

Liniowe stabilizatory napięcia i prądu

1. Wstęp

Stabilizatory dzieli się według zasady działania na stabilizatory parametryczne oraz kompensacyjne tzn. ze sprzężeniem zwrotnym. Stabilizatory kompensacyjne dzieli się na układy o działaniu ciągłym oraz o działaniu impulsowym. W obydwu tych grupach wyróżnia się stabilizatory szeregowo i równoległe. Stabilizatory parametryczne stosowane są w przypadku małych mocy wyjściowych lub jak stabilizatory pomocnicze. Cechują się one małą sprawnością, niezbyt dobrymi parametrami oraz brakiem możliwości regulacji stabilizowanego napięcia lub prądu wyjściowego. Parametry liniowego stabilizatora kompensacyjnego, a zwłaszcza sprawność, są znacznie lepsze niż stabilizatora parametrycznego.

Niniejsze ćwiczenie ma charakter projektowo-doświadczalny i jego celem jest wykształcenie umiejętności samodzielnego projektowania i realizacji praktycznej kompensacyjnych stabilizatorów o działaniu ciągłym w postaci aplikacji wybranych popularnych układów scalonych.

2. Wprowadzenie. Stabilizatory kompensacyjne o pracy ciągłej.

Zadaniem stabilizatorów napięcia lub prądu stałego jest dostarczenie do obciążenia stabilizowanego napięcia lub prądu, którego wartość w bardzo małym stopniu będzie zależała od takich czynników jak zmieniające się:

- napięcie wejściowe $U_I \pm \Delta U_I$
- rezystancja obciążenia $R_L \pm \Delta R_L$
- temperatura otoczenia $T \pm \Delta T$

oraz innych czynników zewnętrznych, takich jak zmiany ciśnienia i wilgotności powietrza atmosferycznego, oraz odporność na działanie czynników chemicznych, a branych pod uwagę wyłącznie w zastosowaniach specjalnych.

Jednak wpływ wymienionych czynników zewnętrznych oraz temperatury na wartości stabilizowanych napięć i prądów wyjściowych jest zazwyczaj do pominięcia w stosunku do zmian wpływu napięcia wejściowego i obciążenia w szczególności w scalonych stabilizatorach napięcia i prądu. Można wówczas powiedzieć, że napięcie wyjściowe U_O lub prąd wyjściowy I_O jest w głównej mierze funkcją napięcia zasilającego U_I i obciążenia R_L

$$\begin{aligned} U_O &= f(U_I, R_L) \\ I_O &= f(U_I, R_L) \end{aligned} \quad (2.1)$$

Różniczki zupełne tych funkcji mają też postać

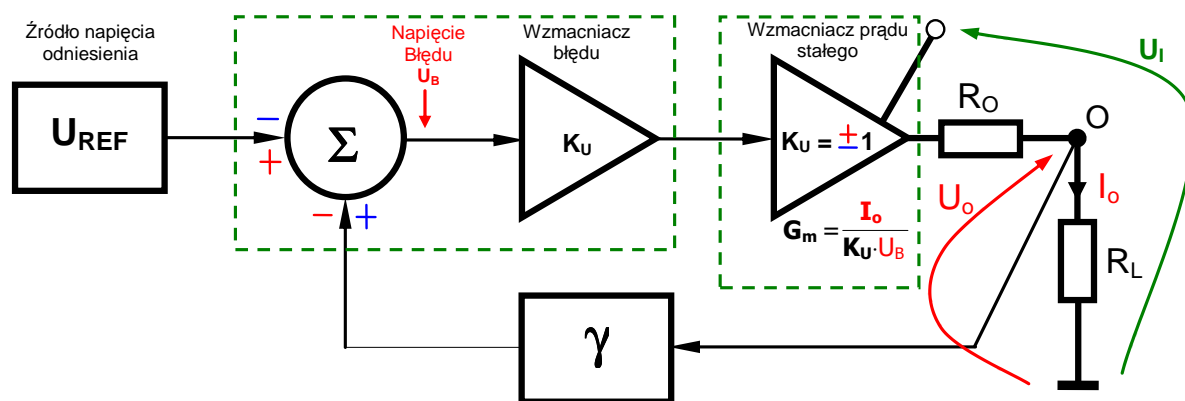
$$\begin{aligned} dU_O &= \frac{dU_O}{dU_I} \cdot \Delta U_I + \frac{dU_O}{dI_O} \cdot \Delta I_O \\ dI_O &= \frac{dI_O}{dU_I} \cdot \Delta U_I + \frac{dI_O}{dU_O} \cdot \Delta U_O \end{aligned} \quad (2.2)$$

Stabilizator jest dwuwrotnikiem włączonym pomiędzy źródło niestabilizowanego napięcia lub prądu wejściowego a obciążenie (rys. 2.1.)



Rys. 2.1. Stabilizator w warunkach roboczych.

Rozważane w ćwiczeniu stabilizatory sterowane o działaniu ciągłym (*Kompensacyjne*) działają dzięki regulacji stałoprądowej rezystancji elementu regulacyjnego (*Tranzystora*) sygnałem zwrotnym, uzależnionym od różnicy napięcia lub prądu wyjściowego i napięcia odniesienia (*Referencyjnego*). Ta ogólna zasada działania sterowanych stabilizatorów została pokazana na poniższym rysunku.



Rys. 2.2. Schemat blokowy i zasada działania stabilizatora kompensacyjnego

Na podstawie schematu blokowego stabilizatora z rys. 2.2, zgodnie z teorią sprzężenia zwrotnego, można zapisać następujące wyrażenia opisujące:

Rezystancję wyjściową - R_{fo}

$$R_{fo} = \frac{R_O}{1 + K_U \gamma} \quad (2.3)$$

Napięcie na wyjściu stabilizatora - U_O

$$U_O = U_{REF} \frac{K_U G_m R_L}{1 + \gamma K_U G_m R_L}, \text{ jeśli przyjmujemy, że } K_U \rightarrow \infty, \text{ czyli } \lim_{K_U \rightarrow \infty} \left[U_{REF} \frac{K_U G_m R_L}{1 + \gamma K_U G_m R_L} \right],$$

wówczas $U_O = U_{REF} \frac{1}{\gamma} \quad (2.4)$

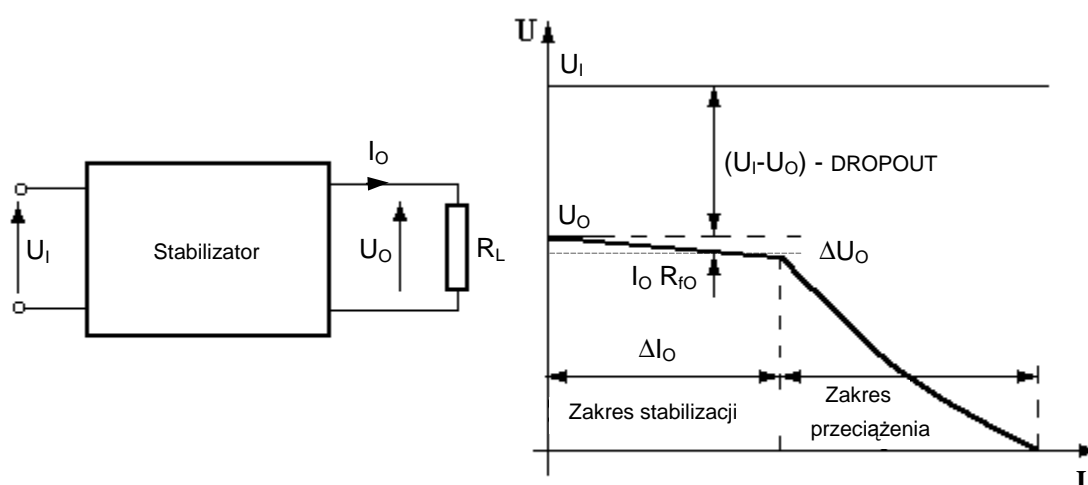
W przypadku stabilizatora prądu w układzie jak na rys.2.2, wyrażenie opisujące zależność prądu stabilizowanego I_O na wyjściu ma postać

$$I_O = U_{REF} \frac{K_U G_m}{1 + \gamma K_U G_m R_O}, \text{ jeśli również przyjmiemy, że } K_U \rightarrow \infty, \text{ a więc } \lim_{K_U \rightarrow \infty} \left[U_{REF} \frac{K_U G_m}{1 + \gamma K_U G_m R_O} \right],$$

wówczas $I_O = \frac{1}{\gamma} \frac{U_{REF}}{R_O}$ (2.5)

Zależność jest prawdziwa dla napięcia U_{REF} będącego w tym układzie napięciem odniesienia względem potencjału punktu „O”

W praktycznej realizacji układowej stabilizatora blok K_U i Σ zgodnie z rys. 2.2 (linia przerywana), stanowi napięciowy wzmacniacz różnicowy lub operacyjny z wejściem symetrycznym.



Rys. 2.3. Charakterystyka wyjściowa stabilizatora napięcia w warunkach roboczych.

Podstawowe parametry stabilizatora są związane z jego charakterystyką wyjściową obrazującą zależność napięcia wyjściowego U_O od prądu obciążenia I_O (przy stałym napięciu wejściowym U_I). W typowej charakterystyce stabilizatora wyodrębnia się

- zakres stabilizacji (normalnej pracy)
- zakres przeciążenia

W zakresie przeciążenia występuje znaczna zależność napięcia od prądu, tzn. zanikają właściwości stabilizujące układu, ponadto może znacznie powiększyć się moc wydzielana w szeregowym elemencie regulacyjnym, co grozi jego uszkodzeniem. Obecnie stosuje się często układy dodatkowe modyfikujące charakterystykę $U_O(I_O)$ w taki sposób, że poza zakresem stabilizacji moc wydzielana w układzie stabilizatora nie powiększa się w ogóle lub powiększa się umiarkowanie (*FoldBack* lub *Safe Operation Area Protection Circuit*) - rys. 3.4.

Podstawowe parametry stabilizatora to:

- U_O – nominalne (znamionowe) napięcie stabilizacji
- U_{REF} – napięcie odniesienia (dioda zenera, źródło typu band-gap, przetwornik C/A)
- I_{Omax}, I_K – maksymalny prąd wyjściowy w zakresie stabilizacji

I_z	– prąd zwarcia
$S_U = \Delta U_I / \Delta U_O$	– współczynnik stabilizacji napięcia od zmian napięcia wejściowego
$S_{RL} = \Delta U_O / U_O$	– współczynnik stabilizacji napięcia od zmian obciążenia
$R_{FO} = \Delta U_O / \Delta I_O $	– rezystancja wyjściowa
$\eta = (U_O I_O) / (U_I I_I)$	– sprawność energetyczna
$(U_I - U_O)_{\min}$	– minimalna różnica napięć pomiędzy wejściem i wyjściem niezbędna do stabilizacji napięcia wyjściowego w warunkach pełnych zmian obciążenia (<i>DropOut</i>)
$(U_I - U_O)_{\max}$	– maksymalna różnica napięć pomiędzy wejściem i wyjściem nie powodująca zniszczenia elementu regulacyjnego w warunkach pełnego obciążenia
R_O, R_S	– rezystancja wyjściowa stabilizatora z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego, rezystancja szeregową „próbującą” zmiany napięcia wywołane zmianami prądu obciążenia
R_L	– rezystancja obciążenia
G_m	– transkonduktancja elementu regulacyjnego (tranzystora mocy, wzmacniacza prądowego) definiowana jako I_C / U_{be} , I_D / U_{gs}
γ	– współczynnik sprzężenia (zwrotnego podziału napięcia – prądu wyjściowego względem napięcia odniesienia), decyduje o wartości napięcia lub prądu stabilizowanego na wyjściu

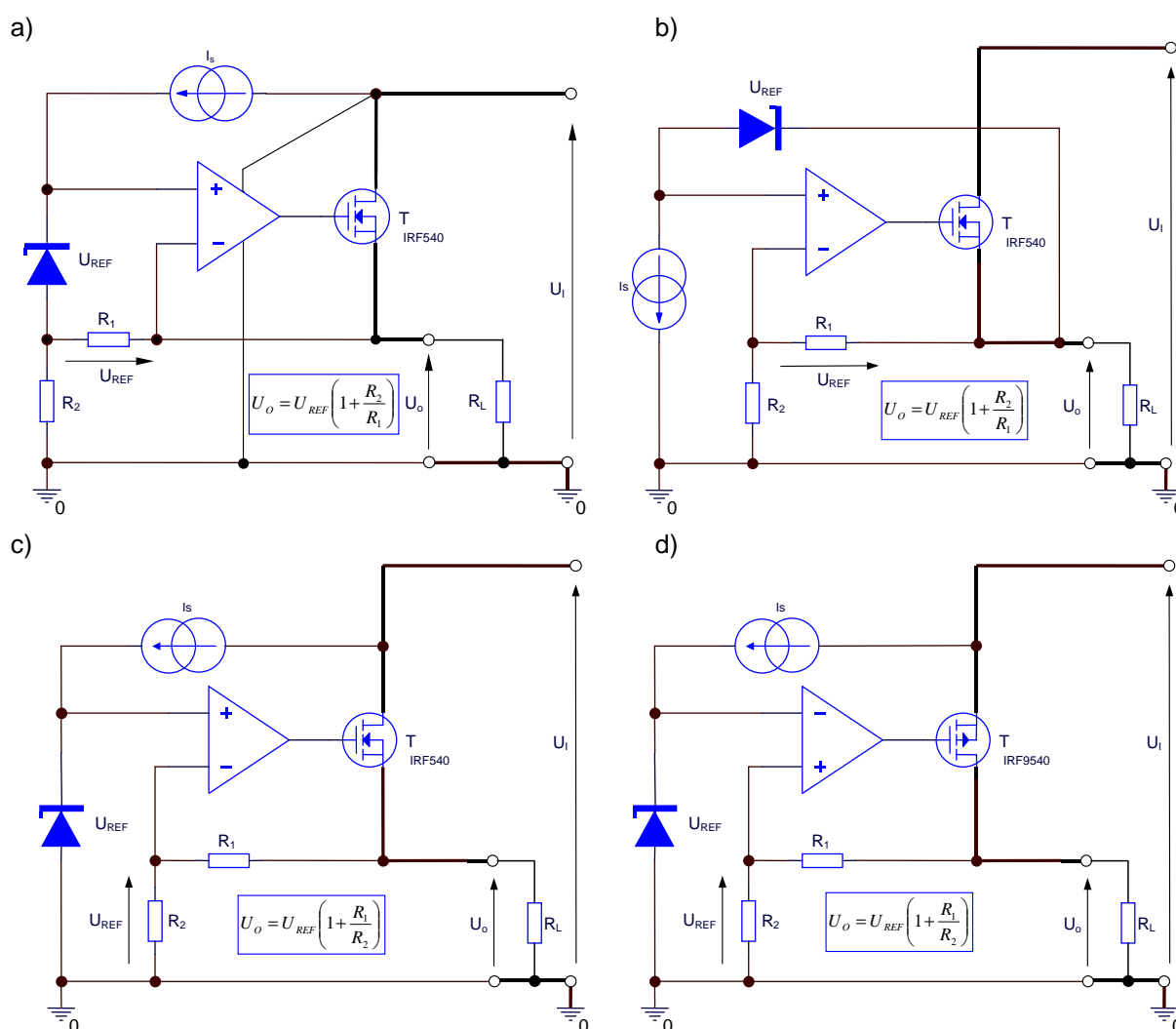
3. Rozwiązania układowe i projektowanie kompensacyjnych stabilizatorów liniowych.

Zgodnie z rys. 2.2, na którym przedstawiono ogólny schemat blokowy stabilizatora kompensacyjnego, stabilizatory możemy podzielić ze względu na rodzaj ujemnego sprzężenia zwrotnego, a więc sposób jego realizacji bądź za pomocą wzmacniacza błędów (sygnał zwrotny podawany jest na wejście różnicowe ze znakiem minus „-”, natomiast element regulacyjny pracuje w układzie OC lub OD) - układy klasyczne, bądź za pomocą inwertera w postaci elementu regulacyjnego (sygnał zwrotny podawany jest na wejście różnicowe ze znakiem minus „+”, natomiast element regulacyjny pracuje w układzie OE lub OS) - układy o małym spadku napięcia pomiędzy wejściem i wyjściem (*Low DropOut*). Podziału stabilizatorów dokonuje się również ze względu na sposób sterowania za pomocą elementu regulacyjnego jak to pokazano na rys. 3.2, z zachowaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego w pętli.

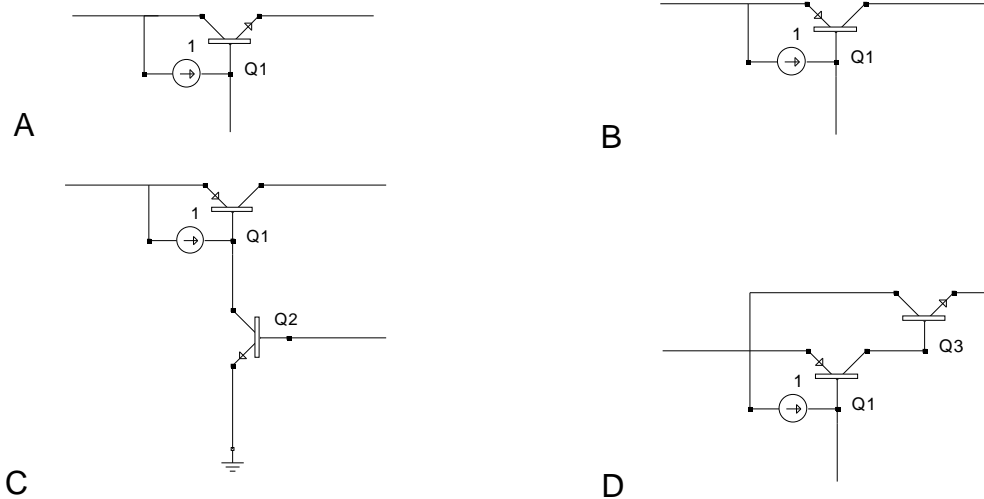
Na rys. 3.1, pokazano najważniejsze powszechnie stosowane układy liniowych stabilizatorów napięcia realizowane, w postaci monolitycznych układów scalonych, bądź na elementach dyskretnych z wykorzystaniem scalonych źródeł napięcia odniesienia (np.: 1N821, TL431, LM385, LM399). Układy stabilizatorów z rys. 3.1 (a) i (b) znalazły szczególne zastosowanie w tzw. 3-końcówkowych programowanych stabilizatorach napięcia lub prądu, w których płynną lub skokową regulację napięcia możemy uzyskać poprzez zmianę rezystancji R_2 , w zakresie od 0Ω do wartości przy której różnica $(U_I - U_O)$ jest większa od $(U_I - U_O)_{\min}$. Dzięki „rezystancji programującej R_2 ” włączonej pomiędzy masę a stabilizator możliwe jest np. cyfrowe ustalanie napięcia wyjściowego za pomocą kluczy tranzystorowych, co ma szczególne zastosowanie w zasilaniu urządzeń bezpośrednio sterowanych mikrokontrolerami jednoukładowymi. Należy przede wszystkim wymienić tu kilka popularnych układów monolitycznych LM78xx, LM317, LM350, MC33269, oraz programowany stabilizator 5-końcówkowy L200 pracujący w układzie jak na rys. 3.1 (c), w którym płynną regulację napięcia uzyskuje się dzięki

zmianom wartości rezystancji R_1 . Na rys. 3.1 (d) przedstawiono podstawowy układ stabilizatora o małym spadku napięcia pomiędzy wejściem i wyjściem (stabilizator LDO). Poza wymienionym „dedykowanymi” układami liniowych stabilizatorów, produkowane są również tzw. uniwersalne monolityczne stabilizatory napięcia lub prądu, zawierające: (i) skompensowane źródło napięcia odniesienia, (ii) wzmacniacz błędny i (iii) układ zabezpieczenia nadprądowego, bądź stabilizator prądu w postaci dodatkowego wzmacniacza - komparatora. Należy tu w szczególności wymienić popularny stabilizator monolityczny uA723. W oparciu o układy scalonych stabilizatorów uniwersalnych, realizowane są najczęściej, układy stabilizatorów pokazane na rys. 3.1 (c) i (d). W celu realizacji aplikacji układu stabilizatora ze stabilizatorem uniwersalnym najczęściej konieczne jest zastosowanie zewnętrznego dyskretnego tranzystora mocy BJT lub MOSFET jako elementu regulacyjnego.

Przyjmując, że blok γ zgodnie z rys. 2.2, stanowi zewnętrzny dzielnik napięcia R_1 , R_2 w układach jak na rys. 3.1, możemy zapisać odpowiednie wyrażenia zgodnie ze wzorem (2.4), opisujące zależność stabilizowanego napięcia wyjściowego U_O od napięcia odniesienia U_{REF} . Zależności te podano na schematach poszczególnych układów stabilizatorów.



Rys. 3.1. Podstawowe układy liniowych kompensacyjnych stabilizatorów napięcia. (a), (b) i (c) układy stabilizatorów wtórnikowych, oraz (d) stabilizator typu LDO.



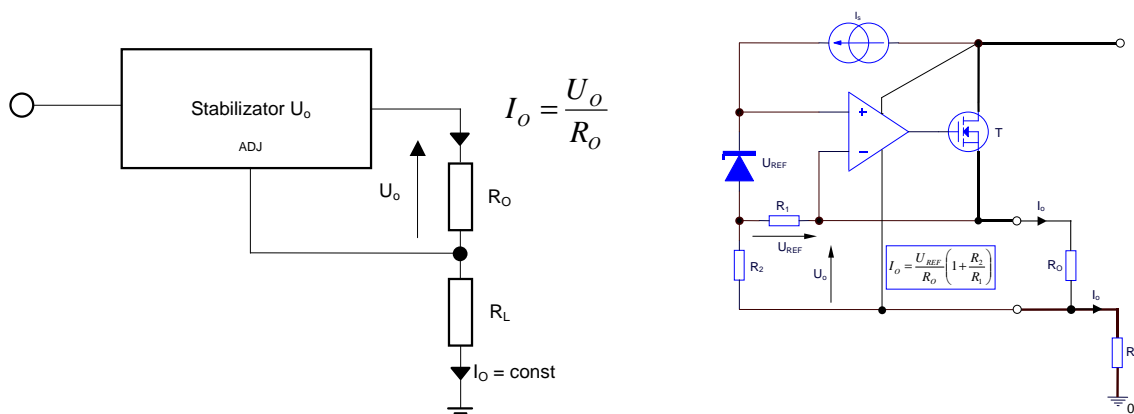
Rys. 3.2. Elementy regulacyjne - podstawowe sposoby sterowania wyjściem stabilizatora.

W tabeli 3.1, zestawiono własności poszczególnych układów sterownia elementami regulacyjnymi i elementów regulacyjnych pokazanych na rys. 3.2, w układach kompensacyjnych stabilizatorów liniowych.

Tabel. 3.1 Podstawowe własności układów sterowania elementami regulacyjnymi z rys. 3.2.

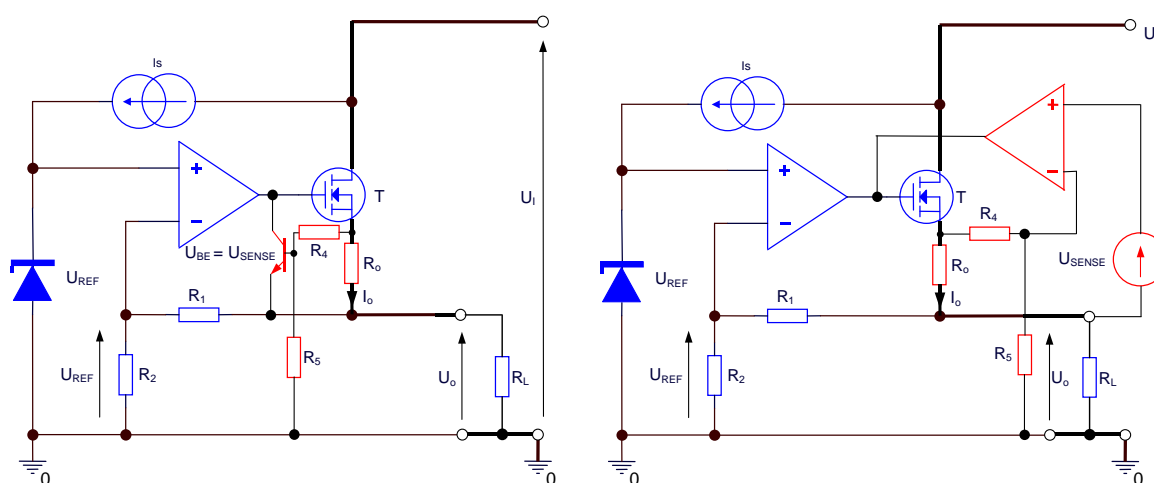
Układ sterowania	A	B	C	D
U_{DROPOUT} [min]	$> U_{\text{BE}}$	$U_{\text{CEsat}} < 0.2\text{V}$	$U_{\text{CEsat}} < 0.2\text{V}$	$U_{\text{CEsat PNP}} + U_{\text{BE NPN}} < 1.5\text{V}$
Impedancja wyjściowa	Niska	Wysoka	Wysoka	Wysoka
Pasmo	Szerokie	Wąskie	Wąskie	Wąskie
Stabilność	Bezwzględna	Warunkowa zależna od C_L	Warunkowa zależna od C_L	Warunkowa zależna od C_L
Rodzaj sterowania obciążeniem	Wtórnik	Inwerter	Podwójny Inwerter	Inwerter

Stabilizator prądu w najprostszy sposób można zrealizować, poprzez wykorzystanie istniejącego już 3-końcówkowego stabilizatora napięcia, w którym pomiędzy wyjście, a masę stabilizatora (końcówka *GND* lub *ADJ*) włączony jest rezystor R_O lub R_S próbujący przepływający prąd jak to pokazano na rys. 3.3.

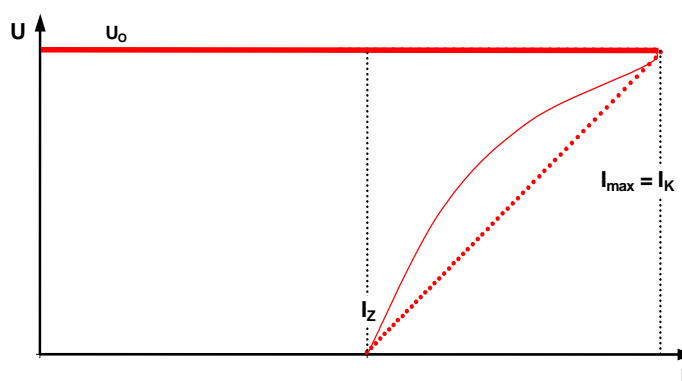


Rys. 3.3. Układ stabilizatora prądu (a) z wykorzystaniem stabilizatora napięcia, (b) ideowy schemat równoważny.

Rozwiązanie to umożliwia w prosty sposób realizację stabilizatorów prądu z wykorzystaniem topologii układowych z rys. 3.1 (a) i (b) scalonych 3-końcówkowych stabilizatorów napięcia. W przypadku układów stabilizatorów, w których napięcie odniesienia U_{REF} podłączone jest pomiędzy „masę” układu scalonego i wejście wzmacniacza błęd (rys. 3.1 (c)) jak przypadku układów L200, czy stabilizatora uniwersalnego uA723, najczęściej w celu zabezpieczenia nad prądowego lub przejścia układu w stabilizację prądu stosuje się dodatkowy układ ze wzmacniaczem błęd w postaci pojedynczego tranzystora lub WO. Na rys. 3.4, pokazano dwa równoważne sposoby realizacji układów stabilizacji prądu w których uzyskuje się zmniejszenie prądu obciążenia przy zmniejszeniu rezystancji obciążenia (*FoldBack*), a więc o charakterystyce jak na rys. 3.5. W układzie tym w odróżnieniu od klasycznych stabilizatorów prądu, poza rezystorem pomiarowym R_O znajduje się dodatkowy dzielnik napięcia zbudowany na rezystorach R_4 i R_5 .



Rys. 3.4. Układy stabilizatorów z układem stabilizacji prądu ze zmniejszonym prądem zwarciovym.



Rys. 3.5. Charakterystyka prądowo-napięciowa układów z rys. 3.4.

Analizując pracę obu układów należy podkreślić, że do uzyskania takiej samej wartości prądu $I_O = I_K$ jak w układzie klasycznym w którym $R_5 \rightarrow \infty$ spadek napięcia na rezystorze R_O musi być większy od wartości napięcia panującego na rezystorze R_4 . **Wynika stąd, że rezystancja próbkująca R_O musi więc być większa !** Stosując układ z ograniczeniem prądu typu *FoldBack* pokazany na rys. 3.4, nie należy przyjmować zbyt dużego stosunku I_K/I_Z , ponieważ prowadzi to do wyraźnego pogorszenia sprawności stabilizatora (w szczególności w układach stabilizatorów niskich napięć),

powiększonych strat mocy w rezystorze R_O i pogorszeniu się współczynnika stabilności od zmian obciążenia.

Poniżej podano odpowiednie zależności do obliczania (syntezy i analizy) układów ograniczenia i stabilizacji prądu z rys. 3.4. Aby uniknąć zadziałania układu przy prądach niższych niż znamionowy należy sprawdzić, czy warunek $I_{MAX}/I_Z > 1$, jest spełniony w całym zakresie napięć wyjściowych U_O (stabilizator regulowany) i prądów, oraz temperatur elementu regulacyjnego. Ponadto w celu wydatnego zmniejszenia strat, jakie powstały przy obciążeniu znamionowym w rezystorze R_O , gdy jest duży stosunek I_{MAX}/I_Z , korzystne jest zmodyfikowanie układu. Przy obniżeniu rezystancji R_O , pociąga to jednak za sobą konieczność zmiany I_Z , a tym samym zmiany stosunku I_{MAX}/I_Z . Zmniejszenie rezystancji R_O , przy zachowaniu takiego samego stosunku I_{MAX}/I_Z jest możliwe tylko i wyłącznie poprzez obniżenie napięcia U_{SENSE} .

$$R_O = \frac{U_{SENSE}}{\left(1 - \frac{U_{SENSE}}{U_O} \left(\frac{I_K}{I_Z} - 1\right)\right)} \frac{1}{I_Z} \quad (2.1)$$

$$I_Z = \frac{U_{SENSE}}{R_O} \frac{U_O + I_K R_O}{U_{SENSE} + U_O} \quad (2.3)$$

$$R_4 = R_5 \frac{\frac{U_{SENSE}}{U_O} \left(\frac{I_K}{I_Z} - 1\right)}{1 - \frac{U_{SENSE}}{U_O} \left(\frac{I_K}{I_Z} - 1\right)} \quad (2.2)$$

$$I_Z = \frac{I_K (R_4 + R_5)}{R_4 \left(\frac{U_O}{U_{SENSE}} + 1\right) + R_5} \quad (2.4)$$

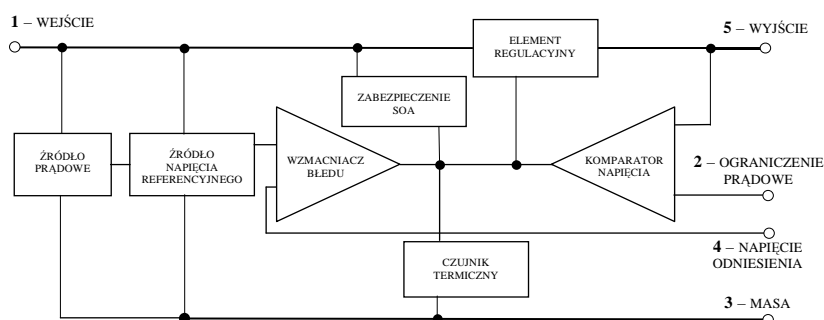
W scalonych stabilizatorach napięcia często stosuje się taki sposób ograniczenia prądu wyjściowego, że poza zakresem stabilizacji moc wydzielana w układzie stabilizatora powiększa się umiarkowanie lub nie powiększa się dzięki zastosowanej automatycznej regulacji wewnętrznego napięcia odniesienia U_{sense} , np. w zależności od wydzielanej temperatury związanej ze wzrostem mocy traconej. Jednym z niewielu produkowanych na świecie stabilizatorów monolitycznych z układem zabezpieczenia prądowego, nadnapięciowego i termicznego, oraz automatyczną regulacją mocy traconej jest układ L200.

4. Badane układy

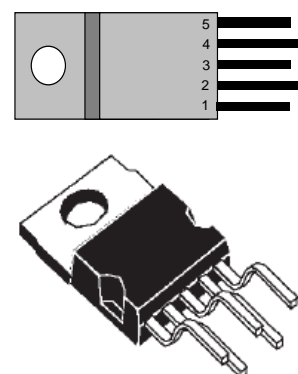
4.1. Stabilizator napięcia i prądu z układem scalonym L200

Układ scalony L200 zaproponowany przez firmę SGS-Thomson jest monolitycznym stabilizatorem napięcia i prądu. Podstawowe właściwości stabilizatora L200 to płynnie regulowane napięcie wyjściowe U_o od 2.75V do 30V (za pomocą pojedynczego rezystora), ustawiane zabezpieczenie prądowe, lub możliwość regulacji płynnej prądu wyjściowego I_o od ok. 20mA do 2A za pomocą zewnętrznego inwertera w postaci pojedynczego WO. Ponadto układ L200 wyposażony został przez konstruktorów w szereg zabezpieczeń takich jak: ogranicznik prądu $I_{Omax} = 2A$, mocy traconej (zgodnie z wykresem SOA – karta katalogowa), wyłącznik termiczny 150°C, zabezpieczenie przed zbyt wysokim napięciem wejściowym (do 60V przez 10ms) i różnicą napięć pomiędzy wejściem i wyjściem większą niż 33V, które czynią go teoretycznie niezawodnym i eliminują w praktyce potrzebę realizacji szeregu układów zabezpieczających i posiadania całej gammy scalonych stabilizatorów napięć stałych.

a)



b)



Rys. 4.1.1. a) Schemat blokowy i b) opis wyprowadzeń „widok z góry” układu scalonego L200.

Tab. 4.1.1. Podstawowe parametry charakterystyczne scalonego stabilizatora L200

Symbol	Parametr	Warunki pomiaru	Wartości			Jedn.
			Min	Typ	Max	
Stabilizator napięcia T = 25°C						
U _o	Zakres napięć wyjściowych	I _o = 10mA	2.85	<>	36	V
ΔU _o /U _o	Współczynnik stabilizacji napięcia wyjściowego od zmian obciążenia	I _{min} = 10mA I _{max} = 1,5A	0.1	0.15	1	%
ΔU _o /ΔU _i	Współczynnik stabilizacji napięcia wyjściowego od zmian napięcia wejściowego	U _i = 8...20V U _o = 5V	0.1	<>	0.39	%
U _o - U _i	Spadek napięcia pomiędzy wejściem i wyjściem układu (pin 1 i 5)	I _o = 1.5A	2	2.5	3	V
Z _o	Impedancja wyjściowa	U _i = 10V, U _o = U _{REF} I _o = 500mA F = 100Hz	1.5	1.5	3	mΩ
U _{REF}	Napięcie odniesienia (referencyjnego)	U _i = 20V I _o = 10mA	2.65	2.75	2.85	V
Stabilizator prądu T = 25°C						
U _{sc}	Wewnętrzne napięcie odniesienia komparatora-ogranicznika prądu (pin 2 i 5)	U _i = 10V, U _o = U _{REF} I _o = 100mA	0.38	0.45	0.52	V
I _{sc}	Szczytowy prąd zwarcia	U _i – U _o = 14V (pomiędzy pin 2 i 5 włączono R _{SC} < 0.01Ω)	<	<	3.5	A
ΔI _o /I _o	Współczynnik stabilizacji prądu wyjściowego od zmian obciążenia	I _o ±ΔI _o I _o = 1A, ΔI _o = 1A	0.9	1	1.5	%

4.1.1. Stabilizator napięcia z ograniczeniem prądowym z układem scalonym L200. Rozwiązanie układowe.

Na rys. 4.1.1.1. przedstawiono schemat ideowy stabilizatora napięcia w postaci podstawowej aplikacji układu scalonego L200. W układzie tym można programować lub regulować w sposób ciągły za pomocą rezystora R_5 stabilizowane napięcie wyjściowe U_O zgodnie z zależnością

$$U_O = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) U_{REF} \quad (4.1.1.1)$$

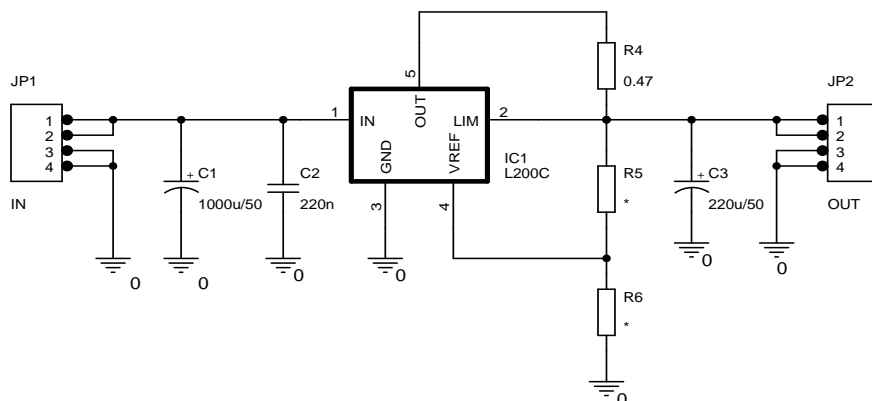
w zakresie $U_{REF} < U_O < (U_I - U_{REF} - U_{BE})$, gdzie przyjmujemy $U_{REF} = 2.75V$. W układzie tym pomiędzy końcówką 3 i 4 a więc na rezystorze R_6 panuje napięcie referencyjne U_{REF} - rozwiązanie układowe z rys. 3.1 (c). Natomiast maksymalny prąd wyjściowy w tym konkretnym przypadku jest ograniczony do wartości zgodnie ze schematem rys. 4.1.1.1

$$I_{Omax} = \frac{U_{SC}}{R_4} = \frac{0.45V}{0.47\Omega} \quad (4.1.1.2)$$

a więc zdeterminowany jest wartością rezystora próbkującego R_4 . Zgodnie z karta katalogową układu L200 rezystor R_6 może przyjmować wartości z zakresu od 330Ω do $1.5k\Omega$. Projektowanie stabilizatora w aplikacji jak na rys. 4.1.1.1, sprowadza się do wyznaczenia stosunku rezystancji R_5/R_6 zgodnie zależnością (4.1.1.1), oraz wyznaczenia sumy rezystancji $R_5 + R_6$, co umożliwi wyznaczenie konkretnych wartości R_5 i R_6 , przyjmując określony prąd dzielnika napięciowego (spoczynkowy) od 4mA do 9mA. Rezystancje R_5 i R_6 można również wyznaczyć z zależności (4.1.1.1), przyjmując zalecane wartości R_6 podane przez producenta w zależności od napięcia wyjściowego jak to pokazano w tabeli

$U_O \pm 20\%$	$R_6 \pm 5\%$
5V	1.5k Ω
12V	1k Ω
15V	750 Ω
18V	330 Ω
24V	510 Ω

W przypadku gdy chcemy aby napięcie wyjściowe było płynnie regulowane za pomocą R_5 , to R_6 ma ustaloną optymalną wartość podaną przez producenta równą 820Ω .



Rys. 4.1.1.1. Schemat ideowy programowanego stabilizatora napięcia z zabezpieczeniem prądowym z układem scalonym L200.

4.1.2. Regulowany stabilizator napięcia i prądu z układem scalonym L200. Rozwiązanie układowe i projektowanie.

W celu jednoczesnej realizacji regulowanego stabilizatora napięcia i prądu z układem L200 w układzie tzw. pętli prądowej L200, zastosowano WO pracujący w układzie inwertera asymetrycznego jak na rys. 4.1.2.1. Inwerter ten stanowią rezystory R_2 i R_3 , oraz WO LM741 zasilany asymetrycznie (rys. 4.1.2.2). Przepływający prąd przez rezystor próbkujący R_4 , powoduje na nim spadek napięcia równy $I_O R_4$. Spadek ten jest równy spadkowi napięcia na R_3 ze znakiem przeciwnym $I_O R_4 = -I_{SC} R_3$. W oczku R_1 , R_2 i R_3 suma spadków napięć jest równa 0V. Na tej podstawie możemy zapisać następujące równanie $I_{SC} R_3 + I_{SC} R_2 + U_{SC} = 0$. Podstawiając za

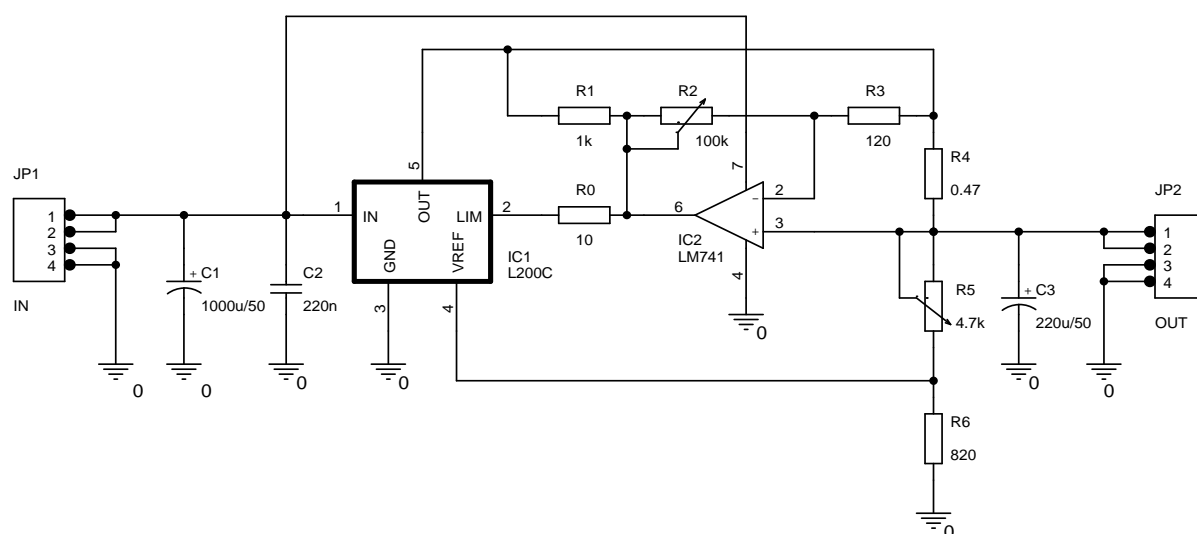
$$I_{SC} = -I_O \frac{R_4}{R_3}, \text{ otrzymujemy ostatecznie}$$

$$I_O = \frac{U_{SC}}{R_4 \left(\frac{R_2}{R_3} + 1 \right)} \quad (4.1.2.1)$$

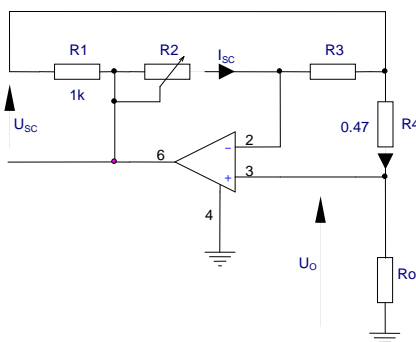
Pomiędzy końcówkami 2 i 5 układu scalonego L200 powstaje spadek napięcia U_{SC} zależny od stosunku rezystancji R_2/R_3 i prądu obciążenia I_O . Jeżeli przy danym prądzie obciążenia płynącym przez R_4 stosunek wartości rezystancji R_2/R_3 jest tak dobrany, że

$$I_O R_4 \left(\frac{R_2}{R_3} + 1 \right) > 0.45 \text{ V}, \text{ w temperaturze } 300\text{K},$$

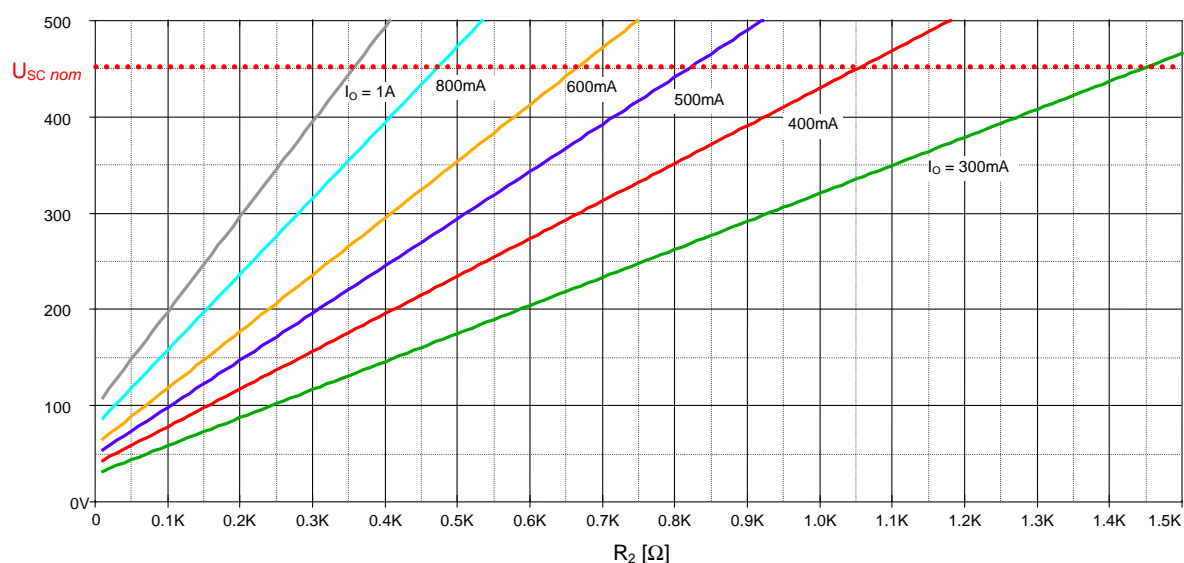
to zwiększanie napięcia wyjściowego (np. za pomocą R_5) przy tej samej rezystancji R_O obciążenia podłączonej do zacisków wyjściowych JP2 nie spowoduje wzrostu prądu, ponieważ I_O jest stabilizowany.



Rys. 4.1.2.1. Schemat ideowy regulowanego stabilizatora napięcia i prądu z układem scalonym L200.

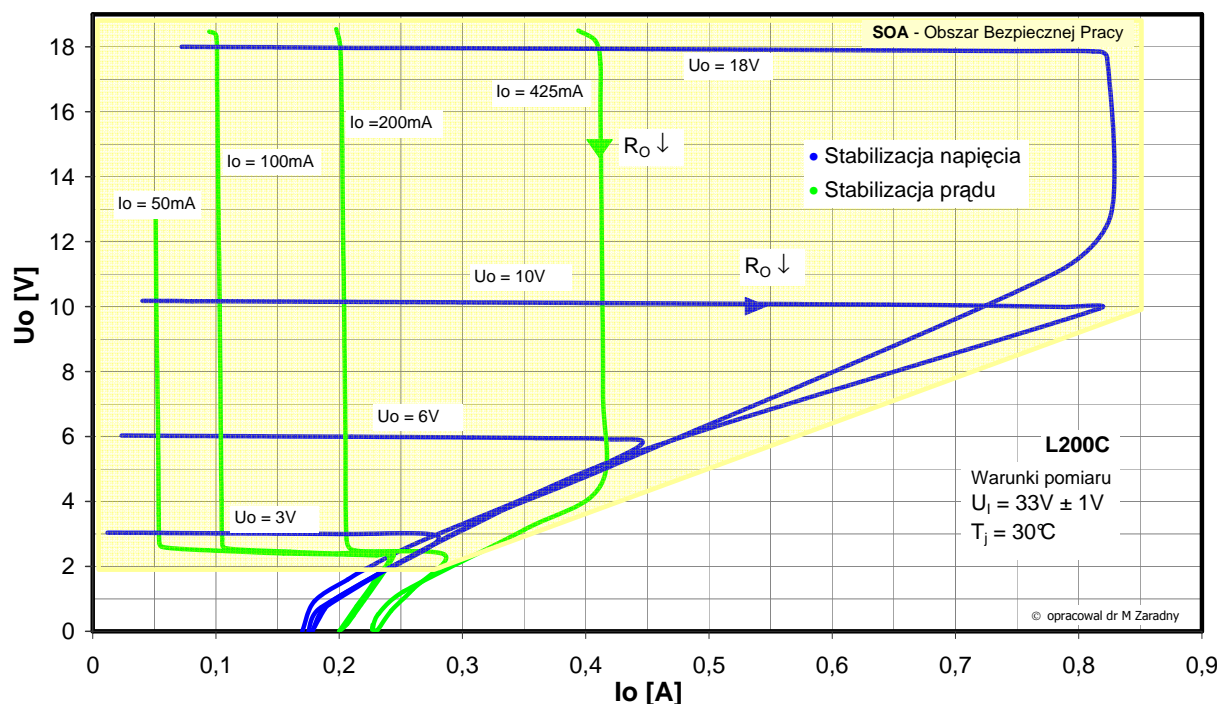


Rys. 4.1.2.2. Schemat inwertera pracującego w pętli prądowej ze stabilizatorem L200.

Rys. 4.1.2.3. Charakterystyki inwertera z rys. 4.1.2.2. Wartości rezystancji przyjęto odpowiednio $R_4 = 0.1\Omega$, $R_3 = 100\Omega$, $R_1 = 1k$ na podstawie karty katalogowej firmy SGS -Thomson.

Projekt programowanego lub regulowanego stabilizatora napięcia i prądu z układem L200 sprowadza się odpowiednio do obliczenia wartości rezystorów R_6 i R_5 układu stabilizatora napięcia zgodnie z procedurą podana w pkt. 4.1.1. i zaprojektowania inwertera ze WO (LM741, TL061 lub podobne) zgodnie z wyprowadzonymi zależnościami w pkt. 4.1.2. W ostatnim przypadku projektu stabilizatora prądu należy obliczyć wartość rezystancji R_3 przyjmując, że wartość maksymalna rezystancji nastawnej R_2 (prąd minimalny) jest wcześniej znana i dodatkowo podany jest zakres regulacji prądu wyjściowego $I_{Omin} \dots I_{Omax}$. Gdy $R_2 = 0$, to prąd stabilizowany jest równy $I_{Omax} = U_{SC}/R_4$. Przy projektowaniu można również przyjąć ustaloną wartość rezystora R_3 z zakresu od 100Ω do 500Ω , a R_2 obliczamy dla zadanej górnej wartości prądu, który będzie prądem stabilizowanym. Małe wartości rezystancji R_3 przyjmujemy wówczas gdy chcemy regulować prąd w zakresie od wartości minimalnej do ok. 200mA, natomiast w przypadku regulacji prądu powyżej 1A wtedy R_3 przyjmuje duże wartości $> 500\Omega$. Rezystor próbkujący R_4 ma przyjętą wartość równą 0.47Ω .

W celu przedstawienia zasady regulacji napięć i prądów przy użyciu stabilizatora L200C, z zastosowaniem dodatkowego inwertera w pętli prądowej, na wspólnym wykresie pokazano pomiarowe charakterystyki prądowo-napięciowe (krzyżowe) układu w tzw. Obszarze Bezpiecznej Pracy (SOA – Safe Operation Area) rys. 4.1.2.4.



Rys. 4.1.2.4. Pomiarowe charakterystyki prądowo-napięciowe stabilizatora L200C uzyskane w układzie jak na rys. 4.1.2.1.

4.1.3. Realizacja układów. Płytką drukowaną, montaż i uruchomienie

Do montażu i pomiarów obliczonego stabilizatora napięcia z zabezpieczeniem nad prądowym z punktu 4.1.1, służy dedykowana drukowana płytką montażowa, której widok przedstawiono na rys. 4.1.3.1. Struktura płytki umożliwia montaż z kilku dyskretnych elementów biernych i układu scalonego L200, w postaci jego aplikacji, szeregu stabilizatorów napięcia, w wersji podstawowej, której schemat ideowy przedstawiono na rys. 4.1.1.1.

W celu samodzielnej realizacji, montażu i późniejszych pomiarów laboratoryjnych programowanego stabilizatora napięcia i prądu z punktu 4.1.2 o schemacie ideowym jak na rys. 4.1.2.1, przedstawiono drukowaną płytką montażową, której widok przedstawiono na rys. 4.1.3.2. Struktura płytki umożliwia montaż z elementów biernych, układu scalonego wzmacniacza operacyjnego LM741 i wykonawczego układu stabilizatora scalonego L200, programowanego tzw. stabilizatora krzyżowego (prądowo-napięciowego), bądź zgodnie z uproszczeniami zaznaczonymi kolorem czerwonym i zielonym struktura płytki umożliwia również realizację układu z rys. 4.1.1.1. **To zadanie projektowo-laboratoryjne przeznaczone jest w szczególności dla studentów chcących wykazać się umiejętnością samodzielnego projektowania i realizacji eksperymentalnej w kierunku bardziej zaawansowanych układów elektronicznych.** Samodzielne wykonanie płytki drukowanej z rys., montaż i uruchomienie, oraz poprawna weryfikacja i interpretacja charakterystyk pomiarowych stabilizatora napięciowo-prądowego **zasługują na ocenę celującą.**

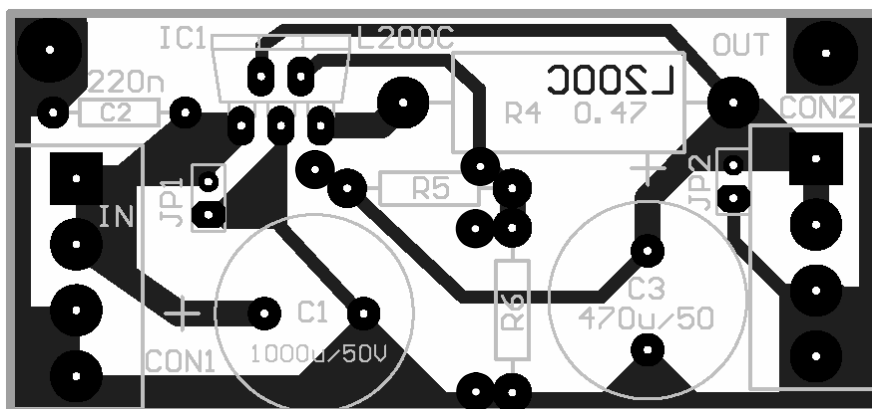
Obie płytki drukowane zawierają część wmontowanych na stałe elementów. Są to: gniazda i końcówki pomiarowe JP1 i CON1, oraz JP2 i CON2 odpowiednio wejścia i wyjścia stabilizatora, kondensatory zabezpieczające C1 i C2 przed pojawieniem się składowej zmiennej na wejściu, w przypadku zasilania stabilizatora z laboratoryjnego zasilacza regulowanego. W przypadku statycznych

pomiarów charakterystyk przejściowych, wyjściowych itp. Stabilizatora i obecności wielu długich przewodów łączących przyrządy pomiarowe istnieje realne ryzyko wzbudzenia się stabilizatora. W tym celu można wyeliminować efekty wzbudzenia się stabilizatora przez zastosowanie i dobór empiryczny pojemności kondensatora blokującego C_2 (np. 100nF, 220nF).

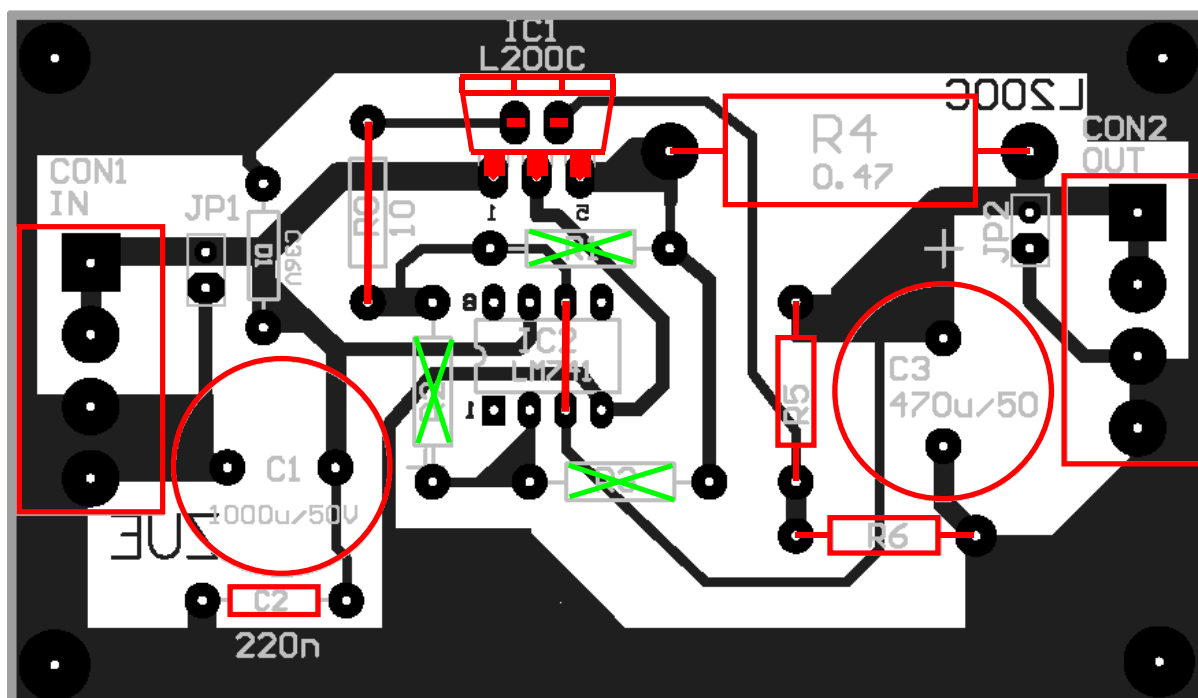
Montażu elementów dokonujemy w następujący sposób: (i) gniazda, elementy mechaniczne mocowania radiatora układu scalonego, elementy bierne, (ii) półprzewodniki, przewody zasilające i pomiarowe.

Przed uruchomieniem układu należy dokładnie sprawdzić jakość połączeń lutowanych, poprawne i zgodne ze schematem ideowym połączenia wszystkich elementów i ich wartości !!!. Ostateczne przed uruchomieniem należy skonsultować się z prowadzącym zajęcia laboratoryjne !

Rysunki płytek drukowanych PCB z zachowaniem liniowej skali 2:1.



Rys. 4.1.3.1. Widok płytki drukowanej „od strony elementów” do montażu stabilizatorów napięcia z układem L200.



Rys. 4.1.3.2. Widok uniwersalnej płytki drukowanej „od strony elementów” do montażu stabilizatorów napięcia (bez R_0 , R_1 , R_2 , R_3 i IC_2) i stabilizatorów napięciowo-prądowych, z układem L200.

5. Projekt układu

Istotą niniejszego ćwiczenia jest wcześniejsze zaprojektowanie układu wskazanego stabilizatora o zadanych parametrach, a następnie jego montaż i pomiary na laboratorium. W tym celu student powinien się zgłosić po temat do prowadzącego zajęcia nie później niż 7 dni przed terminem rozpoczęcia laboratorium.

Temat projektu określa:

1. Układ stabilizatora
2. Zakres zmian napięcia wejściowego $\pm \Delta U_i$
3. Napięcie wyjściowe U_0 prąd wyjściowy I_0
5. Użyte elementy półprzewodnikowe

Ponadto wykonany projekt powinien zawierać:

1. Obliczenia projektowe (w tym rysunek układu zawierający: oznaczenia i wartości rezystorów oraz kondensatorów, zwroty napięć oraz prądów i ich wartości, charakterystyki, odpowiednie wzory). W przypadku układu scalonego (np. L200) odpowiednie notatki i obliczenia można wykonywać we własnej wydrukowanej do tego celu karcie katalogowej.
2. Analizę programem Psice – Jeśli to możliwe?
3. Wykaz elementów
4. Obliczenia radiatora (dopuszczalne straty mocy)

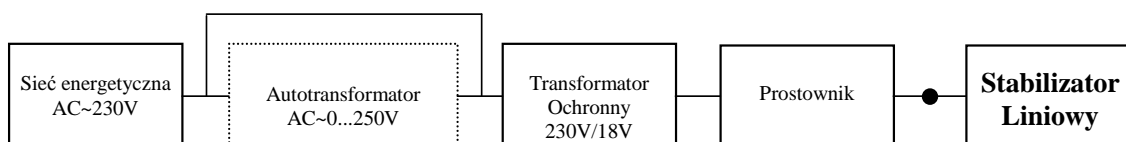
Gotowy staranny projekt należy oddać do sprawdzenia prowadzącemu zajęcia przed rozpoczęciem laboratorium. Jest to warunek konieczny dopuszczenia do ćwiczenia !!!

6. Program ćwiczenia

Na podstawie wykonanego projektu należy zmontować układ stabilizatora. Celowe jest wcześniejsze sprawdzenie lub pomiar wartości użytych elementów. Należy również zamontować obliczony radiator dla tranzystora regulacyjnego lub układu scalonego. Należy unikać zbyt dużej mocy traconej w elemencie regulacyjnym lub układzie scalonym ze względu na wzrost temperatury co prowadzi do zmiany warunków dokonywanego pomiaru.

6.1. Zasilanie sieciowe

Układ prostownika sieciowego, przedstawiony w ćwiczeniu zasilacze niestabilizowane, należy zestawić zgodnie z rys. 6.1.1. Symulację zmian napięcia sieci umożliwia autotransformator.



Rys. 6.1.1. Układ regulowanego prostownika sieciowego.

Prostownik z transformatorem sieciowym wykorzystany w ćwiczeniu z prostownikami pozwala na współpracę ze stabilizatorami pobierającymi prąd maksymalny $I_{wemax} = 0.75A$. W przypadku stabilizatora o większym poborze prądu, należy zastosować regulowany zasilacz laboratoryjny o większym prądzie maksymalnym.

6. 2. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy stabilizatorów napięcia lub prądu przedstawiono na rys. 6.2.1.



Rys. 6.2.1. Układ pomiarowy stabilizatorów.

6. 3. Pomiary i zadanie laboratoryjne

6. 3. 1. Pomiary tętnień

W przypadku zasilania stabilizatora (rys. 6.1.1) zasilaczem niestabilizowanym z ćwiczenia nr1, wyznaczyć metodą oscyloskopową tętnienia prostownika k_t oraz stabilizatora k_{ts} przy prądzie wyjściowym $I_o < I_{Omax}$. Pomiar należy przeprowadzić dla wybranych wartości kondensatora filtrującego.

6. 3. 2. Stabilizator napięcia

6. 3. 2. 1. Pomiar charakterystyki $U_o = f(U_i)$, R_L - parametr

1. Zmierzyć $U_o = f(U_i)$ dla kilku wskazanych wartości rezystancji obciążenia R_L , tak że $I_o < I_{Omax}$.
2. Wykreślić zmierzone charakterystyki $U_o = f(U_i)$.
3. Określić zakresy stabilizacji ΔU_o dla ustalonych rezystancji obciążenia oraz obliczyć współczynniki stabilizacji S_u .
4. Określić tzw. Dropout stabilizatora dla wskazanych wartości rezystancji R_L .

6. 3. 2. 2. Pomiar charakterystyki $U_o = f(I_o)$, U_i - parametr

1. Zmierzyć $U_o = f(I_o)$ dla kilku wskazanych wartości napięcia wejściowego U_i .
2. Wykreślić zmierzone charakterystyki $U_o = f(I_o)$.
3. Zaznaczyć zakres stabilizacji ΔU_o i wyznaczyć rezystancję R_{FO} stabilizatora.
4. Wyznaczyć współczynnik stabilizacji od zmian obciążenia S_{RL} , przyjmując maksymalny prąd I_o nie powodujący przejść układu w stabilizację prądu
5. Zmierzyć $U_o = f(I_o)$, tuż poza zakresem stabilizacji napięcia „na kolanie charakterystyki”.

6. Zmierzyć prąd zwarcia I_z , dla trzech wskazanych wartości napięcia U_i

Uwaga! Zmiany wartości prądu I_o uzyskujemy przez dyskretną zmianę rezystancji obciążenia R_L .

6. 3. 3. Stabilizator prądu (podpunkt 4.1.2)**6. 3. 3. 1. Pomiar charakterystyki $I_0 = f(U_i)$, R_L - parametr**

1. Zmierzyć $I_0 = f(U_i)$ dla kilku wskazanych wartości rezystancji obciążenia R_L .
2. Wykreślić zmierzone charakterystyki $I_0 = f(U_i)$.

6. 3. 3. 2. Pomiar charakterystyki $I_0 = f(U_0)$, U_i – parametr

1. Zmierzyć $I_0 = f(U_0)$ dla kilku wskazanych wartości napięcia wejściowego U_i .
2. Zmierzyć prąd zwarcia $I_0 = f(U_0 = 0V)$ dla dwóch znacznie się różniących wskazanych wartości napięcia wejściowego U_i .
3. Wykreślić zmierzone charakterystyki $I_0 = f(U_0)$.

Uwaga! Zmiany wartości prądu U_0 uzyskujemy przez dyskretną zmianę rezystancji obciążenia R_L .

7. Zagadnienia

1. Definicje parametrów oraz charakterystyki stabilizatorów napięcia i prądu.
2. Schemat blokowy i zasada działania stabilizatora kompensacyjnego o pracy ciągłej.
3. Graficzna interpretacja działania kompensacyjnego stabilizatora napięcia przy zmianie rezystancji obciążenia oraz zmianie napięcia wejściowego.
4. Metody poprawy parametrów stabilizatora kompensacyjnego.
5. Rodzaje zabezpieczeń nadprądowych i stabilizatorów prądu.
6. Rozwiązania układowe stabilizatorów napięcia i prądu.
7. Układ scalony L200: budowa, działanie, parametry i zastosowania.
9. Sprawność, straty mocy oraz dobór radiatorów.
10. Projektowanie stabilizatorów z wykorzystaniem układu scalonego L200 i zasada działania.

8. Literatura

- [1] Antoszkiewicz K., Nosal Z., „Zbiór zadań z układów elektronicznych liniowych”, WNT, 1998
- [2] Baranowski J., Czajkowski G., „Układy elektroniczne. Część I”, WNT, 1994. ss. 391-426
- [3] Borkowski A., „Układy scalone w stabilizatorach napięcia stałego”, WNT 1985
- [4] Borkowski A., „Zasilanie urządzeń elektronicznych”, WKŁ, 1990, 98-198, 295-356
- [5] Golde W., „Układy elektroniczne. Część II”, WNT, 1976. ss.261-286
- [6] Kuta S., „Układy elektroniczne. Część I”, AGH, 1995, ss. 423-466
- [7] Kwaśniewski S., „Stabilizatory napięcia. Dane i zastosowania. Tom I i II”, Gdańsk, 1996
- [8] SGS-Thomson ICs Databook, 1993
- [9] Pawłowski J., „Układy elektroniczne. Nieliniowe układy analogowe”, WNT, 1975. ss. 131-176
- [10] SGS-Thomson, Application Note – AN255/1288
- [11] Tietze U., Schenk Ch., „Układy półprzewodnikowe” WNT 1997
- [12] J. Witkowski, Układy Elektroniczne I – wykłady
- [13] Z. Musiałowski, „Laboratorium układów elektronicznych. Cz. I”, Oficyna wyd. PWr., 1998

9. Przygotowanie do ćwiczenia

Przed realizacją ćwiczenia studenci otrzymują od prowadzącego zajęcia zadanie i odpowiednie założenia projektowe. W zadaniu określony jest układ stabilizatora z wykorzystaniem układu scalonego L200, a więc może to być programowany stabilizator napięcia z zabezpieczeniem prądowym (obowiązkowo), lub programowany stabilizator napięciowo-prądowy (**wówczas można samodzielnie wykonać płytkę drukowaną**). Student dopuszczony będzie do ćwiczenia na podstawie znajomości ćwiczenia i zagadnień teoretycznych dotyczących ćwiczenia (zaliczona kartkówka), a ponadto warunkiem koniecznym jest staranne przygotowanie zadania projektowego i szablonu ćwiczenia według poniższych wskazówek.

9.1. Zadanie projektowe

1. W zadaniu należy przedstawić sposób wyznaczania elementów układu i ich wartości np. według procedury podanej w opisie do ćwiczenia pkt. 4. – parametry zadane i uzyskane. Należy pamiętać o doborze wartości elementów (w szczególności rezystorów) ze znormalizowanych szeregów nie większych niż E-24 (tj. dokładność nie lepsza niż 5%). Na płycie drukowanej (rys. 4.1.3.1) dla rezystorów „programujących” R_5 i R_6 przewidziano równoległe miejsca lutownicze, tak że każdy z rezystorów może stanowić równoległe połączenie dwóch rezystorów z szeregu 5% w celu uzyskania dowolnego stabilizowanego napięcia wyjściowego.
2. Schemat ideowy układu z naniesionymi symbolami zgodnie z instrukcją do ćwiczenia i obliczonymi wartościami elementów (*wzór str. 20-21*).
3. Na papierze milimetrowym przed ćwiczeniem należy przygotować i nanieść odpowiednie przewidywane skale mierzonych wartości i wielkości (np. dla $U_o = f(I_o)$, $U_o = f(U_i)$, gdzie parametrem są odpowiednio U_i , oraz I_o). Każdą z charakterystyk lub rodzinę charakterystyk należy przygotować na osobnym wykresie (stronie).
4. Na płycie drukowanej PCB należy naszkicować (**najlepiej kolorami**), rozmieszczenie wykorzystywanych elementów, zaznaczyć ich symbole i wartości zgodnie ze schematem. Wskazówka - rys. 4.1.3.2.

9.2. Szablon sprawozdania

1. Strona tytułowa (<http://qe.ita.pwr.wroc.pl/~zue/>)
2. Na schemacie ideowym z pkt. 9.1. (2), należy pozostawić miejsce na wpisanie wartości rezystancji rezystorów R_5 , R_6 i R_4 (opcjonalnie dla schematu z rys. 4.1.2.1, rezystorów R_1 , R_2 , R_3) uzyskanych w wyniku pomiaru multimetrem.
3. Tabela wyników obliczeń i pomiarów, oraz pomiarów wskazanych charakterystyk stabilizatora opisanych w zadaniu laboratoryjnym pkt. 6.3. **Wzór w instrukcji do ćwiczenia str. 22-23.**
4. Samodzielnie przygotowane siatki wykresów w skali liniowej na papierze milimetrowym jak to podano już w pkt. 9.1 (3), lub odpowiednio przygotowane wcześniej, wykonane na komputerze i wydrukowane.

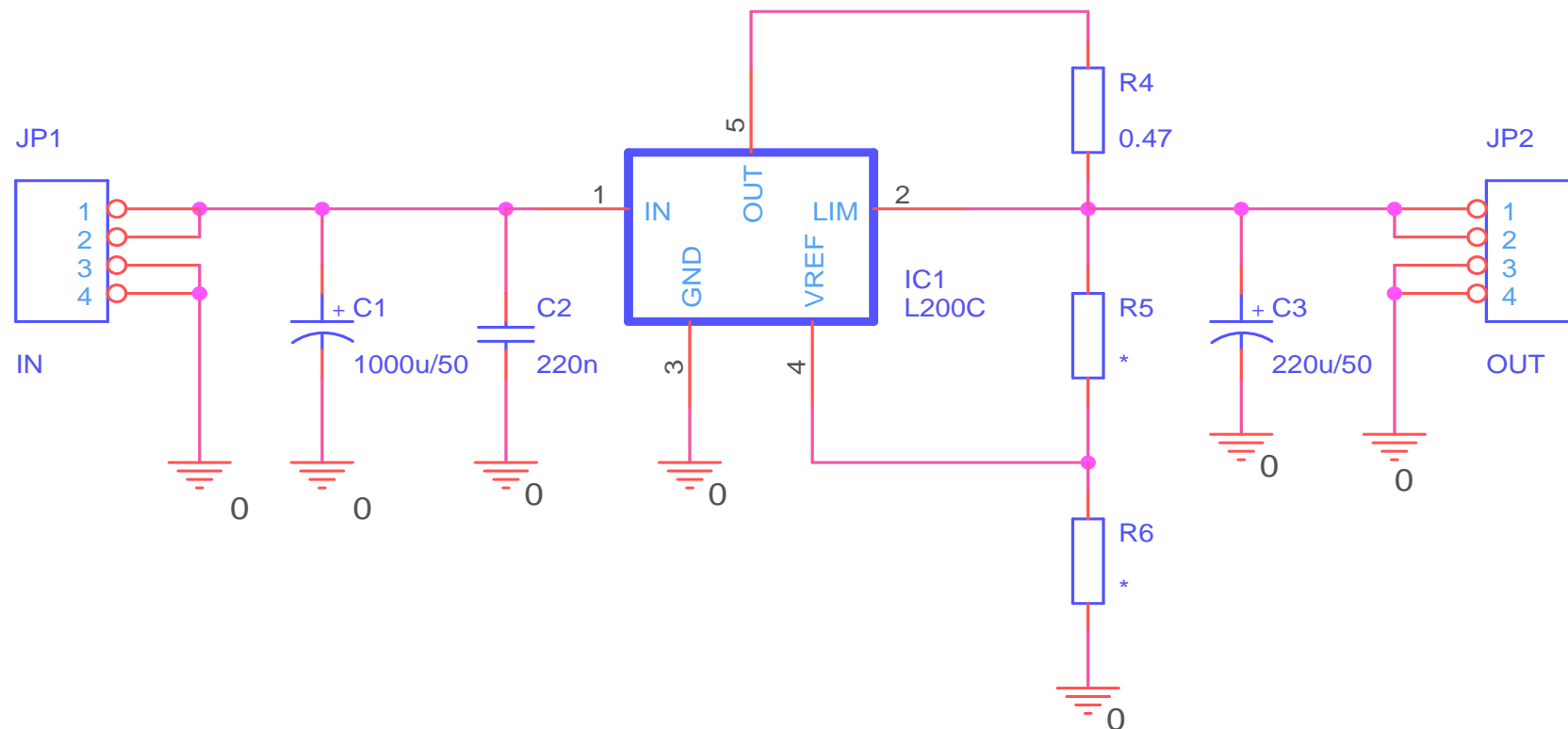
5. Na ostatniej stronie szablonu sprawozdania należy zamieścić wnioski i spostrzeżenia. W tym celu należy przygotować jedną wolną stronę zatytułowaną „**Wnioski i spostrzeżenia**”.
6. W trakcie ćwiczenia należy wykonać spis użytej aparatury i przyrządów pomiarowych wraz z ich symbolami i numerami inwentarzowymi.
7. Jeśli w zadaniu projektowym określono więcej niż jedno napięcie i/lub prąd stabilizowane, wówczas dla każdego przypadku należy wypełnić osobną tabelą **wg. wzoru podanego na str. 20-21 instrukcji**.

Sprawozdanie należy wykonać w czasie zajęć laboratoryjnych i oddać prowadzącemu bezpośrednio po ich zakończeniu !!! W celu sprawnego wykonania ćwiczenia i sporządzenia sprawozdania, należy przed planowym terminem zajęć starannie się przygotować zgodnie z wytycznymi. **Łącznie ze sprawozdanie oddajemy „na papierze” część dotyczącą zadania projektowo-obliczeniowego zadanego przez prowadzącego !!!** Wszystkie strony sprawozdania i projektu muszą być ponumerowane, podpisane i spięte przed oddaniem prowadzącemu !

Obowiązkowo należy zmierzyć wszystkie oporniki przed wlutowaniem na płytkę i nanieść na schemat !!!

	R4	R5		R6	
Obliczone					
Wybrane wartości z szeregu E-24					
Zmierzone					

Odpowiednie wartości wpisujemy odpowiednimi kolorami zgodnie z pierwszą kolumną



[illegible]

Pomiary charakterystyki $U_o = f(I_o)$													
U_o dla $R_{L=\infty} =$		U_o dla $R_{L=\infty} =$		U_o dla $R_{L=\infty} =$		U_o dla $R_{L=\infty} =$		U_o dla $R_{L=\infty} =$		U_o dla $R_{L=\infty} =$		U_o dla $R_{L=\infty} =$	
$U_I =$		$U_I =$		$U_I =$		$U_I =$		$U_I =$		$U_I =$		$U_I =$	
$S_{R_L} =$		$S_{R_L} =$		$S_{R_L} =$		$S_{R_L} =$		$S_{R_L} =$		$S_{R_L} =$		$S_{R_L} =$	
U_o [V]	I_o [mA]	U_o [V]	I_o [mA]	U_o [V]	I_o [mA]	U_o [V]	I_o [mA]	U_o [V]	I_o [mA]	U_o [V]	I_o [mA]	U_o [V]	I_o [mA]