



## ELEKTRONICZNE UKŁADY STEROWANIA NASTAWNIKÓW

# Ćwiczenie 1 (C11c)

## Przetwornica prądu stałego o działaniu ciągłym (liniowy stabilizator napięcia)

Ramowy plan pracy

15'	30'	45'	1 <sup>h</sup>	1 <sup>h</sup> 15'	1 <sup>h</sup> 30'	po zajęciach

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:  
Łukasz Starzak, Bartosz Pękosławski

Łódź 2020

wer. 1.3.0 12.10.2020



## Spis treści

<b>B Wprowadzenie do ćwiczenia.....</b>	<b>5</b>
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Podstawy teoretyczne .....	7
2.1. Wprowadzenie .....	7
2.2. Układy o działaniu ciągłym .....	7
2.2.a. Przekształtnik elektromechaniczny .....	7
2.2.b. Układ elektroniczny o działaniu ciągłym .....	9
<b>C Doświadczenie.....</b>	<b>10</b>
3. Pomiary.....	10
3.1. Układ pomiarowy .....	10
3.2. Wykonanie pomiarów .....	11
<b>D Wyniki .....</b>	<b>13</b>
4. Opracowanie i analiza wyników.....	13
<b>E Informacje.....</b>	<b>15</b>
5. Literatura .....	15



## Wprowadzenie do ćwiczenia

---

### 1. Cel i przebieg ćwiczenia

---

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania przetwornicy prądu stałego o działaniu ciągłym (liniowego stabilizatora napięcia) oraz zbadanie charakterystyk prądowo-napięciowych takiego układu. Badana jest praca z obciążeniem rezystancyjnym.

W ćwiczeniu poruszone zostanie również zagadnienie zaburzeń napięcia wyjściowego oraz strat mocy w tranzystorze wyjściowym stabilizatora.



## 2. Podstawy teoretyczne

---

### 2.1. Wprowadzenie

Przekształcanie energii DC-DC można realizować nie tylko za pomocą przetwornic – tj. układów przełączanych. Istnieją również przekształtniki DC-DC o działaniu ciągłym. Są one wykorzystywane głównie w zasilaczach. Ich główną zaletą jest niski poziom zaburzeń w napięciu wyjściowym. Wadą natomiast – jak wykażemy wkrótce – mała sprawność i konieczność odprowadzania dużej ilości ciepła.

### 2.2. Układy o działaniu ciągłym

#### 2.2.a. Przekształtnik elektromechaniczny

Najprostszym i pierwszym znanym przekształtnikiem DC-DC jest układ elektromechaniczny. Stanowi go zwykły **opornik nastawny**  $R_p$  **włączony w szereg w obwód mocy** (rys. 1a). Pod względem topologii jest to więc układ identyczny jak elektromechaniczny przekształtnik AC-AC (ćwiczenie 2).

Zwiększając wartość opornika, powodujemy odkładanie się na nim coraz większej części napięcia wejściowego – zaś coraz mniejsza część dostępna jest dla odbiornika zgodnie z zależnością

$$U_o = U_i \frac{R_L}{R_p + R_L} = U_i \left( 1 + \frac{R_p}{R_L} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

Uzyskujemy więc zmniejszenie napięcia w stosunku, który nazywany jest **współczynnikiem przetwarzania napięcia** (ang. *voltage conversion ratio*)

$$K_U = \frac{\Delta U_o}{U_i} \quad (2.2)$$

W rozważanym przypadku

$$K_U = \left( 1 + \frac{R_p}{R_L} \right)^{-1} \quad (2.3)$$

Układ z opornikiem ma charakter dzielnika napięcia. A więc nastawa napięcia wyjściowego zależy faktycznie nie od wartości opornika  $R_p$  jako takiej, lecz od stosunku tej wartości do rezystancji odbiornika  $R_L$  – co pokazuje powyższy wzór. Jeżeli odbiornik zmienia swoją rezystancję w czasie pracy (co przy stałym napięciu oznacza po prostu większy lub mniejszy pobór prądu), to **napięcie na nim będzie się również zmieniać**. Stosowalność układu z opornikiem jest więc w zasadzie ograniczona do obciążeń stacjonarnych. Tymczasem duża część odbiorników taka nie jest – np. telefon komórkowy pobiera dużo więcej mocy (a więc prądu, gdyż napięcie zasilania jest stałe) w trakcie rozmowy, niż w stanie oszczędzania energii.

Dodatkowo sprawność tego rozwiązania jest w dużym zakresie sterowania niewielka, co wykazaliśmy już w ćwiczeniu 2. Wynika to z konieczności odłożenia na oporniku całej różnicy między napięciem wejściowym a wyjściowym

$$U_c = U_i - U_o \quad (2.4)$$

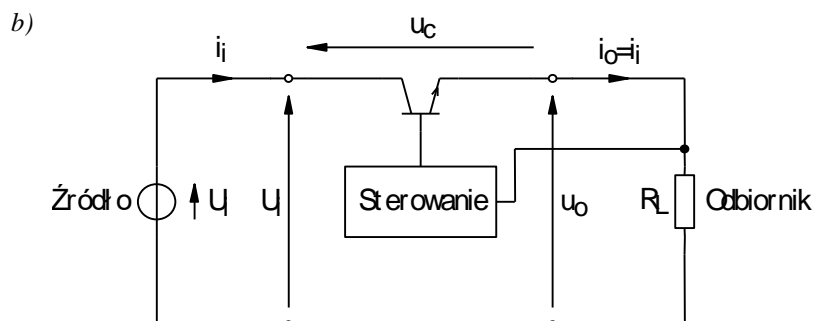
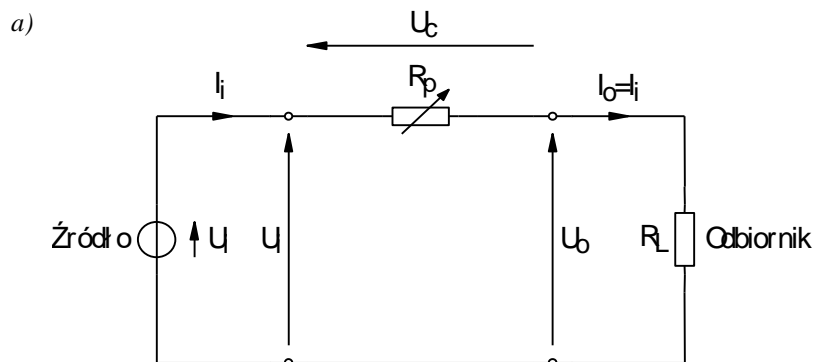
Jeżeli obciążenie (prąd wyjściowy  $I_o$ , przy czym w tym układzie  $I_o = I_i$ ) jest znaczne, to będzie to związane z ciągłym wydzielaniem w przekształtniku (oporniku) znaczącej mocy

$$\Delta P_c = U_c I_o = (U_i - U_o) I_o \quad (2.5)$$

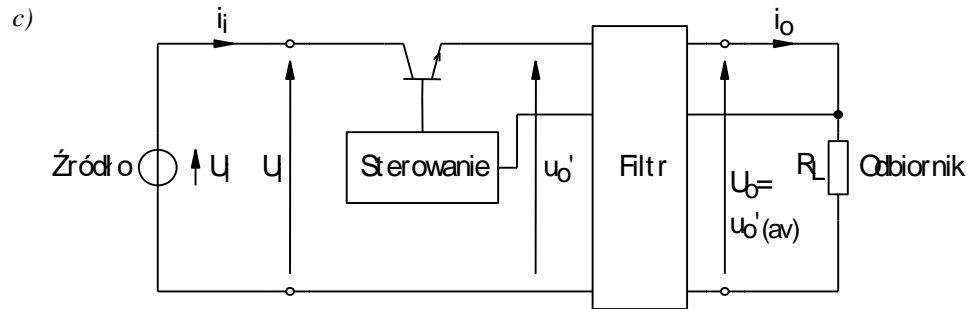
**Sprawność przekształtnika elektromechanicznego jest tym niższa, im większa różnica napięć** (a więc im bardziej chcemy zmienić napięcie):

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{U_o I_o}{U_i I_i} = \frac{U_o I_o}{U_i I_o} = \frac{U_o}{U_i} = K_U \quad (2.6)$$

Załóżmy dla ustalenia uwagi, że  $U_i = 20 \text{ V}$ , pożądane napięcie wyjściowe  $U_o = 10 \text{ V}$ , obciążenie  $I_o = 1 \text{ A}$ . Wobec tego  $K_U = 0,5$ , a równoważna rezystancja odbiornika  $R_L = U_o / I_o = 10 \Omega$ . Na oporniku nastawnym musi się odłożyć napięcie o wartości  $20 \text{ V} - 10 \text{ V} = 10 \text{ V}$ . Moc w nim tracona jest równa  $10 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 10 \text{ W}$ , co stanowi połowę mocy wejściowej  $20 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} = 20 \text{ W}$ . Sprawność wynosi więc zaledwie  $10 \text{ W} / 20 \text{ W} = 0,5$ . Wynika to zresztą również wprost z wyprowadzonego wyżej wzoru (2.6).







Rys. 1. Przetwarzanie energii prądu stałego: a) przekształtnik elektromechaniczny; b) przekształtnik elektroniczny; c) elektroniczny przekształtnik przelączany z uwzględnieniem filtru wyjściowego

## 2.2.b. Układ elektroniczny o działaniu ciągłym

Duży postęp dokonął się dzięki **wynalezieniu tranzystorów bipolarnych złączowych (BJT)** mocy i opracowaniu odpowiednich układów o działaniu ciągłym. W takich układach w szereg w obwód mocy włączony jest tranzystor (jego obwód kolektor-emiter; rys. 1b). Dostarczając do tranzystora odpowiedni prąd sterujący (bazy)  $I_B$ , można powodować przepływ większego lub mniejszego prądu kolektora  $I_C$ , który – jak wynika ze schematu – równy jest prądowi wyjściowemu przekształtnika  $I_o$ . W wyniku uzyskujemy zmianę napięcia wyjściowego zgodnie z prawem Ohma

$$U_o = R_L I_o = R_L I_C = R_L \beta_F I_B \quad (2.7)$$

gdzie  $\beta_F$  jest statycznym wzmocnieniem prądowym tranzystora w układzie wspólnego emitera

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.8)$$

Ponieważ dokonuje się to za pomocą sygnału elektrycznego (a nie mechanicznego jak w przypadku opornika nastawnego), można zrealizować **elektryczne sprzężenie zwrotne**. Mierząc i odpowiednio przetwarzając napięcie wyjściowe, można spowodować takie zmiany prądu bazy, że napięcie to będzie utrzymywane na stałym poziomie – mimo zmian rezystancji odbiornika lub także napięcia wejściowego. Układy tego typu nazywamy **stabilizatorami napięcia o działaniu ciągłym** (ang. *linear voltage regulators*).

Powyższe obowiązuje jednak wyłącznie dla **pracy tranzystora w zakresie aktywnym**. Tylko wówczas tranzystor może pełnić rolę sterowanego źródła prądu, tzn. przewodzić prąd będący funkcją wyłącznie wielkości sterującej ( $I_B$ ), a niezależny od napięcia wyjściowego ( $U_{CE}$ ). Oznacza to pracę pośrodku obszaru charakterystyk wyjściowych  $U_{CE}-I_C$ , a więc przy jednoczesnych znaczących wartościach prądu i napięcia – a w konsekwencji, przy dużej mocy strat.

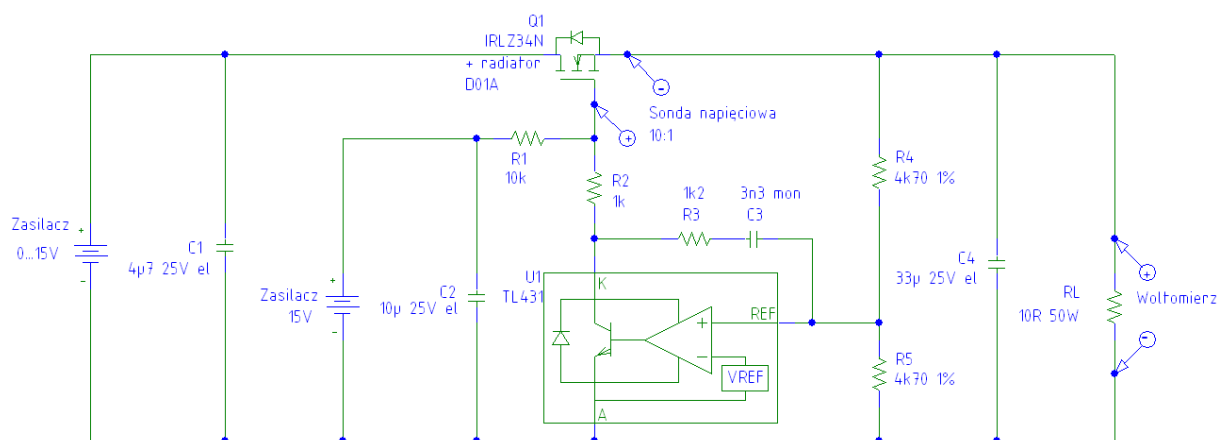
Do tego wniosku można zresztą dojść prościej. Zauważmy, że na tranzystorze musi się ciągle odkładać dokładnie takie samo napięcie, jak w układzie z opornikiem – wyrażające się równością (2.4). W związku z tym, w takich samych warunkach pracy ( $U_i, U_o, I_o$ ) **moc strat w tranzystorze jest dokładnie taka sama**, jak w oporniku nastawnym, a sprawność nadal wyraża się wzorem (2.6). Dla rozważanego przypadku liczbowego wynosi więc ona 0,5.

Układy elektroniczne o działaniu ciągłym umożliwiają więc automatyczną regulację wyjścia. Nie likwidują jednak wady polegającej na ciągłej konieczności odłożenia na elemencie wykonawczym (poprzednio – oporniku, obecnie – tranzystorze) całej różnicy napięć między wejściem a wyjściem, przy ciągłym przepływie prądu z wejścia do wyjścia. Oznacza to ciągle występujące straty mocy w tranzystorze, w tym samym rozmiarze, co w przypadku opornika. Oznacza to nie tylko obniżenie sprawności, ale jednocześnie problemy z chłodzeniem elementu wykonawczego (tranzystora).

### 3. Pomiary

#### 3.1. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy, którego schemat jest pokazany poniżej, składa się z układu elektronicznego z dołączonym sprzętem laboratoryjnym (oscyloskop, zasilacz o dwóch regulowanych sekcjach i miernik uniwersalny).



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

### 3.2. Wykonanie pomiarów

1. Zidentyfikować elementy występujące w układzie elektronicznym na podstawie schematu z rys. 2.
2. Zgodnie ze schematem podłączyć do układu:
  - dwie sekcje regulowane zasilacza (kanał 1 i 2; wybór ustawień kanału przyciskiem *CH(Local)*) – nastawione wstępnie na 0 V (*V-SET* → 0 → *ENTER*) i ustawione w tryb niezależny (*Shift* → *Menu* → ▼ → *COUP: OFF* (wybór strzałkami ◀▶) → *ENTER*);
  - multimetr – ustawiony w tryb woltomierza;
  - sondę napięciową 10:1 przyłączoną do kanału 1 oscyloskopu – do odpowiednich węzłów obwodu tak, aby mierzyć napięcie bramka-źródło tranzystora (znak „+” oznacza końcówkę gorącą), jednak nie przyłączając sondy do jego wyprowadzeń.
3. Na oscyloskopie wybrać wyzwalenie automatyczne (*Trigger Menu* > *Mode: Auto*), podstawę czasu ustawić na dowolną rzędu milisekund. Włączyć tryb pomiaru wartości średniej (*Measure* > *Ch1: Mean*).
4. Ustawić napięcie zasilania obwodu sterowania równe 15 V. Ustawić ograniczenie prądowe dla odpowiedniej sekcji zasilacza (*I-SET* → 0.05 → *ENTER*). Pobór prądu nie powinien przekroczyć nigdy 50 mA.
5. Ustawić ograniczenie prądowe dla drugiej sekcji zasilacza (zasilanie obwodu mocy) na 0,6 A.
6. Poprosić prowadzącego o sprawdzenie połączeń.
7. Włączyć zasilanie układu (przycisk *On/Off* na zasilaczu) oraz podgląd aktualnych wartości prądów i napięć (przycisk *Meter* na zasilaczu).
8. Zmieniając napięcie wejściowe  $U_i$  od 0 V do 15 V (*V-SET*; zmiana wartości za pomocą strzałek ▲▼ lub pokrętła po uprzednim wybraniu cyfry zmienianej strzałkami ◀▶ ; ewentualnie wpisując nową wartość i wciskając *ENTER*), zmierzyć:
  - napięcie wejściowe  $U_i$  (miernik zasilacza)
  - prąd wejściowy  $I_i$  (miernik zasilacza)
  - napięcie wyjściowe  $U_o$  (woltomierz)
  - napięcie  $U_{GS}$  (oscyloskop – wartość średnia)
9. Podczas pomiarów żadne przewody nie mogą dotykać radiatora tranzystora, gdyż grozi to stopieniem izolacji. Nie należy dotykać tego radiatora ze względu na możliwość wystąpienia wysokiej temperatury (> 100 °C).
10. Dla  $U_i = 6$  V, 10 V i 15 V pobrać i zapisać oscylogram napięcia  $u_{GS}$ . Zwrócić uwagę na nastawę wzmocnienia taką, by przebieg w maksymalnym stopniu wypełniał ekran w pionie. Wszystkie ustawienia oscyloskopu powinny być takie same dla wszystkich 3 przypadków.
11. Odpiąć obie końcówki sondy napięciowej, i przyłączyć tak, aby mierzyć napięcie wyjściowe  $u_o$ . Pobrać i zapisać oscylogram (tylko dla  $U_i = 15$  V).
12. Pozostawiając  $U_i = 15$  V odłączyć multimetr, przestawić go w tryb termometru. Podłączyć termoparę zwracając uwagę na biegunowość oznaczoną na jej wtyku i na obudowie multimetru. Zapisać temperaturę otoczenia  $T_a$ . Następnie zmierzyć temperaturę metalowej obudowy tranzystora  $T_c$  przytykając pod kątem prostym czubek sondy temperaturowej do tejże obudowy.
13. Sprowadzić do zera napięcie zasilania obwodu mocy  $U_i$ , a dopiero później napięcie zasilania obwodu sterowania (15 V).
14. Wykonać zdjęcie układu.
15. Rozłączyć układ.
16. Multimetr przełączyć w tryb omomierza. Zmierzyć dokładną rezystancję opornika obciążającego  $R_L$ .



# D

## Wyniki

---

### 4. Opracowanie i analiza wyników

---

Opracowanie i analizę wyników należy przeprowadzić po wykonaniu ćwiczenia 1 i 2. Zagadnienia do analizy zostały opisane w instrukcji do ćwiczenia 2. Wymagane jest wspólne sprawozdanie z realizacji ćwiczeń 1 i 2.



### 5. Literatura

---

- [1] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 3<sup>B</sup>. Tranzystory MOSFET.* Łódź: Politechnika Łódzka, 2010.
- [2] Starzak Ł.: *Laboratorium przekształtników elektronicznych. Ćwiczenie B1p. Sterowanie tranzystorów polowych - projekt.* Łódź: Politechnika Łódzka, 2011.