

ĆWICZENIE 8

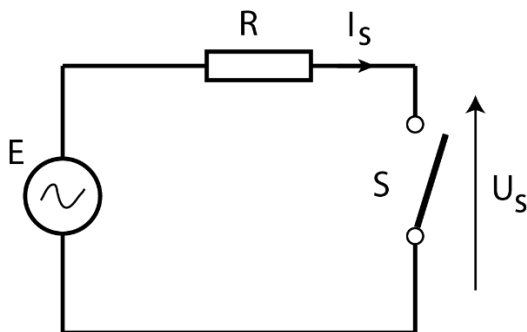
ELEMENTY I UKŁADY PRZEŁĄCZAJĄCE

Opracował: mgr inż. Adam Kowalczyk

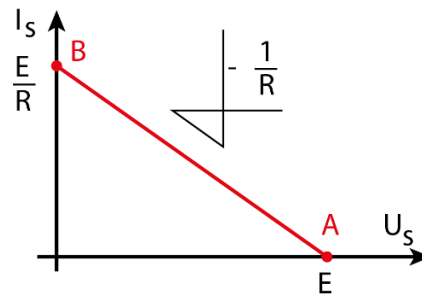
Pierwotna wersja ćwiczenia i instrukcji jest dziełem mgr. inż. Leszka Widomskiego

WPROWADZENIE

Działanie i parametry przełącznika elektrycznego można wyjaśnić na przykładzie z rys. 1a, na którym dowolną złożoną sieć reprezentuje źródło o sile elektromotorycznej E , oporność R oraz przełącznik idealny S , tzn. taki przełącznik, który ma zerową oporność między swymi zaciskami wtedy, gdy jest zwarty (stan włączenia) i zerową przewodność wtedy, gdy jest rozarty (stan wyłączenia).



rys. 1a) Schemat idealnego przełącznika.

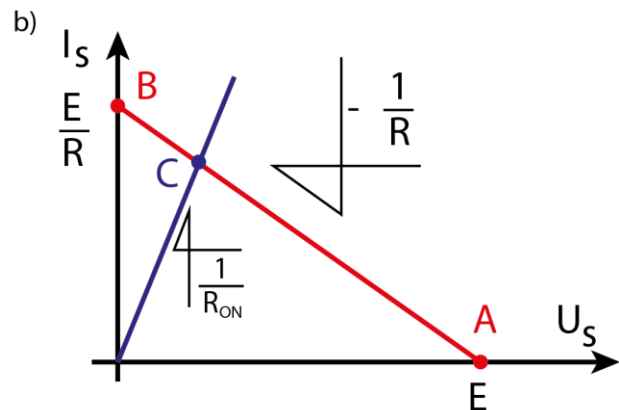
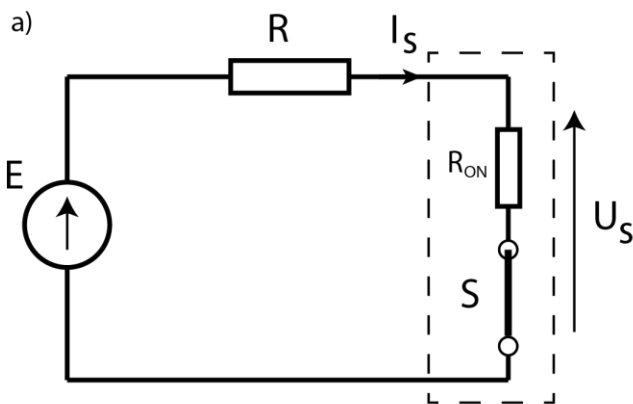


rys. 1b) Charakterystyka prądowo-napięciowa przełącznika.

Na rys. 1b stan włączenia i wyłączenia reprezentują odpowiednio punkty A i B:

- Punkt B – w stanie włączenia $U_S = 0$, $I_S = \frac{E}{R}$
- Punkt A – w stanie wyłączenia $U_S = E$, $I_S = 0$

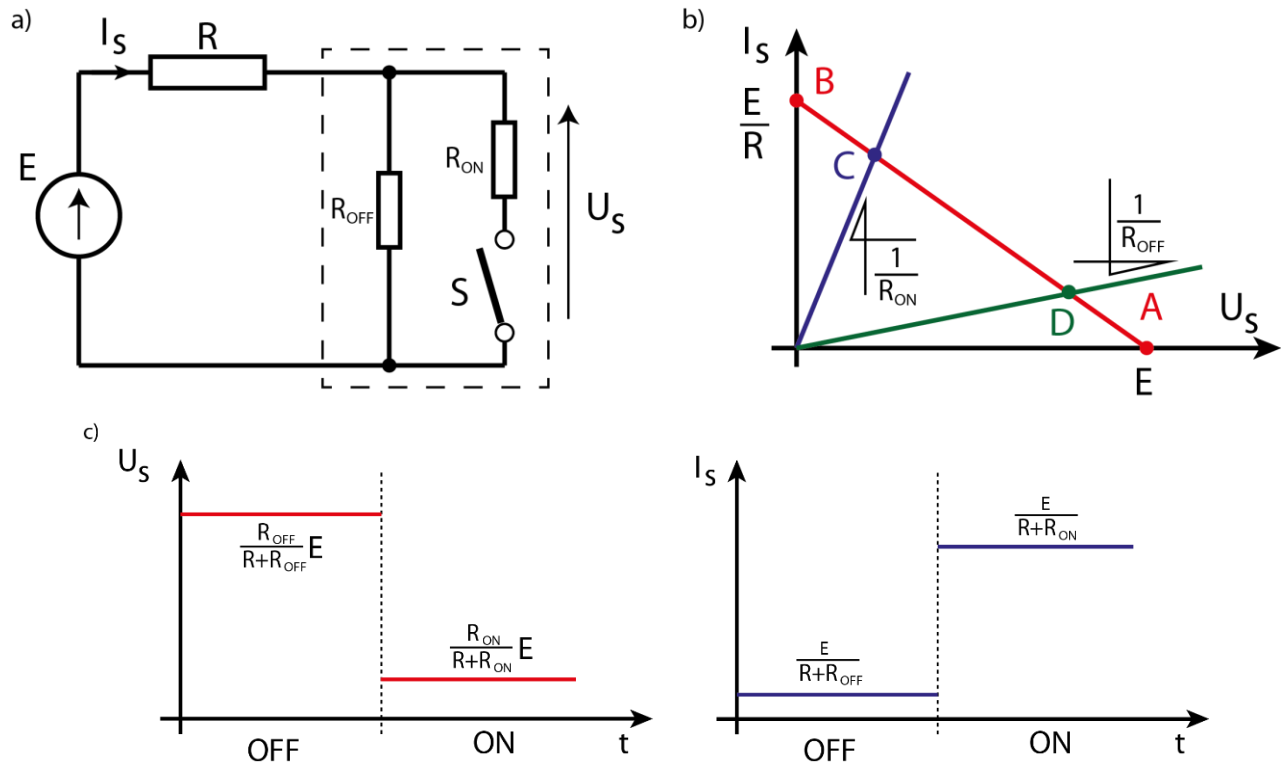
Proces przełączania zachodzi wzdłuż odcinka AB o nachyleniu $-1/R$. Podczas pracy przełącznika idealnego nie wydzielą się w nim żadna moc czynna. Przełączniki rzeczywiste wyróżniają się skończoną opornością w obu stanach oraz bezwładnością. Skutki tych właściwości będą kolejno przedstawione w dalszych częściach instrukcji.



rys. 2. Schemat oraz punkt pracy rzeczywistego przełącznika w stanie włączenia.

W stanie **włączenia**, przełącznik rzeczywisty wykazuje niezerową oporność R_{ON} (rys. 2a) zatem napięcie na przełączniku U_S jest różne od zera i wynosi $U_S = E \cdot R_{ON} / (R_{ON} + R)$, zaś prąd ma mniejsze natężenie niż w obwodzie zawierającym przełącznik idealny i jest równe $I_S = E / (R_{ON} + R)$. Na rys. 2b stan ten reprezentuje punkt C przecięcia prostej obciążenia (o nachyleniu $-1/R$) z prostą o nachyleniu $1/R_{ON}$, przechodzącą przez początek układu współrzędnych $u-i$. W zamkniętym przełączniku rzeczywistym wydzielą się moc czynna $P_S = R_{ON} \cdot I_S^2 = E^2 \cdot R_{ON} / (R_{ON} + R)^2$.

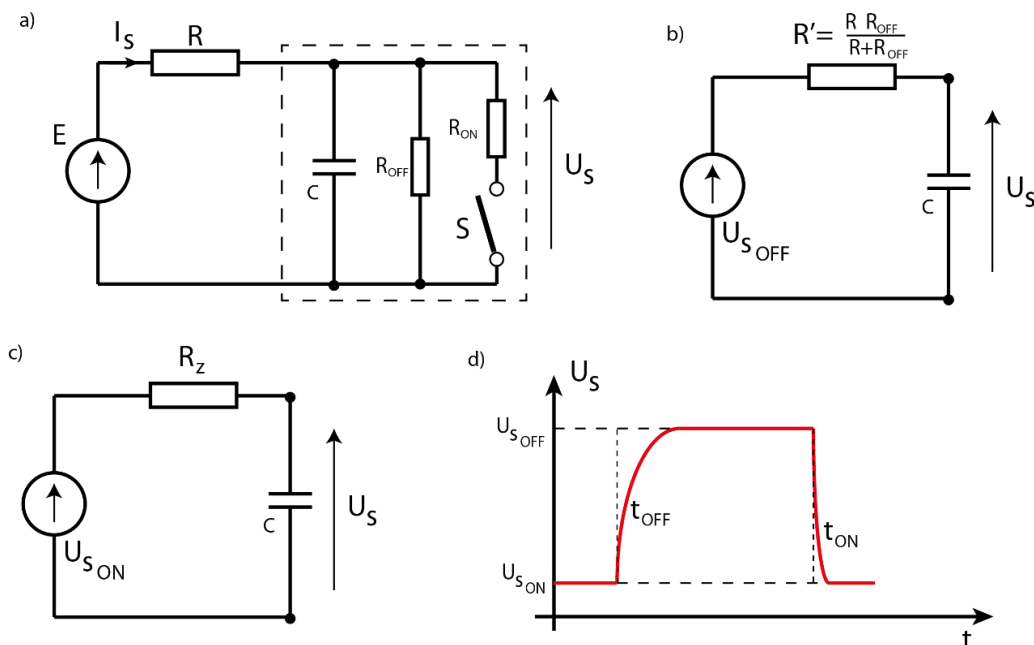
W stanie **wyłączenia** (rys. 3) rzeczywisty przełącznik wykazuje skończoną oporność R_{OFF} . Wtedy $U_S = E \cdot R_{OFF} / (R_{OFF} + R)$, $I_S = E / (R_{OFF} + R)$, zaś punkt pracy na rys. 3b reprezentuje punkt D, otrzymany z przecięcia prostej obciążenia z prostą o nachyleniu $1/R_{OFF}$, przechodzącą przez początek układu.



rys. 3. Schemat oraz charakterystyki rzeczywistego przełącznika.

W otwartym wyłączniku wydzielą się moc czynna $P_S = R_{OFF} \cdot I_S^2 = E^2 \cdot R_{OFF} / (R_{OFF} + R)^2$. Jeśli R_{OFF} jest znacznie większe niż R_{ON} (najczęstszy i pożądany przypadek), to R_{OFF} nieznacznie wpływa na warunki pracy przełącznika w stanie włączenia, czyli na zmianę położenia punktu C. Zatem dwa stany przełącznika reprezentują punkty C i D na rys. 3b i różnica między nimi jest mniejsza niż w przełączniku idealnym (rys. 1b). Sprawność przełączania można scharakteryzować za pomocą stosunku R_{OFF}/R_{ON} .

Bezwładność przełącznika reprezentuje na jego schemacie zastępczym kondensator C (rys. 4) dołączony równolegle do opornika R_{OFF} . Jeśli początkowo przełącznik był zamknięty i napięcie na nim wynosiło $U_{S(ON)} = E \cdot R_{ON} / (R_{ON} + R)$, to po otwarciu przełącznika obwód można przedstawić w postaci schematu zastępczego z rys. 4b (na podstawie twierdzenia Thevenina). Kondensator będzie się ładował, a napięcie na nim będzie wykładniczo rosło od poprzedniej wartości do końcowej $U_{S(OFF)} = E \cdot R_{OFF} / (R_{OFF} + R)$ (rys. 4d) przy czym stała czasu $\tau_{OFF} = C \cdot R \cdot R_{OFF} / (R_{OFF} + R)$. Gdy po naładowaniu kondensatora do wartości $U_{S(OFF)}$ wyłącznik S zostanie zamknięty, to dla tego cyklu odpowiedni schemat zastępczy ma postać przedstawioną na rys. 4c.

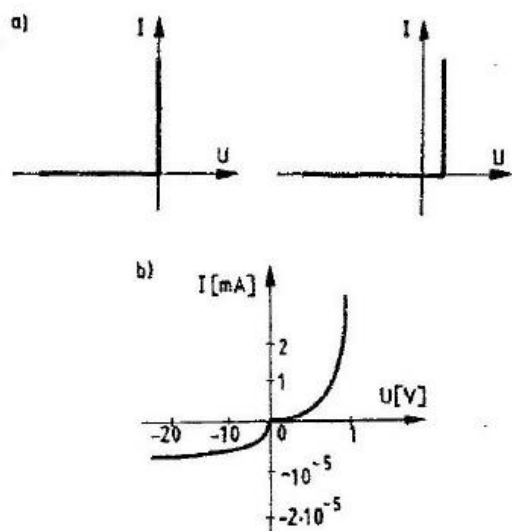


rys. 4. Schematy zastępcze oraz przebieg czasowy wł/wył dla rzeczywistego przełącznika uwzględniającego bezwładność.

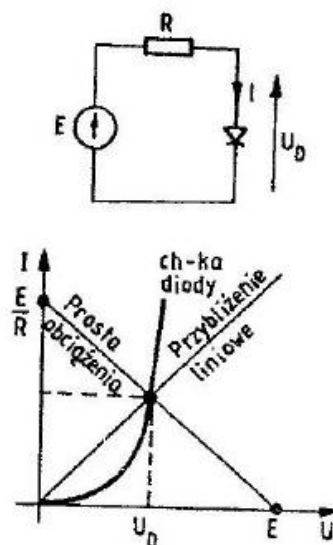
Kondensator rozładowuje się teraz od wartości $U_{S(ON)}$ do wartości $U_{S(OFF)}$ ze stałą czasu $\tau_{ON} = C \cdot R_Z$ (rys.4d), w której $R_Z \approx R \cdot R_{ON} / (R_{ON} + R)$. Widać, że napięcie na przełączniku zmienia się szybciej podczas włączania niż wyłączania.

Jako przełączniki elektroniczne stosowane są powszechnie elementy półprzewodnikowe: diody, tranzystory bipolarne i unipolarne, tyrystory niesymetryczne i symetryczne czyli triaki, tranzystory jednozłączkowe, szczególne typy diod: ładunkowe, tunelowe, Schottky'ego itd. Ich szybkość działania jest ograniczona i, choć jest to spowodowane różnymi przyczynami fizycznymi, charakteryzowane są w podobny sposób, a mianowicie za pomocą czasów włączania t_{ON} i wyłączania t_{OFF} .

Przy włączaniu diod, idealnej z rys. 5a lub rzeczywistej z rys. 5b, wykorzystuje się wielką różnicę ich oporności w kierunkach przewodzenia i zaporowym. Dioda jest przełącznikiem sterowanym, gdyż jej stan zależy od polaryzacji przyłożonego napięcia.

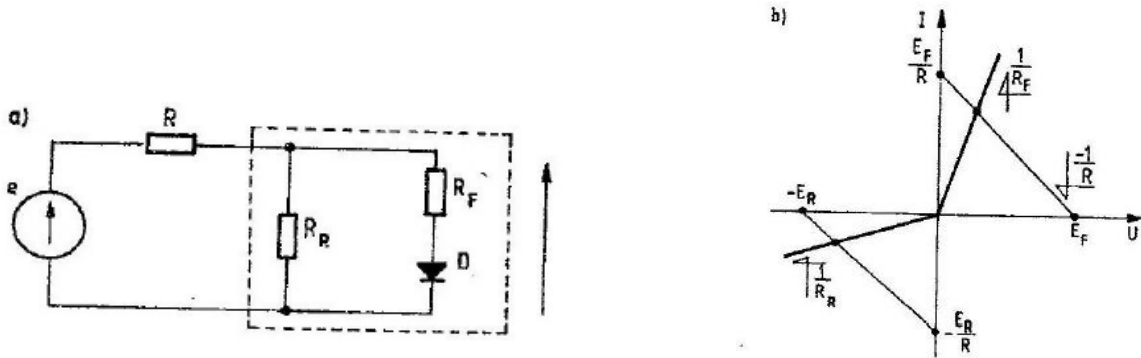


rys. 5. Charakterystyki diod idealnej (a) i rzeczywistej (b).



rys. 6. Dioda jako przełącznik sterowany.

Punkt pracy diody w kierunku przewodzenia otrzymuje się na przecięciu charakterystyki diody z prostą obciążenia dla oporności R (rys. 6): napięcie na diodzie U_D jest różne od zera. Charakterystykę diody w kierunku przewodzenia można w przybliżeniu aproksymować linią prostą (nachylenie $1/R_F$), przechodzącą przez początek układu $u-i$ i punkt pracy diody. W podobny sposób można postąpić w przypadku diody spolaryzowanej w kierunku zaporowym. W wyniku otrzymuje się przybliżony schemat zastępczy diody z rys. 7a, na którym D oznacza diodę idealną. Odpowiada mu przybliżona charakterystyka z rys. 7b, dla której $R_R \gg R_F$. W wielu przypadkach dopuszczalne jest przybliżenie przedstawione na rys. 5a.

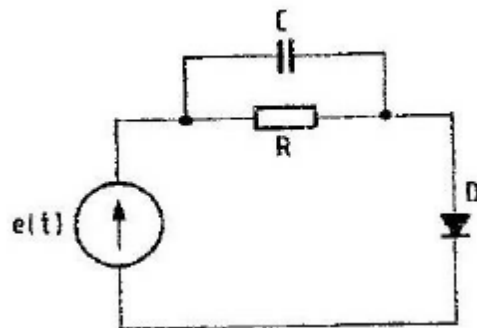


rys. 7. Schemat zastępczy oraz charakterystyka diody jako przełącznika.

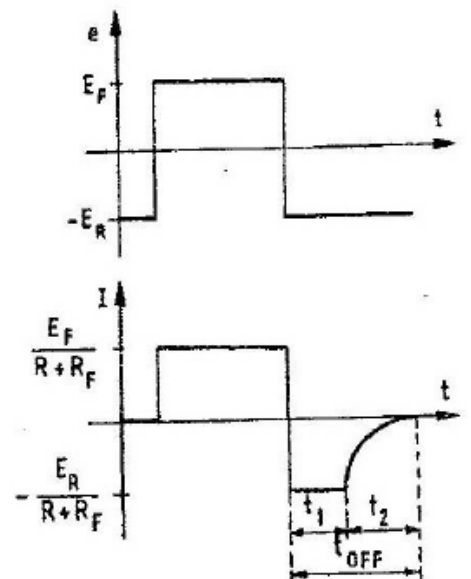
Oprócz bezwładności wynikającej z istnienia pojemności diody, szybkość przełączania diody ograniczają efekty magazynowania ładunku. W przewodzącej diodzie, w obszarze bazy przylegającym do złącza p-n, gęstość objętościowa ładunków nadmiarowych jest duża. Gdy napięcie zewnętrzne zmienia gwałtownie polaryzację na przeciwną (zaporową), to przez diodę nadal płynie duży i stały prąd w kierunku przeciwnym niż poprzednio. Prąd ten płynie dotąd, aż nie nastąpi odprowadzenie ładunków (rys. 8). Zatem w czasie następującym bezpośrednio po zmianie napięcia zasilającego na ujemne (czas t_1 , tzw. półki prądu), oporność diody pozostaje nadal mała i dopiero po upływie czasu t_2 osiąga dużą wartość, charakterystyczną dla kierunku zaporowego.

Ponieważ proces włączania diod przebiega znacznie szybciej niż proces wyłączania, to głównie czas wyłączenia diody $t_{OFF} = t_1 + t_2$ decyduje o największej użytecznej szybkości przełączania diody: przy zbyt częstych przełączeniach dioda cały czas przewodzi i to w obu kierunkach, a więc traci swoją fundamentalną właściwość działania jako przełącznik.

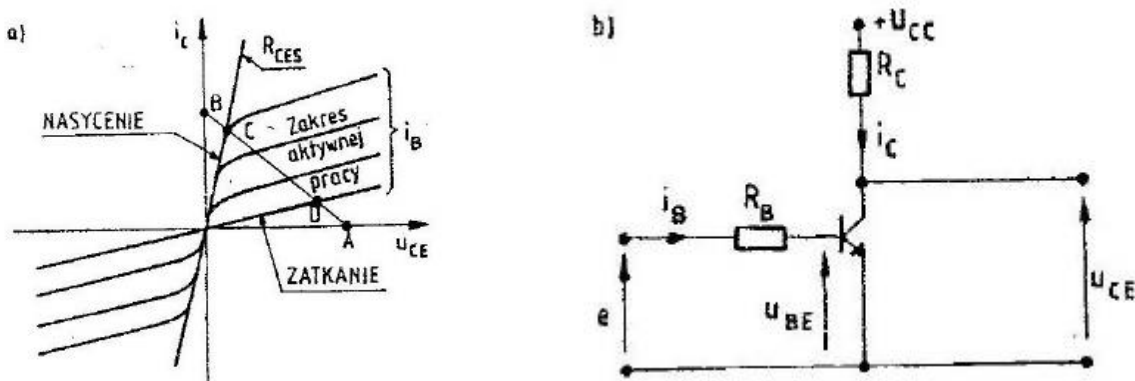
Szybkość przełączania diody można zwiększyć w pewnym stopniu przez



rys. 9. Podłączenie kondensatora przyspieszającego. dołączenie kondensatora przyspieszającego C równolegle do opornika R (rys. 9). Działanie pojemności C polega tu na zwiększeniu prądu w stanach nieustalonych podczas włączania i wyłączania diody, co powoduje zmniejszenie czasów włączania oraz wyłączania.

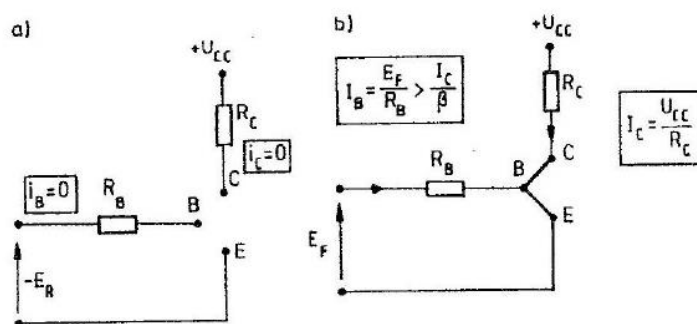


rys. 8. Przełączanie diody.



rys. 10. Charakterystyki tranzystora bipolarnego pracującego w układzie WE.

Tranzystor bipolarny np. typu n-p-n, pracujący w układzie o wspólnym emiterze, którego charakterystyki przedstawiono na rys. 10, stanowi przełącznik (klucz) pokazany wcześniej na rys. 3b. W stanie włączenia (punkt D) przez tranzystor płynie zerowy prąd kolektora o pomijalnie małym natężeniu (odpowiada temu bardzo duża oporność R_{OFF}). Przybliżony schemat zastępczy układu w tym stanie ma postać z rys. 11a. Dostarczenie prądu bazy powoduje przepływ prądu kolektora: punkt pracy tranzystora przesuwa się wzdłuż prostej obciążenia do punktu C, zaś tranzystor zachowuje się jak element sterowany prądem (w tym zakresie w przybliżeniu liniowy). Jeśli prąd bazy osiągnie wartość większą od niezbędnej do przesunięcia punktu pracy do położenia C, to mówi się o nasyceniu tranzystora. Odpowiada to stanowi włączenia przełącznika. W stanie nasycenia napięcie U_{CE} jest bardzo małe, rzędu 0,1V i tranzystor stanowi oporność rzędu kilku lub kilkudziesięciu omów. W stanie nasycenia, napięcie $U_{BE} \approx 0,7V$, a więc potencjał kolektora jest mniejszy od potencjału bazy i złącze kolektorowe spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia (rys. 11b).

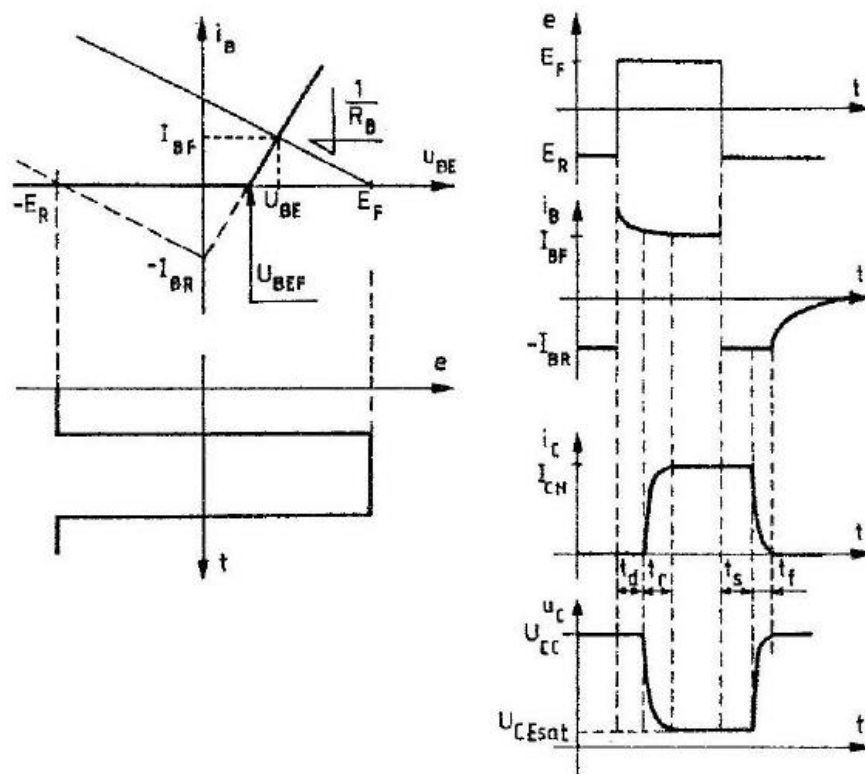


rys. 11. Schematy zastępcze tranzystora bipolarnego jako przełącznika

Szybkość przełączania tranzystorów jest w większym stopniu ograniczona efektami magazynowania ładunków niż w przypadku diod. W zakresie aktywnym pracy tranzystora kolektor jest spolaryzowany napięciem dodatnim względem bazy i nośniki prądu wstrzykiwane przez emiter do bazy dyfundują przez nią i dostają się do złącza kolektorowego. Jeśli napięcie złącza kolektorowego nie jest tak duże, by usunąć nośniki wstrzyknięte do bazy, to w bazie gromadzą się ładunki. W stanie nasycenia sam kolektor wstrzykuje dodatkowo nośniki do bazy, powiększając ładunek w bazie. Dlatego gdy trzeba zatkać tranzystor (rys. 12), to zanim prąd kolektora zacznie się zmniejszać, należy usunąć nadmiar ładunków z bazy. Stąd się bierze opóźnienie czasowe przy wyłączaniu tranzystora t_b . Jeśli napięcie sterujące nie spada do zera, lecz zmienia polaryzację, to początkowo popłynie prąd bazy w przeciwnym kierunku, przyspieszając proces usuwania ładunków nadmiarowych i zmniejszając czas przeciągania t_s tranzystora.

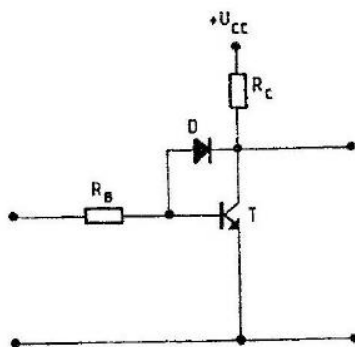
Skończony czas związany z dyfuzją nośników mniejszościowych przez bazę powoduje opóźnienie t_d wzrostu prądu kolektora po dostarczeniu sygnału włączającego tranzystor. Następnie wzrost prądu kolektora do wartości I_{CM} wymaga

czasu t_r (czas narastania impulsu prądu kolektora), a to ze względu na zależność wzmocnienia prądowego tranzystora od częstotliwości oraz wpływ pojemności złączy. Z podobnych powodów, po zniknięciu napięcia sterującego bazą lub zmianie jego polaryzacji i po upływie czasu przeciągania, obserwuje się skończony czas opadania t_f impulsu kolektora.



rys. 12. Punkt pracy tranzystora oraz przebiegi czasowe.

Czasy przełączania tranzystora zmniejsza się różnymi sposobami, głównie stosując tranzystory o wielkich częstotliwościach granicznych (o wąskiej bazie) oraz unikając nasycenia tranzystorów w stanie włączenia. Najprostszym sposobem takiego zabezpieczenia jest włączenie diody między kolektorem a bazą, jak na rys. 13.



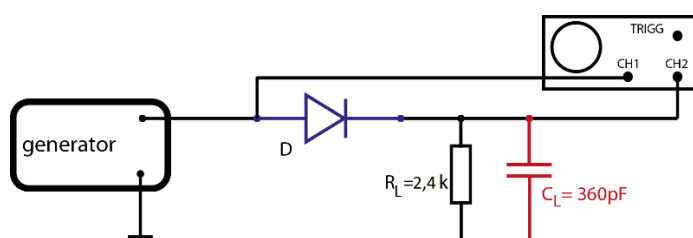
rys. 13. Podłączenie diody zabezpieczającej.

W stanie wyłączenia tranzystora dioda nie przewodzi. Ze wzrostem prądu bazy tranzystor zaczyna przewodzić i napięcie kolektora maleje. Gdy U_{CE} osiągnie wartość $U_{BE} - U_D$ (U_D – napięcie przewodzenia diody), to dioda zacznie przewodzić i uniemożliwi dalszy wzrost prądu bazy. Poprawę szybkości działania układu okupuje się zwiększeniem oporności klucza i mocy traconej w trakcie włączenia.

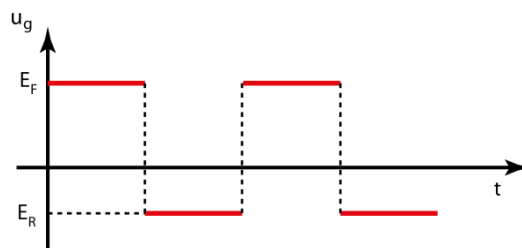
WYKONANIE ĆWICZENIA

I. Badanie diod jako przełączników

Schemat układu pomiarowego:



rys. 14. a) schemat układu do badania diody jako przełącznika



b) poziomy napięć sygnału testującego

W układzie tym należy dokonać pomiarów diod (m.in. prostowniczej oraz impulsowej) otrzymanych od prowadzącego.

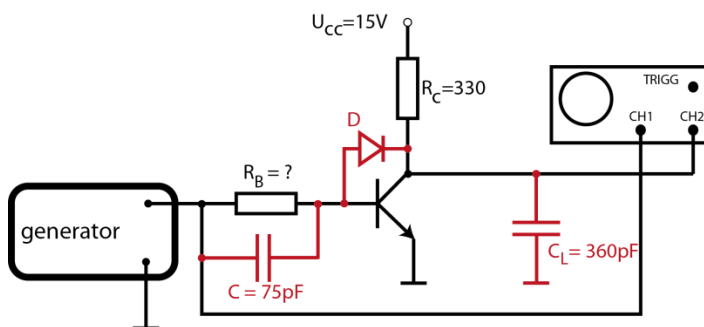
Na generatorze ustawić amplitudę sygnału prostokątnego na 5V. Poprzez regulację składowej stałej należy ustawić kolejno poniższe poziomy napięć (por. rys 14b)

	E_F	E_R	
a)	5V	0V	
b)	2,5V	-2,5V	
c)	1V	-4V	
d)	0	-5V	
e)	2,5V	-2,5V	z kondensatorem C

Dla każdego z przypadków należy:

- 1) Zarejestrować przebiegi w obu kanałach oscyloskopu przy częstotliwości generatora 50kHz.
- 2) Wyznaczyć czas wyłączenia diody $t_{OFF} = t_1 + t_2$ (patrz rys. 8).
- 3) Zaobserwować przebiegi dla coraz większej częstotliwości sygnału sterującego. Oszacować częstotliwość przy której dioda przestaje pracować jako przełącznik.

II. Badanie kluczy tranzystorowych



rys. 15. Schemat układu do badania kluczy tranzystorowych.

1) Zaprojektować przełącznik z kluczem tranzystorowym w ten sposób, by przy znanych $U_{CC}=+15V$ i oporności obciążenia $R_C=330\Omega$, tranzystor typu BC547 pracował w warunkach nasycenia w stanie włączenia (wykorzystać dane katalogowe tranzystora), jeśli prostokątny sygnał sterujący ma poziomy napięcie odpowiednio $E_F = +3,5V$, $E_R=0V$.

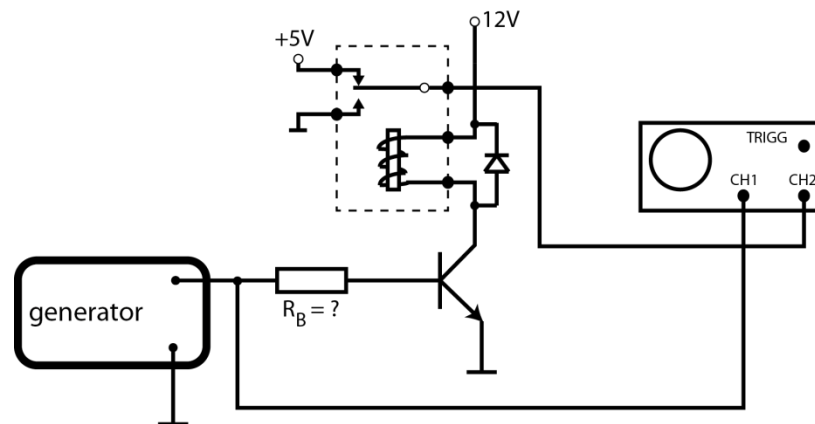
2) Połączyć układ z rys. 15. i zarejestrować przebiegi w obu kanałach oscyloskopu przy częstotliwości generatora 50kHz w następujących przypadkach:

- układ bez elementów dodatkowych
- układ z kondensatorem przyspieszającym C
- układ z diodą D
- układ z kondensatorem obciążającym C_L

3) Dla każdego z powyższych przypadków:

- wyznaczyć czasy: opóźnienia t_d , narastania t_r , opadania t_f , przeciągania t_s oraz napięcie nasycenia tranzystora U_{CEsat} (patrz rys. 12).
- oszacować graniczną częstotliwość przełączania układu przełączającego z tranzystorem nasyconym

III. Badanie przełącznika elektromechanicznego



Rys. 16. Schemat układu do badania przekaźnika elektromechanicznego.

- Zmierzyć charakterystyczne oporności przekaźnika elektromechanicznego otrzymanego od prowadzącego
 - Oporność cewki R_L
 - Oporność zwartych styków R_z
 - Oporność między stykami rozwartymi R_r
- Na podstawie zmierzonych wartości należy obliczyć wartość oporu R_B .
- Po zmontowaniu układu z rys. 16. zarejestrować przebiegi w obu kanałach oscyloskopu przy częstotliwości około **3Hz** i poziomach napięcia wejściowego $E_F = +3,5V$, $E_R=0V$.
- Wyznaczyć czas opóźnienia t_d oraz czas drgania styków t_c .

UWAGI

- Pomiarów czasów należy dokonać na zajęciach (wyeksportowany plik tekstowy, a tym bardziej graficzny może zawierać zbyt mało punktów by dokładnie odczytać odpowiednie czasy)

- Przebiegi, w miarę możliwości powinny być przedstawione na jednym wykresie (np. przebieg włączenia lub wyłączenia dla wszystkich diod).
- Zarejestrowany sygnał prądowy ma być przedstawiony jako sygnał prądowy (mimo, że oscyloskop rejestruje spadek napięcia na oporniku wzorcowym). Odpowiednie wartości napięć należy przeliczyć na wartości prądu i takie opisy powinny się znaleźć na odpowiednich przebiegach.