

Politechnika Łódzka
Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej

Instrukcja do ćwiczenia

Badanie elektronicznych układów zasilających

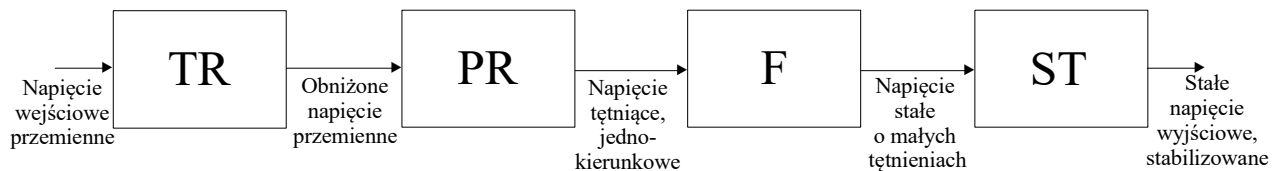
Cel ćwiczenia.

Poznanie budowy, zasady działania najprostszych układów zasilających wykorzystujących diody i tyrystory.

1. Podstawy teoretyczne.

1.1. Zasada działania zasilacza stabilizowanego.

Łatwość wytwarzania oraz przetwarzania energii elektrycznej zaowocowała powstaniem wielkiej liczby urządzeń zasilanych taką energią. Obecnie, szczególną rolę odgrywają urządzenia elektroniczne, bez których trudno sobie wyobrazić codzienne życie. Ze względu na sposób działania, urządzenia takie muszą być zasilane napięciem stałym o stosunkowo małej wartości (kilka, kilkanaście V). Aby skorzystać z sieci energetycznej (230V, 50Hz) należy zastosować układ odpowiednio przetwarzający napięcie zasilające. Do realizacji takiego zadania potrzebne są elementy półprzewodnikowe: diody, tyrystory. Każdy układ zasilający, nazywany często zasilaczem, powinien składać się z następujących elementów:



Rys. 1.1. Schemat blokowy zasilacza stabilizowanego.

- TR – transformator obniżający wartość napięcia;
- PR – prostownik – układ przekształcający napięcie przemienne na napięcie tętniące o wartości średniej różnej od zera – napięcie jednokierunkowe;
- F – filtr – układ zmniejszający tętnienia, wygładzający przebiegi;
- ST – stabilizator napięcia – układ utrzymujący stałą wartość napięcia wyjściowego, niezależnie od zmian wartości napięcia wejściowego i obciążenia.

W zależności od wymagań stawianych przebiegowi napięcia wyjściowego stosowane są różne rozwiązania bloków zasilaczy. W szczególnych przypadkach, podyktowanych głównie względami ekonomicznymi, rezygnuje się ze stabilizatora czy nawet filtru.

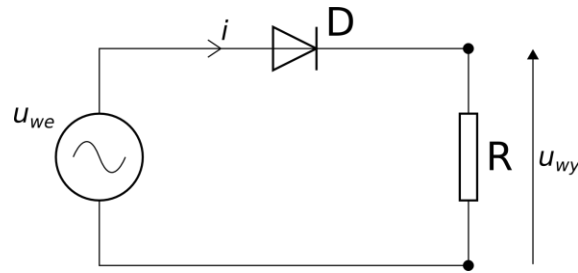
1.2. Podzespoły zasilacza stabilizowanego.

1.2.1. Układy prostownicze.

Zadaniem układów prostowniczych jest przekształcenie napięcia przemiennego (najczęściej sinusoidalnie zmiennego) o wartości średniej równej 0, w napięcie jednokierunkowe o wartości średniej różnej od zera. Do realizacji tego zadania najczęściej wykorzystywane są diody i tyrystory. Wynika to z charakterystycznej własności diod i tyrystorów – przepuszczania prądu elektrycznego tylko w jednym kierunku (w stanie przewodzenia).

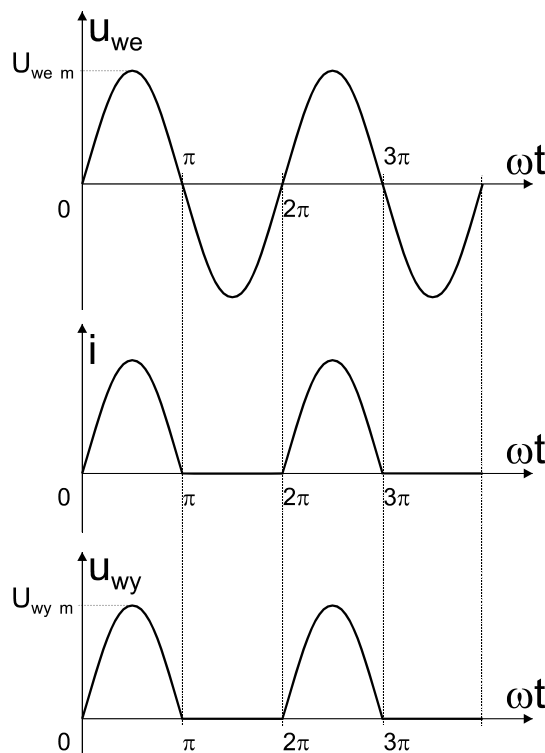
1.2.1.1. Prostownik jednopolówkowy.

Najprostszy układ prostownika jest przedstawiony na rys. 1.2:



Rys. 1.2. Schemat prostownika jednopolówkowego.

Dla ułatwienia rozważań przyjmujemy, że zastosowana dioda prostownicza jest diodą idealną tzn. jej rezystancja w stanie przewodzenia R_F jest równa zero, zaś rezystancja w stanie zaporowym R_R równa nieskończoność. Na wejście prostownika podawane jest napięcie sinusoidalnie zmienne $u_{we} = U_{wem} \sin \omega t$. W przedziale czasu $\omega t \in (0, \pi)$ dioda jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia (wyższy potencjał na anodzie, niższy na katodzie). Prąd ze źródła napięcia przemiennego płynie przez diodę i przez obciążenie (rezystor R). Napięcie wyjściowe jest takie samo jak wejściowe ($U_{wem} = U_{wym} = U_m$) ze względu na założenie $R_F = 0$ (w rzeczywistości napięcie wyjściowe jest mniejsze od wejściowego o spadek napięcia na przewodzącej diodzie, około 0,5V). W przedziale czasu $\omega t \in (\pi, 2\pi)$ dioda jest spolaryzowana w kierunku zaporowym (wyższy potencjał na katodzie) i nie przepuszcza prądu ($R_R = \infty$). Napięcie wyjściowe jest równe zero gdyż całe napięcie wejściowe odkłada się na diodzie. Przebiegi czasowe napięcia wejściowego i wyjściowego oraz prądu są przedstawione poniżej.



Rys. 1.3. Przebiegi napięcia wejściowego i wyjściowego oraz prądu w prostowniku jednopolówkowym.

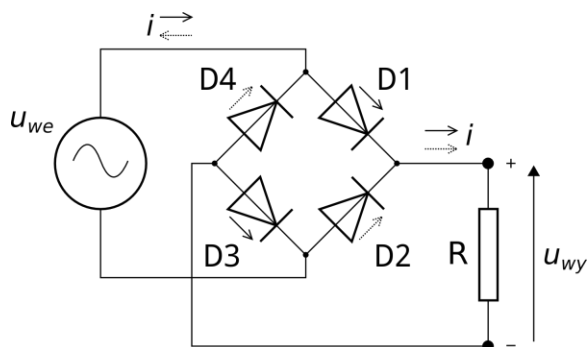
Wartość średnia napięcia wyjściowego jest równa:

$$U_{wy \text{ sr}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{T} \int_0^T u_{wy} dt = \frac{U_m}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_m}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_m}{\pi} \sim 0,32 U_m.$$

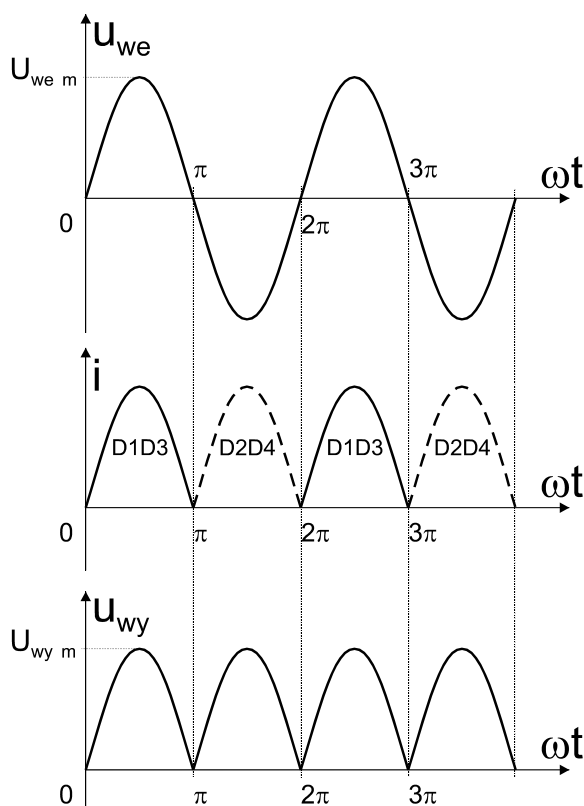
Miarą wartości średniej jest pole powierzchni obszaru ograniczonego wykresem funkcji $u_{wy}(\omega t)$, osią ωt oraz granicami przedziału całkowania $\langle 0, 2\pi \rangle$.

Wadą tego prostownika są duże tętnienia napięcia wyjściowego, a także mała wartość średnia napięcia wyjściowego ($0,32 U_m$).

1.2.1.2. Prostownik dwupółkowy.



Rys. 1.4. Schemat prostownika dwupółkowego w układzie mostka Graetza.



Rys. 1.5. Przebiegi napięcia wejściowego i wyjściowego oraz prądów w prostowniku dwupółkowym (mostek Graetza).

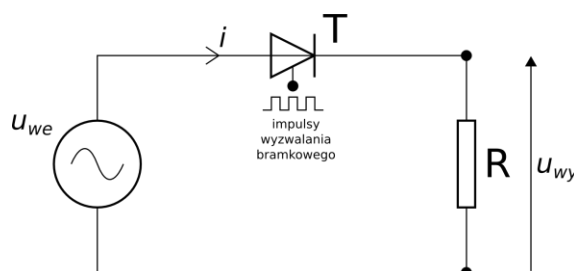
W przedziale czasu $\omega t \in (0, \pi)$ (dodatnia półfala napięcia wejściowego) przewodzą diody D1 i D3, diody D2 i D4 są w stanie zaporowym. Napięcie wyjściowe jest równe napięciu wejściowemu (w rzeczywistości napięcie wyjściowe jest pomniejszone o sumę spadków napięć na przewodzących diodach - ok. 1V). Dla ujemnej półfali napięcia wejściowego przewodzą diody D2 i D4, zaś diody D1 i D3 wchodzą w stan zaporowy. Napięcie wyjściowe jest równe wejściowemu co do wartości lecz ma przeciwny znak. Zatem dla obu półfal napięcia wejściowego prąd płynący przez obciążenie ma jednakowy kierunek. Wartość średnia napięcia wyjściowego jest dwa razy większa niż w prostowniku jednopołówkowym:

$$U_{wy \text{ } \acute{s}r} \stackrel{def}{=} \frac{1}{T} \int_0^T u_{wy} dt = \frac{U_m}{\pi} \int_0^\pi \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2U_m}{\pi} \sim 0,64U_m.$$

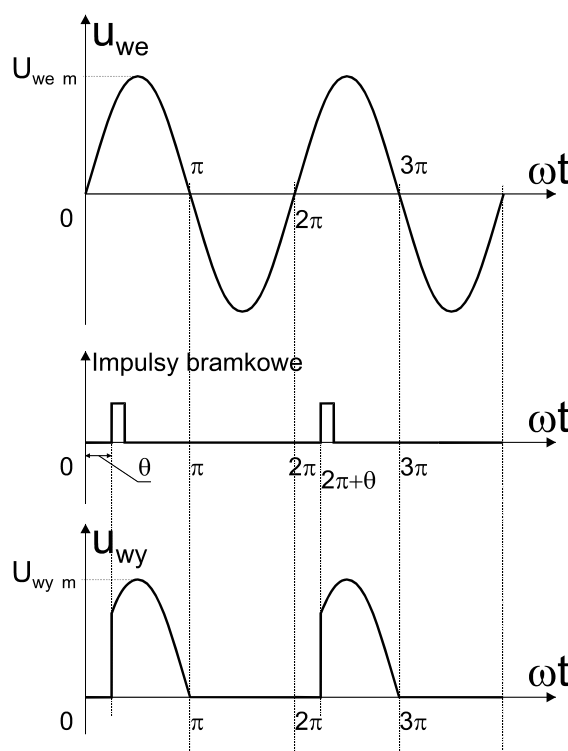
Prostownik w układzie mostkowym (Graetza) jest obecnie najczęściej stosowanym rozwiązaniem prostownika. Z tego powodu diodowe mostki Graetza produkowane są w postaci hybrydowej, jako zamknięty element o czterech wyprowadzeniach ($\sim, \sim, +, -$).

1.2.1.3. Prostownik jednopołówkowy sterowany.

Zastępując w prostowniku jednopołówkowym diodę tyrystorem otrzymujemy prostownik sterowany.



Rys. 1.6. Schemat prostownika jednopołówkowego sterowanego.

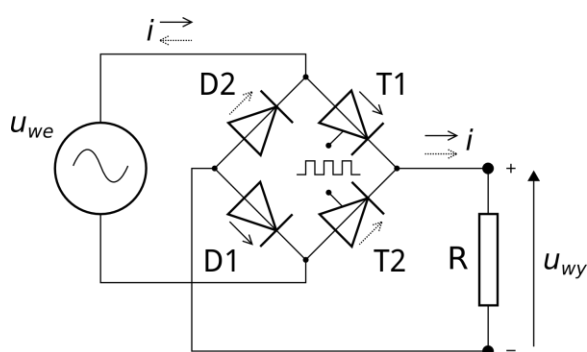


Rys. 1.7. Przebiegi czasowe w prostowniku jednopołówkowym sterowanym.

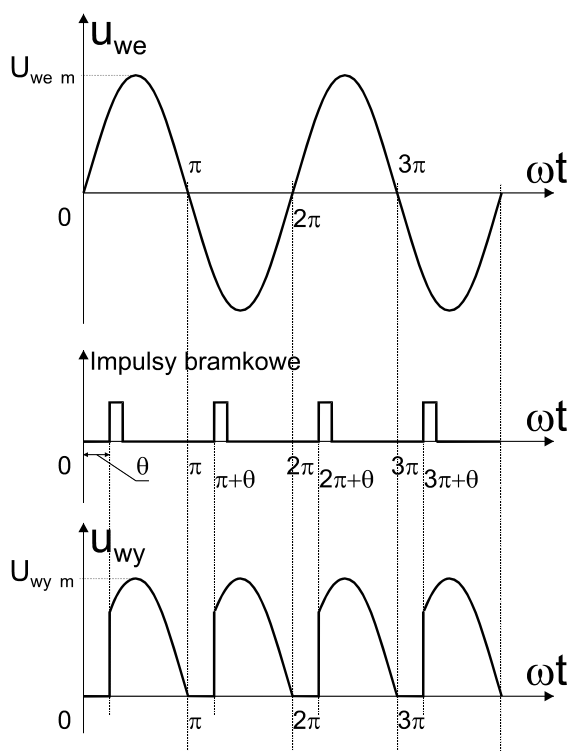
Na bramkę tyrystora podawany jest cyklicznie (w odstępach czasu równych okresowi przebiegu prostowanego) prądowy impuls wyzwalający (włączający tyrystor). Wyłączenie tyrystora następuje samoczynnie podczas zmiany znaku napięcia wejściowego (napięcie na tyrystorze osiąga wartość zerową), po czym proces się powtarza. Zmiana czasu między pojawieniem się dodatniej półfali napięcia a zboczem narastającym impulsu wyzwalającego (tzw. **kąt wyzwalania** θ - rys. 1.7) pozwala na regulację wartości średniej napięcia wyjściowego.

$$U_{wy \text{ śr}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{wy} dt = \frac{U_m}{2\pi} \int_0^\pi \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_m}{2\pi} (1 + \cos \theta) \text{ dla } \theta \in \langle 0, \pi \rangle.$$

1.2.1.4. Prostownik dwupółkowy sterowany (2T-2D).



Rys.1.8. Schemat prostownika 2T-2D.



Rys.1.9. Przebiegi czasowe w prostowniku 2T-2D.

Jeżeli w układzie mostkowym Graetza diody zostaną zastąpione tyrystorami, to powstanie prostownik dwupołkowy sterowany. Ze względów ekonomicznych stosuje się układ z dwoma tyrystorami i dwiema diodami tzw. prostownik 2T-2D. Jest to rozwiązanie całkowicie wystarczające, gdyż każdy z tyrystorów steruje prądem w jednej gałęzi. Podobnie jak w mostku Graetza przewodzą naprzemian pary: tyrystor T1, dioda D1 oraz tyrystor T2, dioda D2. Aby tyrystory weszły w stan przewodzenia, konieczne jest regularne podawanie na ich bramki impulsów wyzwalających (co π). Zmiana kąta wyzwalania θ powoduje zmianę wartości średniej napięcia wyjściowego zgodnie ze wzorem:

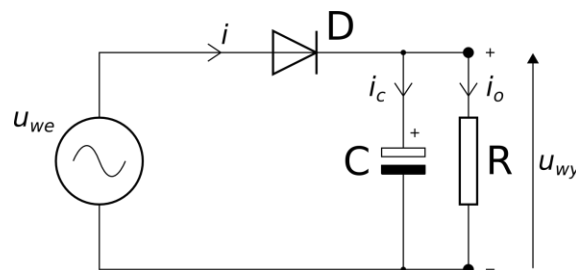
$$U_{wy\ sr} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{wy} dt = \frac{U_m}{\pi} \int_0^\pi \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \theta) \text{ dla } \theta \in \langle 0, \pi \rangle.$$

Najważniejszą zaletą prostowników sterowanych jest możliwość regulacji napięcia wyjściowego. Należy również dodać, że jest to praktycznie regulacja bezstratna. Dzięki temu prostowniki sterowane mogą być stosowane do regulacji napięcia w układach zasilających dużej mocy, układach sterowania prędkością obrotową silników, w energoelektronice. Wadą prostowników sterowanych jest kształt przebiegu napięcia wyjściowego. Jest to przebieg silnie zniekształcony. Aby nie dopuścić do przenoszenia zakłóceń wysokoczęstotliwościowych do zasilanych układów, należy stosować filtry o dużej skuteczności.

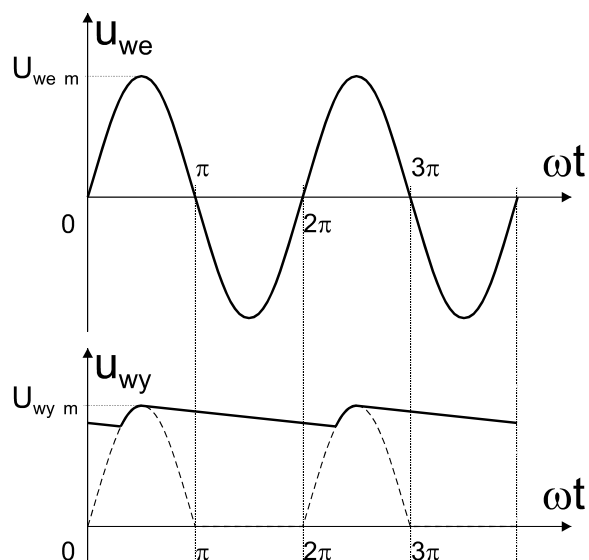
1.2.2. Układy filtrujące.

Z wcześniejszych rozważań wynika, że na wyjściu prostowników otrzymujemy napięcie jednokierunkowe. Przebieg takiego napięcia odbiega znacznie od przebiegu idealnego napięcia stałego (linia prosta). Aby wygładzić przebieg napięcia (zmniejszyć tętnienia) stosowane są najczęściej filtry dolnoprzepustowe. Są to układy, które przepuszczają sygnały (napięcie, prąd) o częstotliwościach mniejszych od częstotliwości granicznej. Wykorzystywane jest w nich zjawisko zmiany reaktancji elementów biernych (cewka, kondensator) przy zmianie częstotliwości. Najczęściej spotykane rozwiązania filtrów to filtry pojemnościowe, rezystancyjno-pojemnościowe, indukcyjne, pojemnościowo-indukcyjne.

1.2.2.1. Filtr pojemnościowy w prostowniku jednopołkowym.



Rys. 1.10. Schemat prostownika jednopołkowego z filtrem pojemnościowym.

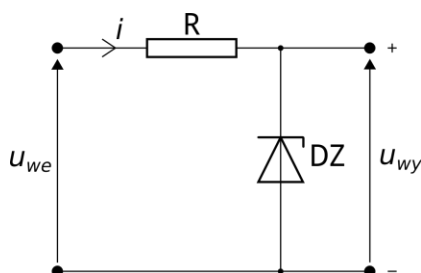


Rys. 1.11. Przebiegi napięcia i prądu w prostowniku z filtrem.

Po podaniu na układ dodatniej półfali napięcia dioda jest w stanie przewodzenia i przewodzi prąd, będący sumą prądu obciążenia i_o i prądu ładowania kondensatora i_c . Z chwilą osiągnięcia przez napięcie wartości maksymalnej U_m dioda przestaje przewodzić, gdyż napięcie na naładowanym kondensatorze staje się większe od chwilowej wartości napięcia wejściowego (wyższy potencjał na katodzie). Od tej chwili kondensator jest rozładowywany przez obciążenie (rezystor R). Prąd obciążenia $i_o = i_c$, a zatem napięcie wyjściowe maleje wykładniczo ze stałą czasową RC. Rozładowanie to ma miejsce aż do czasu zrównania się napięcia wejściowego i napięcia na kondensatorze. Dioda zaczyna znów przewodzić prąd $i = i_c + i_o$, kondensator jest ładowany prądem i_c , proces się powtarza. Amplituda tętnień jest uzależniona od stałej czasowej RC. Im większe jest obciążenie (mniejsza rezystancja R) tym amplituda tętnień staje się większa. Aby zmniejszyć tętnienia należy zwiększyć pojemność kondensatora C. Należy dążyć do jak największej wartości stałej czasowej RC. Podobne zjawiska będą miały miejsce w prostowniku dwupołówkowym z filtrem pojemnościowym. Proces ładowania i rozładowania kondensatora będzie się powtarzał dwa razy częściej.

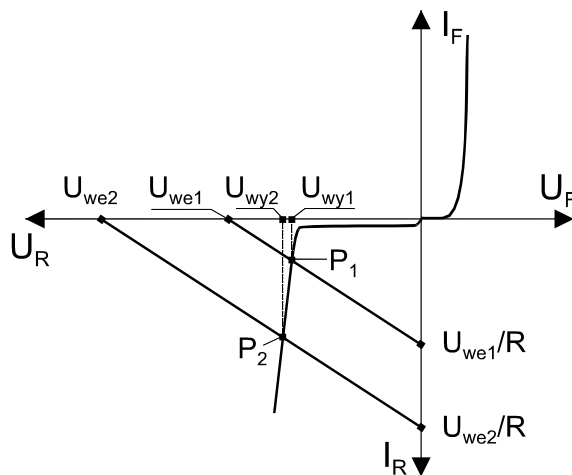
1.2.3. Stabilizatory napięcia.

W wyniku różnego rodzaju zakłóceń, wartość napięcia zasilającego (np. w sieci energetycznej) może się chwilowo zmieniać. W wielu przypadkach jest to zjawisko bardzo niepożądane. Konieczne staje się stosowanie układów, utrzymujących stałą wartość napięcia zasilającego niezależnie od zmian wartości napięcia wejściowego i zmian wartości prądu obciążenia. Zadanie takie realizują stabilizatory napięcia. Podstawowym elementem stosowanym w stabilizatorach napięcia jest dioda Zenera pracująca w obszarze przebicia. Schemat najprostszego stabilizatora napięcia przedstawia poniższy rysunek.



Rys. 1.12. Schemat stabilizatora napięcia.

Układ składa się rezystora R, ograniczającego prąd w układzie i diody Zenera DZ. Dioda Zenera, spolaryzowana zaporowo, powinna pracować na prostoliniowym odcinku charakterystyki w stanie przebicia. Aby tak było, napięcie wejściowe powinno być nie mniejsze niż napięcie Zenera U_Z . Napięcie na diodzie jest wtedy praktycznie stałe i nie zależy od płynącego przez nią prądu. Zasadę działania stabilizatora najłatwiej jest wyjaśnić korzystając z charakterystyk prądowo-napięciowych diody Zenera i opornika R.



Rys. 1.13. Analiza graficzna działania stabilizatora napięcia.

Charakterystyka prądowo-napięciowa opornika R przechodzi przez punkty: U_{we1} na osi napięcia i U_{we1}/R na osi prądu. Przecięcie tej charakterystyki z charakterystyką diody Zenera daje punkt pracy stabilizatora P_1 . Współrzędne punktu pracy pozwalają określić napięcie na diodzie czyli napięcie wyjściowe oraz prąd płynący przez diodę. Jeżeli napięcie wejściowe zostanie zwiększone do wartości U_{we2} to prosta (charakterystyka rezystora) przesunie się równolegle w lewo. Punkt pracy przesunie się po charakterystyce diody do punktu P_2 – praktycznie nie zmieni się napięcie na diodzie, wzrośnie tylko prąd. Im bardziej stroma jest część charakterystyki w obszarze przebicia, tym mniejsze będą zmiany napięcia wyjściowego. Jakość stabilizacji określa tzw. **współczynnik stabilizacji** k_s . Jest on wyrażony wzorem:

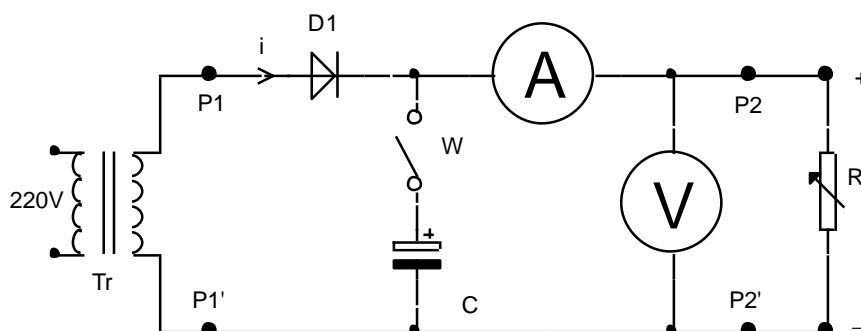
$$k_s = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{we}} ;$$

gdzie ΔU_{wy} – zmiana napięcia wyjściowego odpowiadająca zmianie napięcia wejściowego ΔU_{we} . Stabilizacja będzie tym lepsza, im mniejsza będzie wartość współczynnika k_s .

2. Badania laboratoryjne.

2.1. Badanie prostownika jednopółówkowego.

Układ połączeń.



Przebieg pomiarów.

Połączyć układ wg powyższego schematu. Za pomocą oscyloskopu zaobserwować przebiegi napięcia wejściowego (kanał Y oscyloskopu włączony między punkty P1,P1') i napięcia wyjściowego (punkty P2,P2') dla wyłączanego i włączonego kondensatora. Narysować, zachowując proporcje, obserwowane przebiegi. Dla kilku wartości rezystancji obciążenia R, podanych w instrukcji dodatkowej, zmierzyć wartości prądu i napięcia w układzie (przy wyłączonym i włączonym kondensatorze). Wyniki zanotować w tabeli:

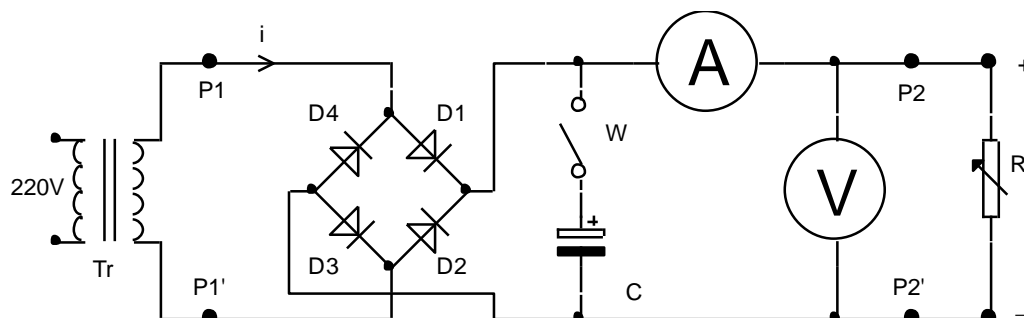
Tabela 2.1

R	U_{wy}	I_{wy}	$U_{wy C}$	$I_{wy C}$
[kΩ]	[V]	[mA]	[V]	[mA]

Narysować charakterystykę wyjściową $U_{wy}=f(I_{wy})$ dla prostownika bez filtru i prostownika z filtrem pojemnościowym.

2.2. Badanie prostownika dwupółkowego.

Układ połączeń.



Przebieg pomiarów.

Połączyć układ wg powyższego schematu. Za pomocą oscyloskopu zaobserwować przebiegi napięcia wejściowego (kanał Y oscyloskopu włączony między punkty P1,P1') i napięcia wyjściowego (punkty P2,P2'), dla wyłączanego i włączonego kondensatora. Narysować, zachowując proporcje, obserwowane przebiegi. Dla kilku wartości rezystancji obciążenia R, podanych w instrukcji dodatkowej, zmierzyć wartości prądu i napięcia w układzie (przy wyłączonym i włączonym kondensatorze). Wyniki zanotować w tabeli:

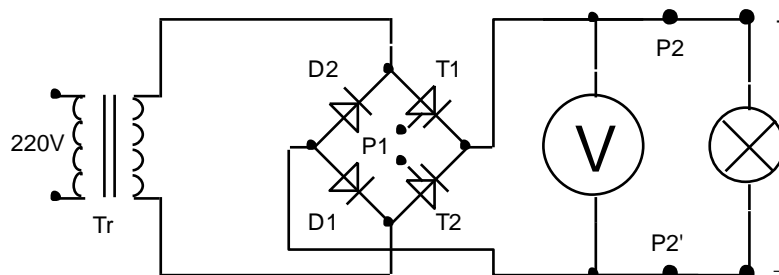
Tabela 2.2

R [kΩ]	U_{wy} [V]	I_{wy} [mA]	$U_{wy C}$ [V]	$I_{wy C}$ [mA]

Narysować charakterystykę wyjściową $U_{wy}=f(I_{wy})$ dla prostownika bez filtru i prostownika z filtrem pojemnościowym.

2.3. Badanie prostownika sterowanego 2T-2D.

Układ połączeń.



Przebieg pomiarów.

Połączyć układ wg powyższego schematu. Zaobserwować na ekranie oscyloskopu bramkowe impulsy wyzwajające oraz przebiegi napięcia wyjściowego. Dla kilku wartości kąta wyzwajania θ zmierzyć wartość średnią napięcia wyjściowego i narysować przebiegi czasowe. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli:

Tabela 2.3

$U_{wy\ m} = \dots\dots\dots$

θ	$U_{wy\ pom}$	$U_{wy\ obl}$
[deg]	[V]	[V]

Obliczyć na podstawie poniższego wzoru wartość średnią napięcia wyjściowego.

$$U_{wy\ obl} = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \theta); \text{ dla } \theta \in \langle 0, \pi \rangle.$$

3. Przykładowe pytania kontrolne.

- Wyjaśnić rolę diod i tyrystorów w układach zasilających.
- Omówić działanie prostowników niesterowanych.
- Omówić działanie prostowników sterowanych.
- Wyjaśnić zasadę działania filtra pojemnościowego.
- Przedstawić analizę graficzną pracy stabilizatora napięcia.