzać się w większości zastosowań. Istnieje też procedura pozwalająca zbudować generator działający zawsze, ale jest ona znacznie bardziej skomplikowana.

Jeśli nie masz zamiaru składać tego obwodu, przyjmij podane tu wartości i wykorzystaj je do narysowania odpowiedniego układu.

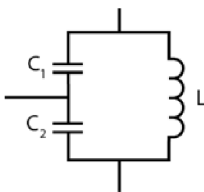
Oto, co powinieneś zrobić:

1. Określ częstotliwość sygnału wyjściowego generatora.
2. Dobierz stosowną cewkę. Ten krok nastęcza najwięcej trudności. Niektóre wartości indukcyjności są bardzo trudno dostępne, więc przypuszczalnie będziesz musiał zadowolić się tym, co zdołasz zdobyć. Na szczęście projekt ten nie wymaga dobrania ściśle określonej wartości indukcyjności, więc powinieneś móc osiągnąć żadaną częstotliwość rezonansową za pomocą odpowiedniego doboru kondensatorów.
3. Jeśli znasz wartość indukcyjności cewki, oblicz potrzebną Ci pojemność kondensatora z podanego niżej wzoru:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Na podstawie tej wielkości wyznaczysz w kilku następnym krokach pojemność kondensatora  $C_1$ .

4. Jeżeli nie znasz wartości indukcyjności, wybierz dowolną wartość pojemności i nazwij ją  $C_1$ . W ten sposób uzyskasz zapewne zupełnie inną częstotliwość, niż jest Ci potrzebna, ale na tym etapie chodzi przede wszystkim o wywołanie drgań w układzie. Regulacją parametrów możesz zająć się później.
5. Wybierz kondensator  $C_2$  tak, by jego pojemność była od trzech do dziesięciu razy większa od pojemności kondensatora  $C_1$ . Rysunek 9.21 przedstawia sposób połączenia cewki i kondensatorów w układ równoległych elementów LC, w którym kondensatory będą pełnić funkcję dzielnika napięcia.



**Rysunek 9.21**

Przerwiemy teraz na chwilę, by poczynić kilka założeń. Przyjmijmy, że generator ma wytwarzać sygnał o częstotliwości 10 kHz, a my dysponujemy cewką o indukcyjności 16 mH.

**Zadania**

- A. Jaką wartość powinna mieć w przybliżeniu pojemność kondensatora  $C_1$ ?  
 B. Jaką wartość musi mieć pojemność kondensatora  $C_2$ ?

**Odpowiedzi**

- A.  $C_1 = 0,016 \mu\text{F}$ .  
 B.  $C_2 = 0,048 \mu\text{F}$  do  $0,16 \mu\text{F}$ .

**28** Wróćmy do projektowania układu generatora.

6. Przyjmij, że wzmocnienie sygnału ma być przeciętnej wielkości, na przykład około 20. Niech stałe napięcie na kolektorze będzie równe mniej więcej połowie napięcia zasilającego. Musisz przede wszystkim pamiętać, że opór opornika przy kolektorze  $R_C$  nie powinien przekraczać wartości jednej dziesiątej impedancji układu LC dla częstotliwości rezonansowej. Dobranie tej wartości sprawia sporo problemów, szczególnie jeśli nie zna się dokładnej indukcyjności cewki. Zazwyczaj będziesz musiał po prostu przyjąć pewną wartość, więc wybranie oporu  $R_C$  jest w dużej mierze dowolne.
7. Złóż układ przedstawiony na rysunku 9.15.
8. Oblicz wartość  $C_C$ . W tym celu przyjmij, że dla żądanej częstotliwości  $X_C$  ma być równe  $160 \Omega$  — to kolejna z praktycznych zasad, którą potrafimy uzasadnić matematycznie. Wartość  $C_C$  wyznacz ze wzoru:

$$C_C = \frac{1}{2\pi f_R X_C}.$$

**Zadanie**

Podstaw do równania odpowiednie wartości i wyznacz z niego  $C_C$ .

**Odpowiedź**

$$C_C = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \text{ kHz} \cdot 160 \Omega} = 0,1 \mu\text{F}.$$

**29** Wykonaj ostatnie zadanie projektu.

9. Oblicz wartość pojemności  $C_B$ . Ponownie przyjmij, że dla żądanej częstotliwości  $X_C$  ma być równe  $160 \Omega$ .

## Zadanie

Ile wynosi pojemność kondensatora  $C_B$ ?

### Odpowiedź

$$C_B = 0,1 \mu\text{F}.$$

**30** Przystąp do pracy z układem.

10. Podłącz obwód do zasilania i sprawdź sygnał wyjściowy na oscyloskopie. Jeśli układ drga, sprawdź, z jaką częstotliwością. Jeśli różni się ona zasadniczo od żądanej, zmieniaj wartość pojemności  $C_1$ , dopóki nie osiągniesz właściwego rezultatu. Jednocześnie zmieniaj pojemność  $C_2$  tak, by stosunek obydwu pozostawał zgodny z parametrami podanymi w kroku 5. Pamiętaj, że zmienianie  $C_2$  wpływa na poziom sygnału wyjściowego.
11. Jeśli obwód nie drga, zapoznaj się z punktami podanymi w podrozdziale „Typowe trudności z uruchomieniem generatora”.

## Doświadczenie dodatkowe

Gdy uda Ci się uruchomić generator, możesz spróbować prowadzić pomiary dalej. Spróbuj teraz podłączyć pętlę sprzężenia zwrotnego do bazy zamiast do emitera (rysunek 9.16). W tym przypadku również należy wyznaczyć wartość kondensatora  $C_E$ . Przyjmij, że dla wybranej częstotliwości  $X_C = 160 \Omega$ .

## Typowe trudności z uruchomieniem generatora

Jeśli generator nie działa, należy przede wszystkim sprawdzić połączenia pętli sprzężenia zwrotnego. Zapoznaj się z punktami poniższej listy — w poradach 2 – 6 znajdziesz praktyczne podpowiedzi, które najprawdopodobniej pozwolą Ci uruchomić generator. Uwagi te znajdują zastosowanie szczególnie wtedy, gdy nie znasz dokładnej indukcyjności cewki, która oferuje kilka odczepów, ale warto odwoływać się do nich zawsze, gdy pojawią się problemy z uruchomieniem generatora.

1. Upewnij się, że kondensatory  $C_B$ ,  $C_C$  i  $C_E$  są odpowiednio duże, by ich reaktancja była mniejsza od  $160 \Omega$ . Sprawdź, czy  $C_E$  ma reaktancję mniejszą od jednej dziesiątej oporu  $R_E$ .
2. Sprawdź stosunek  $C_1/C_2$ . Jego wartość powinna mieścić się w granicach 3:1 a 10:1.

3. Przetwórz kondensatory  $C_1$  i  $C_2$ . Mogą być podłączone z nieodpowiedniej strony układu LC.
4. Sprawdź, czy pętla sprzężenia zwrotnego rozpoczyna się we właściwym miejscu i czy trafia do odpowiedniej końcówki wzmacniacza.
5. Sprawdź, czy końcówki obwodu LC są właściwie podłączone.
6. Sprawdź napięcie stałe na kolektorze, bazie i emiterze.
7. Sprawdź pojemności w układzie LC. Spróbuj wstawić tam elementy o innych pojemnościach, przy których układ może zacząć drgać.
8. Jeśli żadna z powyższych rad nie przyniosła efektu, sprawdź, czy wszystkie komponenty układu są sprawne. Cewka może być przerwana lub zwarta. Zwarcie może pojawić się także na kondensatorze. Tranzystor może być uszkodzony lub wartość jego  $\beta$  może być zbyt niska. Sprawdź też przewody.

W większości przypadków wystarczy wprowadzić jedną z opisanych tu modyfikacji (rzadziej koniecznych jest kilka), by układ zaczął działać.

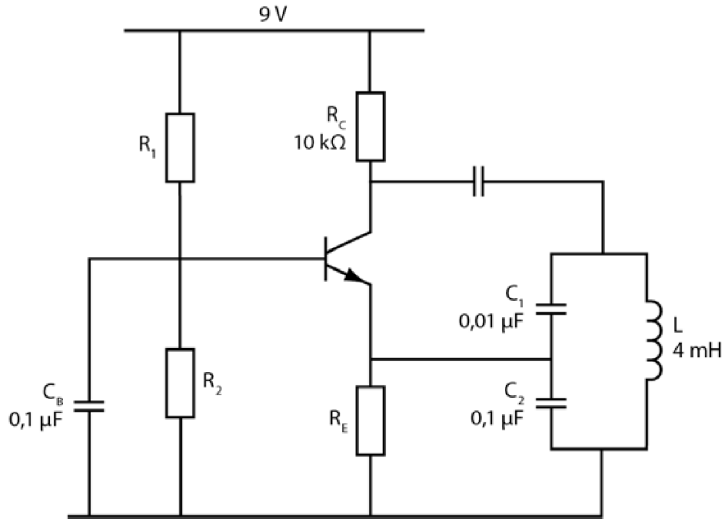
Pamiętaj jednak, że nawet sprawny generator może sprawiać pewne problemy.

- **Zniekształcony sygnał wyjściowy** pojawia się, gdy pojemności  $C_B$ ,  $C_C$  lub  $C_E$  są zbyt małe lub gdy amplituda sygnału wyjściowego jest zbyt duża.
- **Zbyt słaby sygnał wyjściowy** jest najczęściej spotykany w generatorach wytwarzających czystą falę sinusoidalną. W generatorze Colpittsa zazwyczaj pomaga zmiana stosunku pojemności  $C_1$  do  $C_2$ . Jeśli to nie pomoże, spróbuj wymienić tranzystor wzmacniacza, dobierając go zgodnie z zasadami omówionymi w problemie 21. z rozdziału 8.

**31** Wykonaj teraz przykładowe obliczenia. Zaprojektuj i zbuduj generator o częstotliwości wyjściowej 25 kHz, wykorzystując cewkę o indukcyjności 4 mH. Odwołuj się do kroków opisanych w problemach 27 – 30 zgodnie z poleceniami poszczególnych zadań.

### Zadania

1. Wartość  $f_R$  jest znana — wynosi 25 kHz.
2.  $L$  jest wartością znaną — wynosi 4 mH.
3. Wyznacz wartość  $C_1$ .
4. Możesz pominąć ten krok.
5. Wybierz wartość  $C_2$ .
6. Procedura projektowania wzmacniacza została opisana w rozdziale 8.
7. Obwód został przedstawiony na rysunku 9.22.
8. Wyznacz  $C_C$ .
9. Wyznacz  $C_B$ .



Rysunek 9.22

### Odpowiedzi

$$C_1 = 0,01 \mu\text{F}.$$

$$C_2 = 0,1 \mu\text{F}.$$

$$C_C = 0,047 \mu\text{F} \text{ (użyj kondensatora o pojemności } 0,1 \mu\text{F)}.$$

$$C_B = 0,047 \mu\text{F} \text{ (użyj kondensatora o pojemności } 0,1 \mu\text{F)}.$$

Kroki 10 – 11 pozwalają się przekonać, czy generator działa poprawnie. Jeżeli budowałeś ten układ, sprawdź też kroki 10 – 11. Jeśli ograniczyłeś się do rozważań teoretycznych, możesz je opuścić.

**32** Rysunek 9.22 przedstawia układ zaprojektowany w problemie 31.

Pomiary wykonane dla tego obwodu potwierdzają, że generuje on drgania o częstotliwości bliskiej 25 kHz.

### Zadanie

Znajdź impedancję obwodu LC dla częstotliwości rezonansowej. Przyjmij  $r$  (rezystancja opornika dla sygnału stałego) równe 12  $\Omega$ .

### Odpowiedź

$$Z = \frac{L}{C \cdot r} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{0,01 \cdot 10^{-6} \cdot 12} = 33 \text{ k}\Omega \text{ (w przybliżeniu).}$$

**33** Jeśli chcesz, możesz wykonać obliczenia dla kolejnego przykładu projektu. Przygotuj układ generatora pracującego z częstotliwością 250 kHz, w którym będzie pracować 500  $\mu\text{H}$ .

### Zadania

1.  $f_R = 250 \text{ kHz}$ .
2.  $L = 500 \mu\text{H} = 0,5 \text{ mH}$ .
3. Wyznacz wartość  $C_1$ .
4. Możesz pominąć ten krok.
5. Wybierz wartość  $C_2$ .
6. Użyj tego samego wzmacniacza, który zaprojektowałeś w poprzednim przykładzie.
7. Obwód został przedstawiony na rysunku 9.23.
8. Wyznacz  $C_C$ .
9. Wyznacz  $C_B$ .

### Odpowiedzi

$C_1 = 0,0008 \mu\text{F}$ . Użyj kondensatora o standardowej pojemności 0,001  $\mu\text{F}$ .  
 $C_2 = 0,0047 \mu\text{F}$ . To standardowa pojemność.  
 $C_B = C_C = 0,004 \mu\text{F}$  (wartość minimalna).

**34** Schemat zaprojektowanego generatora został przedstawiony na rysunku 9.23.

Wykonane pomiary potwierdzają, że pracuje on z częstotliwością 250 kHz.

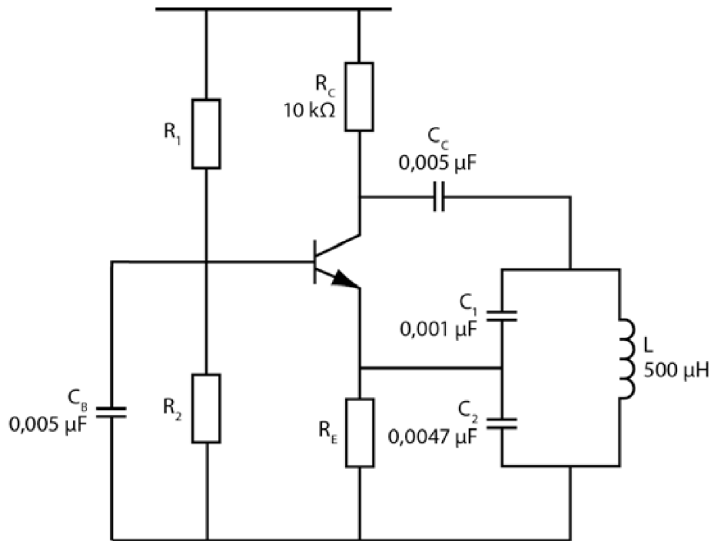
### Zadanie

Znajdź impedancję obwodu LC dla częstotliwości rezonansowej. Przyjmij  $r$  (rezystancja opornika dla sygnału stałego) równe 20  $\Omega$ .

### Odpowiedź

$Z = 30 \text{ k}\Omega$ .

Zgodnie z sugestią w kroku 6. z problemu 28. wartość ta powinna być około dziesięć razy większa od wartości oporu  $R_C$ , tymczasem jest większa około trzykrotnie.



Rysunek 9.23

**35** Rysunek 9.24 przedstawia kilka innych schematów generatorów. Oblicz częstotliwości, z jakimi powinny one pracować. Jeśli chcesz, możesz spróbować zbudować je po kolei. W takim przypadku wykonaj pomiary, które sprawdzą wyliczenia teoretyczne.

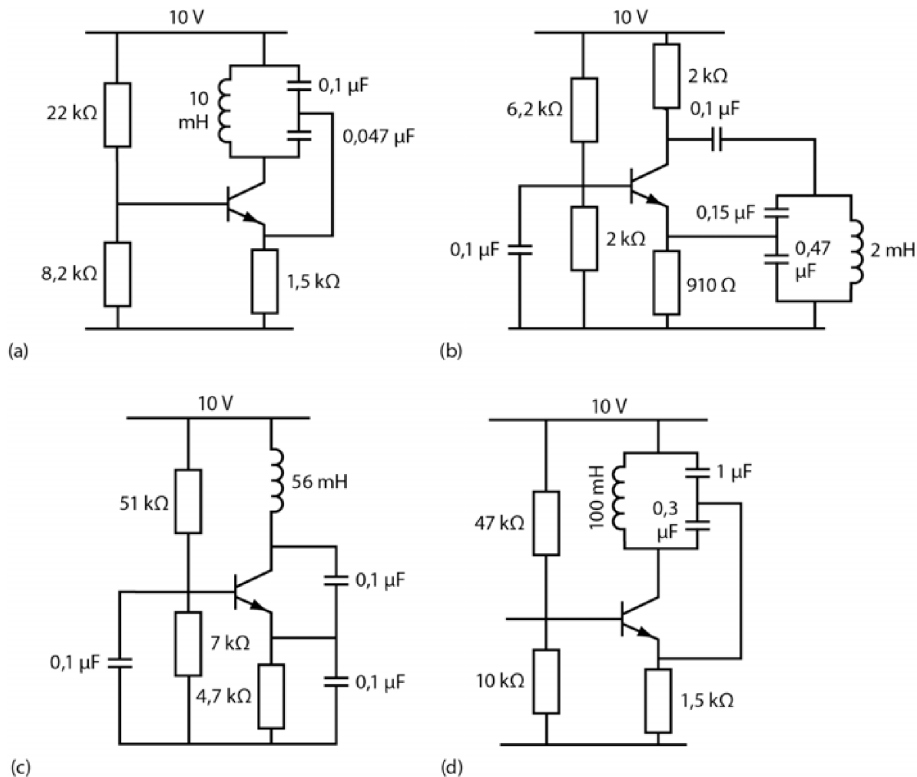
### Zadania

Ile wynosi częstotliwość sygnału wyjściowego w każdym z obwodów?

- A.  $f =$
- B.  $f =$
- C.  $f =$
- D.  $f =$

### Odpowiedzi

- A. 8,8 kHz.
- B. 10 kHz.
- C. 3 kHz.
- D. 1 kHz.



## Podsumowanie i zastosowania

Z tego rozdziału dowiedziałeś się:

- z jakich elementów składa się każdy generator drgań;
- co różni ujemne sprzężenie zwrotne od dodatniego sprzężenia zwrotnego;
- które sprzężenie pobudza układ do drgania;
- jakie dwa sposoby pozwalają uzyskać sygnał sprzężenia zwrotnego w generatorze;
- dlaczego częstotliwość pracy generatora zależy od parametrów charakteryzujących układ rezonansowy LC.

Poznałeś też praktyczną stronę projektowania prostych generatorów drgań, co powinno utrwalić zdobytą wiedzę i pozwolić Ci lepiej zrozumieć zasady pracy tego rodzaju obwodów.

## Test zrozumienia

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień przedstawionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń i rysowania wykresów oraz schematów obwodów użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

1. Z jakich trzech elementów składa się każdy generator?
2. Na czym polega różnica między ujemnym a dodatnim sprzężeniem zwrotnym?
3. Jakie sprzężenie zwrotne jest niezbędne do pracy generatora drgań?
4. Podaj wzór opisujący częstotliwość drgań sygnału wyjściowego generatora.
5. Narysuj schemat generatora Colpittsa.
6. Narysuj schemat generatora Hartleya.
7. Narysuj schemat generatora Armstronga.
8. W problemach 27 – 30 opisaliśmy zasady projektowania generatorów. W jakim stopniu układy przedstawione w problemie 35. spełniają kryteria podane w tej procedurze? Sprawdź wartości  $U_F$ ,  $A_U$  (dla wzmacniacza pracującego w obwodzie wspólnego emitera), stosunek  $C_1/C_2$ , stosunek  $R_C/Z$  oraz częstotliwość dla tych obwodów.
  - A. \_\_\_\_\_
  - B. \_\_\_\_\_
  - C. \_\_\_\_\_
  - D. \_\_\_\_\_
9. Oblicz wartości  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_C$  i  $C_B$  dla układu przedstawionego na rysunku 9.23, jeśli generator wytwarza drgania o częstotliwości 10 kHz i wykorzystuje cewkę o indukcyjności 100 mH.

## Odpowiedzi do testu zrozumienia

Jeśli otrzymane odpowiedzi nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdiesz do następnego rozdziału.

1.	Wzmacniacz, pętla sprzężenia zwrotnego i obciążenie rezonansowe.	(problem 1.)
2.	Sygnał sprzężenia zwrotnego dodatniego jest zgodny w fazie z sygnałem wejściowym, natomiast sygnał sprzężenia ujemnego jest w przeciwfazie do sygnału wejściowego.	(problemy 2 – 3)
3.	Dodatnie sprzężenie zwrotne.	(problem 3.)
4.	$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	(problem 11.)
5.	Patrz rysunek 9.15.	(problem 25.)

6.	Patrz rysunek 9.18.	(problem 25.)
7.	Patrz rysunek 9.20.	(problem 25.)
8. A.	$U_F = \frac{0,047}{0,147}$ .	(problemy 27 – 30)
	Wartości $A_U$ nie da się wyznaczyć.	
	$C_1/C_2 = 0,047/0,1 = 0,47$ .	
	Nie można wyznaczyć wartości $Z$ , ponieważ wartość $r$ jest nieznaną.	
	$f_R = 8,8$ kHz (w przybliżeniu).	
B.	$U_F = \frac{0,15}{0,62}$ .	
	$A_U = 2,2$ (w przybliżeniu).	
	$C_1/C_2 = 0,33$ (w przybliżeniu).	
	Nie można wyznaczyć wartości $Z$ .	
	$f_R = 10$ kHz (w przybliżeniu).	
C.	$U_F = \frac{0,1}{0,2}$ .	
	Wartości $A_U$ nie da się wyznaczyć.	
	$C_1/C_2 = 1$ .	
	Nie można wyznaczyć wartości $Z$ .	
	$f_R = 3$ kHz (w przybliżeniu).	
D.	$U_F = \frac{0,3}{1}$ .	
	Wartości $A_U$ nie da się wyznaczyć.	
	$C_1/C_2 = 0,3$ .	
	Nie można wyznaczyć wartości $Z$ .	
	$f_R = 1$ kHz (w przybliżeniu).	
9.	$C_1 = 0,0033 \mu\text{F}$ ; $C_2 = 0,01 \mu\text{F}$ ; $C_B = C_C = 0,1 \mu\text{F}$ .	(problemy 26 – 30)

# Transformator

**Transformatory** są urządzeniami pozwalającymi przekształcać sygnał zmienny o pewnym napięciu w sygnał o napięciu wyższym lub niższym. Gdy podłączasz telefon komórkowy do gniazdka, transformator umieszczony w zasilaczu przekształca sygnał o napięciu 230 V na około 5 V potrzebnych do naładowania baterii urządzenia. W zasadzie niemal wszystkie urządzenia elektryczne, z którymi masz styczność w domu, przekształcają pobierane z gniazdka napięcie do poziomu niezbędnego do ich zasilania, co oznacza, że ich praca byłaby niemożliwa bez transformatorów.

Transformator potrafi także podnosić napięcie. Na przykład niektóre z urządzeń wytwarzających układy scalone potrzebują do pracy napięcia rzędu tysięcy woltów, które osiąga się po podniesieniu sygnału podawanego przez sieć. Do tego niezbędny jest odpowiedni transformator.

Po zakończeniu pracy z tym rozdziałem będziesz potrafił:

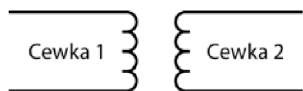
- rozpoznać transformator w schemacie obwodu;
- wyjaśnić znaczenie pojęć **przekładnia transformatora** i **dopasowanie impedancyjne** oraz zastosować te koncepcje w praktyce;
- rozpoznać transformatory dwóch rodzajów;
- przeprowadzić obliczenia dla układów zawierających transformator.

## Podstawa działania transformatora

---

**1** Wyobraź sobie dwie cewki ustawione blisko siebie w sposób przedstawiony na rysunku 10.1. Po podłączeniu do pierwszej zwojnicy (tak zwanego uzwojenia pierwotnego transformatora) napięcia zmiennego powstanie wokół niej zmienne pole magnetyczne (zgodnie z zasadą, że przepływ zmiennego prądu

elektrycznego wywołuje powstanie zmiennego pola magnetycznego). Ponieważ natężenie tego pola ulega zmianie, wywoła ono przepływ zmiennego prądu elektrycznego w drugiej cewce (zwanej uzwojeniem wtórnym transformatora). Zmienne napięcie indukowane w uzwojeniu wtórnym ma tę samą częstotliwość, co sygnał wprowadzany do uzwojenia pierwotnego.



**Rysunek 10.1**

Obydwa zwoje transformatora otaczają zazwyczaj rdzeń wykonany z ferromagnetyku, na przykład żelaza lub ferrytu, co pozwala wzmocnić natężenie pola magnetycznego.

### **Zadania**

- A. Czy zwoje nawinięte na jeden rdzeń są połączone w sensie elektrycznym?
- B. Jakie urządzenie składa się z dwóch zwojów owiniętych wokół żelaznego lub ferrytowego rdzenia?
- C. Co stanie się w uzwojeniu wtórnym, jeśli uzwojenie pierwotne podepniesz do napięcia zmiennego?

### **Odpowiedzi**

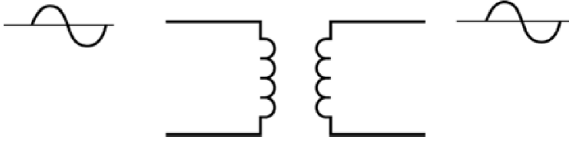
- A. Nie.
- B. Transformator.
- C. W uzwojeniu wtórnym popłynie indukowany zmienny prąd elektryczny, co wytworzy tym samym napięcie pomiędzy końcówkami tego uzwojenia.

**2** Transformator pracuje jedynie wtedy, gdy płynie przez niego prąd zmienny, ponieważ tylko taki prąd generuje zmienne pole magnetyczne, które jest niezbędne do indukowania prądu w uzwojeniu wtórnym. Stałe pole magnetyczne, które towarzyszy prądowi stałemu, nie wywoła przepływu prądu ani związanego z nim spadku napięcia w uzwojeniu wtórnym.

Gdy do uzwojenia pierwotnego wprowadzi się sygnał sinusoidalny, w uzwojeniu wtórnym pojawi się sygnał o takim samym kształcie (rysunek 10.2).

### **Zadania**

- A. Jak zmienia się częstotliwość sygnału w uzwojeniu wtórnym w porównaniu z częstotliwością sygnału podawanego do uzwojenia pierwotnego?



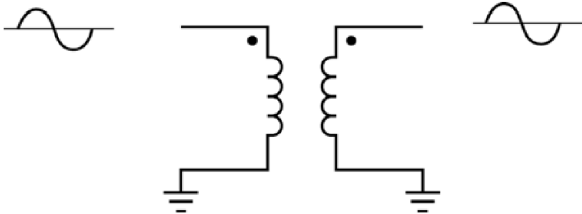
Rysunek 10.2

- B. Jakie napięcie pojawi się na stykach uzwojenia wtórnego, jeśli w uzwojeniu pierwotnym popłynie prąd stały pod napięciem 10 V?

### Odpowiedzi

- A. Nie ma żadnej różnicy. Częstotliwości w obydwu uzwojeniach transformatora są takie same.
- B. Zero woltów. Przepływ prądu stałego w uzwojeniu pierwotnym nie indukuje spadku napięcia i przepływu prądu w uzwojeniu wtórnym. W skrócie mówi się, że prąd stały nie płynie przez transformator.

- 3** Porównajmy teraz kształt sygnału podawanego do uzwojenia pierwotnego z kształtem sygnału wychodzącego z uzwojenia wtórnego. Jeśli dodatniej wartości napięcia wejściowego odpowiada dodatnia wartość napięcia wyjściowego, co pokazaliśmy na rysunku 10.3, mówimy, że sygnały pozostają ze sobą **w fazie**.

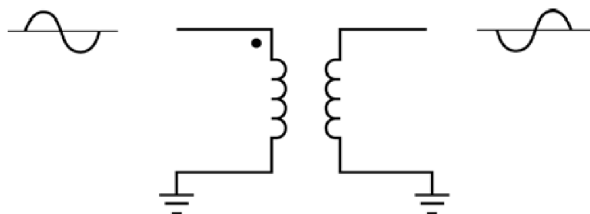


Rysunek 10.3

Kropki na rysunku 10.3 oznaczają odpowiadające sobie zakończenia każdej zwojnicy. Gdybyśmy odwrócili jedną z nich, sygnał wyjściowy byłby odwrócony w stosunku do sygnału wejściowego, czyli byłby **w przeciwfazie**. Graficznie oznacza się to, umieszczając kropki na przeciwnych końcach cewek.

### Zadanie

Sygnał wychodzący z transformatora przedstawionego na rysunku 10.4 jest w przeciwfazie do sygnału wejściowego. Umieść kropkę w odpowiednim miejscu uzwojenia wtórnego, tak by zaznaczyć ten fakt.

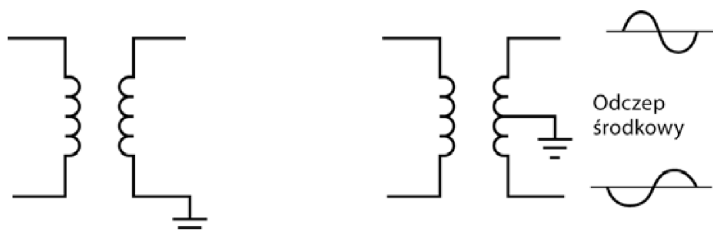


Rysunek 10.4

**Odpowiedź**

Kropka powinna znaleźć się w dolnym rogu prawej cewki.

**4** Transformator przedstawiony na prawej ilustracji z rysunku 10.5 ma trzy końcówki. Dodatkowa znajduje się pośrodku uzwojenia. Jest to tak zwany **odczep środkowy**.



Rysunek 10.5

**Zadanie**

Czym różnią się od siebie sygnały wyjściowe prawego transformatora zaznaczone na rysunku 10.5?

**Odpowiedź**

Obydwa przebiegi są przesunięte względem siebie w fazie o  $180^\circ$ . Oznacza to, że maksimum sygnału z górnej części uzwojenia pojawia się w tym samym czasie co minimum sygnału w dolnej części uzwojenia.

**5** Napięcie wyjściowe transformatora jest wprost proporcjonalne do liczby zwojów uzwojenia wtórnego. Jeżeli zwiększysz liczbę zwojów drugiej zwojnicy transformatora, indukowane w niej napięcie zmienne będzie większe, jeśli zmniejszysz ich liczbę, będzie ono mniejsze.

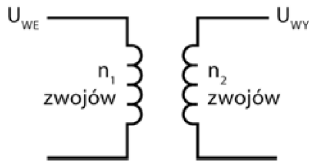
**Zadanie**

Powiedz, w jaki sposób zwiększenie liczby zwojów w uzwojeniu wtórnym wpływa na poziom napięcia wyjściowego transformatora.

**Odpowiedź**

Napięcie na uzwojeniu wtórnym (wyjściowe) rośnie.

**6** Liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego oznaczyliśmy na rysunku 10.6 odpowiednio jako  $n_1$  i  $n_2$ .



Rysunek 10.6

**Zadanie**

Stosunek napięcia wejściowego do napięcia wyjściowego transformatora jest równy stosunkowi liczby zwojów uzwojenia pierwotnego do liczby zwojów uzwojenia wtórnego. Spróbuj wyrazić tę zależność wzorem.

**Odpowiedź**

$$\frac{U_{WE}}{U_{WY}} = \frac{n_1}{n_2}.$$

**UWAGA** Stosunek liczby zwojów w uzwojeniu pierwotnym do liczby zwojów w uzwojeniu wtórnym nazywa się *przekładnią transformatora* i oznacza symbolem  $\eta^1$ :

$$\eta = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

**7** Korzystając ze wzoru na przekładnię transformatora, rozwiąż następujące zadanie.

<sup>1</sup> W literaturze spotyka się też definicję odwrotną —  $\eta = n_2/n_1$  — *przyp. tłum.*

**Zadanie**

Oblicz napięcie wyjściowe w transformatorze o przekładni 2 do 1 (2:1), jeżeli do uzwojenia pierwotnego trafia sygnał sinusoidalny o napięciu  $10 \text{ V}_{\text{pp}}$ .

**Odpowiedź**

$$\frac{U_{\text{WE}}}{U_{\text{WY}}} = \frac{n_1}{n_2} = \eta,$$

$$U_{\text{WY}} = U_{\text{WE}} \cdot \frac{n_2}{n_1} = U_{\text{WE}} \cdot \frac{1}{\eta},$$

$$U_{\text{WY}} = U_{\text{WE}} \cdot \frac{1}{\eta} = 10 \cdot \frac{1}{2} = 5 \text{ V}_{\text{pp}}.$$

**8** Mając dane napięcie wejściowe i przekładnię transformatora, rozwiąż następujące zadania.

**Zadania**

A.  $U_{\text{WE}} = 20 \text{ V}_{\text{pp}}$ ,  $\eta = 5:1$ .

$$U_{\text{WY}} =$$

B.  $U_{\text{WE}} = 1 \text{ V}_{\text{pp}}$ ,  $\eta = 1:10$ .

$$U_{\text{WY}} =$$

C.  $U_{\text{WE}} = 100 \text{ V}_{\text{SK}}$ . Znajdź napięcie wyjściowe, jeśli liczba zwojów uzwojenia pierwotnego jest równa liczbie zwojów w uzwojeniu wtórnym.

$$U_{\text{WY}} =$$

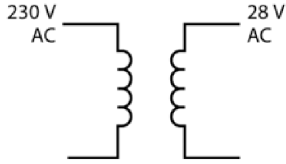
**Odpowiedzi**

A.  $4 \text{ V}_{\text{pp}}$  (to transformator **obniżający napięcie**).

B.  $10 \text{ V}_{\text{pp}}$  (to transformator **podnoszący napięcie**).

C.  $100 \text{ V}_{\text{SK}}$  (to tak zwany transformator **separacyjny**, stosowany do elektrycznego oddzielania źródła napięcia od obciążenia).

**9** Niemal każde urządzenie elektryczne zasilane z domowej sieci  $230 \text{ V}$  ma transformator przekształcający to napięcie na bardziej dogodną wartość. Rysunek 10.7 przedstawia transformator, który obniża napięcie z  $230 \text{ V}$  do  $28 \text{ V}$ .



Rysunek 10.7

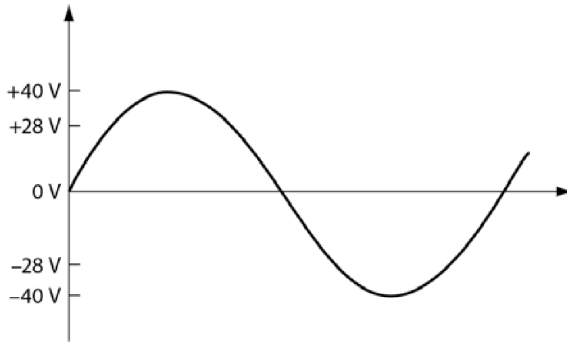
**Zadanie**

Oblicz przekładnię tego transformatora.

**Odpowiedź**

$$\eta = \frac{n_1}{n_2} = \frac{230}{28} = 8,2 : 1.$$

**10** Rysunek 10.8 przedstawia sygnał wyjściowy z transformatora zbijającego napięcie do 28 V obserwowany na oscyloskopie.



Rysunek 10.8

**Zadania**

- A. Czy 28 V to napięcie międzyszczytowe, czy skuteczne?
- B. Ile wynosi wartość napięcia międzyszczytowego na uzwojeniu wtórnym dla omawianego transformatora?

**Odpowiedzi**

- A. Skuteczne.
- B.  $2 \cdot 1,414 \cdot 28 \text{ V} = 79,184 \text{ V}$ .

**11** Wartość 230 V to tak samo jak 28 V wartość napięcia skutecznego.

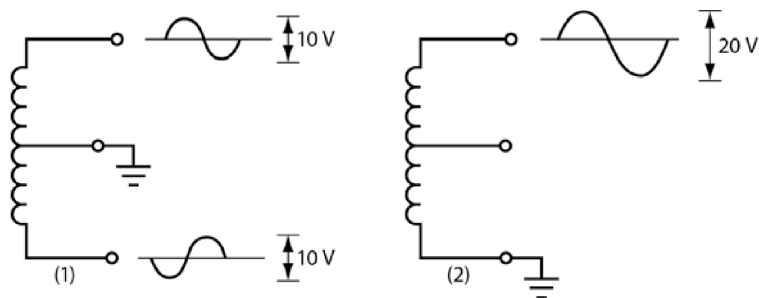
### Zadanie

Oblicz napięcie międzyszczytowe sygnału sieci domowej.

### Odpowiedź

Około 650 V.

**12** Rzeczywista wartość napięcia mierzonego na uzwojeniu wtórnym transformatora zależy od tego, między którymi zwojami zostanie on wykonany. Rysunek 10.9 przedstawia różne sposoby mierzenia napięcia na uzwojeniu wtórnym transformatora 20 V<sub>PP</sub> wyposażonego w odczep środkowy.



Rysunek 10.9

Jeżeli odczep jest uziemiony, jak na ilustracji (1) z rysunku 10.9, wtedy miernik wskaże napięcie 10 V<sub>PP</sub> pomiędzy każdym ze styków a ziemią. Jak widzisz, przebiegi sygnałów na ilustracji (1) są przesunięte w fazie (w tym przypadku o 180°). Jeśli uziemy dolny styk, jak na ilustracji (2) z rysunku 10.9, a odczep będzie niewykorzystany, to pomiędzy górnym stykiem a ziemią miernik wykaże 20 V<sub>PP</sub>.

### Zadania

- A. Przyjmij, że wartość 28 V<sub>SK</sub> podawana dla cewki ze środkowym odczepem jest mierzona właśnie dla tego odczepu. Jaka będzie wartość napięcia skutecznego, jeśli środkowy odczep zostanie uziemiony?
- B. Przyjmij, że 28 V<sub>SK</sub> to napięcie mierzone na całym uzwojeniu wtórnym. Ile będzie wynosić napięcie pomiędzy każdym z końców zwojniczy a odczepem środkowym?

- C. Przyjmij, że napięcie wyjściowe między odczepem środkowym a każdym z końców cewki wynosi  $15 V_{SK}$ . Ile wynosi napięcie międzyszczytowe, gdy odczep nie jest podłączony?

### Odpowiedzi

- A.  $28 V_{SK}$  pomiędzy zaciskami cewki a odczepem.  
 B.  $14 V_{SK}$  (połowa całkowitego napięcia wyjściowego).  
 C. Gdy odczep środkowy nie jest podłączony, napięcie wyjściowe wynosi  $30 V_{SK}$ , zatem  $U_{PP} = 2 \cdot 1,414 \cdot 30 = 84,84 V$ .

**13** Indukowanie pola magnetycznego w uzwojeniu wtórnym przez zmienny sygnał przepływający przez uzwojenie pierwotne nie odbywa się bez strat. Procent mocy wejściowej, jakim jest moc wyjściowa transformatora, nazywamy jego **skutecznością**. Dla ułatwienia rozważań będziemy zakładać, że transformator pracuje ze stuprocentową skutecznością. Jest to równoznaczne z założeniem, iż cała moc wejściowa wprowadzana przez uzwojenie pierwotne równa się mocy wyjściowej wytwarzanej w uzwojeniu wtórnym.

Zapisujemy to następującym wzorem:

$$P_{WE} = P_{WY}.$$

Jednocześnie wiemy, że  $P = U \cdot I$ , zatem:

$$U_{WE} \cdot I_{WE} = U_{WY} \cdot I_{WY}.$$

Po przekształceniu tego równania otrzymujemy następujące zależności:

$$\frac{I_{WY}}{I_{WE}} = \frac{U_{WE}}{U_{WY}} = \eta.$$

### Zadania

- A. Jaki prąd płynie w uzwojeniu pierwotnym transformatora, jeśli moc wyjściowa urządzenia wynosi  $12 W$ , a napięcie wejściowe to  $120 V_{SK}$ ?  
 B. Jakie będzie napięcie wyjściowe tego transformatora, jeśli jego przekładnia to  $5$ ?  
 C. Podaj prąd wyjściowy transformatora.  
 D. Podaj jego moc wyjściową.

### Odpowiedzi

**UWAGA** Prowadząc obliczenia mocy urządzeń zasilanych sygnałem zmiennym, musisz używać wartości skutecznych prądu i napięcia.

$$\text{A. } I_{WE} = \frac{P_{WE}}{U_{WE}} = \frac{12}{120} = 0,1 \text{ A}_{SK}.$$

$$\text{B. } U_{WY} = \frac{U_{WE}}{\eta} = \frac{120}{5} = 24 \text{ V}_{SK}.$$

$$\text{C. } I_{WY} = I_{WE} \cdot \eta = 0,1 \cdot 5 = 0,5 \text{ A}_{SK}.$$

$$\text{D. } P_{WY} = U_{WE} \cdot I_{WY} = 24 \cdot 0,5 = 12 \text{ W (tyle samo, ile wynosi moc wejściowa)}.$$

## Transformatory w obwodach łączności

**14** Obwody łączności charakteryzują się tym, że sygnał wejściowy jest bardzo często przekazywany bardzo długimi przewodami, nazywanymi **liniami**. Impedancja linii wynosi zazwyczaj około 600  $\Omega$ . Przykładem linii łączności są przewody telefoniczne łączące różne miasta.

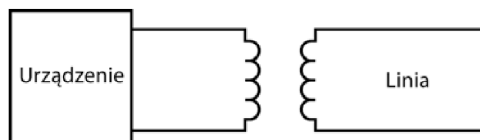
### Zadanie

Wszystkie urządzenia komunikacyjne działają najlepiej, gdy podłączone do nich obciążenie ma tę samą impedancję co urządzenie wyjściowe. Jaką impedancję powinny mieć urządzenia komunikacyjne?

### Odpowiedź

Podłączane do sześciusetomowej linii powinny mieć impedancję 600  $\Omega$ .

**15** Ponieważ większość sprzętu elektronicznego nie ma 600  $\Omega$  impedancji wyjściowej, pomiędzy podłączeniem do linii a samym urządzeniem umieszcza się transformator. Bardzo często transformator jest częścią samego urządzenia. Dzięki temu sprzęt zostaje „dopasowany” do linii. Sytuację tę ilustruje rysunek 10.10.



Rysunek 10.10

Aby uzwojenie wtórne transformatora pasowało do linii, powinno charakteryzować się sześciusetomową impedancją. Impedancja wyjściowa transformatora (mierzona na uzwojeniu wtórnym) zależy od dwóch rzeczy. Jedną z nich jest impedancja wyjściowa urządzenia.

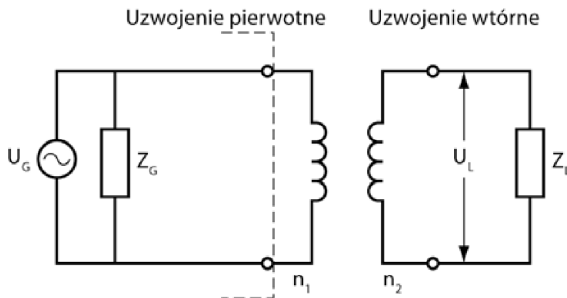
**Zadanie**

Jak sądzisz, od czego jeszcze zależy impedancja wyjściowa transformatora?

**Odpowiedź**

Od przekładni transformatora. (Opór stawiany prądowi stałemu przez poszczególne zwoje nie ma żadnego znaczenia, więc możesz go pominąć).

**16** Rysunek 10.11 przedstawia generator sygnałów o impedancji wyjściowej  $Z_G$  podłączony do uzwojenia pierwotnego transformatora. Do uzwojenia wtórnego zostało podłączone obciążenie o impedancji  $Z_L$ .



**Rysunek 10.11**

Wiesz, że  $P_{WE} = P_{WY}$  oraz że  $P = \frac{U^2}{Z}$ . Możesz zatem zapisać równanie wiążące moc generatora z mocą obciążenia, wyrażając ich zależność od napięcia i impedancji:

$$\frac{U_G^2}{Z_G} = \frac{U_L^2}{Z_L}.$$

Po przekształceniu możesz określić stosunek napięć, który wyraża się wzorem:

$$\frac{Z_G}{Z_L} = \left( \frac{U_G}{U_L} \right)^2.$$

Ponieważ zaś  $U_G = U_{WE}$ , a  $U_L = U_{WY}$  oraz  $\frac{U_{WE}}{U_{WY}} = \frac{n_1}{n_2}$ , można zapisać:

$$\frac{Z_G}{Z_L} = \left( \frac{U_{WE}}{U_{WY}} \right)^2 = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 = \eta^2.$$

Oznacza to, że stosunek impedancji wejściowej do impedancji wyjściowej transformatora jest równy kwadratowi przekładni. W zadaniu A poznasz metodę określania takiej przekładni transformatora, która pozwoli łączyć ze

sobą linię i urządzenia mimo odmiennych impedancji. Dzięki transformatorowi generator „widzi” urządzenie o impedancji równej swojej, a obciążenie „widzi” źródło zasilania o impedancji dostosowanej do własnych potrzeb.

Poniższe zadania opisują generator o impedancji wyjściowej  $10\text{ k}\Omega$ , który wytwarza napięcie  $10\text{ V}_{PP}$  ( $3,53\text{ V}_{SK}$ ). Generator ten będzie podpięty do sześciusetomowej linii.

### Zadania

- Jaką przekładnię powinien mieć transformator, by generator mógł pracować z tą linią?
- Znajdź napięcie wyjściowe na obciążeniu.
- Znajdź prąd obciążenia i moc obciążenia.

### Odpowiedzi

$$\text{A. } \eta = \sqrt{\frac{Z_G}{Z_L}} = \sqrt{\frac{10000\Omega}{600\Omega}} = \frac{4,08}{1}, \text{ czyli } \eta = 4,08.$$

$$\text{B. } U_L = \frac{U_G}{\eta} = \frac{10}{4,08} = 2,45\text{ V}_{PP}, \text{ czyli } 0,866\text{ V}_{SK}.$$

$$\text{C. } P_{WE} = \frac{U_G^2}{Z_G} = \frac{(3,53)^2}{10000} = 1,25\text{ mW}.$$

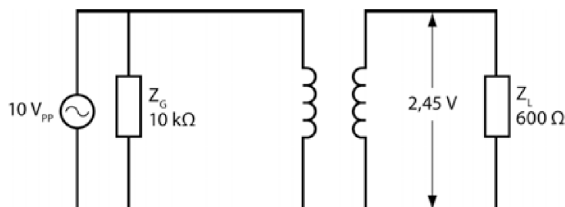
**UWAGA** Obliczenia dotyczące wyznaczenia mocy muszą być prowadzone dla wartości skutecznych.

$$I_{WE} = \frac{P_{WE}}{U_{WE}} = \frac{1,25\text{ mW}}{3,53\text{ V}_{SK}} = 0,354\text{ mA}_{SK}, \text{ co daje } 1\text{ mA}_{PP}.$$

$$I_L = I_{WE} \cdot \eta = 0,354 \cdot 4,08 = 1,445\text{ mA}_{SK}, \text{ co daje } 4,08\text{ mA}_{PP}.$$

$$P_L = \frac{U_L^2}{Z_L} = \frac{(0,866)^2}{600} = 1,25\text{ mW}.$$

Moc obciążenia jest taka sama jak moc wejściowa. Obwód został przedstawiony na rysunku 10.12.



Rysunek 10.12

**UWAGA** Pracujący w takim układzie generator stwierdza, że ma do czynienia z urządzeniem o impedancji  $10\text{k}\Omega$ , mimo że w rzeczywistości ma ono impedancję  $600\ \Omega$ . Z kolei urządzenie uważa, że jest zasilane ze źródła o impedancji  $600\ \Omega$ . Dzięki temu przesył mocy między urządzeniem a obciążeniem jest optymalny. Niestety, w praktyce rzadko mamy do czynienia z tak idealnymi warunkami, jakie wyznaczyłeś przed chwilą. Prawdopodobnie niemożliwe byłoby uzyskanie transformatora o przekładni 4,08, zatem musiałbyś skorzystać z urządzenia o przekładni 4. Różnica ta przekłada się na warunki pracy obciążenia, na szczęście jedynie w niewielkim stopniu.

**17** W tym problemie Twoim zadaniem będzie dobrać parametry transformatora w taki sposób, by umożliwić zasilanie obciążenia z danego generatora.

### Zadania

- A. Jąką przekładnię powinien mieć transformator, by generator o  $2\text{k}\Omega$  impedancji wyjściowej mógł być podłączony do sześciusetomowej linii?  
 B. Ile wynosi napięcie na obciążeniu, jeśli generator wytwarza napięcie  $1\text{ V}_{PP}$ ?

#### Odpowiedzi

- A.  $\eta = 1,83$ .  
 B.  $U_L = 0,55\text{ V}_{PP}$ .

**18** W tym zadaniu masz określić parametry transformatora, który pozwoli połączyć generator z obciążeniem o impedancji  $2\text{ k}\Omega$ .

### Zadania

- A. Jąką przekładnię powinien mieć transformator, by móc podłączyć obciążenie o impedancji  $2\text{ k}\Omega$  do generatora o impedancji wyjściowej  $5\text{ k}\Omega$ ?  
 B. Jakie powinno być zasilanie, jeśli obciążenie pobiera sygnał o mocy  $20\text{ mW}$ ? (Zacznij od znalezienia napięcia na obciążeniu).  
 C. Oblicz prądy w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym oraz moc przekazywaną przez źródło do uzwojenia pierwotnego transformatora.

#### Odpowiedzi

- A.  $\eta = 1,58$ .  
 B.  $U_L = \sqrt{P_L \cdot Z_L} = \sqrt{20\text{ mW} \cdot 2\text{ k}\Omega} = 6,32\text{ V}_{SK}$  oraz  
 $U_G = U_L \cdot \eta = 6,32\text{ V}_{SK} \cdot 1,58 = 10\text{ V}_{SK}$ .  
 C.  $I_L = 3,16\text{ mA}_{SK}$ ,  $I_P = 2\text{ mA}_{SK}$ ,  $P_{WE} = 20\text{ mW}$ .

## Podsumowanie i zastosowania

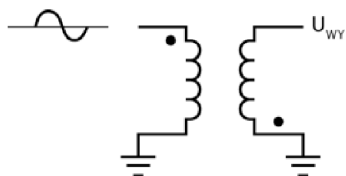
Ten rozdział pozwolił Ci poznać zasady pracy i zastosowania transformatorów.

- Wiesz, dlaczego przyłożenie zmiennego napięcia do uzwojenia pierwotnego wywołuje przepływ prądu w uzwojeniu wtórnym.
- Dowiedziałeś się, w jaki sposób podnosić lub obniżać napięcia na uzwojeniu wtórnym.
- Poznałeś zasady korzystania z odczepu środkowego, dzięki któremu można uzyskiwać różne napięcia w jednym transformatorze.
- Wiesz, jak łączyć za pomocą transformatora generator z obciążeniem.
- Dowiedziałeś się, co może sprawić, że sygnał transformatora będzie odwrócony względem sygnału wejściowego (w przeciwfazie).

## Test zrozumienia

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień przedstawionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

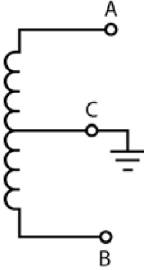
1. W jaki sposób zbudowany jest transformator?
2. Jaki sygnał wejściowy wprowadza się do transformatora?
3. Powiedz, jak będzie wyglądać sygnał wyjściowy, jeśli do transformatora przedstawionego na rysunku 10.13 trafia sygnał sinusoidalny.



Rysunek 10.13

4. Czym jest **przekładnia** transformatora?
5. Jakie będzie napięcie wyjściowe, jeśli  $U_{WE} = 1 \text{ V}_{PP}$ , a  $\eta = 2$ ?  
 $U_{WY} =$
6. Jaka będzie przekładnia transformatora, jeśli  $U_{WE} = 1 \text{ V}_{PP}$ , a  $U_{WY} = 7 \text{ V}_{PP}$ ?  
 $\eta =$

7. Napięcie pomiędzy odczepem transformatora a punktami A i B (rysunek 10.14) może być opisane jako  $U_{A-B} = 28 V_{PP}$ . Jakie napięcie panuje między punktami C i A?



Rysunek 10.14

8. Ile wynosi napięcie międzyszczytowe pomiędzy punktami A i B (rysunek 10.14), jeśli napięcie między punktami B i C  $U_{B-C} = 5 V_{SK}$ ?
9. Jeśli  $I_{WE} = 0,5 A_{SK}$ , a  $I_{WY} = 2,0 A_{SK}$ , jaka jest przekładnia transformatora?
10. Czy transformator opisany w problemie 9. jest transformatorem podnoszącym, czy obniżającym napięcie?
11. Znajdź przekładnię transformatora, jeśli  $Z_L = 600 \Omega$ , a  $Z_G = 6 k\Omega$ .  
 $\eta =$
12. Znajdź impedancję generatora, jeśli  $Z_L = 1 k\Omega$ , a  $\eta = 10$ .  
 $Z_G =$

### Odpowiedzi do testu zrozumienia

Jeśli otrzymane odpowiedzi nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdziesz do następnego rozdziału.

1. Dwie cewki otaczające rdzeń wykonany z ferromagnetyku (na przykład żelaza czy ferrytu).	(problem 1.)
2. Napięcie zmienne. Stały sygnał nie wywoła żadnego efektu.	(problem 2.)
3. Odwrócona fala sinusoidalna.	(problem 3.)
4. Jest to stosunek liczby zwojów uzwojenia pierwotnego do liczby zwojów uzwojenia wtórnego.	(problem 6.)
5. $U_{WY} = 0,5 V$ .	(problem 7.)
6. $\eta = 1,43$ .	(problem 7.)
7. $U_{C-A} = 14 V_{PP}$ .	(problem 12.)
8. $U_{A-B} = 14,14 V_{PP}$ .	(problem 12.)
9. $\eta = 4$ .	(problem 13.)

- 
- 10.** To transformator obniżający napięcie. Napięcie na uzwojeniu wtórnym będzie niższe od napięcia na uzwojeniu pierwotnym, jeśli przez uzwojenie wtórne popłynie większy prąd niż przez uzwojenie pierwotne. Dzięki temu po obydwu stronach transformatora wydzieli się taka sama moc. (problem 13.)
- 
- 11.**  $\eta = 3,2$ . (problem 16.)
- 
- 12.**  $Z_G = 100 \text{ k}\Omega$ . (problem 16.)
-

## Zasilacze

Zasilacze są elementami wielu urządzeń elektronicznych. Zasilacz pobiera zmienny sygnał o napięciu 230 V i przekształca go w sygnał stały, którym mogą być zasilane wszystkie obwody elektryczne.

Idea budowy obwodu zasilacza jest bardzo prosta. Układy, które zaprezentujemy w tym rozdziale, są znane od lat, a ponieważ do zbudowania zasilacza wykorzystuje się wiele elementów opisanych w tej książce, tego rodzaju konstrukcja doskonale nadaje się na podsumowanie podstaw elektroniki.

Jednym z podstawowych elementów zasilacza jest dioda. Aby zrozumieć zasadę działania urządzenia zasilającego, musisz wiedzieć, jak zachowuje się sygnał zmienny po przejściu przez diodę. Dlatego rozdział ten rozpoczniemy właśnie od omówienia pracy diody w układzie prądu zmiennego.

W całym rozdziale będziemy zwracać szczególną uwagę na sposób, w jaki sygnał prądu zmiennego jest modyfikowany przez diody. Jeśli masz dostęp do oscylatora, możesz budować poszczególne układy na płycie prototypowej i sprawdzać przebieg sygnału samodzielnie.

Po zakończeniu pracy z tym rozdziałem będziesz potrafił:

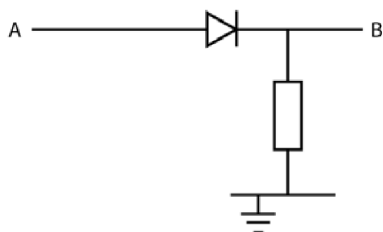
- opisać działanie diody w układzie prądu zmiennego;
- podać przynajmniej dwie metody prostowania sygnału zmiennego;
- narysować przebieg sygnału wychodzącego z obwodów prostujących i filtrujących;
- obliczać napięcie wyjściowe podawane przez zasilacz;
- wyznaczać odpowiednie wartości poszczególnych elementów tworzących zasilacz.

## Diody w obwodach prądu zmiennego. Pulsacje

**1** Diody, a konkretnie ich zdolność do przewodzenia prądu tylko w jednym kierunku, znajdują wiele zastosowań w obwodach prądu zmiennego.

### Zadanie

Przyjmij, że do obwodu przedstawionego na rysunku 11.1 wprowadzasz w punkcie A stały sygnał o napięciu  $+20\text{ V}$ .



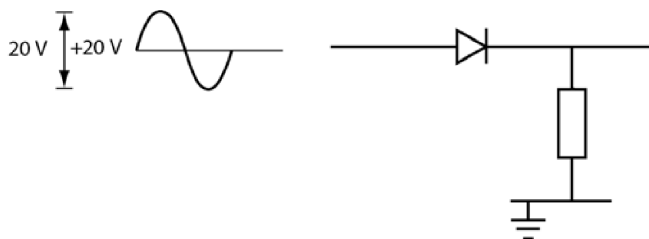
Rysunek 11.1

- A. Ile wynosi napięcie w punkcie B?
- B. Ile będzie wynosić napięcie w punkcie A, jeśli w punkcie B podasz napięcie  $+10\text{ V}$ ?

### Odpowiedzi

- A.  $20\text{ V}$  (na razie pominię  $0,7\text{ V}$  spadku napięcia na diodzie).
- B.  $0\text{ V}$  (dioda jest spolaryzowana zaporowo).

**2** Rysunek 11.2 przedstawia układ znany z rysunku 11.1, lecz tym razem zasilany sygnałem zmiennym o napięciu międzyszczytowym  $20\text{ V}_{PP}$  dobranym tak, by jego średnia przypadła na  $+20\text{ DC}$ .



Rysunek 11.2

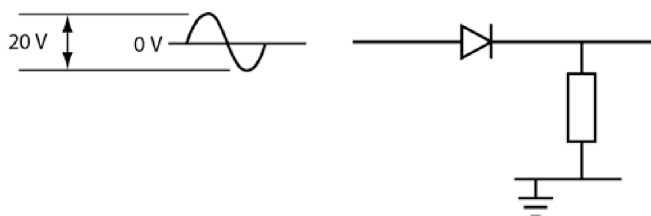
### Zadania

- A. Jakie jest maksimum i minimum napięcia sygnału wejściowego?  
 B. Jak będzie wyglądać przebieg sygnału wyjściowego?

#### Odpowiedzi

- A. Maksimum napięcia to  $20\text{ V} + 10\text{ V} = 30\text{ V}$ .  
 Minimum napięcia to  $20\text{ V} - 10\text{ V} = 10\text{ V}$ .  
 B. Dioda jest zawsze spolaryzowana w kierunku przewodzenia, zatem przewodzi prąd w każdej chwili. Oznacza to, że sygnał wyjściowy będzie wyglądać dokładnie tak samo jak sygnał wejściowy.

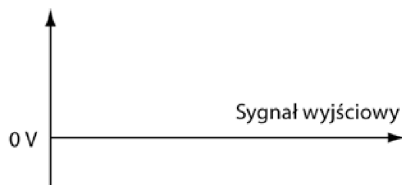
- 3 Rysunek 11.3 przedstawia obwód zasilany sygnałem zmiennym o napięciu międzyszczytowym  $20\text{ V}_{pp}$ . Średnia wartość napięcia wynosi  $0\text{ V DC}$ .



Rysunek 11.3

### Zadania

- A. Jaka jest minimalna i maksymalna wartość tego sygnału?  
 B. Narysuj przebieg sygnału wyjściowego na wykresie umieszczonym na rysunku 11.4. Pamiętaj, że przez diodę przechodzi tylko dodatnia część sygnału.

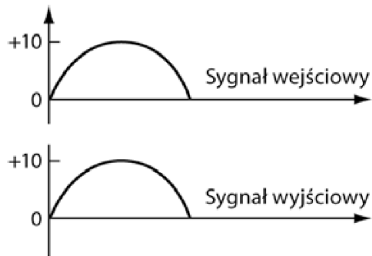


Rysunek 11.4

#### Odpowiedzi

- A. Maksimum to  $+10\text{ V}$ , minimum  $-10\text{ V}$ .

B. Patrz rysunek 11.5.

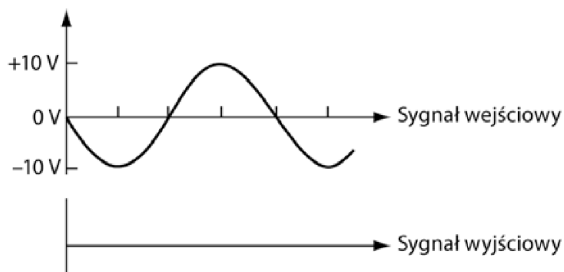


Rysunek 11.5

4 Gdy sygnał wejściowy przyjmie wartości ujemne, dioda przedstawiona na rysunku 11.3 będzie spolaryzowana zaporowo, zatem napięcie sygnału wyjściowego będzie w tych momentach zerowe.

### Zadanie

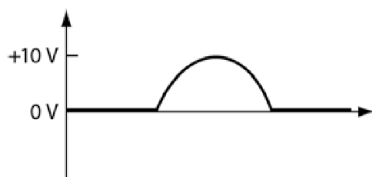
Rysunek 11.6 przedstawia przebieg sygnału wejściowego wprowadzanego do obwodu znanego Ci z rysunku 11.3. Weź osobną kartkę i narysuj na niej kształt sygnału wyjściowego.



Rysunek 11.6

### Odpowiedź

Patrz rysunek 11.7.



Rysunek 11.7

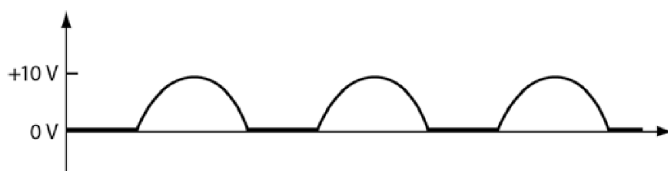
5 Rysunek 11.7 przedstawia przebieg sygnału wychodzącego z układu znanego Ci z rysunku 11.3 dla pełnego cyklu.

### Zadanie

Narysuj teraz sygnał wyjściowy dla trzech pełnych cykli sygnału wejściowego przedstawionego na rysunku 11.6. Rysunek wykonaj na osobnej kartce papieru.

### Odpowiedź

Patrz rysunek 11.8.



Rysunek 11.8

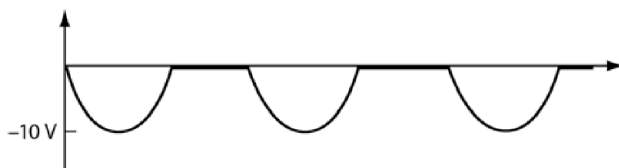
6 Gdy dioda zostanie podłączona odwrotnie, zmieni się kierunek przewodzenia, zatem będzie przepływać przez nią wyłącznie ujemna część sygnału. Tak spolaryzowana dioda nie będzie przepuszczać sygnału dodatniego. Oznacza to, że sygnał wyjściowy będzie odwróceniem sygnału przedstawionego na rysunku 11.8.

### Zadanie

Na osobnej kartce papieru narysuj sygnał wyjściowy dla trzech cykli wejściowych. Załóż przy tym, że dioda została podłączona przeciwnie niż na rysunku 11.3.

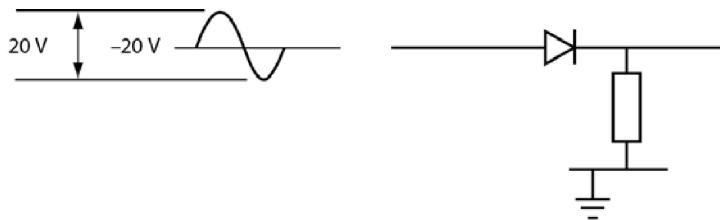
### Odpowiedź

Patrz rysunek 11.9.



Rysunek 11.9

7 Rysunek 11.10 przedstawia obwód zasilany napięciem zmiennym  $20\text{ V}_{PP}$ , którego wartość średnia przypada na  $-20\text{ V DC}$ .



Rysunek 11.10

### Zadania

- A. Kiedy dioda jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia?
- B. Jakie jest napięcie wyjściowe?

#### Odpowiedzi

- A. Nigdy, ponieważ wartości napięcia wynikające z dodawania wartości zmiennych i stałej zamykają się w przedziale od  $-10\text{ V}$  do  $-30\text{ V}$ . Dla tego dioda jest zawsze spolaryzowana zaporowo.
- B. Stałe napięcie  $0\text{ V}$ .

8 Jak widzisz, dioda przepuszcza jedynie dodatnie lub ujemne sygnały, w zależności od tego, w jaki sposób włączysz ją do układu. W efekcie płynący przez układ sygnał zmienny jest przekształcany w impulsy sygnału stałego. Proces ten nazywamy **prostowaniem**. Układ przekształcający zmienne napięcie dodatnie lub ujemne w impulsy stałe nazywa się **prostownikiem półokresowym**.

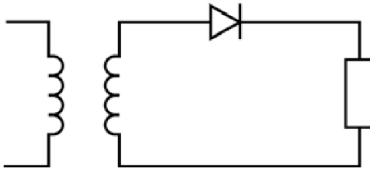
### Zadanie

Spójrz na przebiegi sygnałów przedstawione na rysunkach 11.8 oraz 11.9. Czy sygnały te odpowiadają dodatnim, czy ujemnym impulsom napięcia stałego?

#### Odpowiedź

Przebieg pokazany na rysunku 11.8 odpowiada dodatnim impulsom napięcia stałego. Przebieg na rysunku 11.9 odpowiada ujemnym impulsom napięcia stałego.

**9** Układ z rysunku 11.11 przedstawia transformator, który w obwodzie uzwojenia wtórnego zawiera diodę.



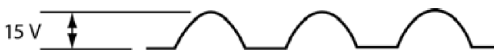
Rysunek 11.11

### Zadania

- A. Jak obecność diody wpływa na sygnał zmienny?
- B. Narysuj przebieg zmienności napięcia na obciążeniu układu widocznego na rysunku 11.11. Przyjmij, że sygnał wyjściowy transformatora to  $30\text{ V}_{PP}$ , a jego średnia wartość wynosi  $0\text{ V DC}$ . Rysunek wykonaj na osobnej kartce papieru.

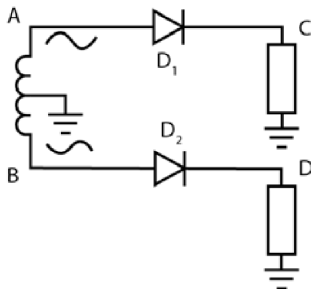
### Odpowiedzi

- A. Sygnał zmienny będzie prostowany.
- B. Patrz rysunek 11.12. Tego rodzaju obwód (prostownik półokresowy) wytwarza sygnał składający się albo z dodatnich części sygnału wejściowego, albo z jego części ujemnych.



Rysunek 11.12

**10** W układzie uzwojenia wtórnego widocznym na rysunku 11.13 sygnał zmienny jest wyprowadzany z każdego końca cewki. Dioda  $D_1$  prostuje sygnał pojawiający się w punkcie A, natomiast dioda  $D_2$  prostuje sygnał wychodzący z punktu B.



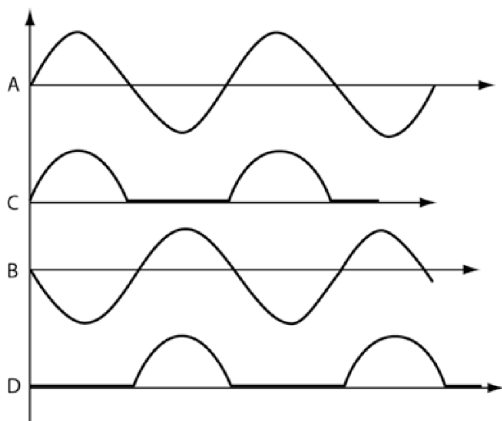
Rysunek 11.13

**Zadania**

- A. Która dioda będzie przewodzić w czasie pierwszej połowy cyklu?  
 B. Która dioda będzie przewodzić w czasie drugiej połowy cyklu?  
 C. Narysuj przebieg sygnałów wejściowych (punkty A i B), a pod każdym z nich narysuj przebieg sygnału wyjściowego (punkty C i D). Rysunki wykonaj na osobnej kartce papieru.

**Odpowiedzi**

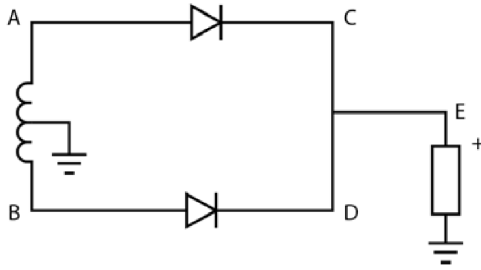
- A. W pierwszej połowie cyklu w kierunku przewodzenia jest spolaryzowana dioda  $D_1$  i to ona przewodzi prąd. Dioda  $D_2$  jest wtedy spolaryzowana zaporowo i nie przewodzi prądu.  
 B. W drugiej połowie cyklu w kierunku przewodzenia jest spolaryzowana dioda  $D_2$  i to ona przewodzi prąd. Dioda  $D_1$  jest wtedy spolaryzowana zaporowo i nie przewodzi prądu.  
 C. Patrz rysunek 11.14.

**Rysunek 11.14**

**11** Rysunek 11.15 przedstawia układ, w którym diody są podłączone do końców transformatora z odczepem środkowym. Diody są uziemione przez wspólny opornik. Oznacza to, że sygnały z obydwu diod trafiają do jednego obciążenia. Taki układ nazywamy **prostownikiem pełnookresowym**.

**Zadanie**

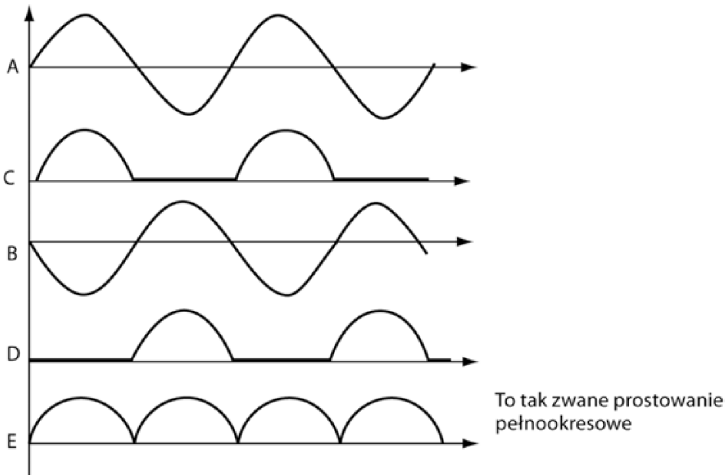
Na osobnej kartce papieru narysuj przebieg sygnału napięcia mierzonego w punkcie E (rysunek 11.15). (Przebieg ten będzie połączeniem sygnałów zbieranych w punktach C i D zaznaczonych na rysunku 11.14).



Rysunek 11.15

**Odpowiedzi**

Patrz rysunek 11.16.



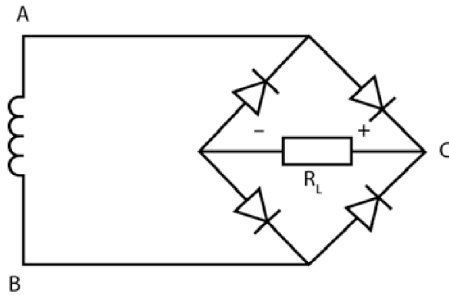
Rysunek 11.16

**12** Prostowanie pełnookresowe pozwala na znacznie „gładsze” prostowanie sygnału zmiennego niż prostowanie półokresowe.

Rysunek 11.17 przedstawia obwód prostownika pełnookresowego połączony z transformatorem o dwóch stykach wyprowadzanych z uzwojenia wtórnego bez środkowego odczepu.

**Zadanie**

Czym układ ten różni się od układu przedstawionego na rysunku 11.15?

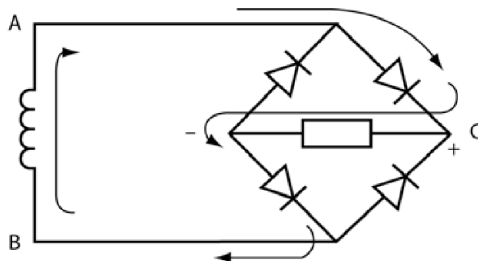


Rysunek 11.17

**Odpowiedź**

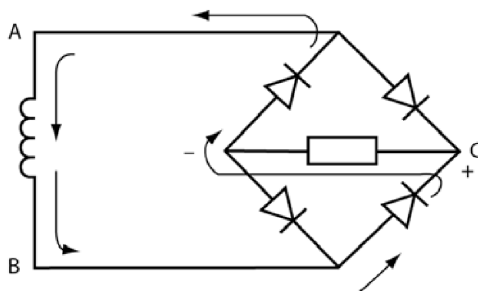
Ten układ nie ma środkowego odczepu, więc musi korzystać z czterech diod.

**13** Rysunek 11.18 przedstawia przepływ prądu przez układ w chwili, gdy napięcie w punkcie A jest dodatnie.



Rysunek 11.18

Rysunek 11.19 przedstawia przepływ prądu przez układ, gdy dodatni sygnał wypływa z punktu B.



Rysunek 11.19

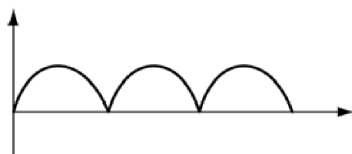
Zauważ, że w obydwu przypadkach prąd przepływa przez opornik w tym samym kierunku.

**Zadania**

- A. Przez ile diod przepływa prąd w każdym z opisanych przypadków?  
 B. Na osobnej kartce narysuj przebieg sygnału w punkcie C.

**Odpowiedzi**

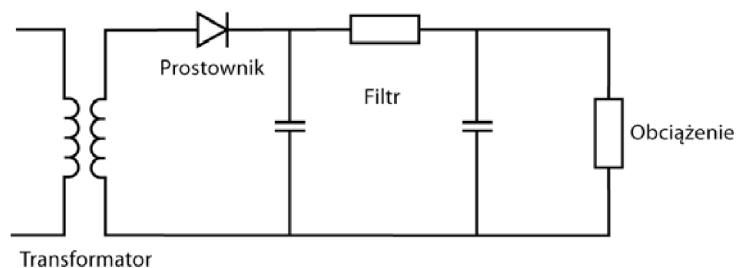
- A. W każdym przypadku prąd przepływa przez dwie diody.  
 B. Patrz rysunek 11.20.

**Rysunek 11.20**

Na razie dowiedziałeś się, w jaki sposób przekształcić sygnał zmienny w stały. Warto tu zauważyć, że sygnał zmienny, który przeszedł procedurę prostowania, bardzo często jest nazywany **tętniącym sygnałem stałym**. Teraz dowiesz się, jak filtrować sygnał, by z tętniącego przeszedł w bardziej ustabilizowany.

**Filtrowanie napięcia tętniącego**

**14** Obwód najprostszego zasilacza można podzielić na cztery części, przedstawione na rysunku 11.21.

**Rysunek 11.21****Zadania**

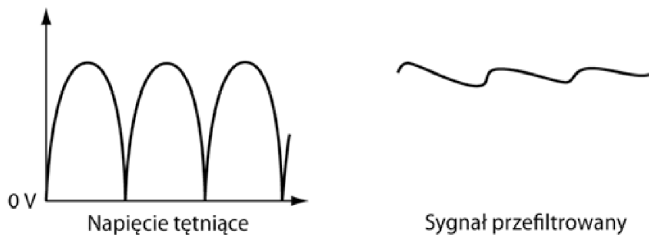
- A. Ile diod musi pojawić się w układzie zasilacza, by transformator z odczepem środkowym wytworzył przebieg pełnookresowy?

- B. Czy układ zasilacza przedstawiony na rysunku 11.21 da przebieg pełnokresowy, czy półokresowy?
- C. Jaki sygnał wychodzi z prostownika zaznaczonego na rysunku 11.21?

### **Odpowiedzi**

- A. Dwa.  
 B. Półokresowy.  
 C. Sygnał tętniący.

**15** Zadaniem filtrującej części zasilacza jest wygładzenie tętniącego sygnału tak, by składał się on w jak największej części z „czystego” sygnału stałego, z minimalną domieszką sygnału zmiennego. Tak przefiltrowane napięcie (prawa ilustracja na rysunku 11.22) jest wprowadzane do obciążenia.



**Rysunek 11.22**

Obciążeniem (elementem zasilanym przez zasilacz) może być lampa, ale także bardziej złożony układ elektroniczny. Niezależnie od tego, co podłączysz do źródła zasilania, urządzenie to będzie wymagało pewnego napięcia oraz będzie pobierać określony prąd, czyli będzie charakteryzować się określonym oporem.

Zazwyczaj znasz napięcie, jakiego wymaga obciążenie, oraz prąd, jaki pobiera (czyli także jego opór), musisz więc dobrać taki zasilacz, by dostarczyć odpowiednie parametry do obciążenia.

Aby uprościć schematy, obciążenia oznacza się symbolem zwykłego opornika.

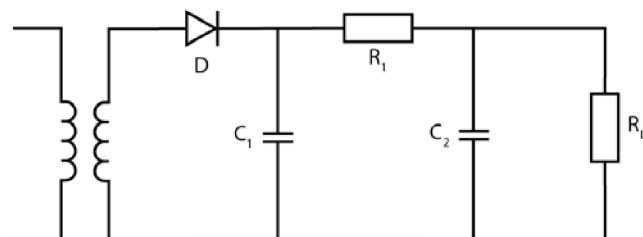
### **Zadania**

- A. Jaką rolę odgrywa filtrująca część zasilacza?
- B. Co podłącza się do zasilacza i jak można traktować te elementy?

**Odpowiedzi**

- A. Filtr przekształca sygnał tętniący w „czysty” sygnał stały.  
 B. Do zasilacza podłącza się obciążenie, na przykład lampę lub dowolny inny układ elektroniczny. Zazwyczaj traktuje się je jak zwykły opornik.

**16** Rysunek 11.23 przedstawia obwód zasilacza z podłączonym do niego obciążeniem.



Rysunek 11.23

**Zadania**

Spójrz na układ przedstawiony na rysunku 11.23 i rozwiąż podane zadania.

- A. Jakiego rodzaju cewka pojawia się w uzwojeniu wtórnym?  
 B. Jakiego rodzaju prostownik pojawia się w tym obwodzie?  
 C. Z jakich elementów jest zbudowany filtrujący fragment układu?  
 D. Jaki przebieg sygnału spodziewasz się uzyskać z prostownika?

**Odpowiedzi**

- A. Bez odczepu środkowego.  
 B. Prostownik półokresowy zbudowany z jednej diody.  
 C. Z opornika i dwóch kondensatorów ( $R_1$ ,  $C_1$  i  $C_2$ ).  
 D. Półokresowy sygnał tętniący.

**17** Rysunek 11.24 przedstawia sygnał wyjściowy uzyskiwany z prostownika zasilacza pokazanego na rysunku 11.23.



Rysunek 11.24

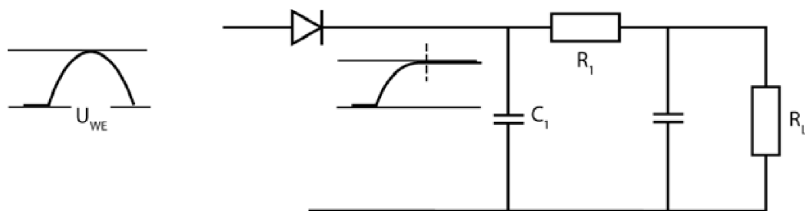
Sygnal ten wchodzi do filtra zasilacza. Spójrz teraz na rysunek przedstawiający pojedyncze tętnienie (11.25) i przeanalizuj działanie elementu filtrującego.



Rysunek 11.25

W czasie potrzebnym wyprostowanemu sygnałowi napięcia, by osiągnąć swoje maksimum, kondensator  $C_1$  ładuje się do maksymalnej wartości napięcia.

Następnie napięcie zaczyna opadać do wartości 0 V, a przez obwód zaczynają płynąć elektrony zebrane w kondensatorze, co prowadzi do jego rozładowania. Prąd ten utrzymuje napięcie na obciążeniu w pobliżu wartości bliskiej maksymalnemu napięciu wyprostowanego układu — zaznaczyliśmy to na rysunku 11.26. Zwróć uwagę, że sygnał stały po prawej stronie diody utrzymuje się na wartości maksymalnej, mimo że sygnał wejściowy  $U_{WE}$  spada do zera.



Rysunek 11.26

### Zadanie

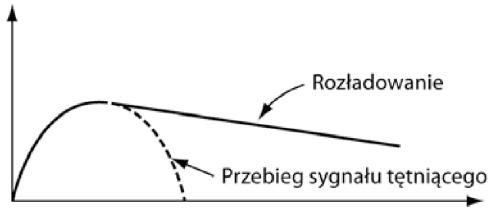
Jaką ścieżką rozładowuje się kondensator  $C_1$ ?

#### Odpowiedź

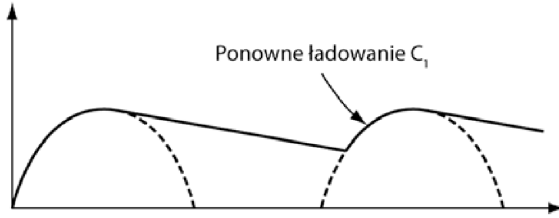
Dioda nie przewodzi, więc kondensator nie może rozładować się przez nią. Jedyna ścieżka prowadzi przez opornik  $R_1$  i obciążenie  $R_L$ .

**18** Jeśli przez diodę nie popłynie następny impuls, kondensator rozładowuje się całkowicie zgodnie z przebiegiem podanym na wykresie z rysunku 11.27.

Jeżeli jednak przez diodę przepłynie kolejny impuls, zanim dojdzie do rozładowania kondensatora, sygnał zyska kształt przedstawiony na rysunku 11.28.



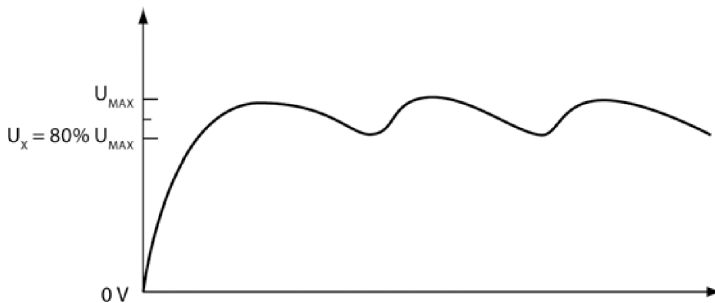
Rysunek 11.27



Rysunek 11.28

Kondensator rozładowuje się w niewielkim stopniu, po czym gdy pojawi się nowy sygnał, natychmiast znów naładuje się do wartości maksymalnej. W efekcie napięcie doprowadzane do obciążenia będzie spadać zawsze jedynie o niewielką wartość.

Gdy przez diodę będą przepływać dalsze impulsy, opisane tu zjawisko będzie się powtarzać. Krzywa przebiegu sygnału została przedstawiona na rysunku 11.29.



Rysunek 11.29

Sygnał zaprezentowany na rysunku 11.29 ma bardzo silną składową stałą zaburzoną w niewielkim stopniu przez sygnał zmienny, wahający się od wartości  $U_X$  do wartości  $U_{MAX}$ . Jeśli dobierzesz parametry  $C_1$ ,  $R_1$  oraz  $R_L$  tak, by stała czasowa rozładowania kondensatora  $C_1$  była mniej więcej dziesięciokrotnie dłuższa od czasu trwania impulsu wejściowego, wartość  $U_X$  będzie wynosić około 80% wartości  $U_{MAX}$ .

Jeśli czas rozładowania kondensatora  $C_1$  będzie przeszło dziesięć razy dłuższy od czasu trwania impulsu wejściowego, filtr jeszcze bardziej wygładzi sygnał.

W dalszej części tego rozdziału będziemy zakładać, że stała czasowa rozładowania kondensatora jest dziesięciokrotnością czasu trwania impulsu wejściowego.

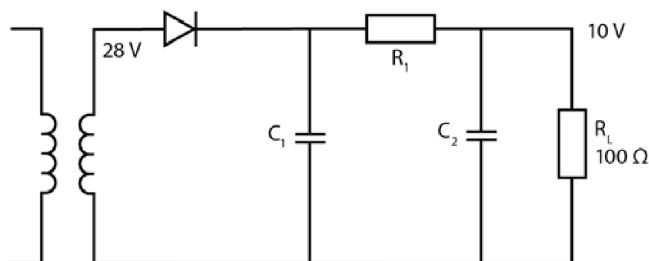
### Zadanie

Oszacuj średnią wielkość sygnału wyjściowego dla przebiegu przedstawionego na rysunku 11.29.

#### Odpowiedź

Około 90%  $U_{MAX}$ .

**19** Sygnał wychodzący z uzwojenia wtórnego transformatora ma wartość  $28 V_{SK}$  i częstotliwość 60 Hz (rysunek 11.30). Do zasilania obciążenia o oporze  $100 \Omega$  jest potrzebny stały sygnał 10 V.



Rysunek 11.30

### Zadanie

Ile wynosi wartość maksymalna sygnału, który przejdzie przez prostownik?

#### Odpowiedź

Napięcie na uzwojeniu wtórnym transformatora to  $28 V_{SK}$ , zatem

$$U_{MAX} = \sqrt{2} \cdot U_{SK} = 1,414 \cdot 28 V_{SK} = 39,59 V, \text{ czyli około } 40 V.$$

**20** Rysunek 11.31 przedstawia przebieg wyprostowanego sygnału wychodzącego z diody prostownika półokresowego.

### Zadanie

Oblicz czas trwania jednego impulsu.



Rysunek 11.31

**Odpowiedź**

Częstotliwość 60 Hz odpowiada sześćdziesięciu cyklom odbywanym w czasie jednej sekundy (sześćdziesięciu **długościom fali** przypadającym na sekundę). Oznacza to, że jeden cykl trwa  $1/60$  sekundy.

$$\frac{1}{60} \text{ s} = \frac{1000}{60} \text{ ms} = 16,67 \text{ ms}.$$

Czas trwania jednego impulsu (połowa długości fali) to zatem 8,33 ms.

**21** Średnie stałe napięcie mierzone w punkcie B obwodu przedstawionego na rysunku 11.30 to około 90% maksymalnej wartości sinusoidy wychodzącej z transformatora,  $U_B = 0,9 \cdot 40 \text{ V} = 36 \text{ V}$ . Opory  $R_1$  i  $R_L$  działają niczym dzielnik napięcia, który zmniejsza otrzymywane w ten sposób 36 V do potrzebnych 10 V.

**Zadanie**

Skorzystaj ze wzoru opisującego dzielnik napięcia i oblicz wartość  $R_1$ , która pozwoli uzyskać spadek napięcia równy 10 V na 100-omowym oporze obciążenia.

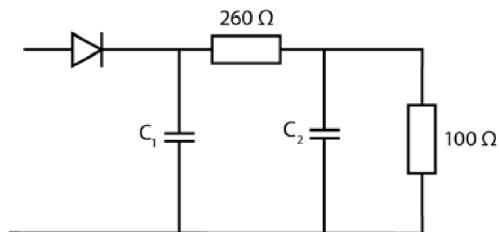
**Odpowiedź**

$$U_{wY} = \frac{U_{WE} \cdot R_L}{R_1 + R_L}$$

$$10 = \frac{36 \cdot 100}{R_1 + 100},$$

stąd  $R_1 = 260 \Omega$ .

**22** Rysunek 11.32 przedstawia prostownik półokresowy pracujący w obwodzie z 260-omowym opornikiem, którego wartość wyznaczyłeś w poprzednim problemie.



Rysunek 11.32

Określ teraz wartość kondensatora  $C_1$ , która pozwoli uzyskać czas rozładowania na dwóch opornikach równy dziesięciu okresom trwania impulsów wejściowych.

### Zadania

- A. Ile powinna wynosić stała czasowa rozładowania kondensatora w obwodzie przedstawionym na rysunku 11.32? Odwołaj się do problemów 18. i 20.
- B. Znając stałą czasową, oblicz wartość  $C_1$ .

### Odpowiedzi

A. Stała czasowa ma być dziesięciokrotnością czasu trwania impulsu (8,33 ms), zatem:

$$\tau = 10 \cdot 8,33 \text{ ms} = 83,3 \text{ ms} \text{ lub } 0,0833 \text{ s.}$$

B.  $\tau = R \cdot C = (R_1 + R_L) \cdot C_1 = 360 \cdot C_1$ .

$$\text{Stąd } 0,0833 = 360 \cdot C_1, \text{ czyli } C_1 = 230 \text{ } \mu\text{F.}$$

**23** Rysunek 11.33 przedstawia przebiegi sygnałów pobieranych w różnych punktach układu prostownika półokresowego.

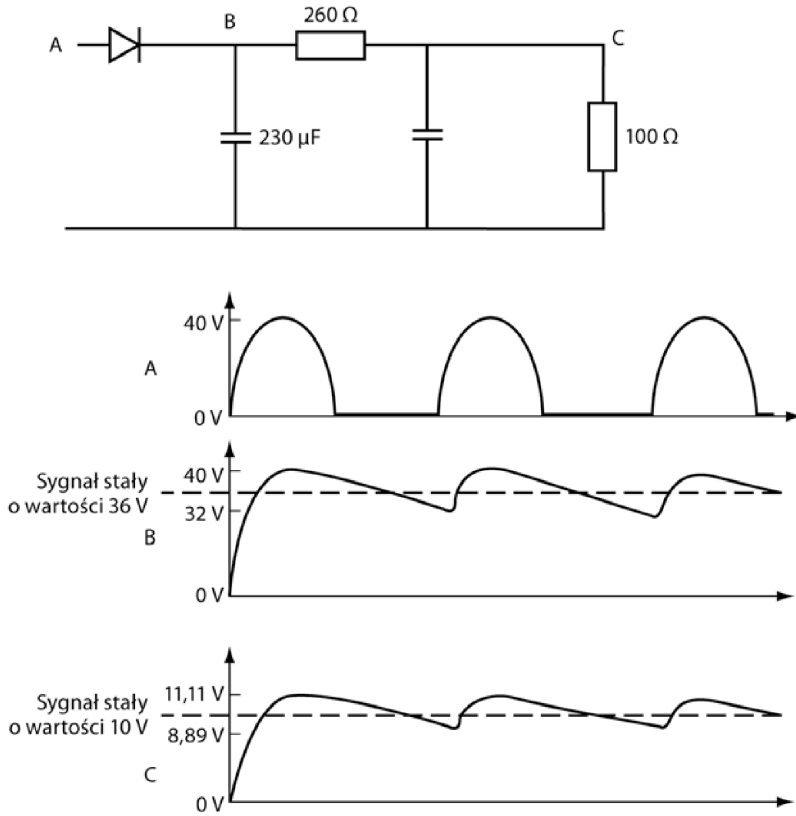
### Zadania

- A. Jak zmienia się napięcie pomiędzy punktami B i C?
- B. Jak zmienia się przebieg sygnału pomiędzy punktami A i C?

### Odpowiedzi

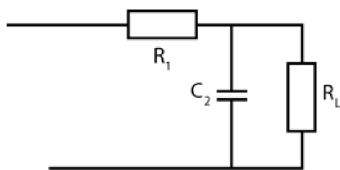
A. Napięcie spada z 36 V do 10 V.

B. Przebieg tętniący zostaje przefiltrowany do stałego sygnału 10 V z niewielkimi odchyleniami.



Rysunek 11.33

**24** W większości przypadków po jednokrotnym filtrowaniu sygnału jego składowa zmienna jest nadal zbyt duża, więc wymaga on kolejnego filtrowania. Rysunek 11.34 przedstawia fragment prostownika półkresowego z dzielnikiem napięcia zbudowanym z opornika  $R_1$  oraz połączenia równoległego elementów  $R_L$  i  $C_2$ . Dzielnik ten zmniejszy składową zmienną i obniży poziom napięcia stałego.



Rysunek 11.34

Dobierz taką wartość kondensatora  $C_2$ , dla której jego reaktancja ( $X_{C2}$ ) będzie nie większa niż jedna dziesiąta oporności obciążenia. Elementy  $C_2$ ,  $R_1$  oraz  $R_L$  tworzą dzielnik napięcia zmiennego. W problemie 26. z rozdziału 6.

opisaliśmy, jak dobrać wartość kondensatora  $C_2$ , by ułatwić sobie obliczenia dotyczące obwodu dzielnika prądu zmiennego zbudowanego z połączonych równolegle opornika i kondensatora.

### Zadania

- Ile powinna wynosić wartość  $X_{C2}$ ?
- Jakim wzorem jest opisana reaktancja kondensatora?
- Ile wynosi częstotliwość zmiennej składowej sygnału?
- Oblicz pojemność kondensatora  $C_2$ .

### Odpowiedzi

A.  $X_{C2} = \frac{R_L}{10} = \frac{100}{10} = 10 \Omega$  lub mniej.

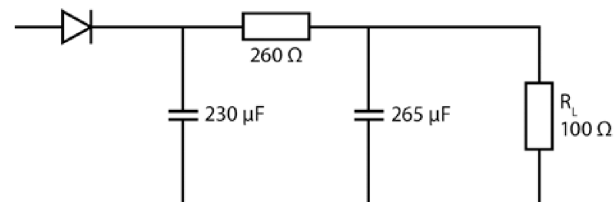
B.  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ .

C. 60 Hz. Jest ona identyczna z częstotliwością fali sinusoidalnej wychodzącej z transformatora.

D. Po przekształceniu wzoru na reaktancję i podstawieniu do niego znanych wartości:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 10 \Omega} = 265 \mu\text{F}.$$

**25** Rysunek 11.35 przedstawia układ prostownika półkresowego po uzupełnieniu go o wartości oporników i kondensatorów.



**Rysunek 11.35**

Ponieważ reaktancja  $X_{C2}$  ma wartość równą jednej dziesiątej oporu  $R_L$ , w obliczeniach prowadzonych dla prądu zmiennego możesz zignorować istnienie obciążenia. Rysunek 11.36 przedstawia układ dzielnika napięcia po tym uproszczeniu.



Rysunek 11.36

### Zadania

- A. Ile wynosi maksymalne napięcie zmienne na wejściu do dzielnika napięcia?  
 B. Określ składową zmienną sygnału przepływającego przez opornik  $R_L$ , wykorzystując w tym celu wzór dzielnika napięcia omówiony w problemie 26. z rozdziału 6.

### Odpowiedzi

A.  $U_{PP} = U_{MAX} - U_X = 40 \text{ V} - 32 \text{ V} = 8 \text{ V}_{PP}$ .

B. Dla zmiennej składowej sygnału:

$$U_{WY} = U_{WE} \cdot \frac{X_{C2}}{\sqrt{X_{C2}^2 + R_1^2}}$$

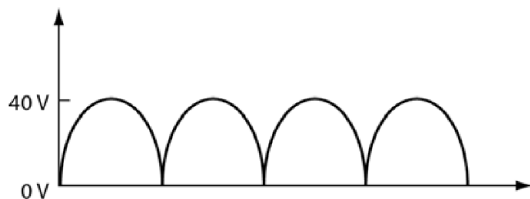
$$U_{WY} = 8 \cdot \frac{10}{\sqrt{10^2 + 260^2}} = 0,31 \text{ V}_{PP}$$

**UWAGA** Wynik oznacza, że wprowadzenie do układu kondensatora  $C_2$  zmniejsza składową zmienną widoczną na wykresie C rysunku 11.33, której maksymalna wartość osiągała 11,11 V, a minimalna 8,89 V. Teraz wartość maksymalna to 10,155 V, a minimalna — 9,845 V. Widzisz zatem, że dodanie kondensatora  $C_2$  pozwoliło osiągnąć założony cel — wygładziło sygnał tak, że w tej chwili jest on znacznie bliższy średniej wartości 10 V.

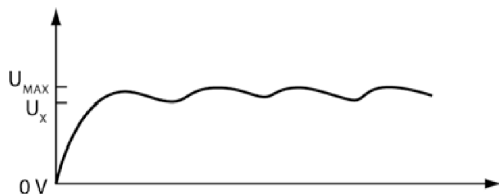
**26** Obliczenia prowadzone dla układu prostownika półokresowego można powtórzyć także dla układu z prostownikiem pełnokresowym. W kilku następnych problemach będziesz wyznaczać wartości  $R_1$ ,  $C_1$  i  $C_2$ , które pozwolą uzyskać spadek napięcia o wartości 10 V na 100-omowym obciążeniu pracującym w układzie prostownika pełnokresowego. Prostownik jest częścią zasilacza z transformatorem, który na uzwojeniu wtórnym podaje napięcie 28 V<sub>SK</sub>.

Rysunek 11.37 przedstawia przebieg sygnału wychodzącego z części prostującej układu.

Rysunek 11.38 przedstawia przebieg sygnału po przejściu przez kondensator filtrujący.



Rysunek 11.37



Rysunek 11.38

Jeśli stała czasowa rozładowania kondensatora  $C_1$  jest dziesięciokrotnie dłuższa od okresu przebiegu sygnału, wartość napięcia  $U_X$  wynosi około 90% napięcia maksymalnego  $U_{MAX}$ . Średnia sygnału stałego w tym obwodzie to 95%  $U_{MAX}$ .

### Zadania

- Ile wynosi średnie napięcie w punkcie B układu z prostownikiem półokresowym, przedstawionego na rysunku 11.33?
- Ile wynosi średni sygnał napięcia stałego dla przebiegu pokazanego na rysunku 11.38, jeśli  $U_{MAX} = 40 \text{ V}$ ?
- Dlaczego prostownik pełnokresowy daje wyższe napięcie średnie niż prostownik półokresowy?

### Odpowiedzi

- 36 V, czyli 90% wartości  $U_{MAX}$ .
- 38 V, czyli 95% wartości  $U_{MAX}$ .
- Różnica ta wynika stąd, że kondensator pracujący w obwodzie prostownika pełnokresowego nie rozładowuje się tak bardzo jak kondensator w obwodzie prostownika półokresowego, więc składowa zmienna w pierwszym przypadku jest nieco mniejsza. To zaś oznacza wyższą wartość napięcia minimalnego  $U_X$  i podniesienie wartości średniej napięcia stałego.

**27** Wartość opornika  $R_1$  w prostowniku pełnookresowym oblicza się tak samo, jak wartość opornika  $R_1$  pracującego w układzie prostownika półokresowego (problem 21.).

### Zadanie

Oblicz wartość  $R_1$ , jeśli wiesz, że  $R_L = 100 \Omega$ ,  $U_{WE} = 38 \text{ V}$ , a spadek napięcia na obciążeniu  $R_L$  ma wynosić  $10 \text{ V}$ .

### Odpowiedź

$$U_{WY} = 10 \text{ V} = \frac{U_{WE} \cdot R_L}{R_1 + R_2} = \frac{38 \cdot 100}{R_1 + 100}.$$

Stąd  $R_1 = 280 \Omega$ .

**28** Metoda, którą obliczałeś pojemność kondensatora  $C_1$  dla prostownika półokresowego (problem 22.), sprawdzi się także w przypadku prostownika pełnookresowego.

### Zadanie

Oblicz wartość  $C_1$ .

### Odpowiedź

Przy stałej czasowej  $\tau = 83,3 \text{ ms}$  i oporze  $R_1 + R_L = 380 \Omega$  pojemność wynosi  $220 \mu\text{F}$ .

**29** Równanie dzielnika napięcia pozwala określić wielkość składowej zmiennej sygnału, która przechodzi przez obciążenie (w naszym przypadku  $R_L = 100 \Omega$ ) zasilane z zasilacza z prostownikiem pełnookresowym (w naszym przypadku  $R_1 = 280 \Omega$ ). Gdy maksymalne napięcie wynosi  $U_{MAX} = 40 \text{ V}$ , spadek napięcia na obciążeniu wynosi  $10,52 \text{ V}$ , jeśli przyjmujemy zasilanie napięciem minimalnym  $U_X = 36 \text{ V}$ , spadek ten wyniesie  $9,47 \text{ V}$ . Oznacza to, że napięcie na obciążeniu zmienia się w granicach od  $10,52 \text{ V}$  do  $9,47 \text{ V}$ , co średnio daje  $U = 10 \text{ V}$ . Po dodaniu drugiego kondensatora, wstawionego do obwodu równolegle do obciążenia, składowa zmienna sygnału zmniejszy się jeszcze bardziej.

**Zadania**

Przeprowadź obliczenia zgodnie ze schematem przedstawionym w problemie 24., by wyznaczyć wartość  $C_2$ .

- A. Oblicz reaktancję drugiego kondensatora ( $X_{C2}$ ).  
 B. Oblicz pojemność  $C_2$ . (Pamiętaj, że częstotliwość składowej zmiennej sygnału w układzie z prostownikiem pełnookresowym wynosi 120 Hz).

**Odpowiedzi**

A. Reaktancja nie może przekraczać jednej dziesiątej wartości oporu obciążenia, zatem powinna wynosić nie więcej niż 10  $\Omega$ .

$$B. C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi f X_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 120 \text{ Hz} \cdot 10 \Omega} = 135 \mu\text{F}.$$

**30** Po przejściu przez pierwszy kondensator filtrujący zmiany sygnału wahają się od 36 V do 40 V, zaś na obciążeniu napięcie zmienia się od 9,47 V do 10,52 V.

**Zadanie**

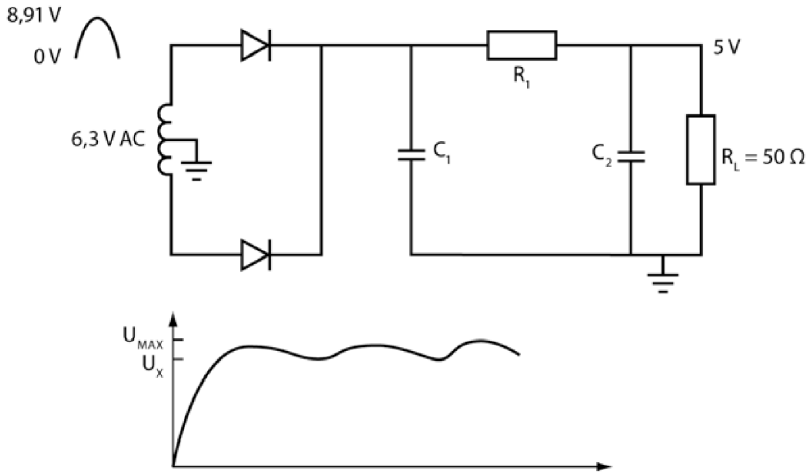
Oblicz minimalną i maksymalną wartość napięcia wyjściowego, jeśli w układzie filtrującym znajdzie się drugi kondensator połączony równolegle z obciążeniem. Jego pojemność będzie wynosić 135  $\mu\text{F}$ . Możesz wykorzystać te same wzory, które posłużyły podczas rozwiązywania problemu 25. dotyczącego prostownika półokresowego. Pamiętaj, że  $X_{C2} = 10 \Omega$  (wyznaczane w problemie 29.),  $R_1 = 280 \Omega$  (problem 27.), a AC  $U_{WE} = U_{MAX} - U_X = 40 \text{ V} - 36 \text{ V} = 4 \text{ V}_{PP}$ .

**Odpowiedź**

$$U_{WY} = U_{WE} \cdot \frac{X_{C2}}{\sqrt{X_{C2}^2 + R_1^2}} = 0,143 \text{ V}_{PP}.$$

W przybliżeniu  $U_{WY} = 0,14 \text{ V}_{PP}$ , zatem sygnał wyjściowy będzie wahać się od wartości 10,07 V do 9,93 V. Oznacza to, że wprowadzenie do układu drugiego kondensatora wydatnie obniży zmiany sygnału. Po zastosowaniu prostownika pełnookresowego zakłócenie sygnału nie sięga nawet połowy wyniku otrzymanego dla prostownika półokresowego, który wyznaczałeś w problemie 25. Mówiąc inaczej, prostownik półokresowy daje znacznie mniej zakłócony sygnał niż prostownik pełnookresowy.

**31** Rysunek 11.39 przedstawia układ prostownika pełnookresowego, który daje 5 V napięcia na obciążeniu  $50 \Omega$ . Oblicz wartości pozostałych komponentów.



Rysunek 11.39

### Zadania

- Ile wynoszą  $U_{MAX}$ ,  $U_X$  oraz średnie napięcie na pierwszym kondensatorze?
- Oblicz wartość  $R_1$  potrzebną do uzyskania sygnału stałego wyjściowego rzędu 5 V.
- Oblicz wartość  $C_1$ .
- Oblicz wartość  $C_2$ .
- Ile wynosi składowa zmienna sygnału?
- Na osobnej kartce narysuj schemat obwodu i opisz poszczególne elementy wartościami.

### Odpowiedzi

A.  $U_{MAX} = 6,3 \cdot \sqrt{2} = 8,91 \text{ V}$ ,  $U_X = 90\% U_{MAX} = 8,02 \text{ V}$ .

Średnia wartość sygnału to  $90\% U_{MAX}$ , co w tym przypadku wynosi 8,46 V.

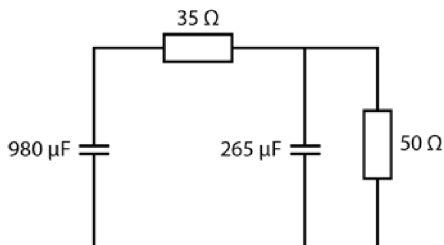
B. Około  $35 \Omega$ .

C.  $980 \mu\text{F}$ .

D. Dla  $X_{C2} = 5 \Omega$  i  $f = 120 \text{ Hz}$   $C_2 = 265 \mu\text{F}$ .

E. Sygnał wchodzący do filtra waha się od wartości 8,91 V do 8,02 V, co daje  $U_{PP} = 0,89 V_{PP}$ . Z równania dzielnika napięcia, w którym  $R_1 = 35 \Omega$ , a  $X_{C2} = 5 \Omega$ , wynika, że składowa zmienna  $U_{WY} = 0,13 V_{PP}$ . Oznacza to, że sygnał zmienia się od wartości 5,065 V do 4,935 V, czyli zakłócenia są bardzo małe.

F. Patrz rysunek 11.40.



Rysunek 11.40

Opisana wyżej prosta procedura pozwala zawsze zbudować działający zasilacz. Nie jest ona jedyną, ale z pewnością jest najprostszą i najbardziej skuteczną.

## Podsumowanie

W rozdziale tym zawarliśmy rozważania dotyczące idei budowy zasilacza i przykładowe obliczenia pozwalające zaprojektować jego układ. Dowiedziałeś się z niego:

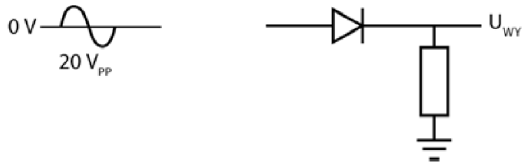
- jakie metody prostowania sygnału stosuje się w praktyce;
- jak wyglądają półokresowe i pełnookresowe układy prostujące;
- jakie obliczenia należy wykonać, by określić wartości poszczególnych elementów układów prostujących pół- i pełnookresowych.

## Test zrozumienia

Podane niżej zadania sprawdzą Twoją znajomość zagadnień przedstawionych w tym rozdziale. Do prowadzenia obliczeń i rysowania wykresów użyj osobnej kartki papieru. Później porównaj otrzymane wyniki z odpowiedziami umieszczonymi na końcu rozdziału.

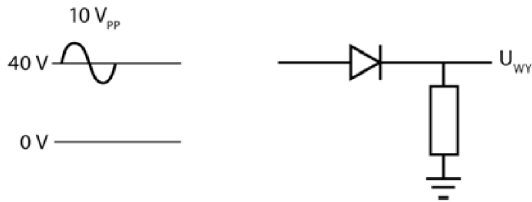
W zadaniach 1 – 5 narysuj przebieg sygnału generowanego przez każdy z przedstawionych układów. Obok schematu podano informację o napięciu wejściowym.

1. Patrz rysunek 11.41.



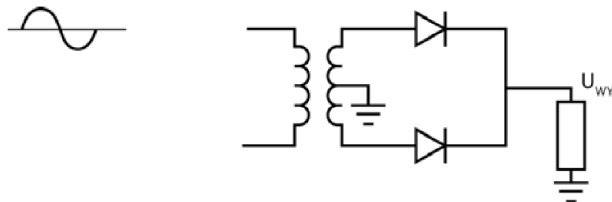
**Rysunek 11.41**

2. Patrz rysunek 11.42.



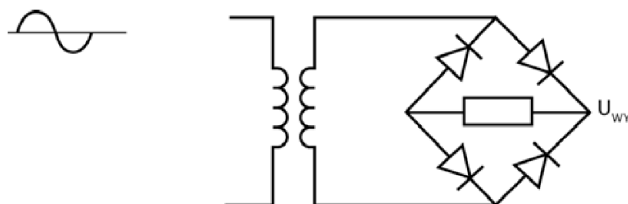
**Rysunek 11.42**

3. Patrz rysunek 11.43.



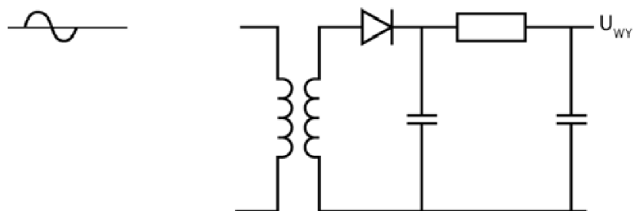
**Rysunek 11.43**

4. Patrz rysunek 11.44.



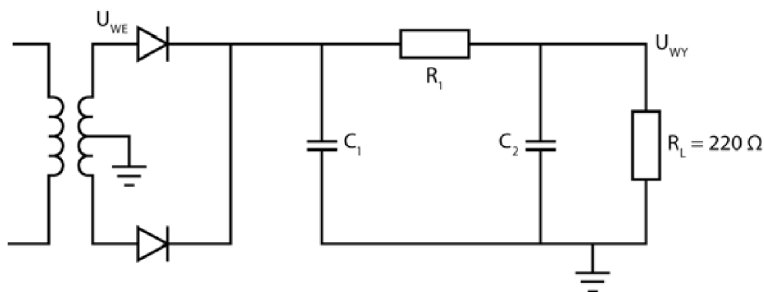
**Rysunek 11.44**

5. Patrz rysunek 11.45.



Rysunek 11.45

6. Układ przedstawiony na rysunku 11.46 jest zasilany z transformatora o napięciu wyjściowym  $100\text{ V}_{SK}$  podawanym z częstotliwością  $60\text{ Hz}$ . Obciążenie  $220\ \Omega$  potrzebuje możliwie gładkiego sygnału  $28\text{ V DC}$ . Określ wartości  $R_1$ ,  $C_1$  i  $C_2$ . Podaj przybliżoną wartość zakłóceń sygnału.



Rysunek 11.46

### Odpowiedzi do testu zrozumienia

Jeśli otrzymane odpowiedzi nie zgadzają się z kluczem, powtórz problemy podane w nawiasach, zanim przejdziesz do następnego rozdziału.

1. Patrz rysunek 11.47. (problemy 1 – 5)



Rysunek 11.47

2. Patrz rysunek 11.48. (problem 2.)



Rysunek 11.48

3. Patrz rysunek 11.49. (problem 11.)



Rysunek 11.49

4. Patrz rysunek 11.50.

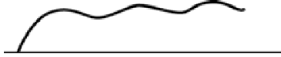
(problem 13.)



**Rysunek 11.50**

5. Patrz rysunek 11.51.

(problemy 15 – 18)



**Rysunek 11.51**

6.  $R_1 = 833 \Omega$ ,  $C_1 = 79 \mu\text{F}$ , niech  $X_{C_2} = 22 \Omega$ , stąd  $C_2 = 60 \mu\text{F}$ .

(problemy 26 – 30)

$$U_{WV} = 14 \cdot \frac{22}{\sqrt{22^2 + 833^2}} = 0,37 V_{pp}.$$



## Wnioski i test końcowy

Książka ta przedstawia podstawowe idee elektroniki i wzory, których znajomość umożliwi Ci dalsze badanie zagadnień związanych ze współczesną elektroniką. Jest ona przeznaczona zarówno dla hobbystów, jak i dla osób zainteresowanych kształceniem się dalej w zawodzie elektronika czy studiami technicznymi na tym kierunku.

### Wnioski

---

Po zakończeniu lektury powinieneś bez trudu radzić sobie ze zrozumieniem zagadnień przedstawianych w podręcznikach i artykułach przeznaczonych dla osób obytych już nieco z tematem elektroniki. Powinieneś też być w stanie tworzyć własne układy, projektować je oraz rozszerzać swoją wiedzę związaną z elektroniką. Staraliśmy się przede wszystkim zapoznać Cię z:

- wszystkimi najważniejszymi elementami dyskretnymi układów elektronicznych oraz oznaczeniami stosowanymi w schematach obwodów;
- teorią działania elementów w układach;
- schematem dobierania najbardziej wydajnych zestawień elementów;
- ideą projektowania prostych obwodów;
- zasadami budowania prostych obwodów elektronicznych.

Jeśli chcesz sprawdzić poziom swojej wiedzy, spróbuj rozwiązać test umieszczony na końcu tego rozdziału. Sprawdzi on, ile zrozumiałeś z zaprezentowanej tu teorii i jak radzisz sobie z rozwiązywaniem zadań praktycznych.

Jeżeli wyniki testu będą zadowalające i uznasz, że rozumiesz już zagadnienia przedstawione w tej książce, zajrzyj do dodatku E, w którym zebraliśmy informacje o dodatkowych źródłach wiedzy. Polecamy też:

- książkę *Sztuka elektroniki cz. I i II* Paula Horowitza i Winfielda Hilla (Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WŁK, Warszawa 2010), która doskonale nada się do poszerzenia podstaw wiedzy z elektroniki;
- książkę *Electronics Projects for Dummies* Earla Boysena i Nancy Muir (Wiley, Indianapolis 2006), będącą doskonałym zbiorem projektów, których wykonanie pozwoli Ci pogłębić znajomość podstaw elektroniki;
- przeszukanie sieci pod kątem interesujących projektów, które mógłbyś wykonać;
- zapoznanie się z zawartością strony Earla Boysena, *www.BuildingGadgets.com*, na której znajdziesz wiele ciekawych projektów, wskazówek oraz odnośników (strona w języku angielskim).

**UWAGA** Osoby zainteresowane bardziej zaawansowanymi zagadnieniami z tej dziedziny powinny mieć świadomość, że kształcenie się w zawodzie elektronika (bądź elektrotechnika) lub inżyniera elektronika (bądź elektryka) znacznie się różni. Elektrycy czy elektrotechnicy zdobywają wykształcenie w szkołach zawodowych, liceach technicznych i technikumach, natomiast inżynierowie, którym do pracy niezbędne są pewne zagadnienia z wyższej matematyki, kończą odpowiednie studia na uczelniach technicznych.

Niezależnie od tego, na jaką ścieżkę rozwoju zdecydujesz się w przyszłości, książka ta zapewni Ci solidne podstawy do dalszego zdobywania wiedzy. Powodzenia, młody elektroniku!

---

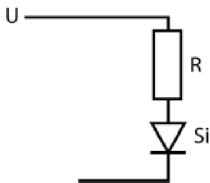
## Test końcowy

---

Pytania testu końcowego pozwolą Ci ocenić ogólny poziom wiedzy z elektroniki. Odpowiedzi i odwołania do konkretnych rozdziałów znajdują się na końcu testu. Obliczenia i rysunki wykonuj na osobnej kartce.

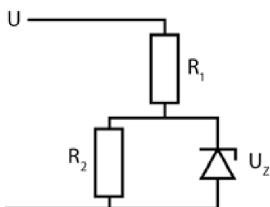
1. Znajdź napięcie, jeśli  $R = 1 \text{ M}\Omega$ , a  $I = 2 \text{ }\mu\text{A}$ .
2. Znajdź natężenie prądu, jeśli  $U = 5 \text{ V}$ , a  $R = 10 \text{ }\Omega$ .
3. Znajdź opór, jeśli  $U = 28 \text{ V}$ , a  $I = 4 \text{ A}$ .
4. Znajdź opór zastępczy układu połączonych równolegle oporników o wartościach  $330 \text{ }\Omega$  i  $220 \text{ }\Omega$ .
5. Znajdź moc, jeśli  $U = 28 \text{ V}$ , a  $I = 5 \text{ mA}$ .
6. Jaka moc wydzielili się na oporniku o wartości  $220 \text{ }\Omega$ , jeśli płynie przez niego prąd  $30,2 \text{ mA}$ ?
7. Jaki maksymalny prąd może popłynąć przez opornik o mocy znamionowej  $0,5 \text{ W}$  i oporze  $1000 \text{ }\Omega$ ?
8. Dwa oporniki,  $10 \text{ }\Omega$  i  $32 \text{ }\Omega$ , zostały połączone szeregowo i podłączone do źródła napięcia  $12 \text{ V}$ . Oblicz spadek napięcia na każdym z nich i powiedz, czemu jest równa suma tych wartości.

9. Prąd o natężeniu 1 A rozplywa się na dwie gałęzie układu połączonych równolegle oporników o wartościach  $6 \Omega$  i  $12 \Omega$ . Określ natężenie prądu w każdej z gałęzi.
10. Prąd o natężeniu 273 mA rozplywa się na dwie gałęzie układu połączonych równolegle oporników o wartościach  $330 \Omega$  i  $660 \Omega$ . Określ natężenie prądu w każdej z gałęzi.
11. Określ stałą czasową obwodu, w którym  $R = 10 \text{ k}\Omega$  i  $C = 1 \mu\text{F}$ .
12. Określ stałą czasową obwodu, w którym  $R = 1 \text{ M}\Omega$  i  $C = 250 \mu\text{F}$ .
13. Trzy kondensatory, o pojemnościach  $1 \mu\text{F}$ ,  $2 \mu\text{F}$  i  $3 \mu\text{F}$ , połączono równolegle. Oblicz pojemność zastępczą tego układu.
14. Trzy kondensatory, o pojemnościach  $100 \mu\text{F}$ ,  $220 \mu\text{F}$  i  $220 \mu\text{F}$ , połączono szeregowo. Oblicz pojemność zastępczą tego układu.
15. Trzy kondensatory, o pojemnościach  $22 \text{ pF}$ ,  $22 \text{ pF}$  i  $33 \text{ pF}$ , połączono szeregowo. Oblicz pojemność zastępczą tego układu.
16. Ile wynosi napięcie progowe dla diody germanowej?
17. Ile wynosi napięcie progowe dla diody krzemowej?
18. Znajdź prąd płynący przez diodę  $I_D$  w układzie przedstawionym na rysunku 12.1, jeśli  $U = 5 \text{ V}$  i  $R = 1 \text{ k}\Omega$ .



Rysunek 12.1

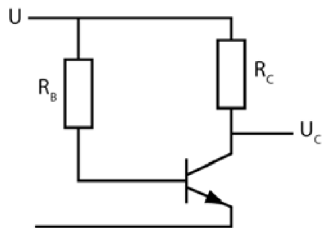
19. Przyjmij, że w układzie z zadania 15.  $U = 12 \text{ V}$ , a  $R = 100 \Omega$ . Znajdź prąd  $I_D$ .
20. Przyjmij, że w obwodzie przedstawionym na rysunku 12.2  $U = 100 \text{ V}$ ,  $R_1 = 7,2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$ , a  $U_Z = 28 \text{ V}$ . Znajdź prąd  $I_Z$  płynący przez diodę Zenera.



Rysunek 12.2

21. Przyjmij, że w układzie z zadania 20.  $U = 10 \text{ V}$ ,  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ , a  $U_Z = 6,3 \text{ V}$ . Znajdź prąd  $I_Z$  płynący przez diodę Zenera.

22. Rozwiąż zadanie, korzystając z danych przedstawionych na rysunku 12.3.



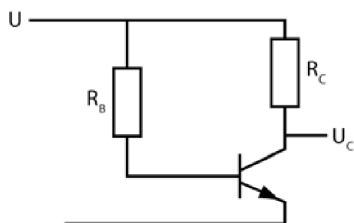
**Rysunek 12.3**

Znajdź stałe napięcie na kolektorze  $U_C$ , wiedząc, że  $U = 28 \text{ V}$ ,  $\beta = 10$ ,  $R_B = 200 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ .

23. Posłuż się ponownie układem przedstawionym na rysunku 12.3 i znajdź  $R_B$ , jeśli  $U = 12 \text{ V}$ ,  $\beta = 250$ ,  $R_C = 2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $U_C = 6 \text{ V}$ .
24. Posłuż się ponownie układem przedstawionym na rysunku 12.3 i znajdź  $\beta$ , jeśli  $U = 10 \text{ V}$ ,  $R_B = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $U_C = 5 \text{ V}$ .
25. Jak nazywają się trzy styki tranzystorów JFET i który z nich odpowiada za kontrolowanie pracy tranzystora?

Kiedy prąd drenu osiąga maksymalną wartość?

26. Rozwiąż zadanie, korzystając z danych przedstawionych na rysunku 12.4.



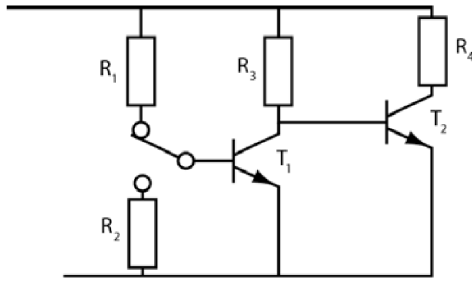
**Rysunek 12.4**

Znajdź wartość  $R_B$ , przy której tranzystor jest włączony, jeśli  $U = 14 \text{ V}$ ,  $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 50$ .

27. Posłuż się ponownie układem przedstawionym na rysunku 12.4 i znajdź  $R_B$ , przy którym tranzystor jest włączony, jeśli  $U = 5 \text{ V}$ ,  $R_C = 4,7 \text{ k}\Omega$ , a  $\beta = 100$ .
28. Rozwiąż zadanie, korzystając z danych przedstawionych na rysunku 12.5.

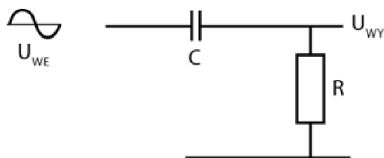
Znajdź wartości oporów  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$ , przy których tranzystor  $T_2$  będzie włączać się i wyłączać, jeśli  $U = 10 \text{ V}$ ,  $\beta_1 = 50$ ,  $\beta_2 = 20$ , a  $R_4 = 2,2 \text{ k}\Omega$ .

29. Posłuż się ponownie układem przedstawionym na rysunku 12.5 i znajdź wartości oporów  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$ , przy których tranzystor  $T_2$  będzie włączać się i wyłączać, jeśli  $U = 28 \text{ V}$ ,  $\beta_1 = 30$ ,  $\beta_2 = 10$ , a  $R_4 = 220 \Omega$ .



Rysunek 12.5

30. Prąd nasycenia drenu w tranzystorze JFET z kanałem  $N$  wynosi  $I_{DSS} = 14 \text{ mA}$ . Oblicz opór drenu  $R_D$ , jeśli dren jest podłączony do napięcia  $28 \text{ V}$ .
31. Narysuj pełny przebieg fali sinusoidalnej.
32. Na rysunku wykonanym do zadania 31. zaznacz wartości  $U_{PP}$ ,  $U_{SK}$  oraz okres fali.
33. Oblicz  $U_{SK}$ , jeśli  $U_{PP} = 10 \text{ V}$ .
34. Oblicz  $U_{PP}$ , jeśli  $U_{SK} = 120 \text{ V}$ .
35. Oblicz okres fali sinusoidalnej o częstotliwości  $14,5 \text{ Hz}$ .
36. Znajdź reaktancję  $X_C$  kondensatora o pojemności  $200 \mu\text{F}$  podłączonego do źródła o częstotliwości  $60 \text{ Hz}$ .
37. Jaka pojemność daje  $50 \Omega$  reaktancji przy częstotliwości  $10 \text{ kHz}$ ?
38. Znajdź reaktancję indukcyjną  $X_L$  dla cewki o indukcyjności  $10 \text{ mH}$ , gdy płynie przez nią sygnał o częstotliwości  $440 \text{ Hz}$ .
39. Znajdź indukcyjność cewki, która wykazuje  $100 \Omega$  reaktancji dla sygnału o częstotliwości  $1 \text{ kHz}$ .
40. Znajdź częstotliwości rezonansowe dla połączonych szeregowo i równoległe kondensatora o pojemności  $0,1 \mu\text{F}$  i cewki o indukcyjności  $4 \text{ mH}$ . Przyjmij, że opór wewnętrzny cewki jest tak mały, iż można go pominąć.
41. Rozwiąż zadanie, korzystając z danych przedstawionych na rysunku 12.6.

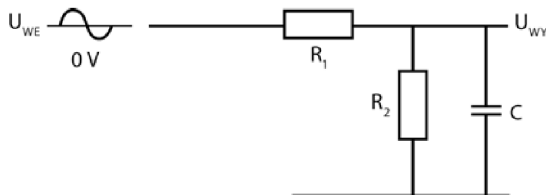


Rysunek 12.6

Znajdź wartości  $X_C$ ,  $Z$ ,  $U_{WY}$ ,  $I$ ,  $\text{tg } \theta$  i  $\theta$ , jeśli  $U_{WE} = 10 \text{ V}_{PP}$ ,  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $C = 0,1 \mu\text{F}$ ,  $R = 1600 \Omega$ .

42. Posłuż się ponownie układem przedstawionym na rysunku 12.6 i znajdź wartości  $X_C$ ,  $Z$ ,  $U_{WY}$ ,  $I$ ,  $\text{tg } \theta$  i  $\theta$ , jeśli  $U_{WE} = 120 \text{ V}_{SK}$ ,  $f = 60 \text{ Hz}$ ,  $C = 0,33 \mu\text{F}$ ,  $R = 6 \text{ k}\Omega$ .

43. W tym zadaniu odwołaj się do schematu z rysunku 12.7.

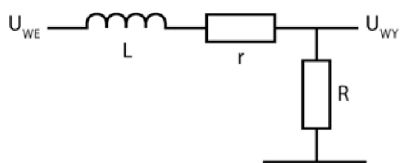


Rysunek 12.7

Oblicz  $X_C$ , AC  $U_{WY}$  i DC  $U_{WY}$ , jeśli  $U_{WE} = 1 V_{PP}$  AC utrzymujące się na poziomie 5 V DC,  $f = 10 \text{ kHz}$ ,  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 0,2 \mu\text{F}$ .

44. Posłuż się ponownie układem przedstawionym na rysunku 12.7 i oblicz  $X_C$ , AC  $U_{WY}$  i DC  $U_{WY}$ , jeśli  $U_{WE} = 0,5 V_{PP}$  AC utrzymujące się na poziomie 10 V DC,  $f = 120 \text{ Hz}$ ,  $R_1 = 80 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$ ,  $C = 1000 \mu\text{F}$ .

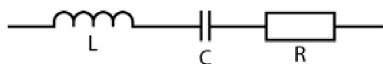
45. W tym zadaniu odwołaj się do schematu przedstawionego na rysunku 12.8.



Rysunek 12.8

W tym obwodzie  $U_{WE} = 10 V_{PP}$  AC utrzymuje się na poziomie 5 V DC,  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $L = 10 \text{ mH}$ ,  $r = 9 \Omega$ ,  $R = 54 \Omega$ . Znajdź AC  $U_{WY}$ , DC  $U_{WY}$ ,  $X_L$ ,  $Z$ ,  $\text{tg } \theta$  i  $\theta$ .

46. W obwodzie przedstawionym na rysunku 12.9  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $C = 0,1 \mu\text{F}$ , a  $R = 10 \Omega$ .



Rysunek 12.9

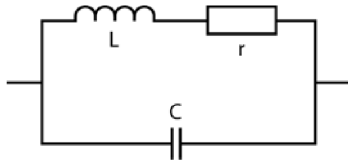
Oblicz  $f_R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ ,  $Z$ ,  $Q$  oraz szerokość pasma przenoszenia.

47. W obwodzie przedstawionym na rysunku 12.10  $L = 10 \text{ mH}$ ,  $C = 0,02 \mu\text{F}$ , a  $r = 7 \Omega$ .

Oblicz  $f_R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ ,  $Z$ ,  $Q$  oraz szerokość pasma przenoszenia.

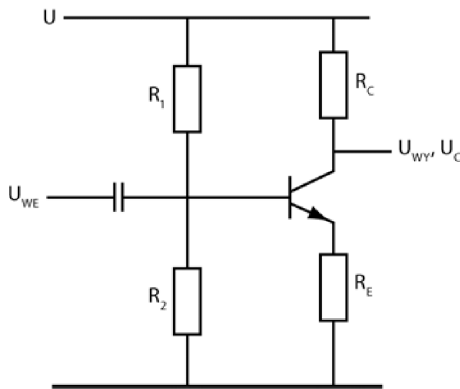
48. Ile wynosi napięcie dla częstotliwości granicznych pasma przenoszenia, jeśli napięcie w obwodzie rezonansowym opisanym w zadaniu 47. osiąga wartość maksymalną równą 8 V?

Ile wynoszą częstotliwości graniczne?



Rysunek 12.10

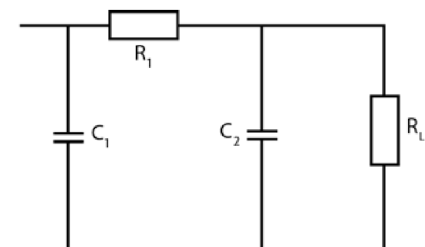
49. Poniższe zadanie rozwiąż w oparciu o dane przedstawione na układzie wzmacniacza (rysunek 12.11).



Rysunek 12.11

- Podaj wartości  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_E$ , dla których wzmacnienie napięciowe wzmacniacza będzie wynosić 10. Przyjmij  $U = 28 \text{ V}$ ,  $R_C = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 100$ .
50. Ponownie odwołaj się do obwodu przedstawionego na rysunku 12.11. Podaj wartości  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_E$ , dla których wzmacnienie napięciowe wzmacniacza będzie wynosić 20. Przyjmij  $U = 10 \text{ V}$ ,  $R_C = 2,2 \text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 50$ .
51. Spójrz na obwód przedstawiony na rysunku 12.11. W jaki sposób należałoby zmodyfikować wzmacniacz opisany w zadaniu 50., by uzyskać w nim maksymalne wzmacnienie? Przyjmij, że minimalna częstotliwość, z jaką ma współpracować wzmacniacz, to  $50 \text{ Hz}$ .
52. Spójrz na obwód wzmacniacza tranzystorowego JFET przedstawiony w problemie 42. z rozdziału 8. Przyjmij, że punkt pracy tranzystora wynosi  $U_{GS} = -2,8 \text{ V}$ , prąd drenu  $I_D = 2,7 \text{ mA}$ , a  $U_{DS} = 12 \text{ V}$ . Znajdź wartości  $R_S$  i  $R_D$ .
53. Jakie będzie wzmacnienie tranzystora opisanego w problemie 52., jeśli jego transkonduktancja wynosi  $4000 \mu\text{S}$ ?
54. Wejście odwracające wzmacniacza operacyjnego ma oporność wejściową  $8 \text{ k}\Omega$ . Ile powinien wynosić opór sprzężenia, by wzmacniacz dawał wzmacnienie 85?
55. Ile wynosi sygnał wyjściowy dawany przez wzmacniacz opisany w pytaniu 54., jeśli sygnał wejściowy to  $2 \text{ mV}$ ?

56. Czym jest generator drgań?
57. Dlaczego do zbudowania generatora drgań potrzebne jest dodatnie sprzężenie zwrotne, a nie ujemne?
58. W jaki sposób jest realizowane sprzężenie zwrotne w generatorze Colpittsa?
59. W jaki sposób jest realizowane sprzężenie zwrotne w generatorze Hartleya?
60. Narysuj układ generatora Colpittsa.
61. Narysuj układ generatora Hartleya.
62. Z jakiego wzoru oblicza się częstotliwość sygnału wyjściowego generatora drgań?
63. Narysuj oznaczenie transformatora z odczepem środkowym.
64. Jak nazywają się cewki stosowane w transformatorze?
65. Podaj równanie wiążące napięcie wejściowe, napięcie wyjściowe i liczbę zwojów każdej z cewek transformatora.
66. Jakim wzorem wyraża się zależność pomiędzy zwojami cewek transformatora a prądami płynącymi w każdej z nich?
67. Jakim wzorem jest opisana zależność pomiędzy impedancją uzwojenia pierwotnego a impedancją uzwojenia wtórnego oraz liczbą zwojów każdej z cewek?
68. Do czego przede wszystkim używamy transformatorów? Podaj dwa zastosowania.
69. Narysuj prosty układ prostownika półokresowego z filtrem i wyjściem.
70. Narysuj prosty układ prostownika pełnookresowego z filtrem i wyjściem.
71. Sygnał wchodzący do prostownika pełnookresowego zasilacza wynosi  $10 V_{SK}$ . Oblicz wartości  $R_1$ ,  $C_1$  i  $C_2$  (rysunek 12.12), które pozwolą uzyskać stały spadek napięcia 5 V na pięćdziesięciomowym obciążeniu.

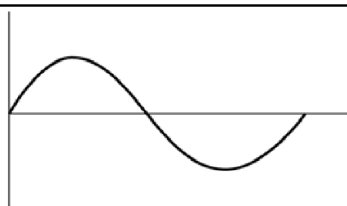


Rysunek 12.12

### Odpowiedzi do testu końcowego

Podane w nawiasach odwołania skierują Cię do rozdziału i problemu, w którym omówiliśmy dane zagadnienie, więc będziesz mógł bez trudu powtórzyć niezbędny materiał.

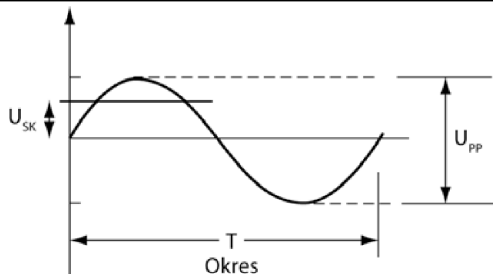
1. $U = 2 \text{ V}$ .	(rozdział 1., problem 5.)
2. $I = 0,5 \text{ mA}$ .	(rozdział 1., problem 6.)
3. $R = 7 \Omega$ .	(rozdział 1., problem 7.)
4. $132 \Omega$ .	(rozdział 1., problem 10.)
5. $P = 140 \text{ mW}$ lub $0,14 \text{ W}$ .	(rozdział 1., problemy 13. i 14.)
6. $0,2 \text{ W}$ .	(rozdział 1., problemy 13. i 15.)
7. $22,36 \text{ mA}$ .	(rozdział 1., problemy 13. i 16.)
8. $2,86 \text{ V}$ ; $9,14 \text{ V}$ ; $12 \text{ V}$ .	(rozdział 1., problemy 23. i 26.)
9. $0,67 \text{ A}$ przez opornik o wartości $6 \Omega$ ; $0,33 \text{ A}$ przez opornik o wartości $12 \Omega$ .	(rozdział 1., problem 28. lub 29.)
10. $91 \text{ mA}$ przez opornik o wartości $660 \Omega$ ; $182 \text{ mA}$ przez opornik o wartości $330 \Omega$ .	(rozdział 1., problem 28. lub 29.)
11. $\tau = 0,01 \text{ s}$ .	(rozdział 1., problem 34.)
12. $\tau = 250 \text{ s}$ .	(rozdział 1., problem 34.)
13. $6 \mu\text{F}$ .	(rozdział 1., problem 40.)
14. $52,4 \mu\text{F}$ .	(rozdział 1., problem 41.)
15. $8,25 \mu\text{F}$ .	(rozdział 1., problem 41.)
16. Około $0,3 \text{ V}$ .	(rozdział 2., problem 10.)
17. Około $0,7 \text{ V}$ .	(rozdział 2., problem 10.)
18. $I_D = 4,3 \text{ mA}$ .	(rozdział 2., problem 14.)
19. $I_D = 120 \text{ mA}$ .	(rozdział 2., problem 14.)
20. $I_Z = 3 \text{ mA}$ .	(rozdział 2., problem 31.)
21. $I_Z = 3,07 \text{ mA}$ .	(rozdział 2., problem 31.)
22. $U_C = 14 \text{ V}$ .	(rozdział 3., problemy 21 – 24)
23. $R_B = 1,1 \text{ M}\Omega$ .	(rozdział 3., problemy 21 – 24)
24. $\beta = 50$ .	(rozdział 3., problemy 21 – 24)
25. Dren, źródło i bramka. Pracą tranzystora JFET steruje bramka.	(rozdział 3., problem 29.)
26. $R_B = 500 \text{ k}\Omega$ .	(rozdział 4., problem 8.)
27. $R_B = 470 \text{ k}\Omega$ .	(rozdział 4., problemy 4 – 8)
28. $R_3 = 44 \text{ k}\Omega$ , $R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega$ , $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$ .	(rozdział 4., problemy 19 – 23)
29. $R_3 = 2,2 \text{ k}\Omega$ , $R_1 = 66 \text{ k}\Omega$ , $R_2 = 66 \text{ k}\Omega$ .	(rozdział 4., problemy 19 – 23)
30. $R_D = 2 \text{ k}\Omega$ .	(rozdział 4., problem 39.)
31. Patrz rysunek 12.13.	(rozdział 5., problem 7.)



Rysunek 12.13

32. Patrz rysunek 12.14.

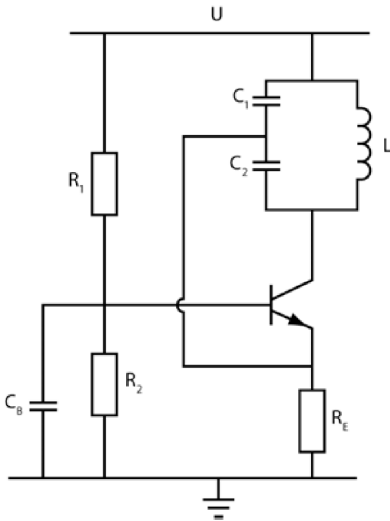
(rozdział 5., problemy 3. i 7.)



Rysunek 12.14

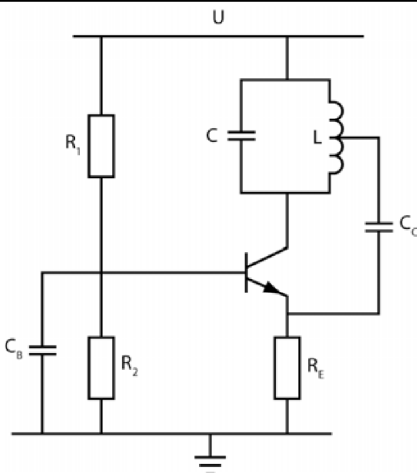
33.	3,535 V.	(rozdział 5., problem 4.)
34.	340 V.	(rozdział 5., problem 5.)
35.	69 $\mu$ s.	(rozdział 5., problem 7.)
36.	13,3 $\Omega$ .	(rozdział 5., problem 14.)
37.	0,32 $\mu$ F.	(rozdział 5., problem 14.)
38.	27,6 $\Omega$ .	(rozdział 5., problem 17.)
39.	16 mH.	(rozdział 5., problem 17.)
40.	8 kHz.	(rozdział 5., problemy 19. i 21.)
41.	$X_C = 1,6 \text{ k}\Omega$ ; $Z = 2236 \Omega$ ; $U_{WY} = 7,07 \text{ V}$ ; $I = 4,4 \text{ mA}$ ; $\text{tg } \theta = 1$ ; $\theta = 45^\circ$ .	(rozdział 6., problemy 10. i 23.)
42.	$X_C = 8 \text{ k}\Omega$ ; $Z = 10 \text{ k}\Omega$ ; $U_{WY} = 72 \text{ V}$ ; $I = 12 \text{ mA}$ ; $\text{tg } \theta = 1,33$ ; $\theta = 53,13^\circ$ .	(rozdział 6., problemy 10. i 23.)
43.	$X_C = 80 \Omega$ , AC $U_{WY} = 8 \text{ mV}$ , DC $U_{WY} = 2,5 \text{ V}$ .	(rozdział 6., problem 26.)
44.	$X_C = 1,33 \Omega$ , AC $U_{WY} = 8,3 \text{ mV}$ , DC $U_{WY} = 2 \text{ V}$ .	(rozdział 6., problem 26.)
45.	$X_L = 62,8 \Omega$ ; $Z = 89 \Omega$ ; AC $U_{WY} = 6,07 \text{ V}$ ; DC $V_{WY} = 4,3 \text{ V}$ ; $\text{tg } \theta = 1$ ; $\theta = 45^\circ$ .	(rozdział 6., problemy 31. i 35.)
46.	$f_R = 16 \text{ kHz}$ , $X_L = 100 \Omega$ , $X_C = 100 \Omega$ , $Z = 10 \Omega$ , $Q = 10$ , $\Delta f = 1,6 \text{ kHz}$ .	(rozdział 7., problemy 2., 6. i 20.)
47.	$f_R = 11254 \text{ Hz}$ , $X_L = X_C = 707 \Omega$ , $Z = 71,4 \Omega$ , $Q = 101$ , $\Delta f = 111 \text{ Hz}$ .	(rozdział 7., problemy 10., 11. i 20.)
48.	$U = 5,656 \text{ V}$ , $f_1 = 11 \text{ 198 Hz}$ , $f_2 = 11 \text{ 310 Hz}$ .	(rozdział 7., problem 27.)
49.	Powinieneś uzyskać wyniki zbliżone do: $R_E = 100 \Omega$ ; $U_C = 14 \text{ V}$ ; $U_E = 1,4 \text{ V}$ ; $U_B = 2,1 \text{ V}$ ; $R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega$ ; $R_1 = 16,8 \text{ k}\Omega$ .	(rozdział 8., problem 17.)
50.	$R_E = 110 \Omega$ ; $U_C = 5 \text{ V}$ ; $U_E = 0,25 \text{ V}$ ; $U_B = 0,95 \text{ V}$ ; $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$ ; $R_1 = 18,1 \text{ k}\Omega$ .	(rozdział 8., problem 17.)
51.	Wzmocnienie można zwiększyć, dodając kondensator, który pozwoli ominąć opornik $R_E$ ; $C_E = 300 \mu\text{F}$ (około).	(rozdział 8., problem 20.)
52.	$R_S = 1,04 \text{ k}\Omega$ ; $R_D = 3,41 \text{ k}\Omega$ .	(rozdział 8., problem 42.)
53.	$A_U = -13,6$ .	(rozdział 8., problem 39.)
54.	$R_F = 680 \text{ k}\Omega$ .	(rozdział 8., problem 45.)
55.	$U_{WY} = 170 \text{ mV}$ . Sygnał jest odwrócony.	(rozdział 8., problem 45.)

56. Generator drgań to układ wytwarzający ciągły sygnał sinusoidalny bez wprowadzania sygnału wejściowego. Istnieją też generatory sygnałów o innych przebiegach, ale nie omawialiśmy ich w tej książce. (rozdział 9., wprowadzenie)
57. Dodatnie sprzężenie zwrotne pozwala podtrzymać drgania lub wyjściowy sygnał sinusoidalny. Ujemne sprzężenie zwrotne stabilizuje wzmacniacz, ale jednocześnie zmniejsza drgania wyjściowe. (rozdział 9., problemy 2. i 3.)
58. Pojemnościowy dzielnik napięcia. (rozdział 9., problem 14.)
59. Indukcyjny dzielnik napięcia. (rozdział 9., problem 14.)
60. Patrz rysunek 12.15. (rozdział 9., problem 24.)



Rysunek 12.15

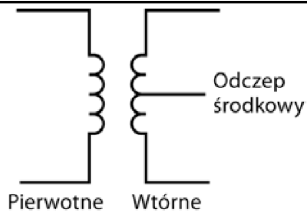
61. Patrz rysunek 12.16. (rozdział 9., problem 25.)



Rysunek 12.16

62.  $f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ . (rozdział 9., problem 11.)

63. Patrz rysunek 12.17. (rozdział 10., problem 4.)



Rysunek 12.17

64. Uzwojenie pierwotne i uzwojenie wtórne. (rozdział 10., problem 2.)

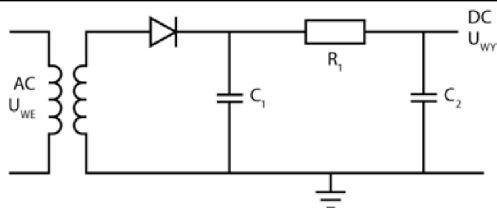
65.  $\frac{U_{WE}}{U_{WY}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = \eta$ . (rozdział 10., problem 6.)

66.  $\frac{I_{WY}}{I_{WE}} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2} = \eta$ . (rozdział 10., problem 13.)

67.  $\frac{Z_{WE}}{Z_{WY}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$ , można zatem powiedzieć, że stosunek impedancji jest równy kwadratowi przekładni transformatora. (rozdział 10., problem 16.)

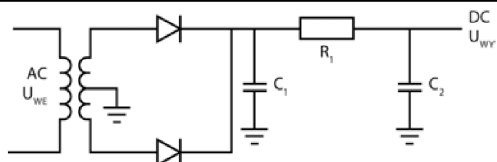
68. Transformatory wykorzystuje się do podnoszenia napięcia zmiennego lub obniżania go, a także do dopasowywania impedancji generatora i obciążenia. (rozdział 10., wprowadzenie)

69. Patrz rysunek 12.18. (rozdział 11., problem 14.)



Rysunek 12.18

70. Patrz rysunek 12.19. (rozdział 11., problem 31.)



Rysunek 12.19

71.  $R_1 = 84 \Omega$ ,  $C_1 = 622 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 265 \mu\text{F}$ . (rozdział 11., problemy 26 – 29)

# Słowniczek

**Amper (A)** — jednostka natężenia prądu elektrycznego.

**Bipolarny tranzystor złączowy (BJT — *bipolar junction transistor*)** — element półprzewodnikowy mogący działać w układzie jako przełącznik lub jako wzmacniacz. W obydwu przypadkach pracą tranzystora steruje mały sygnał wejściowy, który generuje znacznie większy sygnał wyjściowy.

**Cewka, zwojnica, solenoid** — element zbudowany z drucianych zwojów, którego pole magnetyczne przeciwdziała zmianom natężenia płynącego w nim prądu, gdy przyłożone do cewki napięcie ulega zmianie.

**Częstotliwość (f)** — liczba cykli drgań występujących w określonym czasie. Częstotliwość mierzy się w hercach (liczbą drgań na sekundę).

**Dioda** — element przewodzący prąd tylko w jednym kierunku.

**Dioda Zenera** — szczególny rodzaj diody przewodzącej prąd w kierunku zaporowym po przyłożeniu do niej odpowiedniego napięcia.

**Elementy dyskretne** — poszczególne elementy układu elektronicznego, np. oporniki, diody, kondensatory czy tranzystory.

**Farad (F)** — jednostka pojemności.

**Generator drgań, oscylator** — układ elektroniczny generujący ciągły sygnał o charakterystyce okresowej, na przykład sinusoidalny lub kwadratowy.

**Henr (H)** — jednostka indukcyjności.

**Impedancja (Z)** — całkowite przeciwdziałanie (rezystancja i reaktancja) obwodu prądu zmiennego na przepływ prądu. Impedancję mierzy się w omach.

**Indukcyjność (L)** — zdolność elementu do przeciwdziałania przepływowi prądu. Indukcyjność mierzy się w henrach.

**Kąt fazowy** — kąt odpowiadający wyprzedzeniu bądź opóźnieniu sygnału napięcia względem sygnału natężenia.

- Kondensator** — element mogący magazynować ładunek elektryczny po przyłożeniu do niego napięcia. Kondensator oddaje zmagazynowaną w nim energię w postaci prądu elektrycznego, gdy zniknie przykładane do niego napięcie.
- Moc** — zużycie energii w jednostce czasu. Moc mierzy się w watach.
- Om ( $\Omega$ )** — jednostka oporu.
- Opornik** — element określany poprzez stopień, w jakim przeciwdziała przepływowi prądu przez układ.
- Opór, rezystancja (R)** — stopień, w jakim dany element przeciwdziała przepływowi prądu elektrycznego. Opór wyrażany jest w omach.
- Pojemność (C)** — zdolność elementu do magazynowania ładunku elektrycznego po przyłożeniu do niego napięcia. Pojemność wyraża się w faradach.
- Półprzewodnik** — materiał, który w pewnych warunkach wykazuje cechy przewodnika, w innych zaś izolatora. Większość elementów półprzewodnikowych wykonuje się obecnie z krzemu.
- Prawa Kirchhoffa** — dwa prawa opisujące zachowanie się prądu i napięcia w układach prądu stałego i zmiennego. **I prawo Kirchhoffa** głosi, że suma wszystkich prądów wpływających do węzła i wypływających z niego musi być równa zero. **II prawo Kirchhoffa** mówi, że suma napięć we wszystkich oczkach układu jest równa zero.
- Prawo Ohma** — prawo określające związek napięcia, natężenia prądu i oporu w obwodzie. Prawo Ohma przyjmuje postać  $U = I \cdot R$ , czasami zapisuje się je także jako  $E = I \cdot R$ .
- Prostowanie** — proces przekształcania sygnału zmiennego (AC) w stały (DC).
- Przekładnia transformatora** — stosunek liczby zwojów uzwojenia pierwotnego do liczby zwojów uzwojenia wtórnego w transformatorze.
- Przesunięcie fazowe** — zmiana fazy sygnału po przejściu przez układ, na przykład przez wzmacniacz.
- Reaktancja (X)** — stopień, w jakim element przeciwstawia się przepływowi prądu zmiennego. Reaktancja jest wyrażana w omach. Wyróżniamy dwa rodzaje reaktancji: pojemnościową ( $X_C$ ), która jest cechą charakterystyczną kondensatorów, oraz indukcyjną ( $X_L$ ), charakteryzującą cewki.
- Sprzężenie zwrotne** — połączenie wyjścia wzmacniacza z wejściem w taki sposób, by część napięcia wyjściowego sterowała działaniem wzmacniacza, stabilizowała je bądź modyfikowała.
- Transformator** — element układu przekształcający zmienne napięcie wejściowe w wyższe bądź niższe napięcie zmienne.
- Tranzystor polowy z izolowaną bramką typu MOS** (MOSFET — *metal oxide silicon field effect transistor*) — tak samo jak tranzystory BJT i JFET element MOSFET może pracować jako klucz lub wzmacniacz. Tranzystory MOSFET są najczęściej spotykanymi elementami układów scalonych.
- Tranzystor polowy złączowy** (JFET — *junction field effect transistor*) — element półprzewodnikowy, który tak samo jak bipolarny tranzystor złączowy może pracować jako przełącznik lub wzmacniacz.

**Układ scalony** — element układu elektronicznego mający postać małej kości krzemowej, w której umieszczono połączone w układy tranzystory i inne elementy dyskretne.

**Uziemienie, ziemia** — potencjał 0 V. To bezwzględny punkt odniesienia w układzie, w którym jest dokonywany pomiar napięcia.

**Wat (W)** — jednostka mocy elektrycznej rozpraszanej w postaci ciepła, gdy prąd jednego ampera przepływa przez element obwodu pozostający pod napięciem jednego wolta.

**Wolt (V)** — jednostka miary różnicy potencjałów (napięcia) powodującej przepływ prądu elektrycznego przez przewodnik.

**Wzmacniacz** — urządzenie elektroniczne lub odpowiedni układ wytwarzający sygnał wyjściowy o większej mocy, napięciu lub natężeniu niż sygnał wejściowy.

**Wzmacniacz operacyjny** — układ scalony pełniący funkcję wielostopniowego wzmacniacza prądu stałego. Wzmacniacze operacyjne są znacznie mniejsze i przez to znacznie bardziej praktyczne od odpowiadających im układów zbudowanych z elementów dyskretnych.



# Spis symboli i skrótów

Poniższa tabela zawiera symbole i skróty stosowane w tej książce.

Symbol (skrót)	Znaczenie
A	amper
AC	prąd zmienny
A <sub>U</sub>	wzmocnienie napięciowe
$\beta$	wzmocnienie prądowe
$\Delta f$	szerokość pasma przenoszenia
C	kondensator
DC	prąd stały
F	farad
G	transkonduktancja
f	częstotliwość
f <sub>R</sub>	częstotliwość rezonansowa
H	henr
Hz	herc
I	prąd elektryczny
I <sub>B</sub>	prąd bazy
I <sub>C</sub>	prąd kolektora
I <sub>D</sub>	prąd drenu w tranzystorach FET; prąd płynący przez diodę
I <sub>DSS</sub>	prąd nasycenia
L	cewka
LC	układ zawierający cewkę i kondensator
n <sub>P</sub>	liczba zwojów uzwojenia pierwotnego
n <sub>W</sub>	liczba zwojów uzwojenia wtórnego

Symbol (skrót)	Znaczenie
$\Omega$	om
P	moc
T	tranzystor
Q	dobroć
R	opornik
$R_{WE}$	oporność wejściowa tranzystora
r	oporność przewodnika na przepływ prądu stałego
T	okres
$\tau$	stała czasowa
$\eta$	przekładnia transformatora
$\theta$	kąt fazowy
$U_C$	napięcie na kolektorze tranzystora
$U_{DD}$	napięcie zasilania drenu
$U_E$	napięcie na emiterze tranzystora
$U_{GG}$	napięcie zasilania bramki
$U_{GS}$	napięcie pomiędzy bramką a źródłem
$U_{GS(off)}$	napięcie odcięcia pomiędzy bramką a źródłem
$U_{WE}$	napięcie wejściowego sygnału zmiennego
$U_{WY}$	napięcie wyjściowe sygnału zmiennego
$U_{MAX}, U_{MIN}$	napięcie szczytowe
$U_{PP}$	napięcie międzyszczytowe
$U_{SK}$	napięcie skuteczne
U	napięcie zasilania
W	wat
$X_C$	reaktancja pojemnościowa
$X_L$	reaktancja indukcyjna
Z	impedancja

## Przedrostki liczbowe

Poniższa tabela zawiera kolejne charakterystyczne potęgi liczby 10, ich rozwinięcie do pełnej wartości liczbowej, przedrostki stosowane do oznaczenia wartości, symbole tych przedrostków oraz przykłady zastosowania.

Wartość	Liczba	Nazwa	Symbol	Przykład
$10^9$	1 000 000 000	giga	G	GΩ
$10^6$	1 000 000	mega	M	MΩ
$10^3$	1 000	kilo	k	kΩ
$10^{-3}$	0,001	mili	m	mA
$10^{-6}$	0,000 001	mikro	μ	μA
$10^{-9}$	0,000 000 001	nano	n	ns
$10^{-12}$	0,000 000 000 001	piko	p	pF



## Standardowe wartości oporników

Najczęściej stosowanymi opornikami są oporniki węglowe o tolerancji około  $\pm 5\%$  i mocy znamionowej  $\frac{1}{2}$  W lub  $\frac{1}{4}$  W. Typowe wartości oporów tego rodzaju oporników podaliśmy w poniższej tabeli (wszystkie wartości są podane w omach). Elementy te powinny być dostępne w większości sklepów elektronicznych, także u sprzedawców wysyłkowych wymienionych w dodatku E. Rezystory mocy są dostępne w mniejszym wyborze oporności. Pełną ofertę znajdziesz w katalogach producentów i dostawców.

**UWAGA** W tabeli zastosowaliśmy oznaczenia: „k” — kiloom, „M” — megaom, zatem zapis 7,5 k należy rozumieć jako 7500  $\Omega$ , zaś 3,6 M to 3 600 000  $\Omega$ .

2,2	24	270	3,0 k	33 k	360 k
2,4	27	300	3,3 k	36 k	390 k
2,7	30	330	3,6 k	39 k	430 k
3	33	360	3,9 k	43 k	470 k
3,3	36	390	4,3 k	47 k	510 k
3,6	39	430	4,7 k	51 k	560 k
3,9	43	470	5,1 k	56 k	620 k
4,3	47	510	5,6 k	62 k	680 k
4,7	51	560	6,2 k	68 k	750 k
5,1	56	620	6,8 k	75 k	820 k
5,6	62	680	7,5 k	82 k	910 k
6,2	68	750	8,2 k	91 k	1,0 M
6,8	75	820	9,1 k	100 k	1,2 M
7,5	82	910	10 k	110 k	1,5 M
8,2	91	1,0 k	11 k	120 k	1,8 M
9,1	100	1,1 k	12 k	130 k	2,2 M

**394 Dodatek D ■ Standardowe wartości oporników**

---

10	110	1,2 k	13 k	150 k	2,4 M
11	120	1,3 k	15 k	160 k	2,7 M
12	130	1,5 k	16 k	180 k	3,3 M
13	150	1,6 k	18 k	200 k	3,6 M
15	160	1,8 k	20 k	220 k	3,9 M
16	180	2,0 k	22 k	240 k	4,7 M
18	200	2,2 k	24 k	270 k	5,6 M
20	220	2,4 k	27 k	300 k	6,8 M
22	240	2,7 k	30 k	330 k	8,2 M

## Materiały pomocnicze

Podane niżej tytuły książek i czasopism, samouczki oraz informacje o dostawach elementów elektronicznych mogą zainteresować wszystkich tych, którzy będą chcieli poszerzyć swoją wiedzę, czy to przez lekturę, czy przez zajęcia bardziej praktyczne.

### Strony internetowe

---

- **e-Elektronika** (<http://www.e-elektronika.net/>): bogaty zbiór artykułów i informacji z dziedziny elektroniki oraz gotowych schematów układów elektronicznych.
- **Elektronika (nie tylko) analogowa** (<http://www.elportal.pl/ea/>): witryna zawierająca mnóstwo materiałów edukacyjnych (także dla początkujących), schematów układów itd.
- **Wortal Majsterkowicza** (<http://wortal.majsterkowicza.pl/>): dużo artykułów, porad i przykładowych schematów. Serwis udostępnia także kalkulator pozwalający obliczyć np. parametry działania układu czasowego 555 i prosty symulator układów elektronicznych działający w przeglądarce.
- **ERES**, czyli „Elektronika Radiotechnika Elementy Schematy” (<http://www.eres.alpha.pl/>): bardzo bogata baza artykułów i innych materiałów edukacyjnych z zakresu elektroniki, a także duży wybór przykładowych schematów.
- **Elportal** (<http://elportal.pl/>): serwis internetowy czasopisma „Elektronika dla wszystkich”. Zawiera mnóstwo materiałów zarówno dla całkiem początkujących, jak i bardziej obeznaných z tematem.

- **Elektronika Wirtualna** (<http://www.elektronika24.pl/>): strona internetowa poświęcona głównie elektronice. Zawiera schematy układów z różnych polskich i zagranicznych czasopism elektronicznych oraz projekty wykonane przez autora.
- **Elektroda** (<http://www.elektroda.pl/>): bogate źródło wiedzy elektronicznej i gotowych schematów. Znajdziesz tu także jedno z najpopularniejszych forów dyskusyjnych o tematyce elektronicznej.
- **Building Gadgets** ([www.BuildingGadgets.com](http://www.BuildingGadgets.com)): strona z materiałami poświęconymi elektronice prowadzona przez Earla Boysena (jednego z autorów). Znajdziesz na niej wiele przydatnych odnośników do samouczków elektronicznych, forum dyskusyjne, adresy dostawców oraz interesujące schematy obwodów (strona w języku angielskim).

## Książki

---

- *Elektronika dla bystrzaków. Wydanie II*, Cathleen Shamieh i Gordon McComb (Helion, Gliwice 2011). Doskonała lektura dla początkujących zainteresowanych elektroniką, komponentami, układami i metodami pracy.
- *Sztuka elektroniki cz. I i II*, Paul Horowitz i Winfield Hill (Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WŁK, Warszawa 2010). Bardzo przydatny podręcznik dla każdego, kto jest zainteresowany projektowaniem nowych układów elektronicznych oraz poznaniem działania już istniejących.
- *2008 ARRL Handbook for Radio Communications*, red. Mark J. Wilson i Steven R. Ford (American Radio Relay League, Newington, Connecticut 2008). Wprawdzie książka ta powstawała przede wszystkim z myślą o radioamatorach, osoby zainteresowane projektowaniem obwodów elektrycznych mogą znaleźć w niej wiele przydatnych informacji.
- *Electronics Project for Dummies*, Earl Boysen i Nancy C. Muir (Wiley, Indianapolis 2006). Oferuje wstępne wiadomości dotyczące projektowania obwodów elektronicznych oraz wiele projektów, które możesz wykonać samodzielnie.

## Czasopisma

---

- „Elektronika dla wszystkich” — pismo dla osób zainteresowanych praktycznym konstruowaniem układów elektronicznych.
- „Elektronika praktyczna” — zawiera informacje o najnowszych trendach w rozwoju elektroniki. Czasopismo jest przeznaczone dla osób posiadających już pewną wiedzę z zakresu elektroniki.

- „Młody technik” — miesięcznik przeznaczony dla młodzieży o zainteresowaniach technicznych.

---

## **Sklepy i dostawcy**

---

- *www.elfaelektronika.pl* — jeden z największych katalogowych dostawców elektroniki w Europie. W jego ofercie znajdziesz większość potrzebnych Ci elementów i podzespołów elektronicznych. Elfa realizuje zamówienia składane przez klientów indywidualnych. Czas realizacji zamówienia (w zależności od wybranej formy wysyłki) zamyka się w przedziale od jednego dnia do trzech lub pięciu dni roboczych.
- *www.gzz.pl* — niewielki dostawca elementów elektronicznych. W jego ofercie znajdziesz najpopularniejsze elementy obwodów. Zamówienia są realizowane po przedpłacie lub za zaliczeniem pocztowym w terminie określonym w regulaminie dostawcy (Poczty Polskiej bądź firmy kurierskiej).
- *www.aphelektra.com* — kolejny lokalny dostawca najczęściej stosowanych elementów elektronicznych. Zamówienie jest realizowane w ciągu pięciu dni od jego złożenia (wysyłka za pobraniem) lub otrzymania wpłaty (przedpłata).



## Spis wzorów

Poniższa tabela zawiera spis najczęściej stosowanych równań.

Wielkość fizyczna		Wzór	Rozdział
Częstotliwość		$f = \frac{1}{T}$	rozdział 5., problem 7.
	rezonansowa (w szeregowych obwodach LC)	$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	rozdział 7., problem 6.
	rezonansowa (w równoległych obwodach LC)	$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{L}}$ , gdy Q jest mniejsze od 10 lub $f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ , gdy $Q \geq 10$	rozdział 7., problem 10.
Dobroć		$Q = \frac{X_L}{R}$	rozdział 7., problem 20.
Impedancja		$Z = \sqrt{X_C^2 + R^2}$	rozdział 6., problem 8.
Moc		$P = U \cdot I$ lub $P = I^2 \cdot R$ lub $P = \frac{U^2}{R}$	rozdział 1., podsumowanie
Napięcie	prawo Ohma (DC)	$U = I \cdot R$	rozdział 1., podsumowanie
	prawo Ohma (AC)	$U = I \cdot Z$	rozdział 6., problem 8.

Wielkość fizyczna	Wzór	Rozdział
Napięcie	dzielnik napięcia $U_1 = \frac{U_{WE} R_1}{R_Z}$	rozdział 1., podsumowanie
	międzyszczytowe (sinusoida) $U_{PP} = 2 \cdot U_{MAX} = 2\sqrt{2} \cdot U_{SK} = 2,828 \cdot U_{SK}$	rozdział 5., problem 4.
	skuteczne (sinusoida) $U_{SK} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_{MAX} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{SK}}{2} = 0,707 \cdot \frac{U_{PP}}{2}$	rozdział 5., problem 4.
	wyjściowe transformatora $U_{WY} = \frac{n_W \cdot U_{WE}}{n_P}$	rozdział 11., problem 7.
Oporność		
	w połączeniu równoległym $\frac{1}{R_Z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$ lub $R_Z = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}}$ lub $R_Z = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ , gdy w układzie występują dwa oporniki	rozdział 1., podsumowanie
	w połączeniu szeregowym $R_Z = R_1 + R_2 + \dots + R_N$	rozdział 1., podsumowanie
Pojemność		
	w połączeniu równoległym $C_Z = C_1 + C_2 + \dots + C_N$	rozdział 1., podsumowanie
	w połączeniu szeregowym $\frac{1}{C_Z} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$ lub $C_Z = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}}$ lub $C_Z = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ , gdy w układzie występują dwa kondensatory	rozdział 1., podsumowanie
Przekładnia transformatora	$\eta = \frac{n_1}{n_2}$	rozdział 11., problem 7.
Przesunięcie fazowe		
	kąt fazowy (obwód RC) $\operatorname{tg} \theta = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{2\pi f RC}$	rozdział 6., problem 23.
	kąt fazowy (obwód LC) $\operatorname{tg} \theta = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}$	rozdział 6., problem 35.












Wielkość fizyczna	Wzór	Rozdział
Reaktancja		
pojemnościowa	$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$	rozdział 5., problem 13.
indukcyjna	$X_L = 2\pi fL$	rozdział 5., problem 16.
Stała czasowa	$\tau = RC$	rozdział 1., podsumowanie
Szerokość pasma przenoszenia	$\Delta f = \frac{f_R}{Q}$	rozdział 7., problem 20.
Wzmocnienie		
napięciowe	$A_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}}$	rozdział 8., problem 9.
prądowe	$\beta = \frac{I_C}{I_B}$	rozdział 3., problem 17.



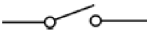
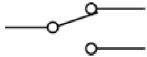

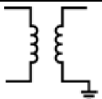
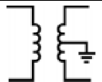
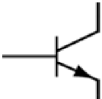
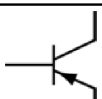
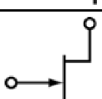
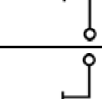

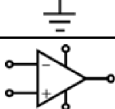


**DODATEK****G**

# Symbole stosowane w schematach obwodów elektronicznych

Poniższa tabela zawiera spis symboli graficznych stosowanych w tej książce.

Element obwodu	Oznaczenie
Bateria	
Cewka (zwojnica)	
Diody	
zwykła	
Zenera	
Generator prądu stałego	
Generator sygnałów (sinusoidalnych)	
Kondensator	
Lampa	
Mierniki	
miernik	
amperomierz	
woltomierz	

Element obwodu	Oznaczenie
Oporniki	
opornik	
oporność zmienna (potencjometr)	
Przełączniki	
pojedynczy jednopozycyjny (SPST — single-pole, single-throw)	
pojedynczy dwupozycyjny (SPDT — single-pole, double-throw)	
Silnik	
Transformatory	
transformator	
z wprowadzeniem środkowym	
Tranzystor	
<i>nnp</i> BJT	
<i>pnp</i> BJT	
JFET z kanałem <i>n</i>	
JFET z kanałem <i>p</i>	
Uziemienie	
Wzmacniacz operacyjny	



# Skorowidz

## A

admitancja przejściowa, 282  
amper, 27  
amperomierz, 57  
amplituda, 176  
analiza układu wzmacniającego, 273  
anoda, 52

## B

baza, 87  
bipolarny tranzystor złączowy, 85  
BJT, bipolar junction transistor, 85  
Boysen Earl, 9  
bramka, 109, 146

## C

cewka indukcyjna, 166  
  indukcyjność, 167  
  reaktancja, 166  
  rezystancja, 166  
charakterystyka  
  prądowo-napięciowa, 28  
  prądowo-napięciowa diody, 57  
  wzmacniacza idealnego, 286  
  wzmacniacza operacyjnego, 286  
cykl, 162, 359  
częstotliwość, 168  
  dolna, 221  
  drgań, 293  
  górną, 221  
  rezonansowa, 168, 214, 305

## D

dioda 1N4001, 59  
dioda baza-emiter, 88  
dioda baza-kolektor, 88  
dioda idealna, 56  
dioda Zenera, 73  
  napięcie przebicia, 74  
diody, 51, 347  
  półprzewodnikowe, 80  
  przebiecie, 70  
  spalenie, 77  
  spolaryzowane w kierunku przewodzenia, 54  
  wstecznie spolaryzowane, 55  
długość fali, 359  
dobór oporników, 260  
dobór oporników stabilizacyjnych, 272  
dobroć niska, 229  
dobroć obwodu, 225  
dobroć wysoka, 229  
dodatnie sprzężenie zwrotne, 295, 383  
dodawanie wektorów, 189  
domieszkiwanie, 52  
dopasowanie impedancyjne, 336  
dren, 109  
drgania, 295  
drugie prawo Kirchhoffa, 32, 45  
dzielnik napięcia, 30, 167  
dzielnik prądu, 33

## E

efekt tranzystorowy, 93  
elektrony, 19  
emiter, 87

**F**

faza, 166, 329  
filtr, 170, 173  
    dolnoprzepustowy, 184  
    górnoprzepustowy, 181  
    środkowoprzepustowy, 223  
    środkowozaporowy, 223  
filtrowanie jednokrotne, 361  
filtrowanie napięcia tętniącego, 353  
funkcja arcus tangens, 189  
funkcja sinusoidalna, 157  
funkcja wykładnicza, 40

**G**

generator, 158  
generator drgań, 293, 307, 383  
    Armstronga, 304, 314  
    Colpittsa, 305, 308  
    Hartleya, 304, 313  
    projektowanie, 316  
    uruchamianie, 319  
generator funkcji, 158  
generowanie przepływu prądu, 18

**H**

henr, 167

**I**

impedancja, 177  
    dzielnika napięcia, 218  
    linii, 336  
    obwodu LC, 322  
    obwodu RLC, 211  
    układu, 218  
    wewnętrzna, 298  
    wyjściowa, 269  
    wyjściowa transformatora, 337  
indukcyjność cewki, 167  
izolator, 51

**J**

JFET, junction field effect transistors, 85

**K**

kanał N, 109  
katoda, 52  
kąt nachylenia prostej, 29  
kąt przesunięcia fazowego, 189, 190, 202  
kierunek przepływu elektronów, 19  
kierunek przepływu prądu, 19, 53  
kiloom, 27

kolektor, 87  
kondensator, 38, 164  
    łączenie równoległe, 42  
    łączenie szeregowo, 43  
kondensator emiterowy, 263  
krzywa przejściowa, 277  
krzywa rezonansowa uniwersalna, 231  
krzywa sygnału wyjściowego, 220  
krzywa  $U-I$ , 57

**L**

lampa próżniowa, 51  
liczba zwojów, 331  
linia, 336  
logika boolowska, 117

**Ł**

ładowanie kondensatora, 40  
łączny opór układu, 31

**M**

megaom, 27  
metoda Armstronga, 304  
metoda Colpittsa, 304  
metoda Hartleya, 304  
mikroamper, 27  
miliamper, 27  
moc, 25, 45  
moc wyjściowa transformatora, 335  
moc znamionowa, 26  
moc źródła, 44  
MOSFET, metal oxide silicon field effect transistor, 85

**N**

napięcie, 20, 44  
    bramka – źródło, 284  
    dren – źródło, 278  
    kolektor – emiter, 102, 248  
    kolektora, 244  
    maksymalne, 233  
    międzyszczytowe, 160, 333  
    nasycenia, 119  
    odcięcia, 149  
    progowe diody, 61  
    przewodzenia, 62  
    skuteczne, 160, 333  
    stałe, 244  
    szczytowe, 160, 213  
    średnie, 364  
    wejściowe, 30  
    wyjściowe, 31, 197  
    wyjściowe transformatora, 330, 335

natężenie, 20, 27, 35  
 natężenie całkowite, 34

## O

obciążenie, 118, 354  
 obciążenie rezonansowe, 299  
 obciążenie tranzystora, 285  
 obszar progowy, 61  
 obszar typu P, 88  
 obwód drgający, 238  
 obwód LC, 301  
 obwód RC, 187  
 obwód RL, 201  
 obwód RLC, 210  
 obwód zasilacza, 355  
 odczep środkowy, 330, 334  
 okres, 161  
 opornik, 26, 44, 162  
   łączenie równoległe, 23, 44  
   łączenie szeregowo, 22, 44  
 opornik sprzężenia zwrotnego, 288  
 opornik stabilizujący, 258  
 oporność obciążenia, 251  
 oporność wejściowa tranzystora, 251  
 opór, 23, 30  
 opór układu, 23  
 opór wewnętrzny, 269  
 opór zastępczy, 23, 24, 193  
 oscylatory, 170, 234  
 oscylator sinusoidalny, 293  
 osłabianie sygnału, 179

## P

pasmo przenoszenia, 221  
 pierwsze prawo Kirchhoffa, 35, 45  
 PIV, peak inverse voltage, 72  
 pojedynczy przełącznik dwupozycyjny, 36  
 pojedynczy przełącznik jednopozycyjny, 36  
 pojemność całkowita, 43, 45  
 polaryzacja diody, 350  
 pole magnetyczne, 236  
 potencjometr, 58  
 poziom zerowy, 159  
 półprzewodnik, 51  
 prawa Kirchhoffa, 32, 35, 45  
 prawo Ohma, 20, 44  
 prąd  
   bazy, 90, 114, 120, 245, 257  
   bramki, 114  
   drenu, 116, 277  
   elektryczny, 18  
   emitera, 257  
   kolektora, 96, 120, 244, 257  
   nasylenia, 148, 278  
   obciążenia, 118

  płynący przez diodę, 66  
   rdzenia, 116  
   stały, 28, 46  
   wyjściowy transformatora, 335  
   zmienny, 162  
 projektowanie generatora, 316  
 prosta obciążenia, 247  
 prostowanie, 348  
 prostowanie pełnookresowe, 351  
 prostownik pełnookresowy, 350, 351  
 prostownik półokresowy, 348  
 PRV, peak reverse voltage, 72  
 przebiecie, 71  
 przebieg sygnału, 188, 368  
 przebieg sygnału wyjściowego, 345  
 przebieg zmienności napięcia, 349  
 przeciwfaza, 329  
 przedrostki, 391  
 przekładnia transformatora, 331, 339  
 przełączanie, 117  
 przełączanie tranzystorów JFET, 146  
 przełącznik, 112  
   elektroniczny, 237  
   mechaniczny, 36, 138, 140  
   tranzystorowy, 117, 127  
   tranzystorowy potrójny, 136  
   tranzystorowy wielopoziomowy, 130  
 przesunięcie fazowe, 188, 189, 201  
 pulsacje, 344  
 punkt nasylenia, 248  
 punkt odcięcia, 248  
 punkt pracy, 254

## R

reaktancja, 164, 177  
   cewki, 166, 196, 210, 216  
   cewki i kondensatora, 213  
   indukcyjna, 166, 170  
   kondensatora, 164, 210  
   pojemnościowa, 164, 170, 174  
 rezonans, 168, 209  
 rezystancja, 26, 177  
   cewki, 166  
   diody, 61  
   lampy, 74  
   zastępcza, 23  
 rezystory mocy, 393  
 rozładowanie kondensatora, 356  
 równoległe łączenie, 23, 42  
 różnica faz, 188

## S

schemat  
   dzielnika napięcia, 195  
   generatora Armstronga, 314

schemat  
  generatora Colpittsa, 308  
  generatora Hartleya, 313  
separatory obciążeń, 270  
simens, 282  
sinusoida, 157  
skuteczność transformatora, 335  
spadek napięcia, 30, 45, 64  
spalenie diody, 77  
sprężenie zwrotne, 237, 288, 303  
stabilizowanie punktu pracy, 245, 259  
stabilizowanie tranzystora, 245  
stabilizowanie wzmacniacza, 296  
stała czasowa, 39, 45, 357  
stałoprądowe napięcie kolektora, 251  
stan nasycenia, 106  
stan tranzystora, 112  
stopień wzmacnienia, 301  
sygnał wyjściowy, 281  
symbole, 389  
symbole graficzne, 403  
szczytowe napięcie wsteczne, 72  
szeregowe łączenie, 22, 43  
szeregowy obwód RLC, 211  
szerokość pasma przenoszenia, 223, 224  
szerokość połówkowa, 221

## T

temperatura, 256  
testowanie obwodów, 158  
tętniący sygnał stały, 353  
transformator, 327  
  obniżający napięcie, 332  
  podnoszący napięcie, 332  
  separacyjny, 332  
transkonduktancja, 282  
tranzystor, 86, 144  
  2N3643, 101, 102  
  bipolarny, 85  
  BJT, 109, 112  
  JFET, 109, 112, 147, 276  
  npn, 90  
  polowy, 85  
  polowy złączowy, 85, 109  
  pnp, 90  
  włączanie, 122  
  wyłączanie, 124  
typ N, 52  
typ P, 52

## U

ujemne sprężenie zwrotne, 294, 383  
układ  
  drgający, 234  
  elektryczny, 44

oscylatora, 294  
RLC, 215  
scalony, 128, 285  
stabilizujący, 277  
wzmacniacza, 255  
wzmacniający, 264  
uruchamianie generatora, 319  
uzwojenie pierwotne, 327  
uzwojenie wtórne, 328

## W

wartości oporów, 393  
wartość maksymalna sygnału, 358  
woltomierz, 57  
wspólna baza, 298  
wspólne źródło, 279  
wspólny emiter, 296  
wspólny kolektor, 267  
współczynnik  
  kierunkowy prostej, 30, 248  
  wzmocnienia stałoprądowego, 249  
  wzmocnienia zmiennoprądowego, 249  
wtórnik emiterowy, 267, 270  
wygasanie drgań, 237  
wykres wskazowy, 189, 202  
wzmacniacz  
  dwustopniowy, 266  
  jednotranzystorowy, 243  
  JFET, 279  
  niestabilny, 252  
  operacyjny, 243, 285  
  stabilny, 254  
  wspólnej bazy, 298  
wzmocnienie  
  napięciowe, 255, 281  
  napięciowe wzmacniacza, 251, 265, 283, 297  
  prądowe, 97, 113, 115  
wzory, 399  
wzrost wzmacnienia, 301

## Z

zasilacze, 343  
złącze baza-emiter, 125  
złącze p-n, 52  
zmienne napięcie wyjściowe, 251  
zniekształcenia, 295

## Ź

źródło, 109  
źródło napięcia, 158



# PROGRAM PARTNERSKI

GRUPY WYDAWNICZEJ HELION

1. ZAREJESTRUJ SIĘ
2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW  
w działający bankomat!

**Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!**

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA WYDAWNICZA

 **Helion SA**