

PRACOWNIA ENERGOELEKTRONICZNA
w ZST w Radomiu

**PRZERYWACZ TRANZYSTOROWY, PRZEKSZTAŁTNIKI PRĄDU
STAŁEGO, IMPULSOWY STABILIZATOR NAPIĘCIA STAŁEGO**

Radom 2006/07

1. Tranzystory bipolarne

To grupa elementów półprzewodnikowych umożliwiających wzmacnianie sygnałów elektrycznych i sterowanie przepływem prądów. Produkowane są jako elementy dyskretne (indywidualne) oraz wchodzi w skład większości monolitycznych układów scalonych. Wynalezione w 1948r., w USA (J. Bardeen, W.H. Brattain i W. Shockley) zapoczątkowały erę elektroniki półprzewodnikowej. Obecnie najogólniej dzieli się je na:

- tranzystory bipolarne- przewodzenie prądów odbywa się w nich z udziałem dwóch rodzajów nośników ładunku elektrycznego, dziur i elektronów, stąd bipolarne,
- tranzystory unipolarne (polowe)- przewodzenie prądów odbywa się w nich z udziałem jednego rodzaju nośników ładunku elektrycznego, dziur albo elektronów oraz sterowanie przepływem prądu odbywa się za pomocą pola elektrycznego, stąd nazwa polowe.

Wszystkie tranzystory bipolarne to elementy zwykle trójelektrodowe, zawierające wewnątrz trzy warstwy półprzewodnika i dwa złącza P-N (rys. 4.14). Elektrody tranzystora bipolarnego nazywane są: emiter- E, baza- B, kolektor (C, K). Zależnie od układu warstw półprzewodnika tworzących tranzystory, rozróżniamy dwa rodzaje tranzystorów bipolarnych:

- 1) tranzystor NPN-rys 1a.,
- 2) 2) tranzystor PNP- rys.1b.

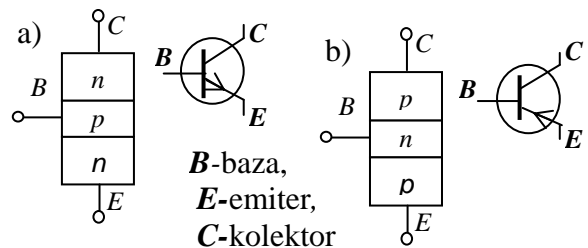
2. Zasada działania tranzystora bipolarnego
Tranzystory bipolarne zalicza się do elementów aktywnych gdyż pozwalają na wzmacnianie prądów oraz sterowanie prądem w obwodzie sterowanym (wyjściowym) za pomocą prądu w obwodzie sterującym (wejściowym). Ponieważ tranzystor posiada 3 elektrody- E, B, C, to jedna z elektrod zawsze jest wspólna dla obwodów wejścia i wyjścia. Zależnie od tego, która z elektrod jest wspólna to mamy układy: wspólnej bazy (WB), wspólnego emitera (WE), wspólnego kolektora (WK). Ze względu na zalety stosunkowo najczęściej spotykanym jest układ WE, którym tu głównie będziemy się zajmować.

Dla uzyskania działania wzmacniającego tranzystora bipolarnego NPN lub PNP konieczna jest odpowiednia polaryzacja jego elektrod i złączy za pomocą napięć zewnętrznych tak aby:

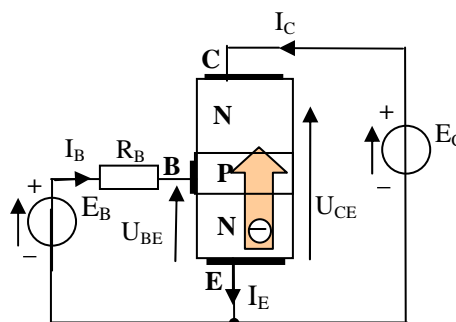
złącze B-E spolaryzować w kierunku przewodzenia zaś złącze C-E spolaryzować zaporowo. Zasadę polaryzacji elektrod i działanie tranzystora wyjaśnimy na przykładzie na przykładzie tranzystora NPN w układzie WE- rys.2., 3.

Zasady polaryzacji tranzystora PNP są identyczne lecz kierunki napięć między elektrodami muszą być odwrotne. Zgodnie z wymaganym sposobem polaryzacji złączy tranzystora, napięcia źródeł E_B i E_C muszą być tak dobrane aby spełniały warunek: $U_{CE} \gg U_{BE}$. Wówczas przez złącze BE

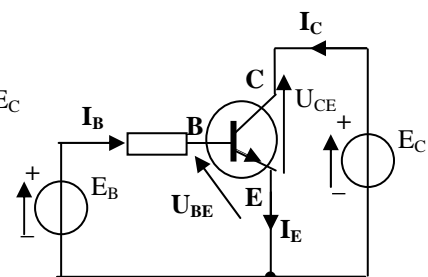
przepływa prąd przewodzenia o wartości zależnej od napięcia źródła i oporu w obwodzie dołączonym do elektrod B-E (obwód sterujący). Gdy złącze baza – emiter jest w stanie przewodzenia, to elektrony z emitera przepływają do bazy. Dalej przez ciekłą bazę na zasadzie dyfuzji podążają w kierunku kolektora. Ponieważ potencjał kolektora jest wyższy niż bazy,



Rys. 1. Układy warstw półprzewodnika, symbole graficzne i nazwy elektrod tranzystorów bipolarnych: a)-NPN, b) PNP



Rys. 2. Zasada polaryzacji złączy tranzystora bipolarnego NPN w układzie WE –rys poglądowy.



Rys. 3. Tranzystor bipolarny NPN w układzie WE.

elektrony te wychwytywane są na złączu CE do obszaru kolektora, wskutek przyciągania do dodatniej elektrody kolektora.

Złącze baza – kolektor zaczyna przewodzić prąd pomimo polaryzacji zaporowej. **Większość elektronów wysyłanych z emitera przez cienki obszar bazy dociera do kolektora. Tylko niewielka ich część tworzy niewielki prąd bazy w obwodzie B –E.**

Zależność między prądem bazy i kolektora ujmuje parametr tranzystora oznaczamy literą β_0 lub h_{21e} , nazywamy **małosygnalowym współczynnikiem wzmocnienia prądowego tranzystora**. **Małosygnalowy współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora w układzie WE** jest to iloraz zmiany wartości prądu kolektora ΔI_C i zmiany prądu bazy ΔI_B wywołującej zmianę prądu kolektora.

$$h_{21e} = \beta_0 = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Wartość współczynnika β_0 może wynosić od kilkudziesięciu do kilkuset. **Efekt wzmacniający tranzystora oznacza tu duże zmiany prądu kolektora (sterowanego) wywoływane β -krotnie mniejszymi zmianami prądu bazy (sterującego).**

Oprócz współczynnika $\beta_0 = h_{21e}$ w opisie i analizie własności tranzystorów bipolarnych stosuje się **wielkosygnalowy współczynnik wzmocnienia prądowego, dla układu WE definiowany jako:**

$$h_{21E} = I_C / I_B$$

Prądy płynące w tranzystorze możemy opisać równaniem :

$$I_E = I_C + I_B$$

I_E – prąd emitera, I_B – prąd bazy, I_C – prąd kolektora. Ponieważ $I_C = h_{21E} \cdot I_B$, to :

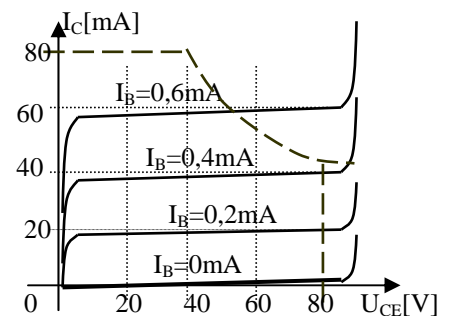
$$I_E = I_C + I_B = h_{21E} \cdot I_B + I_B = I_B \cdot (h_{21E} + 1).$$

Ponieważ prąd bazy jest $h_{21E} = \beta$ -krotnie mniejszy w stosunku do prądu kolektora to w przybliżonych rozważaniach możliwe jest przyjęcie założenia: $I_E \cong I_C$.

3. Charakterystyki statyczne tranzystorów

W katalogach elementów elektronicznych, własności tranzystorów bipolarnych najczęściej opisywane są przez podane parametry statyczne i dynamiczne, rzadziej przez charakterystyki statyczne, które określają zależności między prądami płynącymi przez tranzystor i napięciami na jego elektrodach. Więcej informacji zawierają charakterystyki. Umożliwiają one określenie własności i możliwości zastosowania tranzystorów w różnych układach elektronicznych. Najczęściej podaje się:

- charakterystyki wejściowe $I_B(U_{BE})$ - zależność prądu bazy I_B od zmian napięcia baza – emiter U_{BE} , przy stałej wartości napięcia kolektor – emiter U_{CE} . Charakterystyka ta jest identyczna jak diody półprzewodnikowej utworzonej w oparciu o złącze baza – emiter.
- charakterystyki wyjściowe- $I_C(U_{CE})$. Rys.4. przedstawia przykładową rodzinę charakterystyk wyjściowych, na których widoczny jest wpływ prądu bazy na prąd kolektora. Prąd kolektora początkowo szybko narasta przy małym napięciu U_{CE} , a następnie przestaje się zwiększać i nieznacznie zależy od napięcia kolektor – emiter; (tranzystor pracuje tu w **stanie aktywnym**). **Prąd kolektora tranzystora w stanie aktywnym jest zależny głównie od prądu bazy i można przyjmować, że :** $I_C = \beta \cdot I_B$. Można też wykreślić charakterystykę przejściową -rys.



Rys. 4. Charakterystyki wyjściowe tranzystora dla układu WE

5., która podaje zależność pomiędzy prądem kolektora I_C a prądem bazy I_B przy stałej wartości U_{CE} . Wynika z niej, iż zależność $I_C = f(I_B)$ jest liniowa, i można przyjmować, że **prąd kolektora jest proporcjonalny do prądu bazy $I_C = \beta \cdot I_B$.**

Ważnym jest fakt, że przy prądzie bazy $I_B = 0$ prąd kolektora posiada niewielką wartość, większą od zera. Prąd ten, zwany prądem zerowym kolektora, powstaje z nośników mniejszościowych bazy i kolektora. Bywa on pomijany w uproszczonych rozważaniach.

Praca tranzystora przy prądzie $I_B = 0$ nazywa się **stanem odcięcia (zatkania) tranzystora**. Na odcinkach poziomych charakterystyk wyjściowych gdy $U_{CE} \gg 0$ i $I_C = \beta \cdot I_B$ tranzystor **pracuje w stanie aktywnym**. W układach energoelektronicznych częstą jest **praca tranzystora to stanie nasycenia**; występuje gdy złącza B-E i C-E spolaryzowane są w kierunku przewodzenia co oznacza, że $U_{CE} < 0,7V$ oraz $I_C < h_{21E} \cdot I_B$. Wtedy $I_C \approx E_C / R_C$, gdzie R_C - rezystancja w obwodzie kolektora. Na charakterystykach wyjściowych – rys.4. linią przerywaną zaznaczono tzw. obszar bezpiecznej pracy tranzystora, który wyznaczany jest przez dopuszczalne wartości wielkości (podawane też w katalogach):

- $I_{C_{MAX}}$ - dopuszczalna wartość prądu kolektora,
- $U_{CE_{MAX}}$ - dopuszczalna wartość napięcia kolektor-emiter, jej przekroczenie prowadzi do przebicia w obwodzie kolektor-emiter,
- $P_{C_{MAX}} = (U_{CE} \cdot I_C)_{MAX}$ - wyznaczona przez hiperbole, dopuszczalna wartość mocy wydzielanej w obwodzie kolektora; jej przekraczanie grozi uszkodzeniem struktury tranzystora wskutek przegrzewania.

Wpływ temperatury na pracę tranzystora

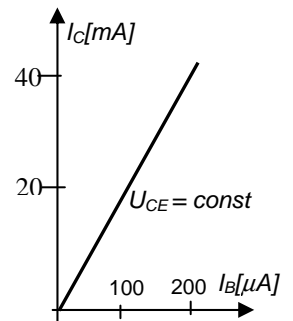
Temperatura złącza tranzystora silnie wpływa na przebieg charakterystyk i ich parametry. Wzrost temperatury powoduje wykładniczy wzrost prądu zerowego I_{CE0} w obwodzie kolektora. Podwaja się on przy wzroście temperatury o 10K. Ze wzrostem temperatury mamy też prawie liniowe zmniejszanie się spadku napięcia na złączach P-N i na złączu B-E; zmiana ta wynosi ok. (-2,3mV/K). Liniowe zmniejszanie się spadku napięcia na złączu B-E pozwala wykorzystywać złącze B-E tranzystora jako czujnik temperatury. Dopuszczalna temperatura pracy tranzystorów krzemowych może dochodzić do 420K (150°C). Znaczna zależność parametrów tranzystora od temperatury zmusza konstruktorów do tworzenia rozwiązań układowych odpornych na jej zmiany.

4. Przełączanie tranzystorów bipolarnych.

Jedną z podstawowych cech tranzystora bipolarnego jest możliwość jego pracy w stanach analogicznych do pracy łącznika (klucza) w stanach zamknięcia i otwarcia styków. Stany nasycenia i zatkania odpowiadają stanom zamknięcia i otwarcia łącznika. Tranzystor jako łącznik jest stosowany zwykle w układzie WE, ze względu na łatwość sterowania przy pomocy prądu bazy, wobec dużego wzmocnienia prądowego (współczynnik h_{21E}). Duża wartość współczynnika wzmocnienia prądowego oznacza możliwość sterowania przepływem prądu kolektora przy pomocy prądu bazy h_{21E} –krotnie mniejszego w stosunku do wartości prądu kolektora. Szybkość działania półprzewodnikowych łączników bezstykowych jest niewspółmiernie większa w stosunku do najszybszych łączników stykowych. Łączniki bezstykowe są powszechnie stosowane w energoelektronicznych układach przekształtnikowych jako elementy pozwalające na załączanie i regulację mocy dostarczanej do odbiornika w obwodach prądu stałego. Podstawowy układ tranzystorowego klucza inwerterowego w układzie WE z obciążeniem rezystywnym badano w serii I ćwiczeń. Określenie układu mianem inwerterowego pochodzi od odwracania (inwersji) fazy napięcia wyjściowego w stosunku do napięcia wejściowego.

Właściwości dynamiczne tranzystorów przełącznikowych są najczęściej charakteryzowane przez wartości czasów trwania stanów przejściowych przy skokowym przełączaniu między stanem zatkania a stanem nasycenia. Idealizowane przebiegi czasowe prądów i napięć w czasie przełączania tranzystora bipolarnego Zakładają brak jakichkolwiek opóźnień podczas pracy przełącznikowej tranzystora. W rzeczywistych układach należy liczyć się z pewnymi opóźnieniami w przebiegu procesów przełączania prądów za pomocą tranzystorów.

Czasy przełączania typowych współczesnych tranzystorów małej mocy (dopuszczalna moc rozpraszana P_C , ok. 0,3 W) są rzędu 5...50 ns. Czasy przełączania tranzystorów średniej i dużej mocy są większe, w przybliżeniu proporcjonalnie do wartości dopuszczalnej mocy rozpraszanej.



Rys. 5. Charakterystyka przejściowa $I_C = f(I_B)$,

5. Przerwyacze prądu stałego

Przerwyacze prądu stałego zwane również bezpośrednimi przekształtnikami prądu stałego, lub czoperami (ang. Chopper), to układy pozwalające na płynną (bezstopniową) regulację mocy dostarczanej do różnego rodzaju odbiorników. Nie zawierają one obwodu pośredniego prądu przemiennego (nie zawiera transformatora), który zapewniałby separację galwaniczną odbiornika od źródła energii. Tranzystorowe przerwyacze prądu stałego, w których tranzystory mocy pracujące dwustanowo (odcięcie i nasycenie) są elementami służącymi do dozowania dopływu energii do odbiorników, są powszechnie stosowane np. w układach zasilaczy impulsowych, impulsowych stabilizatorów napięcia stałego. Pozwalają one na wysoko sprawną regulację poziomu mocy dostarczanej do różnych odbiorników prądu stałego, np. silników elektrycznych.

Rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje bezpośrednich przekształtników prądu stałego:

1. Przekształtniki obniżające (zmniejszające) regulowane napięcie stałe.
2. Przekształtniki zwiększające regulowane napięcie stałe.

Zasadę impulsowego sterowania napięciem i prądem stałym można wyjaśnić na przykładzie układu przerwyacza z tranzystorem BJT, którego schemat poglądowy przedstawiony jest na rys. 8. Tranzystor **T** pełni tu rolę łącznika bezstykowego (mogą tu pracować też tranzystory IGBT lub MOSFET). Przebiegi czasowe napięć i prądu obrazujące pracę układu pokazane są na rys. 9.

Załączanie tranzystora impulsem prądu bazy o czasie trwania t_p powoduje pojawianie się na diodzie D_o napięcia w przybliżeniu równego napięciu zasilania U_{WE} , którego przebieg widzimy poniżej na rys. 9. Przewodzenie tranzystora i dopływ energii ze źródła do odbiornika z magazynowaniem jej w indukcyjności trwa przez czas t_p w każdym okresie T pracy układu. Zablockowanie tranzystora po czasie t_p oznacza odłączenie źródła zasilania od układu obciążającego. Napięcie na diodzie za łącznikiem skokowo zmniejsza się do zera. Jeśli odbiornik ma charakter rezystancyjno-indukcyjny to od tej chwili rozpoczyna się oddawanie energii zmagazynowanej w indukcyjności L ,

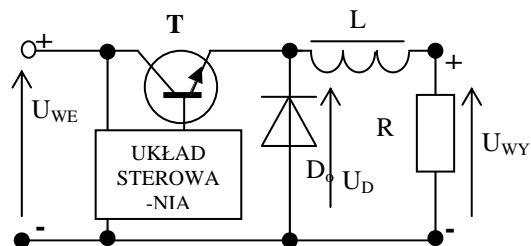
w obwodzie złożonym z diody rozładowczej D_o i obciążenia R_oL . W układzie takim jest zatem konieczna dioda rozładowcza D_o , która umożliwi rozładowanie energii zgromadzonej w indukcyjności i przewodzi prąd obciążenia i_o , gdy tranzystor (łącznik) pracuje w stanie odcięcia. Zależnie od wartości indukcyjności, zmiany wartości chwilowej prądu odbiornika $\Delta I_o = (I_{o2} - I_{o1})$ mogą być mniejsze (przy dużej wartości L) lub większe (przy małej wartości L). **Indukcyjność L (dławik) spełnia tu rolę dławicą dla zmian wartości chwilowych prądu odbiornika.** Często równolegle z odbiornikiem R_o włącza się kondensator elektrolityczny, który jest elementem dodatkowo wygładzającym napięcie.

Regulację wartości średniej napięcia i prądu odbiornika można w układzie rys. 1 uzyskać również bez diody i indukcyjności lecz wówczas przebieg prądu i napięcia wyjściowego nie musi być jak na rys. 2 wygładzony.

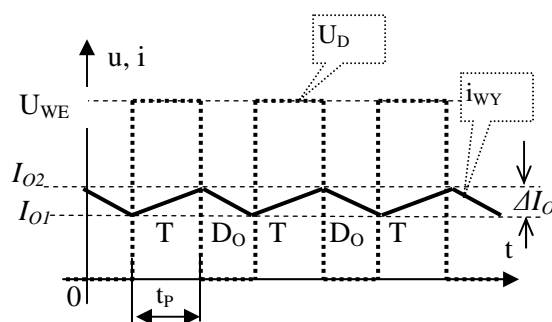
Wartość średnia napięcia odbiornika jest wprost proporcjonalna do napięcia U_{WE} i do względnego czasu przewodzenia prądu przez łącznik (t_p/T): $U_{WY} = U_{WE} \cdot (t_p/T)$

Stosunek (t_p/T) wyrażony w procentach nosi nazwę **współczynnika wypełnienia impulsów (WWI)**.

Zmieniając wartość $WWI = (t_p/T) \cdot 100\%$, zmieniamy wartość średnią napięcia odbiornika w granicach od 0V do wartości bliskiej U_{WE} .



Rys. 8. Zasada budowy przekształtnika obniżającego napięcie.



Rys. 9. Przebiegi napięcia i prądu w układzie przekształtnika bezpośredniego obniżającego napięcie, z obciążeniem RL

Zwykle stosowane są dwa podstawowe sposoby regulacji (modulacji) względnego czasu przewodzenia łącznika.

1. Modulacja szerokości impulsów (ang. PWM- Pulse Width Modulation)- zachowuje się stałą wartość okresu T (stała częstotliwość) impulsów sterujących a zmienia się wartość czasu trwania (szerokości) impulsów sterujących t_p (rys.10.).

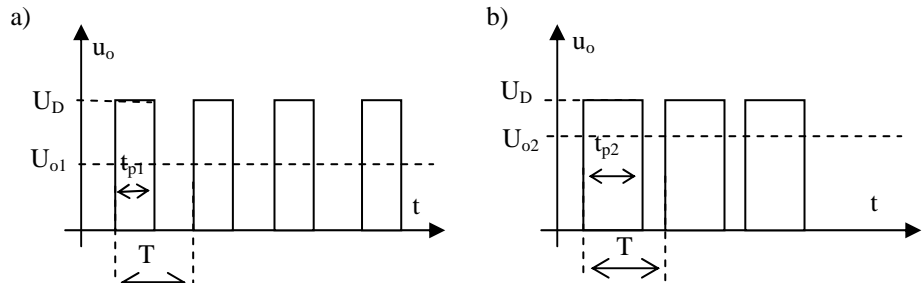
2. Modulacja częstotliwości impulsów (ang. PFM- Pulse Frequency Modulation)-utrzymuje się stałą wartość czasu przewodzenia (t_p) elementu kluczującego a zmienia się częstotliwość impulsów sterujących (kluczowania dopływu energii)- (rys. 11). W obydwu przypadkach możliwa jest płynna regulacja wartości średniej napięcia

zasilającego odbiornik.

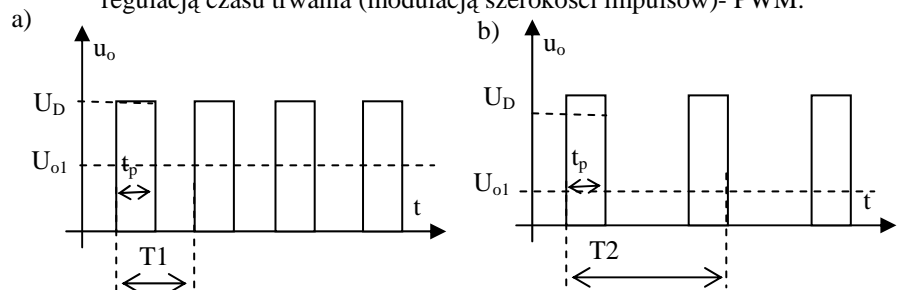
W przerywaczu prądu stałego występują określone tętnienia prądu odbiornika ΔI_o jak widać na rysunku 9. Amplituda tętnień maleje ze wzrostem wartości indukcyjności L dławika gdyż wtedy dławik magazynuje więcej energii. Zaznaczono tam również przedziały czasu odpowiadające przewodzeniu łącznika oraz diody rozładowczej (D_o).

Amplitudę tętnienia

prądu można zmniejszyć zwiększając indukcyjność odbiornika (włączenie dodatkowego dławika) lub zwiększając częstotliwość załączania łącznika (wtedy dławik częściej pobiera i oddaje energię).



Rys.10. Przebiegi napięcia w układzie przerywacza pracującego z regulacją czasu trwania (modulacją szerokości impulsów)- PWM.



Rys.11. Przebiegi napięcia przerywacza pracującego z regulacją częstotliwości impulsów (modulacją częstotliwości impulsów)- PFM.

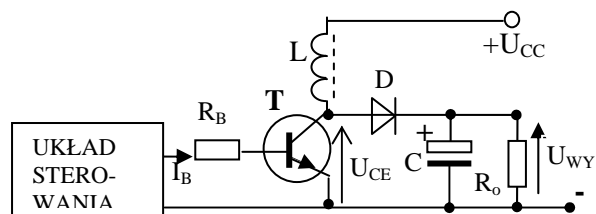
6. Przekształtnik bezpośredni podwyższający napięcie stałe

Na rys. 8 przedstawiony jest przekształtnik prądu stałego zdolny do regulacji wartości napięcia zasilającego odbiornik U_{WY} w zakresie od 0 do prawie pełnej wartości napięcia zasilającego U_{WE} . Jest to przekształtnik obniżający napięcie.

Po wykonaniu połączeń przerywacza jak na rys.12 można uzyskać przekształtnik podwyższający napięcie stałe U_{WY} , w stosunku do napięcia zasilającego U_{CC} . Tranzystor bipolarny lub inny pełni tu rolę klucza cyklicznie zwierającego dławik L z minusem źródła U_{cc} . Po wysterowaniu bazy tranzystora wchodzi on w stan nasycenia. Wtedy rozpoczyna się przepływ prądu przez dławik L i podczas przepływu prądu dławik magazynuje energię pobieraną ze źródła. Po zablokowaniu tranzystora dławik stara się podtrzymać przepływ prądu w obwodzie oddając zmagazynowaną wcześniej energię. Jedyną możliwą drogą przepływu dla prądu z dławika staje dioda D i obwód $R_o C$ odbiornika..

Gdy energia zmagazynowana w dławiku jest większa od energii pobieranej przez rezystancję R , można uzyskać podwyższenie wartości napięcia na zaciskach odbiornika w stosunku do napięcia źródła U_{cc} .

Kondensator C wygładza napięcie, którym zasilany jest odbiornik, tu jest nim rezystor R_o . Klucz tranzystorowy jest tu załączany z częstotliwością rzędu kilkudziesięciu kHz. Dzięki temu indukcyjność dławika może być stosunkowo niewielka, gdyż czas magazynowania i poboru energii



Rys.12. Przekształtnik tranzystorowy podwyższający napięcie stałe.

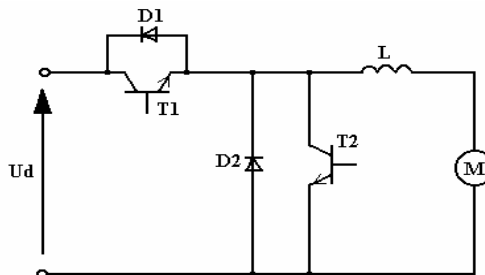
z dławika rzędu mikrosekund ($T=1/f$) nie wymaga poboru dużych porcji energii dla podtrzymania przewodzenia diody do następnego włączenia tranzystora; (energia dławika: $W_L=L \cdot I^2/2$).

7. Zastosowania przerywaczy prądu stałego.

Działanie łączników tranzystorowych jest znacznie szybsze niż działanie łączników tyrystorowych. Dzięki temu znajdują one zastosowanie w układach, w których jest wymagana duża częstotliwość łączeń. Powszechnie stosuje się je w układach zasilaczy impulsowych do przetwarzania napięć stałych, do sterowania dopływu energii dla silników prądu stałego, w układach falowników napięcia itp.

Energoelektroniczne łączniki półprzewodnikowe prądu stałego niestety nie zapewniają przerwy galwanicznej w obwodzie wyłączanym, dlatego też ze względów bezpieczeństwa często stosuje się zwykły łącznik mechaniczny, połączony szeregowo z łącznikiem energoelektronicznym, który umożliwia całkowite odłączenie zasilania od odbiornika.

Przerywacz na rys 13, w odróżnieniu od innych przerywaczy umożliwia przepływ energii w obu kierunkach przy odpowiednimysterowaniu baz tranzystorów. Jest to czasami wymagane np. przy hamowaniu silnika ze zwrotem energii do źródła zasilania



Rys. 13. Schemat obwodu mocy przerywacza tranzystorowego 2-kierunkowego [1]

(rys.6). Podczas zasilania silnika przewodzenie prądu odbywa się przez T1, D2. Podczas hamowania, silnik pracuje jako prądnica i energia odzyskana przez prądnicę zwracana jest do źródła za pośrednictwem T2 i D1. (T2 kluczowany pozwala na podwyższenie napięcia z prądnicy do przekazania energii przez D1 do źródła U_d).

8. Impulsowe stabilizatory i przetwornice napięcia stałego.

Jak już wspomniano przerywacze tranzystorowe znajdują zastosowanie między innymi w impulsowych zasilaczach i stabilizatorach napięcia stałego. W praktyce można spotkać ogromną liczbę rozwiązań układowych tego rodzaju zasilaczy. Schematy pokazane na rys.1 i 5 mogą być schematami bezpośrednich przetwornic napięcia stałego. Po zastosowaniu w układach ujemnego sprzężenia zwrotnego mogą to być impulsowe stabilizatory napięcia stałego. Przy niezbyt dużych mocach wyjściowych można stosować dostępne w handlu specjalizowane układy scalone, które mogą służyć do sterowania pracą kluczy tranzystorowych lub są prawie kompletnymi układami pozwalającymi budować stabilizatory impulsowe po dodaniu nielicznych elementów zewnętrznych. Częstotliwości pracy kluczy tranzystorowych w zasilaczach impulsowych sięgają obecnie 200kHz. **Jeden z takich układów stabilizacji napięcia, zbudowany na bazie specjalnego układu scalonego, typu L296 badany jest w niniejszym ćwiczeniu.**

Pytania sprawdzające:

1. Jak zbudowany jest tranzystor bipolarny NPN, PNP? Jak bada się złącza tranzystorów omomierzem?
2. Jak należy spolaryzować złącza tranzystora dla uzyskania efektu wzmacnienia i sterowania wartością prądu kolektora w układzie WE? Narysuj schemat!
3. Jaki przebieg posiadają charakterystyki wejściowe (bazowe) i wyjściowe tranzystora w układzie WE?
4. Na czym polega działanie tranzystora bipolarnego jako elementu aktywnego?
5. W jaki sposób możemy zmierzyć wartości współczynnika wzmocnienia prądowego tranzystora w układzie WE?
6. Co należy rozumieć przez punkt pracy tranzystora?
7. Wymień i zdefiniuj podstawowe parametry statyczne tranzystora bipolarnego.
8. Co należy rozumieć przez czas włączania i wyłączania tranzystora? Kiedy istotne są wartości tych czasów?
9. Według jakich kryteriów klasyfikuje się tranzystory bipolarne.
10. Od czego zależy wartość prądu kolektora tranzystora pracującego w układzie WE w stanach aktywnym i nasycenia?

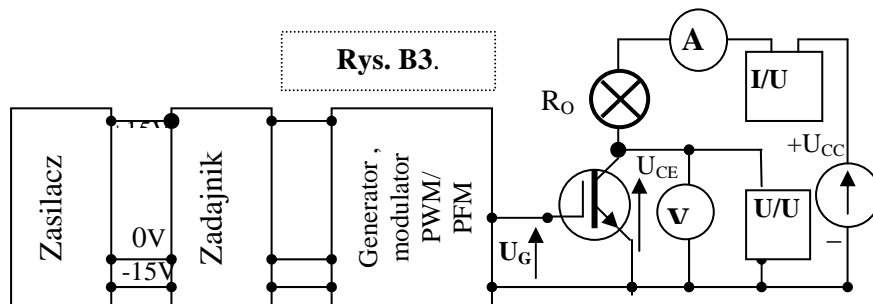
Literatura:

1. S.Januszewski, A. Pytlak, H. Świątek „Urządzenia energoelektroniczne”

1. Badanie przerywacza tranzystorowego pracującego w trybie PWM w układzie regulacji mocy dostarczanej do odbiornika rezystancyjnego.

a). Zestaw układ pomiarowy wg rys. B3 z generatorem impulsów pracującym w trybie PWM.

b). Zanotuj oscylogramy napięć $u_G(t)$, $u_{CE}(t)$, $i_o(t)$ w porządku chronologicznym dla określonej wartości współczynnika wypełnienia impulsów ($WWI = (t_H/T) * 100\%$, np. ok. 30% , odpowiadające pracy modulatora w trybie PWM.



Podaj opis stanów pracy klucza tranzystorowego w poszczególnych przedziałach czasu dla jednego okresu zmienności napięcia $u_G(t)$.

c). Badanie zależności wartości średniej napięcia na odbiorniku od wartości współczynnika wypełnienia impulsów (przebieg charakterystyki sterowniczej układu) oraz zależności prądu odbiornika i mocy wydzielanej w odbiorniku od wartości WWI.

WWI[%]	0	10	20	40	60	80	100
U_o [V]							
I_o [A]							
P_o [W] = $U_o * I_o$							

Uzasadnij uzyskane przebiegi.

2. Badanie przerywacza tranzystorowego w układzie regulacji mocy dostarczanej do odbiornika, pracującego w trybie PFM.

a). Zestaw układ pomiarowy wg rys B2. z włączeniem modulatora do pracy w trybie PFM.

b). Zanotuj oscylogramy napięć $u_G(t)$, $u_{CE}(t)$, $i_o(t)$ w porządku chronologicznym dla określonej wartości współczynnika wypełnienia impulsów ($WWI = (t_H/T) * 100\%$, np. ok. 30% ,

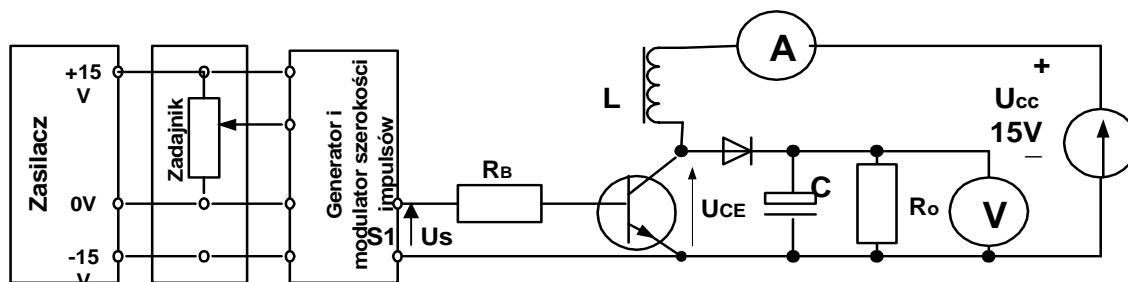
Podaj opis stanów pracy klucza tranzystorowego w poszczególnych przedziałach czasu jednego okresu napięcia sterującego $u_G(t)$.

c). Zbadaj zależność prądu, napięcia i mocy odbiornika od częstotliwości impulsów sterujących.

f[Hz]							
U_o							
I_o							
P_o [W] = $U_o * I_o$							

d). Opisz zjawiska zachodzące w układzie ilustrowane przebiegami zarejestrowanymi w punkcie b oraz wyjaśnij zależności i wyniki uzyskane w punktach b i c.

3. Badanie przerywacza tranzystorowego w układzie podwyższania wartości napięcia.



Rys. B3. Przekształtnik tranzystorowy podwyższający

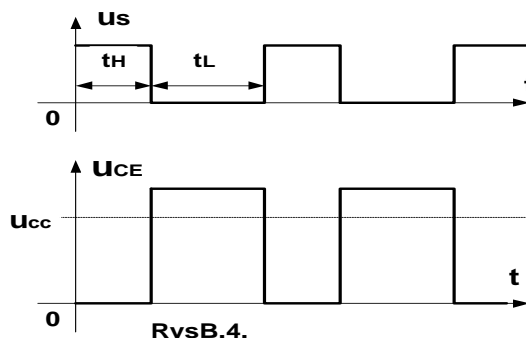
Na rys. B4. pokazane są uproszczone przebiegi napięcia sterującego pracą przekształtnika oraz napięcia kolektor-emiter tranzystora.

W czasie trwania stanu wysokiego napięcia u_s tranzystor jest wprowadzony w stan nasycenia. W tym czasie dławik L gromadzi energię. W czasie t_L tranzystor pozostaje zablokowany. Oddawana energia z dławika powoduje podniesienie poziomu napięcia wyjściowego (na odbiorniku) ponad wartość napięcia źródła U_{CC} .

a). Zestaw układ badawczy jak na rys. 3.

b). Zarejestruj oscylogramy napięć: u_s , u_{CE} i u_{odb} podczas sterowania tranzystora impulsami prostokątnymi o częstotliwości ok. 1,5kHz i o współczynnika wypełnienia (WWI) bliskim 50% dla rezystancji obciążenia około 100Ω . Wykonaj pomiary wartości średniej i amplitudy tętnień napięcia na odbiorniku. Podaj uzasadnienie i związki zależności pomiędzy uzyskanymi oscylogramami napięć.

c). Zbadaj zależność napięcia na odbiorniku od wartości współczynnika wypełnienia impulsów sterujących (WWI). Wartości WWI ustalamy z pomiarów czasu na ekranie oscyloskopu nie dopuszczając do przekroczenia wartości $WWI=70\%$ - grozi to przeciążeniem tranzystora.



RysB.4.

WWI[%]	10	20	30	40	50	60	70
U_{ODB} [V]							

Wykreśl charakterystykę $U_{ODB}=f(WWI)$ oraz podaj jej uzasadnienie odwołując się do procesów zachodzących w układzie.

Jakie skutki dla pracy układu może mieć wartość WWI bliska 100% lub zwarcie klucza tranzystorowego?