

1 Zadania z rozwiązaniami

1.1 Zadanie 1

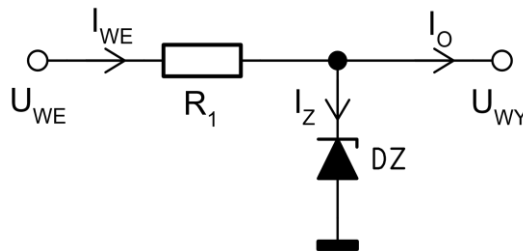
Napięcie pochodzące z niestabilizowanego źródła może się zmieniać w zakresie od $U_{WEmin} = 7\text{ V}$ do $U_{WEmax} = 10\text{ V}$. Należy zaprojektować stabilizator równoległy z diodą Zenera, który wytworzy na swoim wyjściu napięcie $U_{WY} = 5\text{ V}$.

Układ będzie obciążany prądem z zakresu od 0 do $I_{Omax} = 25\text{ mA}$.

Po zaprojektowaniu stabilizatora należy oszacować jego najważniejsze parametry: rezystancję wyjściową r_{WY} i współczynnik stabilizacji napięcia S_U .

Rozwiązanie:

Stabilizator będzie miał strukturę pokazaną na rysunku:



Trzeba dobrać opornik R_1 oraz typ diody Zenera.

Na początek wybierzemy popularną diodę Zenera małej mocy typu BZX55, o nominalnym napięciu przebicia $U_Z = 5,1\text{ V}$ (BZX55-C5V1). W katalogu (Vishay Semiconductors) odczytujemy jej parametry:

$$P_{tot} = 500\text{ mW}$$

$$r_{DZ} (@I_Z = 5\text{ mA}) < 35\ \Omega$$

Obliczamy maksymalny prąd, jaki może popłynąć przez diodę Zenera:

$$I_{Zmax} = \frac{P_{tot}}{U_Z} = \frac{500\text{mW}}{5,1\text{V}} \approx 100\text{mA}$$

Rezystancję opornika R_1 obliczamy „na najgorszy przypadek” - czyli dla sytuacji, kiedy napięcie na wejściu stabilizatora ma najmniejszą możliwą wartość. Jako że stabilizator musi wtedy móc dostarczyć do obciążenia prąd do 25 mA, a w takiej sytuacji przez diodę Zenera powinien nadal płynąć prąd I_{Zmin} wynoszący co najmniej 5 mA, opornik powinien mieć rezystancję:

$$R_1 < \frac{U_{WEmin} - U_Z}{I_{Omax} + I_{Zmin}} = \frac{7\text{V} - 5,1\text{V}}{25\text{mA} + 5\text{mA}} \approx 63\ \Omega$$

Z szeregu E24 zostanie wybrany opornik o rezystancji nominalnej 56 Ω. Co prawda wartość z szeregu najbliższa obliczonej to 62 Ω, ale trzeba pamiętać o tolerancji, która w tym przypadku wynosi ±5%.

W przypadku projektowania stabilizatora równoległego konieczne jest określenie dopuszczalnej mocy strat użytego opornika.

Największa moc przy normalnej pracy stabilizatora zostanie wydzielona w oporniku wtedy, kiedy na wejściu pojawi się napięcie $U_{WE_{max}} = 10\text{ V}$. Będzie ona równa:

$$P_{R_{max}} = \frac{(U_{WE_{max}} - U_Z)^2}{R_1} = \frac{(10\text{V} - 5,1\text{V})^2}{56\Omega} = 0,43\text{W}$$

Teoretycznie można użyć opornika o dopuszczalnej mocy strat równej 0,5 W, jednak warto zastanowić się nad mocą, która zostanie wydzielona po zwarceniu wyjścia stabilizatora do masy. Ta moc to:

$$P_{R_{zw}} = \frac{U_{WE_{max}}^2}{R_1} = \frac{(10\text{V})^2}{56\Omega} \approx 1,8\text{W}$$

A więc, jeśli stabilizator nie ma ulec uszkodzeniu i w takiej sytuacji, należy użyć opornika o dopuszczalnej mocy strat wynoszącej aż 2 W!

Sprawdźmy teraz, czy nie może ulec uszkodzeniu dioda Zenera.

Gdy na wejściu pojawi się napięcie $U_{WE_{max}} = 10\text{ V}$, przez opornik popłynie prąd:

$$I_{R_{max}} = \frac{U_{WE_{max}} - U_Z}{R_1} = \frac{10\text{V} - 5,1\text{V}}{56\Omega} \approx 88\text{mA}$$

Gdy ze stabilizatora nie będzie pobierany żaden prąd, cały prąd $I_{R_{max}}$ wpłynie do diody Zenera. Nie ulegnie ona uszkodzeniu, bo – jak obliczono – może przez nią popłynąć prawie 100 mA bez obawy o przekroczenie dopuszczalnej mocy strat.

Pozostaje jeszcze obliczenie parametrów zaprojektowanego stabilizatora:

1. Rezystancja wyjściowa to równoległe połączenie r_{DZ} i R_1 :

$$r_{WY} = r_{DZ} \parallel R_1 = 35\Omega \parallel 56\Omega \approx 22\Omega$$

2. Współczynnik stabilizacji:

$$S_U = \frac{r_{DZ}}{r_{DZ} + R_1} = \frac{35\Omega}{35\Omega + 56\Omega} \approx 0,38$$

Jest on bardzo kiepski, ale na szczęście rezystancja diody Zenera nieco maleje wraz ze wzrostem płynącego przez nią prądu, więc rzeczywista wartość współczynnika stabilizacji będzie trochę lepsza od obliczonej.

UWAGA

W powyższych rozważaniach nie brano pod uwagę rozrzutu napięcia U_Z diody Zenera, który wynosi $\pm 5\%$ (wskazuje na to litera „C” w oznaczeniu typu diody). Teoretycznie należałoby więc zawsze wykonywać obliczenia „na najgorszy przypadek”, przyjmując, że U_Z może się zmieniać od ok. 4,8 do ok. 5,4 V. Jednak takie „aptekarsstwo” stosuje się rzadko i w inżynierskiej praktyce po prostu przyjmuje się odpowiednie „zapasy” względem wartości granicznych lub dopuszczalnych.

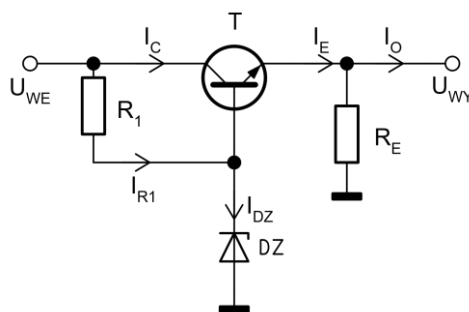
1.2 Zadanie 2

Należy zaprojektować stabilizator napięcia stałego pracujący w warunkach jak w zad. 1, ale przy obciążeniach prądem o natężeniu do 2A.

Rozwiązanie:

W takiej sytuacji nie można (i też nie warto) zastosować stabilizatora równoległego z diodą Zenera. Po pierwsze nie ma diod Zenera o tak wielkich mocach, a po drugie stabilizator równoległy pobierałby ze źródła napięcia cały czas prąd przekraczający 2A, co nie miałoby sensu.

Należy więc zbudować stabilizator szeregowy. Najprostsze rozwiązanie pokazuje poniższy



rysunek:

Projektowanie stabilizatora będzie polegało na dobraniu diody Zenera DZ i tranzystora T oraz obliczeniu rezystancji R_1 . Dodatkowo zostanie omówione zastosowanie opornika dociążającego R_E .

Tym razem należy użyć diody Zenera o napięciu przebicia $U_Z = 5,6$ V, bo napięcie wyjściowe będzie obniżone o ok. 0,6 – 0,7 V względem napięcia panującego na katodzie diody.

Tak jak w zad. 1, w katalogu (np. Vishay Semiconductors) odnajdujemy parametry diody Zenera typu BZX55-C6V6:

$P_{tot} = 500$ mW

$$r_{DZ} < 25 \Omega$$

Obliczmy dopuszczalny prąd I_{Zmax} tej diody:

$$I_{Zmax} = \frac{P_{tot}}{U_Z} = \frac{500mW}{5,6V} \approx 90mA$$

Tranzystor wybierzemy wstępnie przy założeniu, że nie nastąpi zwarcie wyjścia projektowanego stabilizatora. W takiej sytuacji możemy oszacować jego potrzebną dopuszczalną moc strat:

$$P_{Tmax} = (U_{WEmax} - U_{WY}) \cdot I_{Cmax} = (10V - 5V) \cdot 2A = 10W$$

Może to być na przykład popularny tranzystor BD241A, którego podstawowe parametry są następujące:

$$P_{tot} = 40 W$$

$$I_{Cmax} = 3 A$$

$$h_{FE} (\beta) \geq 10 A/A (@ I_C = 3 A)$$

Możemy więc obliczyć maksymalny prąd bazy, jaki będzie potrzebny do wysterowania tranzystora przy pełnym obciążeniu stabilizatora:

$$I_{Bmax} = \frac{I_{Omax}}{\beta_{min}} = \frac{2A}{10} = 200mA$$

I tutaj pojawia się problem, albowiem maksymalny prąd bazy tranzystora przekracza dopuszczalny prąd wybranej wcześniej diody Zenera – a więc nie da się zrealizować tego układu przy użyciu diody typu BZX55. W tej sytuacji należy poszukać diody Zenera o większej dopuszczalnej mocy strat, znaleźć tranzystor o większym współczynniku wzmocnienia prądowego albo zmodyfikować schemat projektowanego stabilizatora. Zdecydujemy się na pierwsze rozwiązanie, jakkolwiek pozostałe nie muszą być od niego gorsze.

W katalogu (ponownie Vishay Semiconductors) znajdujemy diodę Zenera 1N4734A o następujących parametrach:

$$P_{tot} = 1,3W$$

$$r_{DZ} < 5 \Omega$$

UWAGA

Zanim się ucieszymy widząc pięciokrotnie mniejszą rezystancję dynamiczną r_{DZ} diody 1N4734A w porównaniu do diody BZX55-C5V6, spójrzmy na warunki, w jakich te rezystancje zmierzono. Otóż dla diody BZX55 rezystancja dynamiczna ona mierzona przy prądzie $I_Z = 5 mA$, a dla diody prąd pomiarowy to aż 45 mA. Trudno więc wprost porównywać te dwa, jednak zupełnie różne, elementy.

Dopuszczalny prąd diody 1N4734A to trochę ponad 230 mA, więc do naszego stabilizatora nadaje się idealnie.

UWAGA

Parametr h_{FE} (β) tranzystora został na razie określony najbardziej pesymistycznie jak to jest możliwe – czyli przy maksymalnym dopuszczalnym prądzie kolektora (3 A). Jednak, jeśli się przyjrzymy danym katalogowym uważniej (czyli spojrzymy nie na podane w tabelkach parametry graniczne, a przyjrzymy się zamieszczonym niżej wykresom), zauważymy, że przy prądzie $I_C = 2$ A minimalny współczynnik wzmocnienia prądowego to nie 10 A/A, a ok. 20 A/A. Więc być może „od biedy” dałoby się diodę Zenera typu BZX55 zastosować, jednak chyba nie warto budować układu pozbawionego wszelkich „zapasów”.

Po wybraniu elementów, które zostaną użyte do zbudowania stabilizatora, można przystąpić do projektowania całego układu – czyli do obliczenia potrzebnej wartości opornika R_1 , a następnie oszacowania przewidywanych parametrów elektrycznych stabilizatora.

Rezystancję opornika R_1 obliczamy tak samo jak w zad. 1, ale przy założeniu, że powstający stabilizator równoległy będzie obciążany prądami od 0 do $I_{Bmax} = 200$ mA.

UWAGA

Tutaj warto zrobić uwagę trzecią, będzie ona dotyczyła minimalnego prądu, jaki będzie przepływał przez diodę Zenera. W zad. 1 był to prąd $I_{Zmin} = 5$ mA, jednak w projektowanym układzie można przyjąć większy. Zwiększenie prądu diody Zenera spowoduje zmniejszenie jej rezystancji dynamicznej r_{DZ} i, co za tym idzie, poprawę współczynnika stabilizacji całego stabilizatora. Jednocześnie, wobec dużych prądów, jakie będą pobierane z wyjścia układu, nie pogorszy to radykalnie jego sprawności. Przy obliczaniu rezystancji opornika R_1 założono więc, że prąd diody Zenera nie będzie nigdy mniejszy od $I_{Zmin} = 40$ mA.

$$R_1 \leq \frac{U_{WEmin} - U_Z}{I_{Zmin} + I_{Bmax}} = \frac{7V - 5,6V}{40mA + 200mA} = 5,8\Omega$$

Biorąc pod uwagę to, że prąd I_{Bmax} został obliczony przy założeniu, że najmniejszy współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora $\beta_{min} = 10 A/A$, a tak naprawdę będzie on około dwa razy większy, można bezpiecznie użyć opornika R_1 o rezystancji 10Ω .

Współczynnik stabilizacji tego stabilizatora będzie podobny (zapewne nieco gorszy, na pewno nie lepszy) do współczynnika stabilizacji stabilizatora równoległego utworzonego z elementów R_1 i DZ, czyli:

$$S_U \geq \frac{r_{DZ}}{R_1 + r_{DZ}} = \frac{5\Omega}{10\Omega + 5\Omega} = 0,33$$

Na rezystancję wyjściową stabilizatora będą się składały: rezystancja wyjściowa stabilizatora równoległego z diodą Zenera, pomniejszona β razy i rezystancja dynamiczna złącza emiter-baza tranzystora.

Pierwszy składnik jest w miarę stały i wynosi:

$$r_{WY1} = \frac{r_{DZ} \parallel R_1}{\beta} \approx \frac{5\Omega \parallel 10\Omega}{20} = 0,17\Omega$$

Drugi zależy od prądu I_E pobieranego z emitera tranzystora (czyli prądu I_O pobieranego ze stabilizatora):

$$r_{WY2} = r'_{eb} = \frac{\phi_T}{I_E} \approx \frac{25mV}{I_O}$$

Nietrudno zauważyć, że przy małym prądzie I_O dominującym składnikiem będzie r_{WY2} , a przy prądzie dużym oba składniki mogą być podobne, lub wręcz dominuje r_{WY1} :

$$r_{WY} = r_{WY1} + r_{WY2} = 0,17 \Omega + 2,5 \Omega \approx 2,7 \Omega \quad \text{przy } I_O = 10 \text{ mA}$$

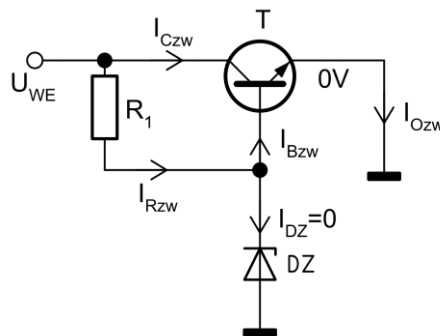
$$r_{WY} = r_{WY1} + r_{WY2} = 0,17 \Omega + 0,025 \Omega \approx 0,2 \Omega \quad \text{przy } I_O = 1 \text{ A}$$

Wzrostowi rezystancji wejściowej można zaradzić obciążając wstępnie stabilizator stałym prądem, czyli dodając opornik R_E . Na przykład jeśli zostanie zastosowany opornik R_E o rezystancji 100Ω , prąd I_E tranzystora nie będzie nigdy mniejszy niż 50 mA , a rezystancja wyjściowa będzie zawsze mniejsza od ok. $0,7 \Omega$. Jednak zastosowanie opornika spowoduje wzrost stałej mocy traconej w stabilizatorze o:

$$P_{RE} = \frac{U_O^2}{R_E} = 0,25W$$

Taka też powinna być dopuszczalna moc strat opornika R_E .

Na zakończenie obliczmy, jakie moce wydzielią się w elementach stabilizatora w przypadku zwarcia jego wyjścia do masy. Taką sytuację ilustruje poniższy rysunek:



Jako że emiter tranzystora znajduje się na potencjale masy, na bazie panuje napięcie około 0,7 V. W najgorszej sytuacji, gdy na wejściu stabilizatora pojawi się napięcie $U_{WE} = 10\text{ V}$, na oporniku R_1 odłoży się napięcie $U_{R1zw} = 9,3\text{ V}$.

Wtedy moc wydzielająca się w tym oporniku jest równa:

$$P_{R1zw} = \frac{U_{R1zw}^2}{R_1} = \frac{(9,3V)^2}{10\Omega} \approx 8,7W$$

Do bazy tranzystora popłynie prąd:

$$I_{Bzw} = \frac{U_{R1zw}}{R_1} = \frac{9,3V}{10\Omega} = 0,93A$$

Więc nawet jeśli założymy, że przy bardzo dużym prądzie kolektora współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora spadnie do 10 A/A, zwarciovyy prąd kolektora I_{Czw} wyniesie ponad 9 A i spowoduje jego uszkodzenie. Oczywiście być może, zanim to nastąpi, spaleni ulegnie opornik R_1 . Jednak gdyby oba elementy „wytrzymały, w tranzystorze wydzieliłaby się moc:

$$P_{Tzw} = U_{CE} \cdot I_{Czw} \approx 10V \cdot 9A = 90W$$

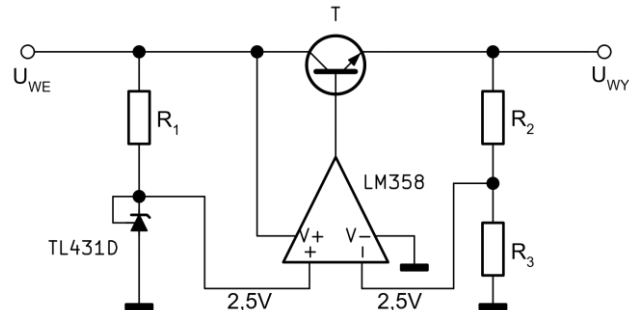
1.3 Zadanie 3

Należy zaprojektować stabilizator napięcia stałego o parametrach jak w zad 1 i zad. 2, ale z wykorzystaniem pętli sprzężenia zwrotnego i wzmacniacza błędu.

Rozwiązanie:

Jak źródło napięcia odniesienia zostanie zastosowany stabilizator scalony TL431, a wzmacniaczem błędu będzie popularny wzmacniacz operacyjny LM358.

Jako że TL431 jest „programowaną diodą Zenera”, może on wytwarzać dowolne napięcie, ograniczone od góry napięciem zasilającym, a od dołu wartością 2,5 V. Jeśli zdecydujemy się na wybór $U_{REF} = 2,5 V$, schemat ideowy projektowanego stabilizatora będzie taki, jak na



poniższym rysunku:

Niestety decyzja o zastosowaniu typowego wzmacniacza operacyjnego ma pewne konsekwencje. Otóż wzmacniacz operacyjny LM358 nie będzie w stanie dostarczyć do bazy tranzystora odpowiedniego prądu. Po sprawdzeniu w katalogu (Texas Instruments) okazuje się, że maksymalny prąd wyptywający z wyjścia tego wzmacniacza operacyjnego to 40 mA (wartość typowa), a w najgorszym przypadku tylko 20 mA (wartość minimalna). A więc musimy poszukać innego tranzystora, o większym współczynniku wzmocnienia prądowego.

W katalogu (ON Semiconductor) odnajdujemy tranzystor BD645, który ma następujące parametry:

$$P_{tot} = 40 W$$

$$I_{Cmax} = 4 A$$

$$h_{FE} (\beta) \geq 750 A/A$$

Wygląda więc na idealny do zastosowania w naszym układzie.

Na początek zaprojektujemy źródło napięcia odniesienia. W tym celu trzeba dobrać tylko opornik R_1 . Z danych katalogowych układu TL431 wynika, że najmniejszy prąd, który układ zapewni mu poprawne działanie, to 1 mA. Jako że potrzeba jeszcze trochę prądu dla spolaryzowania wejścia referencyjnego tego układu (do 4 μA) oraz do ok. 100 nA prądu potrzebnego do polaryzacji wejścia nieodwracającego wzmacniacza operacyjnego, ustalmy „z zapasem” prąd opornika R_1 na około 2 mA.

Obliczamy:

$$R_1 \leq \frac{U_{Wemin} - 2,5V}{2mA} = \frac{4,5V}{2mA} = 2,25k\Omega$$

i z szeregu E24 wybieramy wartość 2,2 k Ω .

Ponieważ na wyjściu stabilizatora chcemy otrzymać napięcie $U_0 = 5 \text{ V}$, a napięcie referencyjne $U_{REF} = 2,5 \text{ V}$, musimy zastosować oporniki R_2 i R_3 . W naszym układzie powinny one mieć jednakowe rezystancje.

UWAGA

Jak duże powinny być te rezystancje. Kiloomy, setki kiloomów, czy może megaomy?

Zauważmy, że gdyby wzmacniacz operacyjny, użyty jako wzmacniacz błędu w tym układzie, był idealny, nie miałoby to żadnego znaczenia. Jednak rzeczywisty wzmacniacz błędu idealny nie jest, a nieidealność, która może nas w takiej sytuacji „zaboleć” to jego niezerowe prądy wejściowe. A właściwie nie tyle same prądy wejściowe (bo ich znaczenie możemy zredukować teoretycznie do zera, dobierając $R_4 = R_2 || R_3$), co ich różnica – prąd niezrównoważenia. Ten prąd spowoduje w naszym układzie niedokładne „mnożenie” napięcia referencyjnego i tym samym błąd określenia napięcia na wyjściu stabilizatora.

Jednak w przypadku zastosowania wzmacniacza operacyjnego jako wzmacniacza błędu ten problem należy uznać „przekombinowany”. Zauważmy, że prąd niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego LM2358 nie powinien przekroczyć 30 nA , więc znaczące błędy napięcia wyjściowego pojawią się dopiero przy rezystancjach w obwodach wejściowych wzmacniacza operacyjnego na poziomie setek kiloomów. Tymczasem zastosowanie rezystancji R_2 i R_3 rzędu pojedynczych kiloomów nie spowoduje strat mocy w znaczących wobec przewidywanych mocy pobieranych przez stabilizator podczas jego normalnej pracy.

Decydujemy się więc na rezystancje $R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ albo jakiegokolwiek inne podobnego rzędu, które znajdziemy w szufladzie.

Na zakończenie obliczmy parametry elektryczne zaprojektowanego stabilizatora:

- rezystancja wyjściowa r_{WY} . Prawdopodobnie będzie praktycznie niemierzalna, albowiem przy wzmocnieniu wzmacniacza operacyjnego na poziomie 10^5 V/V prędzej ujawni się rezystancja ścieżek i doprowadzeń, niż „czysta” rezystancja wyjściowa samego stabilizatora. Tak czy inaczej, należy się spodziewać rezystancji r_{WY} rzędu setek mikroohmów albo pojedynczych miliomów.

- współczynnik stabilizacji niestety nie zostanie „poprawiony” przez sprzężenie zwrotne, a nawet wręcz przeciwnie.

Współczynnik stabilizacji źródła napięcia odniesienia U_{REF} obliczymy w następujący sposób:

$$S_{U_{REF}} = \frac{r_{REF}}{R_1 + r_{REF}}$$

gdzie r_{REF} to rezystancja dynamiczna układu TL431. W katalogu odczytujemy, że ta rezystancja przy napięciu wyjściowym wynoszącym 2,5 V to najwyżej 0,5 Ω . A więc współczynnik stabilizacji źródła napięcia odniesienia to mniej niż:

$$S_{UREF} \leq \frac{0,5\Omega}{2200\Omega + 0,5\Omega} = 0,00023$$

Współczynnik stabilizacji całego stabilizatora jest, co prawda, dwukrotnie gorszy:

$$S_U = \frac{R_2 + R_3}{R_2} \cdot S_{UREF} \leq 0,00046$$

ale i tak – dzięki bardzo małej rezystancji wewnętrznej układu TL431 i możliwości zastosowania dużej rezystancji opornika R_1 – jest doskonały.

Teoretycznie w tym momencie moglibyśmy uznać stabilizator za zaprojektowany, niestety pojawiają się tutaj bardzo poważne problemy, które koniecznie należy przeanalizować:

1. Czy wzmacniacz LM358 będzie poprawnie pracował przy napięciu zasilającym wynoszącym 7 V? Bo przecież takie właśnie będzie najniższe napięcie występujące na wejściu naszego układu!

W katalogu znajdujemy następujące dane: „Power supply $V^+ = +5...+30 V$ ”.

A więc wszystko jest w porządku.

2. Czy tranzystor „wytrzyma” zwarcie wyjścia stabilizatora do masy?

Obliczmy więc. Zakładając, że z wyjścia wzmacniacza operacyjnego może popłynąć do bazy tranzystora prąd o natężeniu nawet 40 mA, a tranzystor BD645 ma współczynnik wzmocnienia prądowego 750 A/A... chyba nawet nie trzeba niczego liczyć. Jeśli nie zabezpieczymy naszego układu przez zwarcie, tranzystor nie ma żadnej szansy na „przeżycie” takiego doświadczenia.

3. Na koniec najgorsze. Otóż nasz, właśnie doskonale zaprojektowany, układ **w ogóle nie będzie działał**. Dotychczas nie przewidzieliśmy podstawowego problemu, jakim jest jego *drop-out*.

Po pierwsze: w najgorszym przypadku wzmacniacz operacyjny typu LM358 potrafi wytworzyć na swoim wyjściu maksymalne napięcie nie większe niż $V^+ - 1,5 V$ (gdzie V^+ to jego dodatnie napięcie zasilania).

Po drugie: tranzystor BD645 to tzw. tranzystor Darlingtona, a więc napięcie jego przewodzącego złącza baza-emiter to nie ok. 0,7 V, a prawie 1,5 V.

Czyli *drop-out* naszego układu, będący sumą dwóch wyżej wymienionych ograniczeń, może sięgnąć wartości aż ok. 3 V co, przy napięciu wejściowym $U_{WEmin} = 7\text{ V}$ uniemożliwi uzyskanie napięcia $U_O = 5\text{ V}$.

Należy więc albo zapewnić napięcie $U_{WEmin} \geq 8\text{ V}$, albo zbudować stabilizator o innej strukturze niż pokazana w niniejszym zadaniu.