Skrypt Podstaw Elektroniki

ZADANIA

Artur Przelaskowski

Warszawa, sierpień 2014

Wprowadzenie

Prezentowany zestaw zadań z rozwiązaniami służy poznaniu podstaw elektroniki w zakresie elementarnych problemów dotyczących przepływu prądu, najprostszych elementów obwodów, obliczeń rozkładów prądów i napięć, obserwacji zachowań elementów nieliniowych i wzmacniających.

Skrypt ten przyjmuje formę elektroniczna, stale aktualizowaną i uzupełnianą aż do postaci kompletnego materiału wspierającego naukę podstaw elektroniki na pierwszym roku studiów informatycznych.

Równoległa jego wersja jest tworzona w języku angielskim.

Warszawa, sierpień 2014

Spis treści

Rozdział 1

Problemy elementarne

1.1 Podstawy fizyczne przepływu prądu

Zamieszczono krótką charakterystykę elementarnych zjawisk fizycznych towarzyszących przepływowi prądu.

Pytania problemowe

Pytanie 1.1 *Dlaczego płynie prąd.*
Podaj możliwie wiele sposobów powodowania (wzbudzania, generowania) przepływu prądu elektrycznego.
◇

Przykładowa odpowiedź – Powody mogą być następujące:

- indukcja elektromagnetyczna;
- chemicznie (baterie, reakcje w ogniwach paliwowych);
- fotowoltaicznie (fotony wybijają ładunki – baterie słoneczne, CCD, matryce CMOS w detektorach obrazowych itp.);
- cieplnie (termopara - na stacjach kosmicznych z napędem jądrowym, kineskop CRT);
- piezoelektrycznie (mechanicznie) - konwersja ściskania na ładunek, np. w głowicach ultradźwiękowych;
- ...

Zadania obliczeniowe

Zadanie 1.1 *Prąd przenoszący ładunek.*

Wyobraźmy sobie najprostszy obwód zasilany ze źródła napięcia stałego (tj. obwód stałoprądowy) i dostarczający energię bezpośrednio do odbiornika. Wykonaj odpowiednie obliczenia formułując odpowiedzi na następujące pytania:

- *jaki ładunek zostanie przeniesiony prądem elektrycznym o natężeniu* $1A$ *w ciągu* $10min$*?*
- *jak długo musi płynąć prąd o natężeniu 1 mA aby przenieść identyczny ładunek?*
- *przy jakim napięciu źródła energia przekazana odbiornikowi wynosi* $6kJ$*?*
- *jaką rezystancję powinien mieć odbiornik tej energii?*

□

Przykładowe rozwiązanie – Należy wykorzystać definicję natężenia prądu (prądu) w wersji stałoprądowej: $I = Q/t$ (ilość ładunku przepływająca na sekundę). Ładunek liczymy więc jako $Q = I \cdot t$, przyjmując że prąd I jest stały w czasie t. Mamy więc: $Q = 1A \cdot 10 \cdot 60s = 600[As] = 600C$.

Korzystając z tej samej zależności obliczamy czas przeniesienia tego ładunku przy mniejszej wartości prądu $I' = 1mA$: $t' = Q/I' = 600C/10^{-3}A = 6 \cdot 10^5$ s.

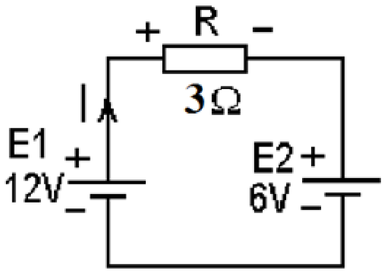
Przyjmując, że całe napięcie zasilające U odkłada się na odbiorniku, możemy ustalić dostarczaną moc $P = U \cdot I$ i w konsekwencji energię jako $E = P \cdot t = U \cdot I \cdot t$. Pozwala to policzyć napięcie źródła przekazującego określoną energię w ustalonych warunkach według zależności: $U = \frac{E}{I \cdot t} = E/Q = 6 \cdot 10^3 J/600C = 10[J/C] = 10V$.

Aby określić rezystancję odbiornika energii konieczna jest znajomość prawa Ohma, gdzie rezystancja jest właściwością warunkującą zależność pomiędzy płynącym prądem a pojawiającym się napięciem jako $R = U/I$. Przy ustalonym napięciu źródła zasilania $U = 10V$ w przypadku prądu $I = 1A$ mamy więc $R = 10V/1A = 10[V/A] = 10\Omega$. W drugim przypadku zaś $R' = 10V/10^{-3}A = 10^4\Omega$. Doborem wartości rezystancji ustalamy więc płynący prąd i czas przenoszenia ładunku.

Zadanie 1.2 *Wydzielanie mocy.*

W obwodzie jak na rysunku (1.1 - po lewej) oblicz:

- *ile mocy wydziela się na oporniku?*
- *jaką moc traci źródło* E_1*, a jaką zyskuje* E_2*?*



Rysunek 1.1: Napięciowe zasilanie odbiornika: z lewej dwuźródłowe, z prawej: za pomocą jednego źródła.

- *jak sytuacja zmieni się w obwodzie z jednym źródłem i większym opornikiem (1.1 - po prawej)?*

□

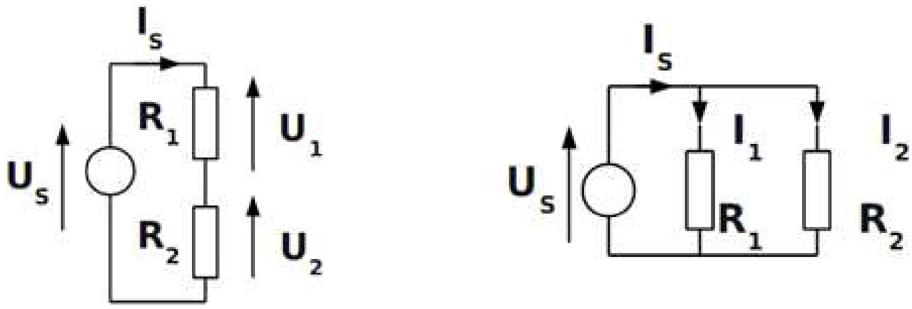
Przykładowe rozwiązanie – Policzmy napięcie odkładające się oporniku $U_R = E_1 - E_2$ i prąd przez niego płynący (zgodnie z większym wymuszeniem): $I = U_R/R$. Stąd moc traconą w R możemy policzyć następująco: $P_R = U_R \cdot I = U_R^2/R = (E_1 - E_2)^2/R = 36V^2/3\Omega = 12W$.

Źródło E_1 wymusza kierunek przepływu energii i oddaje energię elementom obwodu R oraz E_2. Moc źródeł - traconą i pobieraną można wygodnie oszacować licząc prąd $I = (E_1 - E_2)/R = 6V/3\Omega = 2A$, a następnie moc traconą $P_{E_1} = E_1 \cdot I = 12V \cdot 2A = 24W$ oraz pobieraną $P_{E_2} = E_2 \cdot I = 6V \cdot 2A = 12W$. Moc wydatkowana ze źródła E_1 jest więc równa sumie mocy pobieranej przez R oraz E_2.

1.2 Obwody prądu stałego

Zadanie 1.3 *Opór zastępczy.*

Wyprowadź zależności na szeregowy i równoległy opór zastępczy posługując się rysunkami jak niżej (1.2) □



Rysunek 1.2: Szeregowy (po lewej) i równoległy układ połączeń dwóch rezystorów.

Przykładowe rozwiązanie – Przeanalizujmy kolejno rozkład napięć w układzie szeregowym oraz rozpływ prądów przy równoległym połączeniu oporników R_1 i R_2.

Zadanie 1.4 *Oszczędności.*

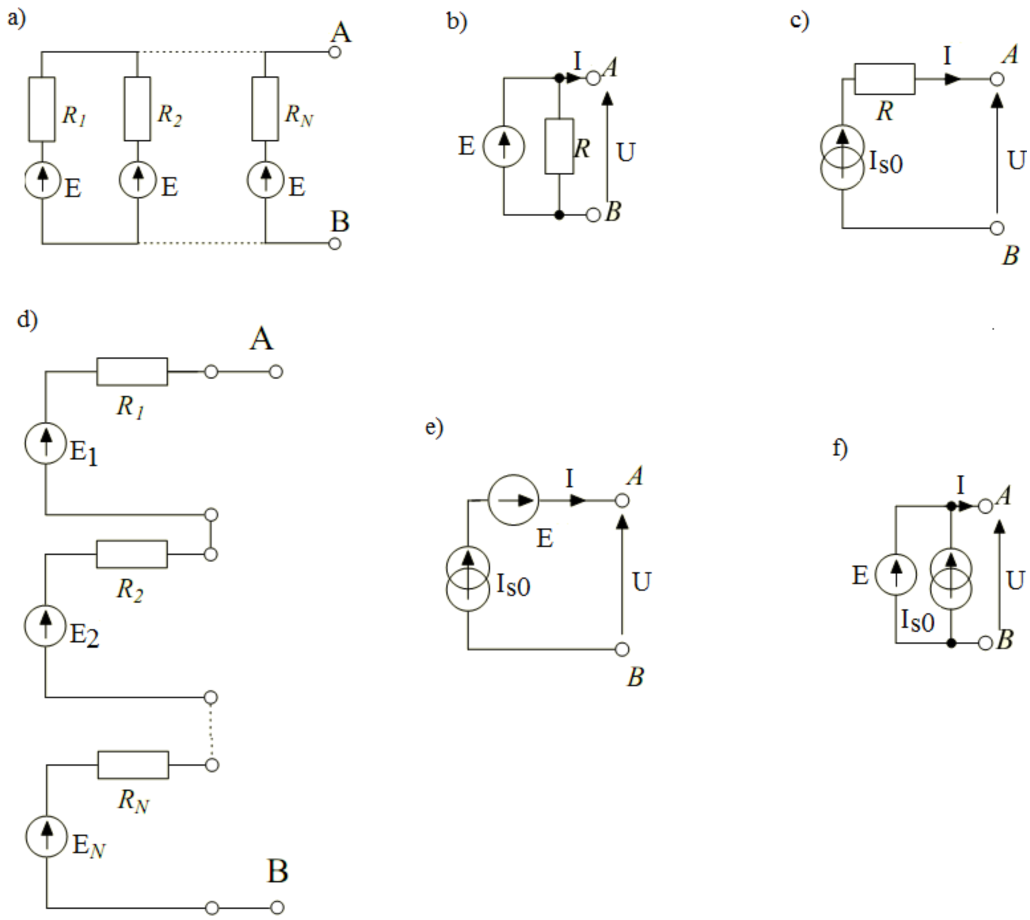
Masz do dyspozycji oporniki o wartościach rezystancji 10Ω *i 100*Ω *na moc nominalną 0,5W; zaproponuj układ złożony z takich oporników, który jest możliwie tani, o rezystancji* 60Ω *i nominalnej mocy co najmniej 1W.*
□

Przykładowe rozwiązanie –

Zadanie 1.5 *Upraszczanie źródeł.*

Uprość układy jak niżej (1.3) do postaci równoważnej, możliwie uproszczonej, uzasadniając te uproszczenia. □

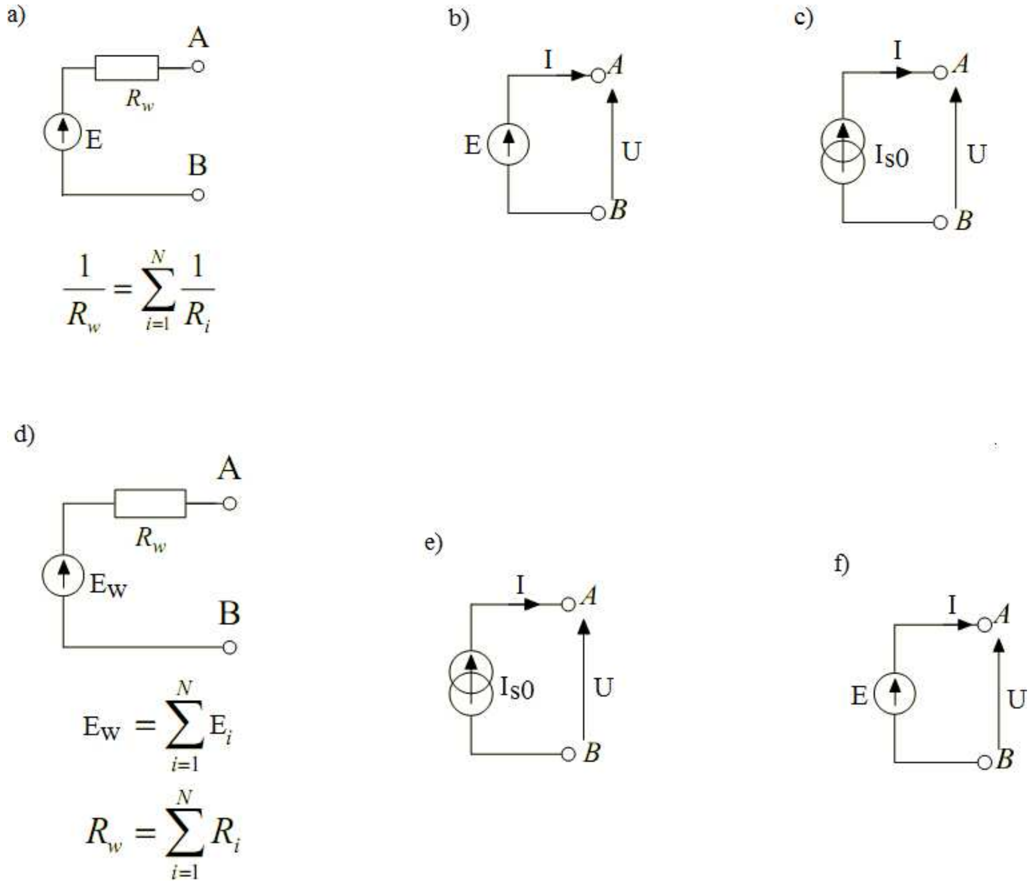
Przykładowe rozwiązanie – Rozważmy kolejno te obwody. Równoległe połączenie gałęzi takich samych źródeł E z szeregowymi opornikami (rys. 1.3a)) można zastąpić pojedynczym źródłem E (idealnym) z szeregowo dołączoną rezystancją o wartości równej równoległemu połączeniu oporników $R_1, \ldots, R_N$ (zobacz rys. 1.4a)). Powód jest prosty: w żadnej z tych gałęzi prąd nie płynie, gdyż źródła wzajemnie się znoszą, a wyjście (pomiędzy końcówkami AB) jest rozwarte. Na wyjściu mamy więc potencjalne źródło idealne E (bez ograniczeń wydajności), które będzie wydatkowało energię poprzez szeregową rezystancję R_w, taką



Rysunek 1.3: Nadmiarowe konfiguracje łączenia źródeł napięciowych i prądowych, poddające się elementarnym uproszczeniom.

że $\frac{1}{R_w} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{R_i}$. Takie same napięcie U na opornikach R_i wynika z równego napięcia na końcówkach wszystkich gałęzi oraz z tej samej E. Potencjalny prąd pojawiający się w gałęziach np. przy obciążeniu układu rezystancją obciążenie dołączoną pomiędzy końcówkami AB, będzie sumowany do $I_{AB} = U/R_1 + \cdots + U/R_N$ $\Rightarrow I_{AB}/U = 1/R_w = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{R_i}$.

Podobny układ (przypadek d) z rys. 1.3), tym razem szeregowo połączonych, zróżnicowanych źródeł napięciowych $E_1, \ldots, E_N$ z szeregowymi opornikami o wartościach odpowiednio $R_1, \ldots, R_N$ można przybliżyć jednym źródłem $E_w = \sum_{i=1}^{N} E_i$ oraz sumacyjną rezystancją zastępczą $R_w = \sum_{i=1}^{N} R_i$ (zobacz rys. 1.4a)). Przy braku obciążenia (otwarte wyjście AB) nie płynie w obwodzie żaden prąd, a napięcie wyjścia jest sumą szeregowo połączonych SEM źródeł. Pojawiający się przy obciążeniu I_{AB} jest jednakowy dla wszystkich oporników, dlatego też suma spadków napięć na wszystkich opornikach opornikach $U_R = I_{AB} \cdot (R_1 + \cdots + R_N)$, czyli $U_R/I_{AB} = R_w = \sum_{i=1}^{N} R_i$.



Rysunek 1.4: Uproszczenia konfiguracji źródeł napięciowych i prądowych z rys. 1.3, w odpowiedniej kolejności.

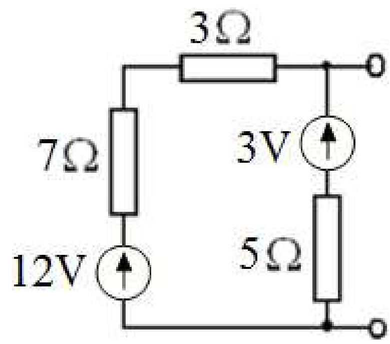
Przypadek b) zawiera pojedyncze źródło napięciowe z równolegle podłączonym opornikiem. Napięcie wyjściowe pomiędzy AB zapewnia idealne źródło E, natomiast rezystancję R możemy pominąć, gdyż stale wydatkowany przez źródło prąd E/R nie obciąża źródła idealnego (nie powoduje spadku wartości siły elektromotorycznej źródła, gdyż jest ono idealne). Z punktu widzenia końcówek AB obecność R nie ma więc żadnego znaczenia, także z punktu widzenia rezystancji wyjściowej tego obwodu (przyjmuje się, że idealne źródło napięciowe ma zerową rezystancje wewnętrzną, która zwiera R w połączeniu równoległym.

Podobnie przypadek c) upraszczamy do idealnego źródła prądowego I_{s0}, gdyż zapewnia ono stały prąd bez względu na wartość R. Idealne źródło prądowe ma nieskończoną rezystancję wewnętrzną, stąd dodanie nawet dużej R w połączeniu szeregowym nie zmienia też rezystancji wyjściowej obwodu. Spadek napięcia na idealnym źródle prądowym nie wpływa na jego funkcjonalność (będzie równe sumie spadków napięć na R i obciążeniu lub po uproszczeniu - tylko na obciążeniu).

Szeregowe połączenie źródła prądowego i napięciowego (przypadek e)) daje wymuszenie I na obciążeniu, a spadek napięcia na obciążeniu nie zależy od E (jak wyżej wartość spadku napięcia na idealnym źródle prądowym nie warunkuje jego pracy), a jedynie od wartości rezystancji obciążenia. Szeregowe połączenie nieskończonej rezystancji z zerową także wskazuje na możliwość pominięcia źródła napięciowego. Podobnie równoległe dołączenie źródła prądowego do napięciowego (jak w f)) nie wpływa na warunki pracy obciążenia, gdyż nie ma wpływu na podawaną E stanowiąc zamkniętą gałąź równoległą o nieskończonej rezystancji. Wymuszenie prądowe doładowuje źródło E nie zmieniając w żaden sposób jego parametrów. Tak więc z punktu widzenia obciążenia można zredukować układ jedynie do źródła napięciowego.

Zadanie 1.6 *Równoważne źródła zastępcze.*

Dla układu jak niżej (1.5) policz równoważne źródło zastępcze. □



Rysunek 1.5: Układ do uproszenia za pomocą umownego źródła zastępczego.

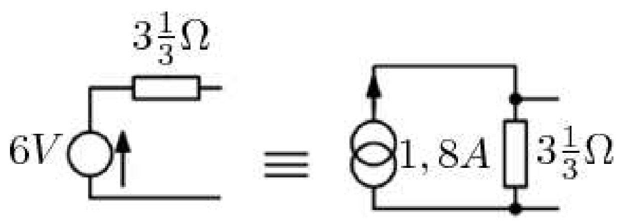
Przykładowe rozwiązanie – Zgodnie z zasadami - napięciową Thevenina i prądową Nortona wyznaczmy równoważne źródła szacując napięcie rozwarcia i prąd zwarcia dla układu z rys. 1.5. Sumując składniki napięcia wyjściowego (obciążenia) od obu źródeł (według zasady superpozycji dla układów liniowych) mamy (wykorzystując odpowiednie dzielniki napięciowe):
$U_{rozw} = 12V \cdot \frac{5\Omega}{(3+7+5)\Omega} + 3V \cdot \frac{(3+7)\Omega}{(3+7+5)\Omega} = 4V + 2V = 6V.$

Prąd zwarcia obciążenia jest sumą wymuszeń od obu źródeł płynących bezpośrednio na wyjście (zerowe obciążenie ściąga cały prąd od obu źródeł). Liczymy więc:$I_{zw} = \frac{12V}{(3+7)\Omega} + \frac{3V}{5\Omega} = 1,8A$. Teraz już można narysować schematy równoważnych źródeł zastępczych mając $U_T = 6V$ i $R_T = \frac{U_{rozw}}{I_{zw}} = 3\frac{1}{3}\Omega$ oraz $I_N = 1,8A$ i $R_N = R_T = 3\frac{1}{3}\Omega$ (rys. 1.6). □

Zadanie 1.7 *Rezystancja zastępcza układu oporników.*

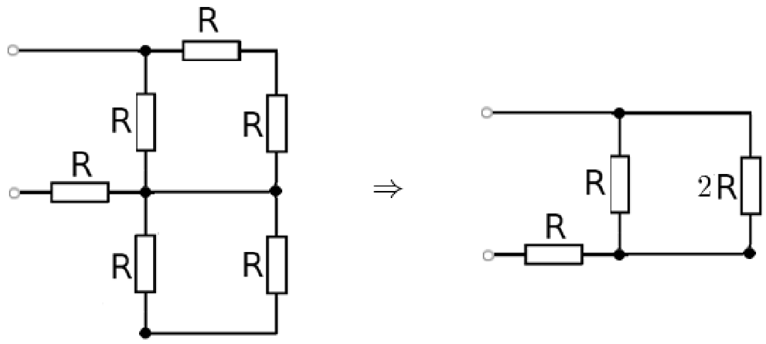
Wyznacz:

- *rezystancję zastępczą układu rezystorów jak na rys. 1.7 (po lewej);*



Rysunek 1.6: Równoważne źródła zastępcze, obliczone dla układu z rys. 1.5.

- *wartość R, jeśli moc tracona w całym obwodzie wynosi $P_R = 300mW$ przy napięciu zasilającym $U = 5^{1/2}V$.*



Rysunek 1.7: Układ rezystorów (po lewo) przekształcony do postaci równoważnej (po prawej).

Dodatkowo wskaż w układzie opornik, na którym wydziela się najmniejsza moc.
□

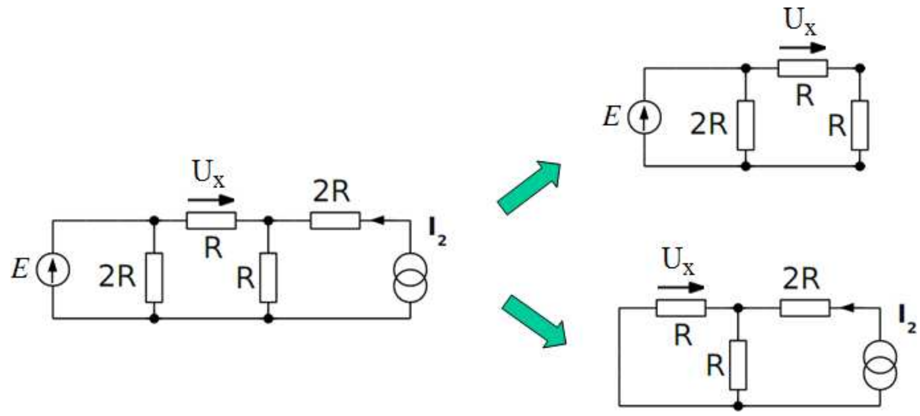
Przykładowe rozwiązanie – Układ z rys. 1.7a) należy w pierwszej kolejności uprościć (nieco podchwytliwie został niepotrzebnie skomplikowany). Dolną gałąź z dwoma szeregowo połączonymi opornikami można usunąć, gdyż oba końce tej gałęzi są ekwipotencjalne (na tym samym potencjale ze względu na idealne połączenie tych końcówek, więc w gałęzi nie popłynie żaden prąd). Dodatkowo dwa szeregowo połączone oporniki gałęzi górnej, po prawej zastąpmy przez $2R$. Mamy więc równoważny układ jak na rys. 1.7 (po prawej). Opór zastępczy liczymy teraz wykorzystując zależności na opory zastępcze szeregowo i równoległe łączonych rezystorów: $R_z = R + R||2R = R + \frac{2R^2}{3R} = 1\frac{2}{3}R$.

Moc traconą w całym układzie oporników liczymy z zależności $P_R = 0.3W = = U^2/R_z = \frac{5V \cdot V}{5/3R}$. Stąd konkretną wartość R wynosi $R = \frac{3}{5} \cdot \frac{5V \cdot V}{0.3W} = 10\Omega$.

Poszukajmy teraz rezystora, na którym wydziela się najmniejsza moc. Po pierwsze, w układzie z rys. 1.7 (po lewej) zerowa moc wydziela się w obydwu usuniętych przy uproszczeniu rezystorach dolnej gałęzi. Po uproszczeniu zaś, (schemat po prawej na rys. 1.7) mamy trzech kandydatów: najpierw odpada dolny R, szeregowo połączony z $R||2R$, gdyż płynie przez niego większy prąd, niż przez R równolegle połączony z $2R$ (a moc $P = I^2 \cdot R$). Oporniki dwóch równoległych gałęzi wydzielają moc odpowiednio: $\frac{U^2_{R||2R}}{R}$ (w gałęzi z jednym opornikiem) oraz $\frac{U^2_{R||2R}/4}{R}$ (na każdym z dwóch oporników gałęzi $2R$). Tak więc na tych dwóch opornikach uproszczonego układu wydziela się najmniejsza moc.

Zadanie 1.8 *Superpozycja źródeł.*

Dla układu jak na rysunku 1.8 wyznacz napięcie U_x. Podaj warunek zerowania tego napięcia.



Rysunek 1.8: Obwód prądu stałego z dwoma źródłami (po lewej) przekształcony według zasady superpozycji: po usunięciu źródła prądowego (po prawej u góry) oraz napięciowego (po prawej u dołu).

□

Przykładowe rozwiązanie – Zastosujmy metodę superpozycji. Sytuację po usunięciu obu źródeł pokazano na rys. 1.8 po prawej. Zajmijmy się sytuacją w obwodzie po usunięciu źródła prądowego (tj. szacujemy wymuszenie U_x pochodzące od E, przy czym warto zwrócić uwagę, że zwrot U_x na rysunku jest przeciwny do kierunku spadku napięcia pochodzącego od E). Liczmy więc: $U_x^{(E)} = -E/2$, bo napięcie jest równo dzielone pomiędzy dwa szeregowe R.

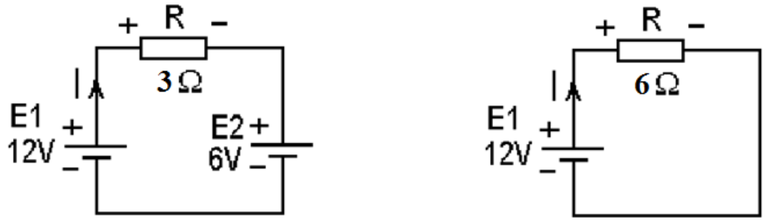
W przypadku źródła prądowego szacunki są równie proste: $U_x^{(I_2)} = R \cdot I_2/2$, gdyż prąd jest równo dzielony pomiędzy dwie równoległe gałęzie o tej samej R, a kierunek U_x jest zgodny z wymuszeniem. Ostatecznie mamy więc
$U_x = U_x^{(E)} + U_x^{(I_2)} = R \cdot I_2/2 - E/2 = \frac{R \cdot I_2 - E}{2}$.

Warunek zerowania U_x jest oczywisty: $U_x = 0 \Leftrightarrow R \cdot I_2 - E = 0$, co daje $E = R \cdot I_2$.

Zadanie 1.9 *Wydzielanie mocy.*

W obwodzie jak na rysunku 1.9 (z lewej) oblicz

- *ile mocy wydziela się na oporniku,*
- *jaką moc traci źródło E_1, a jaką zyskuje E_2.*



Rysunek 1.9: Najprostsze obwody dostarczania mocy.

Jak sytuacja zmieni się w obwodzie na rys. 1.9 (z prawej)?
□

Przykładowe rozwiązanie – Moc wydzielana na R zależy od spadku napięcia na oporniku, czyli $P_R = \frac{(12-6)^2 V \cdot V}{3\Omega} = 12W$. Ponieważ źródła napięciowe są skierowane przeciwnie, źródło E_1 o większej SEM wymusza przepływ prądu we wskazanym na rysunku kierunku wydatkując energię, podczas gdy E_2 pobiera energię określonej mocy. Wartości mocy traconej i pozyskiwanej zależą od wartości płynącego w obwodzie prądu $I = \frac{E_1 - E_2}{R}$, a więc istotną rolę odgrywa wartość R. Daje to $P_{E_1} = E_1 \cdot \frac{E_1 - E_2}{R} = 12V \cdot \frac{6V}{3\Omega} = 24W$, zaś pobierana $P_{E_2} = E_2 \cdot \frac{E_1 - E_2}{R} = 6V \cdot \frac{6V}{3\Omega} = 12W$. Zatem E_1 połowę swojej energii daje R, a połowę E_2.

Po usunięciu E_2 i zwiększeniu wartości opornika do $R' = 6\Omega$ (1.9 z prawej), cała moc $P'_{E_1} = E_1 \cdot \frac{E_1}{R'} = 12V \cdot \frac{12V}{6\Omega} = 24W$ oddawana jest rezystorowi (gdzie $P'_R = \frac{12^2 V \cdot V}{6\Omega} = 24W$).

1.3 Obwody prądu zmiennego

Zadanie 1.10 *Szeregowy układ rezonansowy.*

Oblicz przepięcie na elementach reaktancyjnych w szeregowym układzie rezonansowym, jeśli wartości elementów wynoszą odpowiednio: $R = 50\Omega$, $C = 20\mu F$, $L = 5H$.

□

Przykładowe rozwiązanie – Przepięcie w szeregowym obwodzie rezonansowym dotyczy *wzmocnienia* napięcia występującego na elementach reaktancyjnych (indukcyjność, pojemność) w stosunku do napięcia wejściowego podanego na układ RLC, odkładającego się w rezonansie na R. Wielkości te wiąże zależność na dobroć układu $Q = \frac{X_{L,C}}{R} = \frac{U_{L,C}}{U_R = U_{wej}}$. Stąd przepięcie równe dobroci układu rezonansowego liczymy z zależności $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{\sqrt{5/20 \cdot 10^6}}{50} = 10$. Wykorzystano proste przekształcenie $\omega_0 L = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot L = \sqrt{L/C}$.

Zadanie 1.11 *Obliczenia wskazowe.*

W obwodach prądu zmiennego oblicz

- *wartości chwilowe napięć, których wskazy są następującą postać:* $V_1 = 5j$, $V_2 = -3 + j$, $V_3 = 2e^{-j\pi/2}$
- *transmitancję obwodu, jeśli* $u_{we} = \sin(\omega t + \pi/2)$, $u_{wyj} = \cos(\omega t - \pi/4)$.

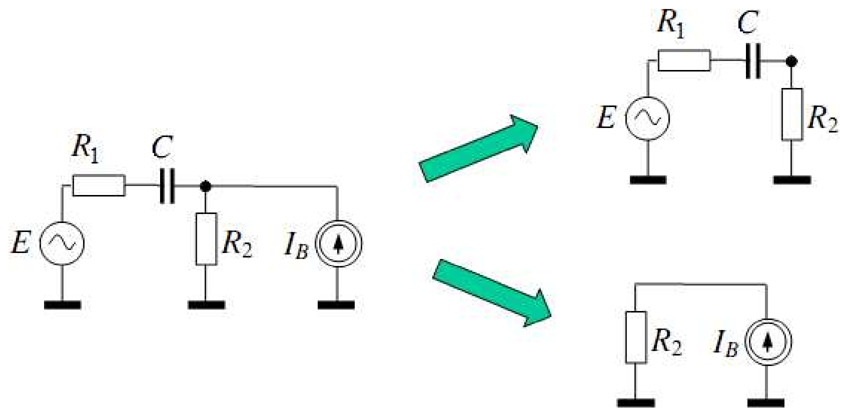
□

Przykładowe rozwiązanie –. Mając dane wskazy napięć w obwodzie, musimy odwołać się do podstawowej zależności, która pozwala przekształcić wskaz sygnału w jego postać chwilową: $v(t) = \mathrm{Re}\{V \cdot e^{j\omega t}\}$. Liczmy więc kolejno stosując wzór Eulera:
$v_1(t) = \mathrm{Re}\{5j \cdot e^{j\omega t}\} = \mathrm{Re}\{5j \cdot (\cos\omega t + j\sin\omega t)\} = \mathrm{Re}\{-5\sin\omega t + 5j\cos\omega t\} =$
$= -5\sin\omega t = 5\cos(\omega t + \pi/2)$, ponieważ $\sin\omega t = -\cos(\omega t + \pi/2)$;
$v_2(t) = \mathrm{Re}\{(-3 + j) \cdot (\cos\omega t + j\sin\omega t)\} = -3\cos\omega t - \sin\omega t$; można też zamienić V_2 na postać wykładniczą $V_2 = \sqrt{10}e^{j(\arctan(-1/3)+\pi)}$, wtedy $v_2(t) = \mathrm{Re}\{\sqrt{10}e^{j(\arctan(-1/3)+\pi)} \cdot e^{j\omega t}\} = \sqrt{10}\cos(\omega t + \arctan(-1/3) + \pi)$;
$v_3(t) = \mathrm{Re}\{2e^{-j\pi/2} \cdot e^{j\omega t}\} = \mathrm{Re}\{2e^{j(\omega t - \pi/2)}\} = 2\cos(\omega t - \pi/2) = 2\sin\omega t$.

Aby obliczyć transmitancję (widmową) obwodu, czyli stosunek widmowej transformacji sygnału wyjściowego $Y(j\omega)$ do transformacji sygnału wejściowego $X(j\omega)$ postaci $G(j\omega) = \frac{Y_p \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}}{X_p \cdot e^{j\omega t \varphi}}$, należy ustalić wskazową postać napięć. Mamy więc $U_{we} = 1$, ponieważ $\sin(\omega t + \pi/2) = \cos\omega t$, co daje fazę $\varphi = 0$. Natomiast $U_{wyj} = e^{-j\pi/4}$. Prowadzi to do następujących postaci transformacji: $X(j\omega) = U_{we} \cdot e^{j\omega} = e^{j\omega}$ oraz analogicznie $Y(j\omega) = e^{j(\omega t - \pi/4)}$. Daje to $G(j\omega) = e^{-j\pi/4}$, czyli w tym przypadku transmitancja nie zależy od pulsacji.

Zadanie 1.12 *Superpozycja w obwodzie prądu zmiennego.*

Oblicz napięcie na R_2*, jeśli wartości elementów obwodu przedstawionego na rys. 1.10 wynoszą odpowiednio:* $R1 = 50\Omega$, $R_2 = 100\Omega$, $C = 20\mu F$, $I_B = 5mA$, $E = 5sin(\omega t + \pi/2)$, $\omega = 10^3 rad/s$.



Rysunek 1.10: Obwód dwóch źródeł, w tym prądu zmiennego, uproszczony według zasad superpozycji (po prawej).

□

Przykładowe rozwiązanie – Uproszczenie obwodu według zasad superpozycji prowadzi do schematów jak na rys. 1.10 po prawej. Spadek napięcia na R_2 zależny od źródła E obliczamy z dzielnika napięciowego $U_{R_2}^{(E)} = E \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2+1/(j\omega C)} =$ $= 5 \cdot \frac{j\omega C \cdot R_2}{j\omega C \cdot (R_1+R_2)+1} = 5 \cdot \frac{j10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{j10^3 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 150+1} = 5 \cdot \frac{2j}{1+3j} = 5 \cdot \frac{2j \cdot (1-3j)}{10} = (3+j)V =$ $= \sqrt{10} e^{j\,\mathrm{arctan}(1/3)} V$, co zapisie chwilowym można przedstawić jako $u_{R_2}^{(E)}(t) = \sqrt{10}\cos(\omega t + \mathrm{arctan}(1/3))V$.

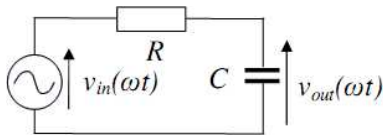
Składową napięcia od źródła prądowego obliczamy z prawa Ohma (kondensator stanowi przerwę w obwodzie dla wymuszenia stałoprądowego, stąd usunięcie w analizie lewej strony obwodu): $u_{R_2}^{(I_B)} = I_B \cdot R_2 = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 100\Omega = 0.5V$ - jest to oczywiście wartość napięcia stałego. Stąd finalna postać spadku napięcia jest następująca: $u_{R_2}(t) = u_{R_2}^{(E)}(t) + u_{R_2}^{(I_B)} = 0.5 + \sqrt{10}\cos(\omega t + \mathrm{arctan}(1/3))V$.

Zadanie 1.13 *Transmitancja w obwodzie RC.*

W obwodzie jak na rys. 1.11 przyjmij, że: $\omega = 1000 rad/s$, $R = 10k\Omega$, $C = 5\mu F$. *Oblicz napięcie wyjściowe* $v_{out}(\omega t)$ *dla sygnału wejściowego* $v_{in}(t) = 5sin(\omega t + \pi/4)$. *Jaka jest transmitancja tego układu?*

□

Przykładowe rozwiązanie –

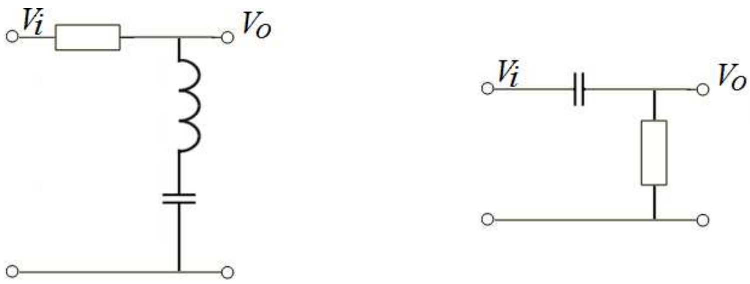


Rysunek 1.11: Zmiennoprądowy obwód RC z wyjściowym napięciem na C.

1.4 Filtry

Pytanie 1.2 *Transmitancja filtru środkowozaporowego.*

Oblicz transmitancję i naszkicuj charakterystykę amplitudową filtru jak na rys. 1.12 po lewej.



Rysunek 1.12: Elementarne filtry: środkowozaporowy RLC (z lewej) i górnoprzepustowy RC.

◇

Przykładowe rozwiązanie –

Pytanie 1.3 *Filtr górnoprzepustowy RC.*

Opisz właściwości filtru jak na rys. 1.12 po prawej, podaj jego możliwe zastosowania. Jakie znasz inne filtry?

◇

Przykładowe rozwiązanie –

1.5 Nieliniowe elementy półprzewodnikowe

Pytanie 1.4 *Porównanie zasad działania tranzystorów.*

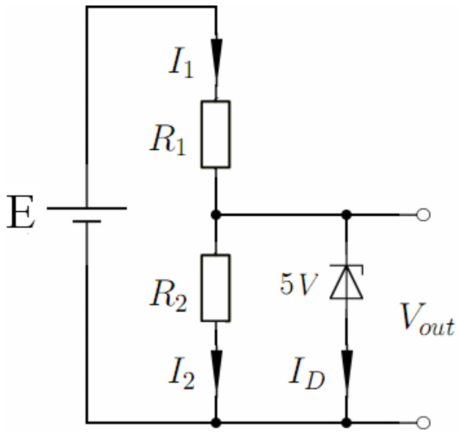
Porównaj zasadę działania tranzystora bipolarnego i polowego. Jakie znasz zastosowania tranzystorów?

◇

Przykładowe rozwiązanie –

Zadanie 1.14 *Stabilizacja z diodą Zenera.*

W obwodzie jak na rys. 1.13 oblicz prąd diody I_D, jeśli $E = 12V$, $R_1 = 2,5k\Omega$, $R_2 = 7,5k\Omega$.



Rysunek 1.13: Podstawy układ ze stabilizującą diodą Zenera.

□

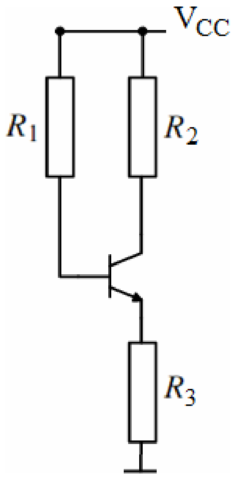
Przykładowe rozwiązanie – W pierwszej kolejności należy sprawdzić, czy dioda jest w zatkana, czy też w stanie przewodzenia. Oszacujmy więc napięcie na R_2 w nieobciążonym dzielniku napięciowym źródła E: $U_{R_2} = E \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} = 12 \cdot \frac{7,5}{10} V = 9V$. Ponieważ napięcie to jest wyższe (nawet znacząco) od stabilizującego napięcia diody Zenera spolaryzowanej zaporowo (napięcie przebicia diody), równego 5V, dioda pracuje w zakresie przebicia. Znaczy to, że $I_D = I_1 - I_2 = \frac{12-5}{2,5 \cdot 10^3} - \frac{5}{7,5 \cdot 10^3} = 2\frac{2}{15} mA$.

Zadanie 1.15 *Punkt pracy tranzystora.*

Ustal punkt pracy tranzystora w układzie z rys. 1.14, jeśli $R_1 = R_2 = R_3 = 100\Omega$, $V_{CC} = 5V$, a wartość $\beta = 200A/A$.

□

Przykładowe rozwiązanie – Punkt pracy tranzystora określają wartości prądu kolektora I_C oraz napięcia kolektor-emiter U_{CE}. Na początek ustalmy wartość



Rysunek 1.14: Elementarny układ zasilania tranzystora bipolarnego rezystorem w emiterze.

prądu bazy I_B sterującego tranzystorem, zakładając stan aktywny pracy tranzystora ($V_{CC} > U_{BE}$, czyli możliwy jest stan aktywny bądź nasycenia). Ustalmy też dla uproszczenia $R_1 = R_2 = R_3 = R$. Wykorzystamy równość $V_{CC} = I_B \cdot R + U_{BE} + I_E \cdot R$, a ponieważ w stanie aktywnym $I_E = (\beta + 1)I_B$, to przekształcamy tę równość do postaci: $I_B = \frac{V_{CC}-U_{BE}}{R+(\beta+1)\cdot R} = \frac{4{,}3}{20200} \approx 2,13 \cdot 10^{-4} = 0,213mA$. Ta wartość daje $U_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R - I_E \cdot R = V_{CC} - I_B \cdot R \cdot (2\beta+1) = 5 - 2,13 \cdot 10^{-4} \cdot 4,01 \cdot 10^4 \approx (5 - 8,5)V = -3,5V$. Ujemna wartość szacowanego napięcia kolektor-emiter oznacza, że tranzystor znajduje się w stanie nasycenia.

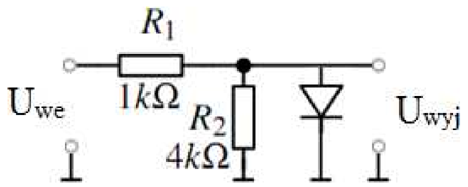
Skoro tak, to musimy jeszcze raz przeliczyć zależności prądowo-napięciowe, ponieważ wzmocnienie prądowe jest mniejsze niż β. Przyjmijmy $U_{CEnas} = 0.2V$. Wtedy można wyznaczyć relację pomiędzy I_B oraz I_C z różnicy spadków napięć na R_1 i R_2: $I_B \cdot R + U_{BE} = I_C \cdot R + U_{CEnas}$, co pozwala ustalić $I_C = I_B + \frac{U_{BE}-U_{CEnas}}{R} = I_B + 5mA$. Rozważając pętlę od V_{CC} przez bazę do emitera, napiszmy uwzględniając wyznaczoną zależność $I_C(I_B)$: $V_{CC} = I_B \cdot R + U_{BE} + (I_B + I_B + 5mA) \cdot R$, co daje $I_B = \frac{V_{CC}-U_{BE}}{3R} - \frac{5}{3}mA \approx 14,3mA - 1,66mA = 12,64mA$. Wartość I_C szacujemy więc na $I_C = I_B + 5mA = 17,64mA$ ustalając finalnie punkt pracy jako $(I_C, U_{CE}) = (17,64mA,\ 0,2V)$.

Zadanie 1.16 *Charakterystyka diodowego ogranicznika napięcia.*

Podaj zależność $U_{wyj}(U_{we})$ oraz $I_D(U_{we})$ w obwodzie jak na rys. 1.15. Przyjmij, że napięcie przewodzenia diody $U_{DF} = 0,7V$.

□

Przykładowe rozwiązanie – Obie charakterystyki będą odzwierciedlać dwa stany pracy diody: zatkanie i przewodzenie. Dioda zasilana jest z dzielnika napię-



Rysunek 1.15: Dioda w układzie ogranicznika napięcia.

ciowego R_1R_2 według zależności $U_{DF} = U_{wyj} = U_{we} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} = U_{we} \cdot \frac{4}{5}$ (oznacza to liniowy wzrost napięcia z nachyleniem 4/5).

Przyjmijmy uproszczony odcinkami liniowy model diody ze stała wartością U_{DF} w stanie przewodzenia. Dioda ogranicza wtedy napięcie wyjściowe na poziomie $U_{DF} = 0,7V$, co uzyskuje się przy napięciu wejściowym $U_{we}^P = 0,7V \cdot \frac{5}{4} = 0,875V$. Wzrost U_{we} powyżej tej wartości nie zmienia poziomu napięcia wyjściowego ograniczając tym samym zakres możliwych zmian U_{wyj}. Mamy więc

$$U_{wyj} = U_{we} \cdot \frac{4}{5} \quad \text{for} \quad U_{we} \leqslant 0,875V$$
$$U_{wyj} = 0,875V \quad \text{for} \quad U_{we} > 0,875V$$

Z kolei I_D zaczyna płynąć dopiero po spełnieniu warunku $U_{we} > 0,875V$ jako różnica pomiędzy prądem wtedy dopływającym przez R_1, a płynącym przez równoległą do wyjścia gałąź z R_2 według zależności, liczony według zależności $I_D = \frac{U_{we}-U_{DF}}{R_1} - \frac{U_{DF}}{R_2} = \frac{U_{we}-0,7V}{10^3\Omega} - \frac{0,7V}{4\cdot10^3\Omega} = (U_{we}[V] - 0,7)[mA] - 0,175mA$ (oznacza to liniowy wzrost prądu z nachyleniem 1). Na tej podstawie otrzymujemy charakterystykę

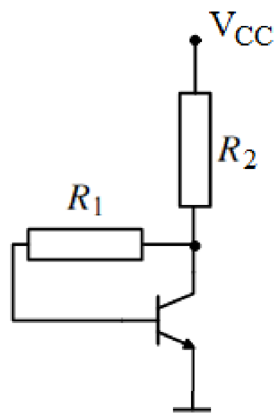
$$I_D = 0 \qquad \text{for} \quad U_{we} \leqslant 0,875V$$
$$I_D = (U_{we} - 0,7V)[mA] - 0,175mA \qquad \text{for} \quad U_{we} > 0,875V$$

Zadanie 1.17 *Punkt pracy tranzystora z pętlą BC.*

Oblicz punkt pracy tranzystora w układzie z rys. 1.16, wiedząc że $R_1 = 3k\Omega$, $R_2 = 100\Omega$, $V_{CC} = 10V$ oraz $\beta = 200A/A$. W jakim stanie znajduje się tranzystor przy takich warunkach pracy?

□

Przykładowe rozwiązanie – Szukamy pary niewiadomych (I_C, U_{CE}). Napiszmy więc dwa równania, dotyczące warunków sterowania prądem bazy oraz rozkładu napięć w obwodzie kolektora. Od strony bazy mamy $0,7+I_B\cdot R_1 = U_{CE}$; od strony kolektora zaś $U_{CE}+(I_B+I_C)\cdot R_2 = V_{CC}$ (warto zauważyć, że oba prądy płyną przez R_2). Podstawmy więc pierwsze z równań do drugiego uwzględniając zależność $I_C = \beta \cdot I_B$, co daje $0,7 + I_B \cdot R_1 + (\beta + 1) \cdot I_B \cdot R_2 = V_{CC}$. Wtedy

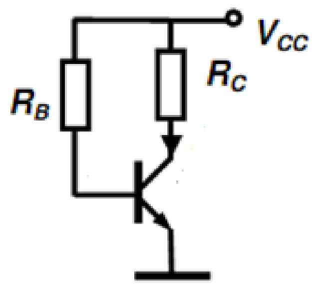


Rysunek 1.16: Układ zasilania tranzystora bipolarnego z pętlą baza-kolektor.

$I_B = \frac{V_{CC}-0,7}{R_1+(\beta+1)\cdot R_2} = \frac{9,3}{23,1\cdot 10^3} = 0,4026mA$, czyli $I_C = 200A/A \cdot 0,4026mA \approx$ $\approx 80,5mA$ oraz $U_{CE} = 0,7 + 0,4026mA \cdot 3k\Omega \approx 1,9V$.

Zadanie 1.18 *Ustalanie warunków pracy tranzystora.*

Oblicz rezystancje R_B i R_C układu określającego punkt pracy tranzystora z rys. 1.17, gdzie $V_{CC} = 12V$, $\beta = 200A/A$ i $U_{BE} = 0,7V$, zapewniając napięcie $U_{CE} = 6V$ przy dopuszczalnej mocy traconej (rozpraszanej) w tranzystorze $P_{\max} = 600mW$.

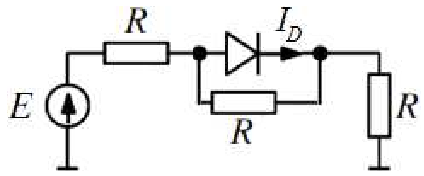


Rysunek 1.17: Elementarny układ zasilania tranzystora bipolarnego.

□

Przykładowe rozwiązanie – Dopuszczalna moc rozpraszana w tranzystorze $P_{\max} = I_C \cdot U_{CE} = 600mW$. Tranzystor pracuje więc w stanie aktywnym z prądem $I_C = \frac{600\cdot 10^{-3}}{6} = 100mA$, co daje prąd bazy $I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{100\cdot 10^{-3}}{200} =$ $= 0,5mA$. Ponadto, z analizy obwodu zasilania bazy wiemy, że spadek napięcia $U_{R_B} = V_{CC} - U_{BE}$. Podobnie, napięcie $U_{R_C} = V_{CC} - U_{CE}$. Możemy więc policzyć wartości rezystorów ustalających zamierzony punkt pracy tranzystora:
$R_B = \frac{U_{R_B}}{I_B} = \frac{12-0,7}{0,5\cdot 10^{-3}} = 22,6k\Omega$ oraz $R_C = \frac{U_{R_B}}{I_B} = \frac{12-6}{100\cdot 10^{-3}} = 60\Omega$.

Zadanie 1.19 *Dioda włączona szeregowo. Oblicz prąd diody I_D w obwodzie z rys. 1.18 , jeśli $E = 3V$ i $R = 1k\Omega$. Ustal warunki przewodzenia diody.*



Rysunek 1.18: Układ ze diodą szeregową.

□

Przykładowe rozwiązanie – Załóżmy, że dioda nie przewodzi (jest zatkana) i obliczmy (z dzielnika napięciowego) występujący na niej spadek napięcia: $U_D = E \cdot \frac{R}{3R} = 1V$. Jest to wystarczające napięcie, by wprowadzić diodę w stan przewodzenia. Przyjmijmy $U_{DF} = 0,7V$ uzyskując:

- prąd w oporniku równoległym z diodą $I_{R||D} = \frac{U_{DF}}{R} = \frac{0,7}{10^3} = 0,7mA$;
- prąd płynący przed dwa pozostałe oporniki (ten sam, bo są one połączone szeregowo) $I_{2R} = \frac{E-U_{DF}}{2R} = \frac{3-0,7}{2 \cdot 10^3} = 1,15mA$.

Ponieważ I_{2R} rozpływa się na prąd diody oraz $I_{R||D}$, możemy obliczyć
$I_D = I_{2R} - I_{R||D} = 1,15mA - 0,7mA = 0,45mA$.

Warunkiem przewodzenia diody jest wartość $E \cdot \frac{R}{3R} > U_{DF}$, czyli $E > 2,1V$ (niezależnie od wartości R).