



Politechnika Wroclawska

Laboratorium Metrologii

Ćwiczenie nr 4

Podstawowe parametry źródeł prądowych i napięciowych.

I. Zagadnienia do przygotowania na kartkówkę:

1. Źródło napięciowe idealne – definicja, symbole. Schemat i opis rzeczywistego źródła napięciowego.
2. Źródło prądowe idealne – definicja, symbole. Schemat i opis rzeczywistego źródła prądowego.
3. Rodzaje chemicznych źródeł napięcia. Charakterystyka prądowo-napięciowa typowego ogniwa.
4. Zasada działania prostownika. Zdefiniować współczynnik tętnień.
5. Omówić sposób pomiaru rezystancji wewnętrznej źródła napięciowego. Podać zależność, z której wyznacza się tą rezystancję.
6. Charakterystyka napięciowo-prądowa typowego zasilacza laboratoryjnego.

Uwaga! Na zajęcia należy przynieść 5 arkuszy papieru milimetrowego formatu A4.

II. Program ćwiczenia:

1. Pomiar charakterystyk obciążalności źródeł napięć i prądów stałych.
2. Wyznaczanie rezystancji wewnętrznej źródeł napięciowych.
3. Pomiar współczynnika tętnień źródeł napięciowych.

III. Literatura:

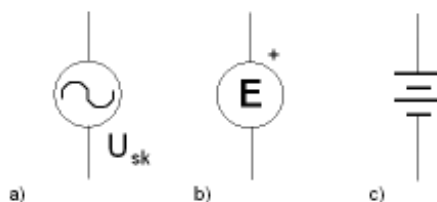
1. A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki, *Metrologia elektryczna*, WNT, Warszawa 1998.
2. A. Czerwiński, *Akumulatory, baterie, ogniwa*, WKŁ, Warszawa 2005

1. Wstęp

1.1 Definicje

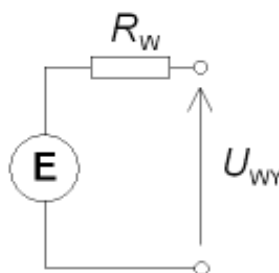
Jednym z najbardziej podstawowych elementów w elektronice jest źródło energii elektrycznej. Ze względu na sposób dostarczania tej energii źródła możemy podzielić na dwa rodzaje: źródła napięciowe oraz źródła prądowe.

Źródłem napięciowym (idealnym) nazywamy element, na którego zaciskach występuje napięcie elektryczne o nieziennej wartości bez względu na obciążenie jakie podłączymy do zacisków. Źródło napięciowe oznaczamy na schematach elektrycznych za pomocą jednego z poniższych symboli:



Symbol a) oznacza źródło napięcia zmiennego, symbole b) i c) źródło napięcia stałego. Często przyjmuje się również konwencję, iż symbol c) oznacza zasilanie bateryjne lub akumulatorowe. Jeśli na schemacie nie jest oznaczona polaryzacja źródła (a więc bieguny + i -) przyjmuje się, iż biegunem dodatnim jest biegun na górze rysunku. W przypadku symbolu c) biegun dodatni oznaczony jest dłuższą kreską poziomą.

Z zasady działania wnioskujemy iż źródło napięciowe musiałyby mieć nieskończony zapas energii oraz dla obciążeń o rezystancji dążącej do zera musiałyby zapewniać nieskończenie duży prąd (zgodnie z prawem Ohma). Tego typu obiekt nie jest możliwy do realizacji fizycznej, w związku z czym wprowadza się definicję **rzeczywistego źródła napięciowego**. W najprostszym możliwym modelu źródła rzeczywistego przyjmuje się, iż ma ono dwa parametry: siłę elektromotoryczną oraz rezystancję wewnętrzną.

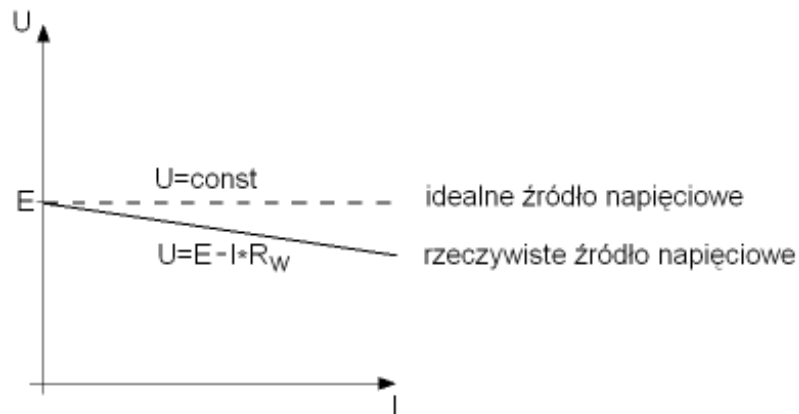


Siłę elektromotoryczną E (w skrócie SEM) definiujemy jako **napięcie wyjściowe niepracującego źródła** a więc napięcia na zaciskach wyjściowych źródła gdy nie jest pobierany z niego żaden prąd. Z fizycznego punktu widzenia siła elektromotoryczna jest siłą jaka działa na nośniki ładunku elektrycznego aby mogły się one poruszać w polu elektrycznym źródła (umowne ładunki dodatnie poruszają się od + do -).

Rezystancja wewnętrzna źródła modeluje straty energii zachodzące we wnętrzu źródła podczas jego pracy. Napięcie wyjściowe źródła jest odwrotnie proporcjonalne do pobieranego prądu i dane jest zależnością:

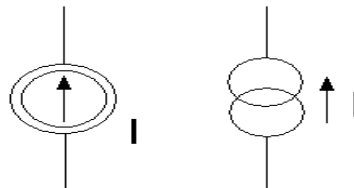
$$U_{wy} = E - I_{wy} \cdot R_w$$

Charakterystykę napięciowo-prądową (zależność napięcia od prądu) idealnego i rzeczywistego źródła napięciowego przedstawia rysunek.

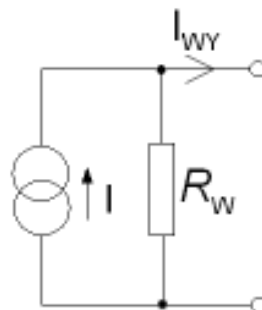


Elementem analogicznym do źródła napięciowego jest źródło prądowe. Źródła prądowe są znacznie rzadziej spotykane w elektronice z dwóch powodów – źródła chemiczne energii elektrycznej (baterie, akumulatory) to przede wszystkim źródła napięciowe a źródła inne niż chemiczne pobierają przeważnie energię z sieci energetycznej, która jest również źródłem napięciowym..

Źródłem prądowym (idealnym) nazywamy element, który wymusza pomiędzy swoimi zaciskami prąd elektryczny o niezmiennym natężeniu bez względu na obciążenie jakie podłączymy do tego źródła. Źródło prądowe oznaczamy na schematach elektrycznych za pomocą jednego z poniższych symboli:



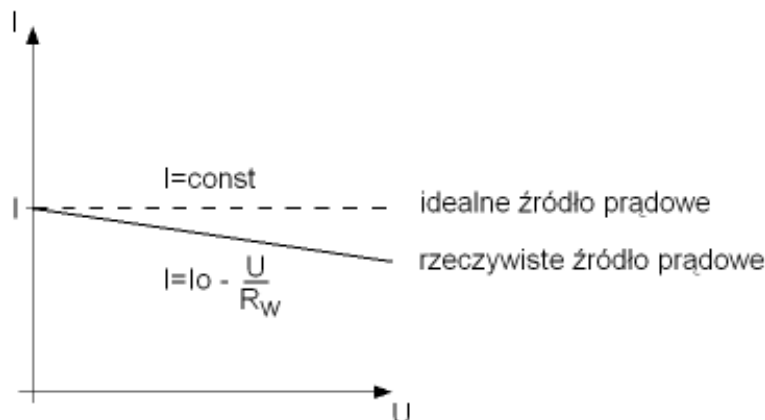
Przyjmujemy, iż prąd wymuszany przez źródło płynie w kierunku oznaczonym strzałką. W przypadku źródła prądowego również nie jest możliwa jego fizyczna realizacja. W przypadku rezystancji obciążenia dążącej do nieskończoności źródło posiadałoby na swoich zaciskach nieskończenie wielkie napięcie. W związku z tym do zamodelowania rzeczywistości używamy pojęcia **rzeczywistego źródła prądowego**.



Prąd wyjściowy rzeczywistego źródła prądowego jest równy:

$$I_{wy} = I - \frac{U_{wy}}{R_w}$$

Charakterystykę prądowo-napięciową (zależność prądu od napięcia) idealnego i rzeczywistego źródła napięciowego przedstawia rysunek.



Z pojęciami źródła napięciowego oraz źródła prądowego związane jest twierdzenie Thevenina oraz twierdzenie Nortona.

Twierdzenie Thevenina mówi nam, iż dowolny układ elektryczny w postaci dwójnika (elementu z dwoma zaciskami) możemy zastąpić za pomocą źródła napięciowego (rzeczywistego) o sile elektromotorycznej równej napięciu między rozwartymi zaciskami wyjściowymi takiego układu i rezystancji wewnętrznej równej rezystancji tego układu po usunięciu wszystkich źródeł energii.

Twierdzenie Nortona mówi nam z kolei, iż dowolny układ elektryczny w postaci dwójnika możemy zastąpić za pomocą źródła prądowego (rzeczywistego) o natężeniu równym natężeniu prądu płynącego pomiędzy zwartymi zaciskami wyjściowymi takiego układu i rezystancji wewnętrznej równoległej równej rezystancji tego układu po usunięciu wszystkich źródeł energii.

Przez usunięcie źródeł energii rozumiemy zwarcie wszystkich źródeł napięciowych oraz rozwarcie wszystkich źródeł prądowych.

1.2 Rzeczywiste źródła napięciowe

Rzeczywiste źródła napięciowe możemy podzielić na:

- źródła chemiczne – baterie, akumulatory;
- źródła elektromagnetyczne - prądnice prądu stałego i zmiennego;
- źródła termoelektryczne – termoogniwa, termopary;
- źródła fotoelektryczne – tzw. fotoogniwa.

Źródła chemiczne (ogniwa) działają na zasadzie reakcji chemicznych, w których następuje przeniesienie elektronów pomiędzy reagentami. Metalowa elektroda po zanurzeniu do roztworu elektrolitu przyjmuje określony potencjał elektryczny (ściśle związany z zastosowanymi materiałami). Jest to wynik oddziaływań atomów i elektronów na powierzchni metalu z jonami i cząsteczkami roztworu. Elektroda wraz z elektrolitem w którym jest zanurzona stanowi tzw. **półogniwo**. Układ dwóch półogniw połączonych zewnętrznym ob-

wodem elektrycznym nazywamy **ogniwem galwanicznym**. Ogniwa te są zwykle oddzielone od siebie porowatą przegrodą lub innym separatorem umożliwiającym tylko transport jonów (nośników ładunku w roztworze) pomiędzy elektrodami. Każdy rodzaj ogniwa ma ściśle przyporządkowany potencjał własny – dodatni lub ujemny. Łącząc ze sobą wiele ogniw możemy otrzymywać niemalże dowolne napięcia.

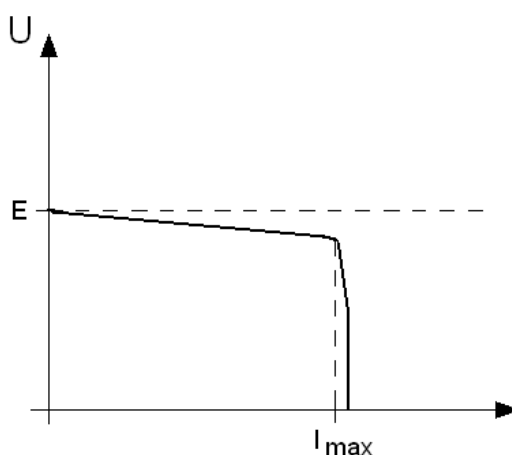
Chemiczne źródła napięcia dzielimy na trzy grupy:

- **ogniwa pierwszego rodzaju** (tzw. ogniwa pierwotne, baterie) działają jako źródła elektryczności bez uprzedniego ładowania z zewnętrznego źródła. Pobór energii z takiego ogniwa związany jest z nieodwracalnymi reakcjami chemicznymi. Ogniwa takie po rozładowaniu, czyli po całkowitej przemianie reagentów nie nadają się do powtórnego użytku.

- **ogniwa drugiego rodzaju** (tzw. ogniwa odwracalne, akumulatory) dostarczają energię elektryczną poprzez reakcje chemiczne odwracalne. Po rozładowaniu takiego ogniwa możemy za pomocą prądu elektrycznego z zewnętrznego źródła wymusić reakcję odwrotną do zachodzącej normalnie i przywrócić ogniwo do stanu naładowanego. Przeważnie podczas procesu ładowania i rozładowywania część reagentów zmienia się w produkty uboczne i z biegiem czasu pojemność takiego ogniwa zmniejsza się. Z tego też względu ogniwa drugiego rodzaju mają ograniczoną liczbę możliwych cykli ładowania i rozładowania (kilkaset do kilku tysięcy).

- **ogniwa paliwowe** działają podobnie do ogniw pierwszego rodzaju, jednakże do ich pracy potrzebne jest ciągle dostarczanie reagentów i odprowadzanie produktów ubocznych. Ogniwa tego typu są bardzo rzadko stosowane w elektronice.

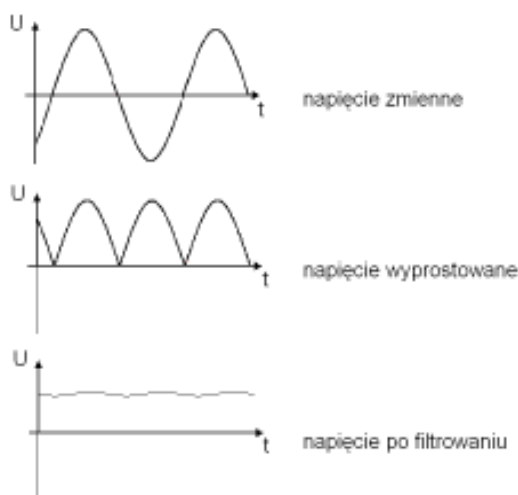
Cechą charakterystyczną chemicznych źródeł napięcia jest **bardzo stabilne napięcie wyjściowe w postaci napięcia stałego**. Jako stabilność rozumiemy brak jakichkolwiek wahań tego napięcia oraz wszelkich zakłóceń. Do minusów źródeł chemicznych (ogniw) musimy zaliczyć ograniczoną **pojemność** i związany z tym powolny spadek napięcia wyjściowego podczas pracy postępujący wraz z procesem rozładowywania się ogniwa. Pojemność ogniwa chemicznego podajemy w *amperogodzinach* (Ah). Jest to jednostka określająca jak duży prąd można pobrać z tego ogniwa ażeby rozładowanie do zera trwało równo godzinę. Jeśli chcemy takie ogniwo rozładować w przeciągu dwóch godzin musimy pobrać prąd dwa razy mniejszy itd. Ogniwa chemiczne posiadają również wyraźnie ograniczoną maksymalną obciążalność – tzw. **maksymalny prąd chwilowy**. Przy próbie poboru prądu większego od tej wartości napięcie ogniwa chemicznego spada do zera. Typowa charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa chemicznego przedstawiona jest na rysunku poniżej.



Źródła elektromagnetyczne napięcia tworzy się na wiele różnych sposobów. W zastosowaniach w elektronice użytkowej korzystamy przeważnie z sieci energetycznej, która jest źródłem napięcia przemiennego sinusoidalnego 230 V o częstotliwości 50 Hz. Sposób

realizacji takiego źródła jest problemem zakładu energetycznego dostarczającego nam prąd. Aby zaaplikować tego typu źródło energii stosujemy różnego **przekształtniki**: na przykład prostowniki lub przetwornice.

Prostownikiem nazywamy układ zmieniający napięcie przemiennie sinusoidalne na napięcie zmienne o jednym znaku, które w kolejnym kroku jest przemieniane w napięcie stałe. Tego typu układy spotykamy w większości urządzeń elektronicznych z jakimi mamy na co dzień: w zasilaczach, ładowarkach itp. Kolejne etapy działania takiego układu ilustruje poniższy rysunek:



Napięcie sieci energetycznej jest zmniejszane za pomocą transformatora do napięcia o tym samym kształcie ale mniejszej amplitudzie, następnie napięcie wyjściowe transformatora jest prostowane i w ostatnim etapie filtrowane (np. za pomocą kondensatorów). Jak widać na rysunku napięcie wyjściowe prostownika nie jest jednak napięciem idealnie stałym. Występują tzw. **tętnienia** wynikające z niedokładnego odfiltrowania. Tętnienia są parametrem charakterystycznym każdego prostownika decydującym o jego jakości. Definiujemy tzw. **współczynnik tętnień**, który określa jakość stałego napięcia wyjściowego:

$$k_t = \frac{u(t)}{U}.$$

Współczynnik tętnień jest stosunkiem wartości skutecznej napięcia zmiennego na wyjściu prostownika do wartości napięcia stałego. Jeśli założymy, iż tętnienia na wyjściu prostownika mają charakter sinusoidalny, możemy w prosty sposób dokonać pomiaru współczynnika tętnień mierząc napięcie wyjściowe najpierw woltomierzem wartości skutecznej napięcia zmiennego a następnie woltomierzem napięcia stałego. Iloraz tych dwóch wartości da nam w efekcie szukany współczynnik.

1.3 Stabilizatory

Stosowane w elektronice źródła napięciowe chemiczne oraz prostowniki mają charakterystyki zbliżone do rzeczywistego źródła napięcia (a więc cechują się rezystancją wewnętrzną). Największą wadą rzeczywistego źródła napięcia jest zależność napięcia wyjściowego od pobieranego prądu – a więc od rezystancji obciążenia. Problem ten rozwiązuje się stosując na wyjściu takich źródeł napięciowych stabilizatory.

Stabilizatorem nazywamy układ elektroniczny odpowiedzialny za utrzymywanie swojego napięcia wyjściowego na stałym poziomie, bez względu na wahania napięcia wejściowego.

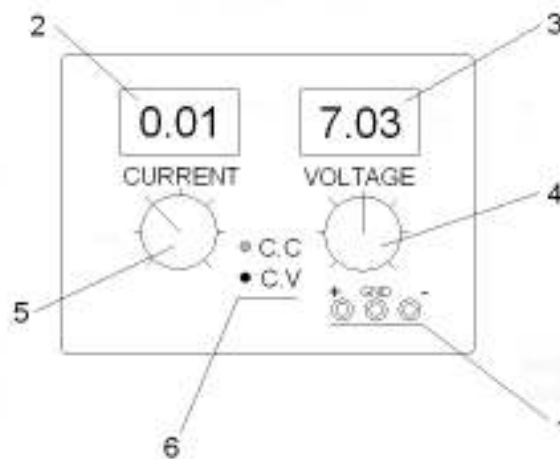
wego oraz bez względu na przyłączone obciążenie. Rzeczywiste stabilizatory posiadają oczywiście parametry graniczne, a więc zbiór warunków, w których będą w stanie spełnić swoją rolę. Do parametrów granicznych stabilizatora zalicza się:

- maksymalne i minimalne napięcie wejściowe,
- maksymalny możliwy prąd obciążenia.

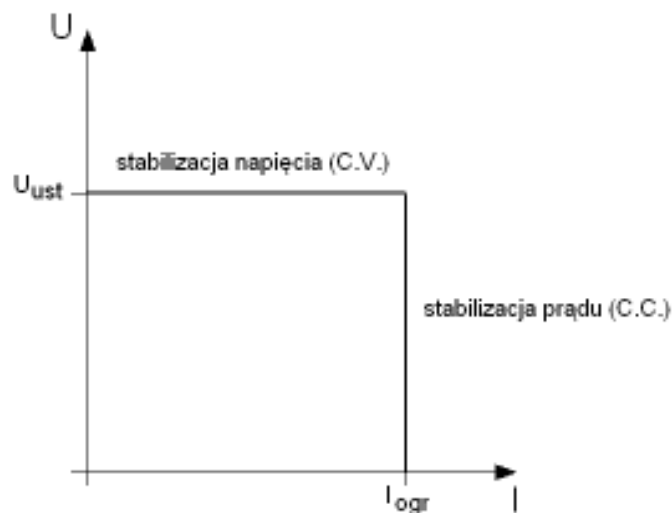
Jeśli zapewnimy napięcie wejściowe mieszczące się w określonych granicach oraz nie będziemy przekraczać maksymalnego obciążenia źródło napięciowe stabilizowane będzie zachowywać się w przybliżeniu jak idealne źródło napięcia.

1.4 Zasilacz laboratoryjny

W laboratoriach badawczych stosuje się najczęściej źródła napięciowe o bardzo rozbudowanych układach stabilizacji i sterowania parametrami wyjściowymi. Urządzenie takie spotykane jest zwykle w postaci zasilacza laboratoryjnego. Płytę czołową typowego zasilacza przedstawiono na rysunku poniżej:



Do zrozumienia zasad obsługi zasilacza laboratoryjnego potrzebna jest jego charakterystyka napięciowo-prądowa:



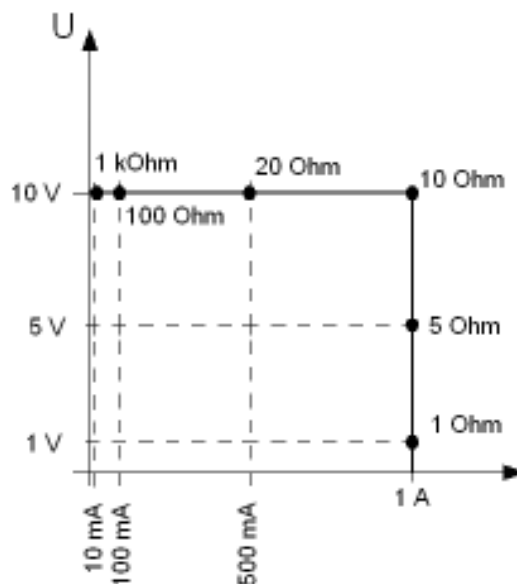
Zasilany układ podłączamy do zacisków (1) + oraz -. Zacisk środkowy, GND jest zaciskiem tzw. uziemienia. Jest on połączony z obudową zasilacza i w większości prostych zastosowań nie używamy tego zacisku. Na wyświetlaczach podany jest aktualnie pobierany z zasilacza prąd (2) oraz napięcie (3) pomiędzy zaciskami + i -.

Zasilacz działa jako źródło napięciowe jeśli pobierany jest prąd mniejszy niż ustawiany pokrętkiem (5) **prąd ograniczenia**. Praca w trybie stabilizacji napięcia (źródło napięciowe) sygnalizowana jest zapaleniem się diody (6) opisanej jako C.V. (ang. *constant voltage*). Po przekroczeniu prądu ograniczenia I_{ogr} (a więc zgodnie z prawem Ohma jeśli podłączona rezystancja jest zbyt mała) zasilacz przechodzi w tryb stabilizacji prądu. Jest to sygnalizowane zapaleniem się diody (6) oznaczonej jako C.C. (ang. *constant current*). Od tego momentu zasilacz pracuje jako źródło prądowe.

W trybie pracy jako źródło napięciowe napięcie wyjściowe jest stałe i niezmienne a prąd zależy od obciążenia, w trybie pracy jako źródło prądowe prąd jest stały a napięcie zależy od obciążenia.

Przykład 1. Do zacisków zasilacza laboratoryjnego przyłączono rezystor zmienny (potencjometr), który może przyjmować wartości od 1000 do 0 Ω . Ustawiono napięcie wyjściowe 10 V oraz ograniczenie prądowe 1 A. Wykreślić charakterystykę napięciowo-prądową takiego źródła.

Rozwiązanie. Po ustawieniu potencjometru na wartość 1000 Ω z zasilacza pobierany będzie prąd 10 mA. Jest on mniejszy od wartości ograniczenia prądowego a więc zasilacz będzie pracował jako źródło napięciowe. Napięcie na jego zaciskach będzie wynosić 10 V. Zmniejszając wartość rezystora zmiennego (potencjometru) do 100 Ω pobierzemy prąd 100 mA. Jest to wciąż mniej niż ograniczenie prądowe. Napięcie na zaciskach zasilacza nadal będzie wynosić 10 V. Przy 20 Ω uzyskamy prąd równy 0,5 A. Dalej zmniejszając wartość rezystancji obciążenia np. do 10 Ω uzyskamy prąd równy 1 A. Jest to prąd graniczny, w tym punkcie zasilacz przejdzie w tryb stabilizacji prądu. Jest to ostatni punkt, w którym napięcie jest równe 10 V. Redukując rezystancję potencjometru do 5 Ohm uzyskamy 5 V spadku napięcia na zaciskach wyjściowych. Po zmniejszeniu rezystancji obciążenia do 1 Ω prąd płynący pomiędzy zaciskami zasilacza będzie wynosił nadal 1 A, jednakże napięcie wyjściowe zmniejszy się do 1 V. Dalej redukując wartość obciążenia aż do zera będziemy zmniejszać napięcie wyjściowe aż do uzyskania braku potencjału na zaciskach wyjściowych (prąd wciąż będzie płynął!).



Przykład 2. Jakie należy ustawić ograniczenie prądowe aby móc zasilić rezystor o wartości 50 Ω napięciem stałym o wartości 5 V.

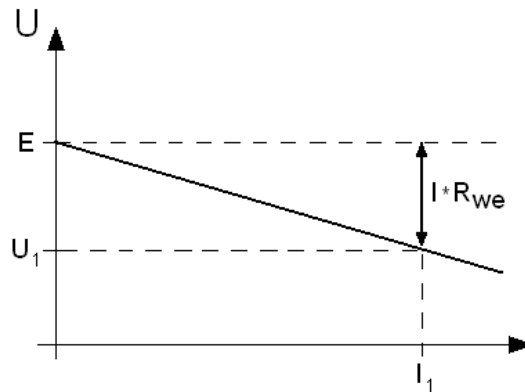
Rozwiązanie. Zgodnie z prawem Ohma:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{5V}{50\Omega} = 0,1A$$

Przy zasilaniu rezystora o wartości 50Ω napięciem stałym o $5 V$ popłynie przez niego prąd o natężeniu $100 mA$. Taki też prąd będzie wymuszony na zaciskach zasilacza przez rezystor. Aby zasilacz mógł pracować w trybie źródła napięciowego (C.V.) należy ustawić ograniczenie prądowe na dowolną wartość większą niż $100 mA$. W praktyce ustawiamy to ograniczenie na wartość niewiele większą, gdyż ograniczenie prądowe stanowi zabezpieczenie przed przetężeniem, które mogłoby doprowadzić do zniszczenia zasilanego układu.

1.5 Pomiar rezystancji wewnętrznej źródła napięciowego

Rezystancja wewnętrzna typowego źródła napięciowego zawiera się przeważnie w zakresie od $100 m\Omega$ do 10Ω . Ponieważ nie ma możliwości pomiaru tej rezystancji za pomocą omomierza, musimy korzystać z innych metod. Jedną z metod pomiaru jest odczytanie tej rezystancji z charakterystyki napięciowo-prądowej źródła:



Ponieważ jednak nie znamy wartości siły elektromotorycznej E , gdyż w trakcie każdego pomiaru obciążamy źródło chociażby woltomierzem, do odczytania rezystancji wewnętrznej potrzebne nam są wartości prądów i napięć w dwóch punktach charakterystyki. Wtedy:

$$U_1 = E - I_1 R_{we}$$

$$U_2 = E - I_2 R_{we}$$

Porównując oba równania otrzymujemy:

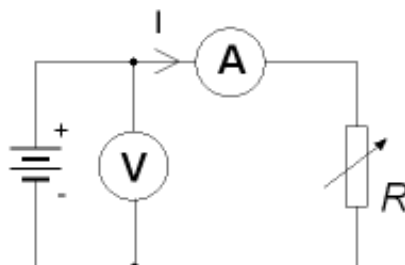
$$U_1 + I_1 R_{we} = U_2 + I_2 R_{we}$$

Skąd:

$$R_{we} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}$$

2. Przebieg ćwiczenia

1. Korzystając z **opornicy dekadowej** zmierzyc charakterystykę napięciowo-prądową zasilacza stabilizowanego 9V. Przed rozpoczęciem pomiarów ustawić rezystancję opornicy na 800 Ω . Pomiaru dokonać dla prądów od 10 mA do 100 mA z krokiem 10 mA. Prąd regulujemy zmieniając rezystancję. Zapisać za każdym razem ustaloną rezystancję (odczytać z opornicy), zmierzony prąd i zmierzone napięcie. Wyniki zebrać w tabeli.



Po zakończeniu pomiaru odłączyć opornicę.

2. W układzie jak poprzednio zmierzyc charakterystykę napięciowo-prądową akumulatora 12V 1.3Ah. Skorzystać z **rezystora zmiennego**. Ustawić woltmierz na zakres 1000V (najwyższy). Pomiaru dokonywać po ustabilizowaniu się napięcia kolejno dla wartości prądu od 60 mA do 160 mA z krokiem 10 mA. Wszystkich pomiarów dokonać w jednej serii bez powtarzania. Zapisywać **tylko** zmierzony prąd i zmierzone napięcie. Wyniki zebrać w tabeli. W amperomierzu pomiarów dokonywać z włączonym automatycznym wyborem zakresu.
3. W układzie jak poprzednio zmierzyc charakterystykę napięciowo-prądową zasilacza laboratoryjnego. Skorzystać z **rezystora zmiennego**. W woltmierzu i amperomierzu pomiarów dokonywać z włączonym automatycznym wyborem zakresu. Przed podłączeniem układu ustawiamy napięcie wyjściowe zasilacza na odpowiednią wartość. Ograniczenie prądowe ustawiamy po zmontowaniu układu następująco:
 - ustawić rezystor zmienny w pozycji 15 Ω ,
 - pokrętle Current na zasilaczu wybrać zadaną wartość (nie patrzeć na wskazanie napięcia),
 - ustawić rezystor zmienny w pozycji 235 Ω (napięcie wróci do normy).

Dokonać trzech serii pomiarowych dla następujących ustawień:

seria 1: napięcie 8 V, ograniczenie prądowe 100 mA.

seria 2: napięcie 8 V, ograniczenie prądowe 200 mA.

seria 3: napięcie 10 V, ograniczenie prądowe 200 mA.

Podczas pomiarów nie zmieniać tych ustawień. Pomiarów dokonujemy zmieniając rezystancję obciążenia zmiennego. Pomiarów dokonać dla następujących wartości w podanej kolejności:

seria 1: 40, 60, 80, 100 mA, (dalej: patrz uwaga poniżej)

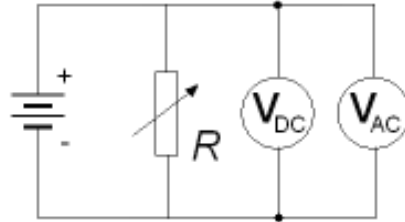
seria 2: 50, 100, 150, 200 mA, (dalej: patrz uwaga poniżej)

seria 3: 50, 100, 150, 200 mA, (dalej: patrz uwaga poniżej)

UWAGA! W każdej z serii zaobserwować moment wyraźnego spadku napięcia i zahamowania wzrostu prądu. Od tego momentu spisywać wartość prądu **dla całkowitych wartości napięcia.**

Po zakończeniu każdej z serii ustawić rezystor zmienny w pozycji 235 Ω .

4. Dokonać pomiaru współczynnika tętnień zasilacza stabilizowanego jednocześnie za pomocą dwóch woltomierzy (AC i DC). Ustawić ręcznie zakresy pomiarowe i zapisać które wybrano. Zasilacz obciążyć **opornicą dekadową**. Pomiaru dokonać dla rezystancji odpowiadających prądom 10, 20, 30, 40 i 50 mA. (patrz tabela wyników pkt 1).



5. Wykreślić charakterystykę napięciowo-prądową zasilacza stabilizowanego. Wyznaczyć rezystancję wewnętrzną tego zasilacza (dla prądów poniżej 50 mA)
6. Wykreślić charakterystykę napięciowo-prądową akumulatora. Wyznaczyć rezystancję wewnętrzną tego akumulatora.
7. Wykreślić na jednej kartce wszystkie trzy charakterystyki prądowo-napięciowe zasilacza laboratoryjnego.
8. Wyznaczyć współczynnik tętnień zasilacza stabilizowanego dla obciążenia znamionowego (podane na obudowie).
9. Wyznaczyć niepewność określenia współczynnika tętnień (prawo propagacji niepewności).