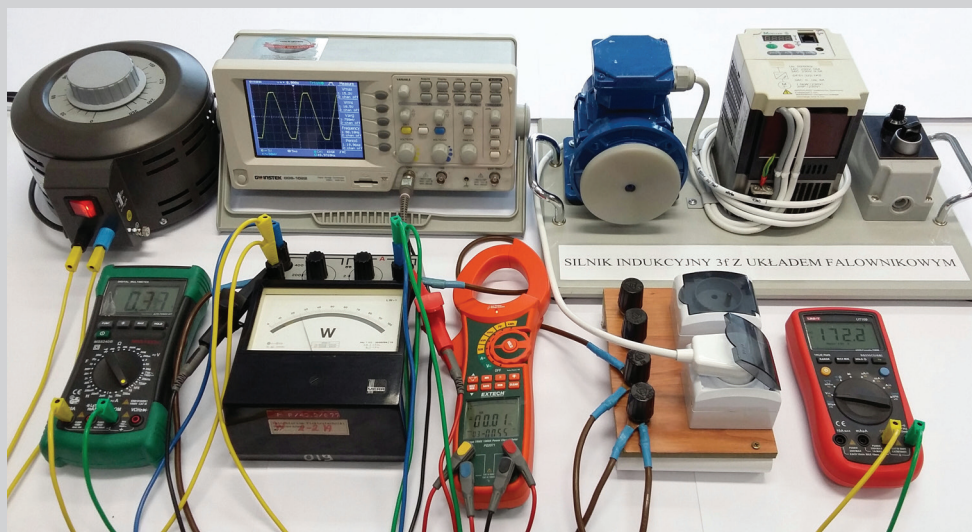


Marek Adamiec

Podstawy elektrotechniki i elektroniki dla studentów Wydziału Mechanicznego



Podstawy elektrotechniki i elektroniki dla studentów Wydziału Mechanicznego

Podręczniki – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Marek Adamiec

Podstawy elektrotechniki i elektroniki dla studentów Wydziału Mechanicznego



Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
Lublin 2018

Recenzenci:

dr hab. inż. Rafał Longwic, prof. Politechniki Lubelskiej

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2018

ISBN: 978-83-7947-322-9

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak
www.agencjapop.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

Spis treści

<i>Wstęp</i>	7
--------------------	---

Część pierwsza

Materiały pomocnicze do wykładów i ćwiczeń laboratoryjnych	9
---	----------

1. Obwody prądu stałego	11
2. Jednofazowe obwody prądu sinusoidalnie zmiennego	20
3. Trójfazowe obwody prądu sinusoidalnie zmiennego	27
4. Elektryczne źródła światła	30
5. Maszyny prądu stałego	40
6. Maszyny prądu zmiennego	47
7. Pomiary wielkości nieelektrycznych	56
8. Chemiczne źródła energii elektrycznej	69
9. Elementy i zabezpieczenia w instalacji elektrycznej	81
10. Elementy elektroniczne bierne i półprzewodnikowe bezzłączowe	89
11. Elementy półprzewodnikowe złączowe	96
12. Analogowe układy elektroniczne	114
13. Cyfrowe układy elektroniczne	123
14. Przepisy BHP w Laboratorium elektrotechniki i elektroniki	130

Część druga

Instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych	131
--	------------

1. Pomiary w obwodach prądu stałego	133
2. Pomiary w jednofazowych obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego	138
3. Pomiary w trójfazowych obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego	141
4. Badanie elektrycznych źródeł światła	144
5. Badanie maszyn prądu stałego	150
6. Badanie maszyn prądu zmiennego	153
7. Pomiary wielkości nieelektrycznych	160
8. Badanie chemicznych źródeł energii elektrycznej	164
9. Badanie elementów i zabezpieczeń w instalacji elektrycznej	167
10. Badanie elementów elektronicznych biernych i półprzewodnikowych bezzłączowych	170
11. Badanie elementów półprzewodnikowych złączowych	175
12. Badanie analogowych układów elektronicznych	181
13. Badanie cyfrowych układów elektronicznych	186
Literatura uzupełniająca	189

Wstęp

Przedmiot "Podstawy elektrotechniki i elektroniki" realizowany przez Wydział Mechaniczny Politechniki Lubelskiej prowadzony jest w formie wykładów i ćwiczeń laboratoryjnych. Wymiar godzinowy zajęć, zarówno dla wykładów jak i laboratoriów, w zależności od kierunku kształcenia, wynosi 15 lub 30 godzin na studiach stacjonarnych oraz 9 lub 18 godzin na studiach niestacjonarnych. W przypadku tego przedmiotu bardzo ważne jest opanowanie zagadnień matematycznych w zakresie rachunku różniczkowego, całkowego, trygonometrii i liczb zespolonych oraz działów fizyki dotyczących elektryczności i magnetyzmu. Zajęcia wykładowe mają za zadanie wyjaśnienie trudnych zagadnień, poznanie fachowego słownictwa i przygotowanie do wykonania ćwiczeń laboratoryjnych, których celem jest doświadczalne sprawdzenie praw i zasad elektrotechniki, zapoznanie się z metodami pomiarów i sprzętem oraz zdobycie praktycznych umiejętności łączenia układów elektrycznych, przeprowadzania pomiarów i obliczeń. Bardzo istotnym aspektem zagadnienia jest uświadomienie sobie konieczności przestrzegania zasad bezpiecznego postępowania w czynnościach związanych z pomiarami wielkości elektrycznych i obsługą urządzeń przetwarzających energię elektryczną oraz jej racjonalnego wykorzystania.

Część teoretyczna opracowania jest szczegółowa i wielowątkowa, jej głównym zadaniem jest przygotowanie do ćwiczeń, ale także pomoc w opanowaniu materiału pokazywanego w formie prezentacji na zajęciach wykładowych. Informacje w formie pisemnej zostały uzupełnione materiałem zdjęciowym i rysunkowym dla lepszego przygotowania do zajęć praktycznych oraz poznania budowy urządzeń i symboli graficznych elementów. Bardziej rozbudowana część graficzna zagadnienia jest prezentowana i omawiana na wykładach w celu wyjaśnienia skomplikowanych zjawisk fizycznych. Część zagadnień została celowo pominięta lub omówiona tylko ogólnie, ponieważ są to tematy, które student powinien rozwiązać samodzielnie w czasie wykonywania ćwiczenia. Wiele opisów dotyczących zjawisk zachodzących w polu magnetycznym i mikrostrukturze atomowej materii wymaga szczególnego skupienia i wyobraźni w celu ich właściwego zrozumienia. W sposób obszerny opisano zjawiska zachodzące w sieci atomowej półprzewodników domieszkowanych, ponieważ jest to podstawa do zrozumienia zasady działania elementów elektronicznych, a następnie zbudowanych z nich układów.

Instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych zostały opracowane w szerokim zakresie, z myślą o możliwości wyboru ich poszczególnych części, w zależności od wymiaru godzinowego i umiejętności poszczególnych grup studentów. Do każdego tematu zostały także opracowane zagadnienia służące do indywidualnego przygotowania się studenta do zajęć oraz zbiorczy wykaz fachowej literatury. Podczas układania programów ćwiczeń duży nacisk położono na poznanie budowy i zasady działania elementów oraz urządzeń elektrycznych, a następnie określenie ich właściwości na podstawie analizy charakterystyk graficznych.

Metodyka wykonywania ćwiczeń opiera się na podstawowych i prostych czynnościach praktycznych, ale w niektórych tematach student poznaje też nowoczesne metody pomiarowe, realizowane z wykorzystaniem zaawansowanego technicznie sprzętu (cęgowy miernik mocy, miernik parametrów instalacji, oscyloskop cyfrowy, rejestrator, mikrokontroler). W kilku instrukcjach do ćwiczeń nie zamieszczono schematów układów, które powinny być połączone w celu wykonania badań, a są podobne do już wcześniej montowanych, tak aby w celach szkoleniowych student mógł sam narysować schemat, a następnie na jego podstawie połączyć układ. Podobnie w części teoretycznej opracowania nie zamieszczono charakterystyk, które są wyznaczane w ramach ćwiczenia. W miarę możliwości na zajęciach praktycznych poszczególne zadania każdego ćwiczenia są przydzielane studentom indywidualnie, a główne pomiary wykonywane są wspólnie przez całą grupę. Wnioski opracowane na podstawie ćwiczeń laboratoryjnych powinny opisywać działanie elementów, układów i urządzeń elektrycznych w aspekcie analizy wartości mierzonych wielkości fizycznych oraz ich zmienności i wzajemnej zależności widocznej na wykreślonych charakterystykach.

Część pierwsza

Materiały pomocnicze do wykładów i ćwiczeń laboratoryjnych

1. Obwody prądu stałego

1.1. Wielkości fizyczne występujące w obwodach prądu stałego

Cząstki elementarne atomu posiadające ładunek elektryczny o takiej samej wartości i przeciwnym znaku to elektron i proton. Protony są związane z neutronami w jądrze atomowym i mają większą masę, natomiast elektrony zmieniają miejsce położenia w obrębie swojego atomu, mogą być wymieniane między różnymi atomami w reakcjach chemicznych lub przemieszczać się w całej strukturze ciała pod wpływem pola elektrycznego.

Potencjał elektryczny jest wielkością, która określa stopień naelektryzowania ciała. Ciała elektrycznie obojętne (mające taką samą ilość ładunku dodatniego i ujemnego) ma potencjał równy zero. Potencjał ziemi przyjmuje się równy zero, ponieważ niewielka liczba elektronów, która przy rozładowaniu lub naładowaniu różnych ciał jest pobierana lub oddawana ziemi, nie ma praktycznie wpływu na jej naelektryzowanie.

Siła elektromotoryczna źródła energii elektrycznej jest to różnica potencjałów na zaciskach tego źródła, gdy nie jest z niego pobierany prąd (bez obciążenia źródła).

Napięcie jest to różnica potencjałów dwóch punktów obwodu elektrycznego lub pola elektrycznego czyli stosunek pracy, wykonanej przy przeniesieniu ładunku między punktami 1 i 2 pola elektrycznego, do wartości tego ładunku:

$$U_{12} = V_2 - V_1 = \frac{W_{12}}{q} \quad (1)$$

Spadek napięcia jest to napięcie (różnica potencjałów), które powstaje na zaciskach odbiornika elektrycznego pod wpływem przepływającego prądu. Napięcie to jest proporcjonalne do płynącego prądu i oporu odbiornika:

$$U = I \cdot R \quad (2)$$

Natężenie prądu (prąd) jest to stosunek ładunku elektrycznego przepływającego przez przekrój poprzeczny elementu przewodzącego do czasu tego przepływu:

$$I = \frac{q}{t} \quad (3)$$

Energia ładunku elektrycznego q zmienia się przy przeniesieniu go z punktu o potencjale V_1 do punktu o potencjale V_2 zgodnie z zależnością:

$$W = q \cdot V_1 - q \cdot V_2 = q \cdot U_{12} = I \cdot t \cdot U_{12} \quad (4)$$

Moc elektryczna jest to zmiana energii elektrycznej ładunku w jednostce czasu. Moc określa się między dwoma punktami przewodnika, przez który płynie prąd, zwykle pomiędzy zaciskami urządzenia elektrycznego (odbiornika).

$$P = \frac{W_{12}}{t} = \frac{I \cdot t \cdot U_{12}}{t} = U_{12} \cdot I \quad (5)$$

Rezystancja przewodnika (opór) jest wprost proporcjonalna do jego długości, a odwrotnie proporcjonalna do przekroju poprzecznego i wyraża się zależnością:

$$R = \frac{\zeta \cdot l}{A} \quad (6)$$

gdzie:

ζ – opór właściwy, zależny od materiału z którego wykonany jest przewodnik,

l – długość przewodnika,

A – powierzchnia przekroju poprzecznego przewodnika.

Tab. 1.1. Wielkości fizyczne występujące w obwodach prądu stałego

Wielkość elektryczna	Symbol wielkości	Jednostka wielkości	Symbol jednostki
Ładunek	Q, q	Culomb	C
Potencjał	V, ϕ	Wolt	V
Siła elektromotoryczna	E, SEM	Wolt	V
Napięcie, spadek napięcia	U, ΔU	Wolt	V
Natężenie prądu (prąd)	I	Amper	A
Energia	W	Jull	J
Moc	P	Wat	W
Rezystywność (opór właściwy)	ζ	Om·milimetr kwadrat/metr	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
Rezystancja (opór)	R	Om	Ω
Indukcyjność	L	Henr	H
Pojemność	C	Farad	F

1.2. Pomiar podstawowych wielkości elektrycznych i przyrządy pomiarowe

Pomiar wielkości elektrycznych może być realizowany za pomocą mierników elektromechanicznych, wyposażonych w ustrój ruchomy i wskazówkę, oraz elektronicznych, posiadających wyświetlacz cyfrowy. Ponadto w technice pomiarowej przydatne są oscyloskopy analogowe i cyfrowe, umożliwiające wizualizację przebiegów napięciowych oraz pomiar i obliczenia matematyczne charakterystycznych dla nich wielkości. Mierniki mogą być podłączane bezpośrednio do elementów elektrycznych, za pośrednictwem przetworników lub wykonywać pomiary metodą bezstykową, z wykorzystaniem czujników (np. amperomierz cęgowy). Nazwy mierników związane są z jednostką wielkości, którą mierzą (np. woltomierz, amperomierz, miliamperomierz). Mierniki elektromechaniczne mierzą najczęściej jedną wielkość, ale mogą posiadać wiele zakresów pomiarowych i kilka podziałek do odczytu wskazań. Pomiar wymaga wstępnego obliczenia stałej miernika, a następnie wartości mierzonej wielkości.

Stałą woltomierza lub amperomierza elektromechanicznego wyznacza się dzieląc nastawiony zakres pomiarowy przez liczbę działek na podziałce miernika (górnej lub dolnej). Wartość mierzonej wielkości oblicza się mnożąc wskazywaną liczbę działek przez stałą miernika. Stałą watomierza elektromechanicznego wyznacza się dzieląc iloczyn nastawionych zakresów pomiarowych (napięciowego i prądowego) przez liczbę działek na podziałce miernika (rys.1.1). Wartość mierzonej mocy oblicza się mnożąc wskazywaną liczbę działek przez stałą miernika. Woltomierz, amperomierz i omomierz posiadają dwa zaciski, a watomierz cztery. Mierząc napięcie czyli różnicę potencjałów, należy dołączyć przewody miernika do zacisków elementu, na którym ta wielkość jest mierzona lub jak najbliżej tych zacisków. W praktyce napięcie mierzy się na zaciskach źródła energii lub odbiornika. Napięcie mierzone na źródle, bez jego obciążenia czyli poboru prądu, nazywa się siłą elektromotoryczną, a napięcie mierzone na odbiorniku nazywa się spadkiem napięcia. W czasie montażu układu elektrycznego woltomierze powinny być dołączane dopiero po wykonaniu obwodu z uwzględnieniem polaryzacji i właściwego zamocowania przewodów. Możliwy jest także pomiar różnicy potencjałów na elementach układu w czasie jego pracy, poprzez dotknięcie przewodami miernika, trzymanymi w rękach za pośrednictwem specjalnie wykonanych w tym celu i dobrze izolowanych uchwytów.

W celu bezpośredniego pomiaru natężenia prądu płynącego przez wybrany element układu należy szeregowo z nim połączyć zaciski amperomierza, z uwzględnieniem polaryzacji. Amperomierze włącza się w czasie montażu obwodu elektrycznego za pomocą przewodów o przekroju dostosowanym do wartości mierzonego prądu, zwracając uwagę na właściwy styk przewodu z zaciskiem elementu i miernika. Bezstykowy pomiar prądu, na przykład z wykorzystaniem amperomierza cęgowego, może być realizowany w różnych gałęziach układu w czasie jego działania. W celu pomiaru mocy źródła energii elektrycznej lub odbiornika należy połączyć zaciski napięciowe watomierza z zaciskami elementu, którego moc jest mierzona, a zaciski prądowe miernika szeregowo z tym elementem, uwzględniając polaryzację poszczególnych punktów połączeniowych. W przypadku pomiaru napięcia istotne jest aby miernik pobierał jak najmniejszy prąd, czyli posiadał jak największą oporność. W przypadku pomiaru prądu istotne jest aby na mierniku występował jak najmniejszy spadek napięcia, czyli urządzenie pomiarowe powinno mieć jak najmniejszą oporność. W przypadku pomiaru mocy obydwa te aspekty są istotne. W celu pomiaru rezystancji odbiornika należy bezpośrednio połączyć jego zaciski z przewodami omomierza, w tym przypadku polaryzacja nie ma znaczenia, jednak odbiornik powinien być odłączony od innych elementów obwodu elektrycznego. Mierniki elektroniczne występują najczęściej w postaci multimetrów, które mogą zmierzyć wiele wielkości elektrycznych, a także nieelektrycznych (rys.1.2). Pomiar polega na wybraniu za pomocą pokrętki bądź przycisku właściwej wielkości fizycznej, jej rodzaju i zakresu, a następnie odczytaniu wyświetlonej wartości.

Multimetry niskiej klasy posiadają rezystancję o wartości $1\text{ M}\Omega$ przy pomiarze napięcia, a multimetry wyższej klasy charakteryzują się oporem równym $10\text{ M}\Omega$. Należy zauważyć, że do pomiaru prądu służą inne gniazda multimetru niż do pomiaru pozostałych wielkości, a zakresy prądowe miernika mogą się znacznie różnić. W przypadku niepewności w oszacowaniu wartości mierzonego prądu należy skorzystać z większego zakresu pomiarowego amperomierza. Trzeba też pamiętać, aby nie podłączyć przewodów miernika bezpośrednio pod napięcie, gdy są one umieszczone w gniazdach do pomiaru prądu.

Pomiar mocy jest podstawową ale i problematyczną czynnością w elektrycznej technice pomiarowej. Mierniki elektromechaniczne posiadają ograniczenia związane z elementami mechanicznymi, mniejszą dokładność i zmienność parametrów w czasie. Mierniki cyfrowe do pomiaru mocy występują na rynku w ograniczonej ilości, służą najczęściej tylko do pomiaru tej wielkości i są kosztowne. Ponadto niektóre z nich mierzą tylko moc czynną, nie mają możliwość pomiaru mocy biernej, pozornej i współczynnika mocy, co jest ważne przy zmiennych przebiegach napięcia i prądu. Istnieje grupa oscyloskopów z możliwością pomiaru mocy, które mierząc wartość skuteczną napięcia i prądu wykonują operację całkowania, a następnie mnożenia tych wielkości. Są to przyrządy wysokiej klasy, pomiary napięcia i prądu muszą być wykonywane z dużą szybkością próbkowania i rozdzielczością.



Rys. 1.1. Watomierz elektromechaniczny



Rys. 1.2. Multimetry cyfrowe

1.3. Źródła i odbiorniki energii elektrycznej

Źródła i odbiorniki energii elektrycznej są w rzeczywistości przetwornikami energii. W przypadku źródeł energia elektryczna jest wielkością wyjściową, a do wejścia może być dostarczana energia chemiczna, mechaniczna, świetlna, odnawialna. Dla odbiorników energia elektryczna jest wielkością wejściową, a na wyjściu może być uzyskiwana energia cieplna, mechaniczna, chemiczna, świetlna. Źródła charakteryzują się własnym napięciem elektrycznym, natomiast na odbiornikach w czasie przepływu prądu występuje spadek napięcia. Klasyfikację źródeł energii można przeprowadzić ze względu na rodzaj wytwarzanego napięcia. Przetworniki energii chemicznej w elektryczną (bateria, akumulator, ogniwo paliwowe) oraz energii słonecznej w elektryczną (ogniwo fotowoltaiczne) wytwarzają napięcie o charakterze stałym. W ogniwach chemicznych różne potencjały na elektrodach powstają w wyniku wymiany elektronów między reagentami podczas reakcji chemicznych z udziałem jonów i katalizatorów. W ogniwach słonecznych napięcie powstaje w wyniku zmiany poziomów energetycznych i migracji elektronów oraz "dziur" w materiałach półprzewodnikowych. Przetworniki energii mechanicznej w elektryczną (prądnice), w zależności od konstrukcji, mogą wytwarzać napięcie stałe lub o zmiennej wartości i polaryzacji. Pośrednio w ten sposób może też być przetwarzana energia odnawialna (wiatrowa, wodna) i chemiczna (węgiel, ropa naftowa, reakcje jądrowe). Napięcie w prądnicie powstaje w wyniku przemieszczania się swobodnych elektronów w przewodniku pod wpływem działania pola magnetycznego, w wyniku ruchu uzwojenia lub zmiany położenia biegunów magnetycznych. Jako szczególne źródło energii może być traktowany zasilacz, który jest przetwornikiem energii elektrycznej w elektryczną, natomiast zmianie ulega wartość i rodzaj napięcia, ze zmiennego na stałe.

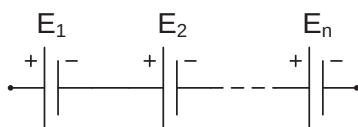
Źródła energii wytwarzające napięcie stałe w czasie, stosowane są najczęściej do zasilania urządzeń mobilnych i przenośnych, natomiast sieci prądu zmiennego zasilają urządzenia stacjonarne. Zasadniczą wadą tych pierwszych jest niewielkie napięcie elementarnych ogniw, które w celu jego zwiększenia łączy się w sposób szeregowy. Źródła energii to elementy aktywne w obwodach elektrycznych, natomiast elementami pasywnymi są odbiorniki. Odbiorniki mogą być przystosowane do zasilania prądem stałym lub zmiennym, a niektóre z nich mogą pracować przy dwóch rodzajach prądu. W zależności od specyfiki pracy i konstrukcji odbiorniki prądu stałego mają oznaczoną polaryzację lub nie. Posiadają opór elektryczny, który ma charakter czynny (rezystancja), przy zasilaniu prądem stałym oraz dodatkowo bierny (reaktancja), przy zasilaniu prądem zmiennym. Odbiorniki przetwarzają energię elektryczną na ciepłą (elementy rezystancyjne), mechaniczną (silniki), świetlną (lampy elektryczne, diody LED), chemiczną (elektrolizery). Elementy pasywne, które mają zdolność gromadzenia energii w polu elektrycznym to kondensatory, a w polu magnetycznym, to cewki indukcyjne. Wielkości charakteryzujące te odbiorniki (indukcyjność i pojemność) omówiono w rozdziale 2.

1.4. Rodzaje połączeń źródeł energii i odbiorników w obwodach elektrycznych

Elementy elektryczne mogą być łączone ze sobą w sposób szeregowy i równoległy. Źródła energii łączy się szeregowo w celu uzyskania odpowiedniej wartości napięcia, jest to szczególnie przydatne przy zastosowaniu źródeł energii, które posiadają niewielkie napięcia znamionowe. Elementarne ogniwa łączy się ze sobą we wspólnej obudowie lub poprzez połączenia zewnętrzne. W połączeniu szeregowym łączy się zacisk ujemny jednego źródła z zaciskiem dodatnim drugiego, napięcie całkowite występuje pomiędzy „plusem” pierwszego ogniwa a „minusem” ostatniego. Źródła energii łączy się równolegle w celu uzyskania odpowiedniej wartości prądu, wymaganego przez odbiornik. Zwiększenie prądu można uzyskać poprzez powiększenie powierzchni czynnej elektrod ogniwa lub łączenie zewnętrzne ogniw, które posiadają podobne napięcia. W połączeniu równoległym łączy się ze sobą zaciski dodatnie wszystkich źródeł oraz oddzielnie zaciski ujemne. Przez odbiorniki połączone szeregowo płynie prąd o takim samym natężeniu, natomiast występujące na nich spadki napięcia są różne. Na odbiornikach połączonych równolegle występują spadki napięcia o takiej samej wartości, natomiast prądy płynące przez nie są różne. Dla niektórych odbiorników polaryzacja podczas łączenia nie ma znaczenia (np. rezystor, żarówka), dla innych natomiast jest istotna (np. silnik, dioda).

Zastępcza siła elektromotoryczna n źródeł połączonych szeregowo jest równa:

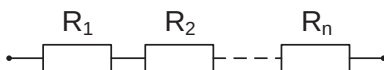
$$E = \sum_{k=1}^n E_k \quad (7)$$



Rys. 1.3. Schemat układu ze źródłami energii połączonymi szeregowo

Dla szeregowego połączenia n oporników można obliczyć rezystancję zastępczą (opór wypadkowy) jako sumę rezystancji składowych:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (8)$$



Rys. 1.4. Schemat układu z opornikami połączonymi szeregowo

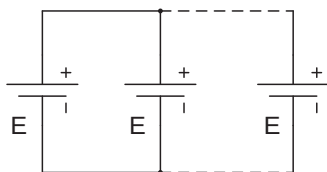
Siła elektromotoryczna zastępcza n jednakowych źródeł energii połączonych równolegle:

$$E_z = E \quad (9)$$

gdzie:

E – siła elektromotoryczna pojedynczego źródła.

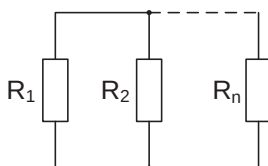
W praktyce takie połączenie stosuje się w celu zwiększenia pojemności źródła i natężenia prądu pobieranego przez odbiornik.



Rys. 1.5. Schemat układu ze źródłami energii połączonymi równolegle

Dla równoległego połączenia n oporników można obliczyć rezystancję zastępczą (opór wypadkowy), której wartość jest mniejsza od najmniejszej wartości oporu składowego:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (10)$$

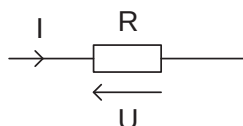


Rys. 1.6. Schemat układu z opornikami połączonymi równolegle

1.5. Prawa w obwodach elektrycznych

Prawo Ohma dotyczy związku między trzema podstawowymi wielkościami elektrycznymi, można go sformułować dla pojedynczego odbiornika (rys. 1.7) lub dla obwodu elektrycznego zbudowanego ze źródła energii i odbiornika (rys. 1.8). W pierwszym przypadku stwierdzono, że natężenie prądu elektrycznego płynącego przez odbiornik jest proporcjonalne do napięcia występującego na jego zaciskach, a odwrotnie proporcjonalne do oporu odbiornika. W przypadku przepływu prądu stałego opór jest nazywany rezystancją.

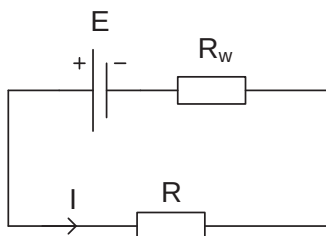
$$I = \frac{U}{R} \quad (11)$$



Rys. 1.7. Sposób zaznaczania prądu i napięcia odbiornika

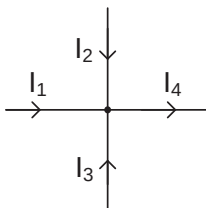
W drugim przypadku definiuje się, że prąd płynący w obwodzie elektrycznym jest równy stosunkowi siły elektromotorycznej źródła energii do sumy rezystancji wewnętrznej źródła i rezystancji odbiornika:

$$I = \frac{E}{R + R_w} \quad (12)$$



Rys. 1.8. Schemat obwodu z jednym źródłem energii i jednym odbiornikiem

I Prawo Kirchhoffa dotyczy prądów oraz węzła obwodu elektrycznego, czyli miejsca rozgałęzienia się przewodów. Według tego prawa suma prądów wpływających do węzła obwodu elektrycznego jest równa sumie prądów wypływających z tego węzła lub suma algebraiczna prądów w węźle obwodu elektrycznego jest równa zero. To prawo można także formułować dla elementów elektrycznych posiadających przynajmniej trzy zaciski (np. tranzystor).



Rys. 1.9. Sposób zaznaczania węzła obwodu oraz prądów wpływających i wypływających z niego

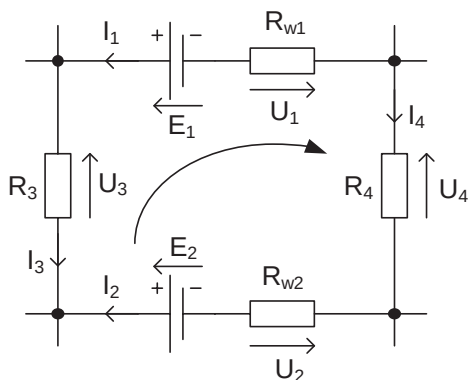
Dla zamieszczonego powyżej węzła obwodu elektrycznego I prawo Kirchhoffa przyjmuje postać równania:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 \quad (13)$$

II Prawo Kirchhoffa dotyczy napięć oraz obwodu elektrycznego pojedynczego lub będącego częścią składową układu i nazywanego w tym przypadku oczkiem. Suma algebraiczna sił elektromotorycznych źródeł energii działających w obwodzie elektrycznym (oczku) jest równa sumie algebraicznej spadków napięć na poszczególnych odbiornikach obwodu lub suma algebraiczna sił elektromotorycznych i spadków napięć w obwodzie jest równa zero. Poniżej zamieszczono ogólny wzór

(14) oraz równania dla przykładowego obwodu będącego częścią większego układu (15 i 16).

$$\sum E_i = \sum I_n \cdot R_n \quad (14)$$



Rys. 1.10. Sposób zaznaczania prądów, napięć i kierunku obiegowego w oczku obwodu

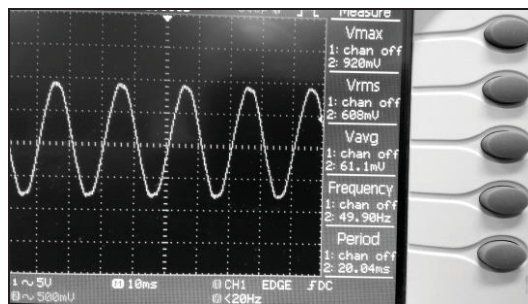
$$E_2 - E_1 + U_1 - U_4 - U_2 + U_3 = 0 \quad (15)$$

$$E_2 - E_1 + I_1 \cdot R_{w1} - I_4 \cdot R_4 - I_2 \cdot R_{w2} + I_3 \cdot R_3 = 0 \quad (16)$$

2. Jednofazowe obwody prądu sinusoidalnie zmiennego

2.1. Ogólna charakterystyka prądu sinusoidalnie zmiennego

Prąd sinusoidalnie zmienny zmienia swoją wartość w funkcji czasu i kierunek przepływu zgodnie z przebiegiem funkcji sinus. Dla jego przebiegu można określić wartość maksymalną, średnią, skuteczną i chwilową, a także częstotliwość, okres i pulsację (rys. 2.1, tab. 2.1). W związku ze zmiennością prądu i napięcia, takie elementy elektryczne jak cewka i kondensator zachowują się inaczej niż przy przepływie prądu stałego. Potrafią gromadzić energię elektryczną i oddawać ją z powrotem do źródła. W związku z tym wprowadzono pojęcie energii oraz mocy czynnej, biernej, a w konsekwencji pozornej oraz oporu elektrycznego czynnego, biernego i całkowitego, uwzględniającego odmienny charakter oporów składowych. Kolejnym istotnym zagadnieniem w tym temacie jest przesunięcie się względem siebie przebiegów napięcia i prądu, występujących na cewkach i kondensatorach, a także innych elementach o charakterze indukcyjnym i pojemnościowym. Spowodowało to wprowadzenie pojęcia kąta przesunięcia fazowego między prądem i napięciem oraz współczynnika mocy.



Rys. 2.1. Przebieg napięcia sinusoidalnie zmiennego na ekranie oscyloskopu

2.2. Odbiorniki w obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego

Elementy pasywne zasilane prądem zmiennym charakteryzują się rezystancją, indukcyjnością i pojemnością. W praktyce najczęściej odbiorniki prądu zmiennego stosowane powszechnie posiadają charakter rezystancyjno-indukcyjny (np. uzwojenia silników, prądnic, transformatorów). W uproszczeniu można traktować określone rodzaje odbiorników jako idealne, czyli posiadające tylko jedną cechę. Odbiorniki rezystancyjne przekształcają energię elektryczną w ciepłą, indukcyjne mają zdolność do gromadzenia energii w polu magnetycznym, a pojemnościowe gromadzą energię w polu elektrycznym.

Rezystor (opornik) jest elementem pasywnym, który ogranicza prąd. Może posiadać opór o stałej lub regulowanej wartości (rezystor suwakowy, obrotowy) (rys. 2.2). Rezystancja może być stała (element liniowy) lub zmieniać się w funkcji prądu, temperatury, siły (element nieliniowy).

W obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego napięcie na zaciskach rezystora i prąd przez niego płynący są ze sobą w fazie, nie występuje między nimi przesunięcie. Moc ma charakter czynny, energia elektryczna jest dostarczana ze źródła do rezystora i przetwarzana na energię cieplną. Rezystory wykonywane są z drutu oporowego i służą najczęściej do ograniczania prądu, uzyskiwania energii cieplnej oraz przetwarzania nieelektrycznych wielkości fizycznych na napięcie elektryczne w celu ich pomiaru (rezystory jako czujniki).

Cewka indukcyjna (zwojnica) jest elementem pasywnym, który przeciwstawia się zmianom płynącego przez nią prądu. Przy zmianach prądu indukuje się w niej napięcie, które przeciwdziała tym zmianom (opór bierny – reaktancja indukcyjna). Jest to wynikiem zmiennego pola magnetycznego, którego źródłem jest prąd, obejmującego swoim działaniem uzwojenie cewki. W obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego napięcie na zaciskach cewki jest przesunięte w fazie względem płynącego przez nią prądu o kąt $\varphi=90^\circ$ (wyprzedza prąd). Moc ma charakter bierny, energia elektryczna jest dostarczana ze źródła do cewki w jednym półokresie, a następnie oddawana do źródła w drugim półokresie. Cewki indukcyjne to najczęściej uzwojenia wykonywane z izolowanego przewodnika, nawijane na rdzeniu ferromagnetycznym i stosowane w maszynach wirujących, transformatorach (rys. 2.3), przekątnikach, stycznikach oraz w celu pomiaru nieelektrycznych wielkości fizycznych przetwarzanych na napięcie elektryczne (np. czujniki indukcyjne prędkości obrotowej).

Kondensator (układ dwóch przewodników przedzielonych izolatorem) jest elementem pasywnym, który przeciwstawia się zmianom napięcia poprzez ładowanie i magazynowanie ładunku elektrycznego na swoich okładkach. Zmiany napięcia przyłożonego do kondensatora powodują przepływ prądu. Prąd sinusoidalnie zmienny powoduje cykliczne ładowanie i rozładowanie kondensatora oraz zmianę polaryzacji i pola elektrycznego między jego okładkami. Kondensator posiada opór bierny (reaktancję pojemnościową). W obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego prąd płynący przez kondensator jest przesunięty w fazie względem napięcia o kąt $\varphi=90^\circ$ (wyprzedza napięcie). Moc ma charakter bierny, energia elektryczna jest dostarczana ze źródła do kondensatora w jednym półokresie, a następnie oddawana do źródła w drugim półokresie. Kondensatory wykorzystywane są w energetyce do kompensacji mocy biernej indukcyjnej pobieranej przez duże maszyny elektryczne, do magazynowania energii elektrycznej (superkondensatory) oraz w układach filtracji napięcia (rys. 2.4).



Rys. 2.2. Rezystory suwakowe na stanowisku pomiarowym



Rys. 2.3. Cewki indukcyjne jako uzwojenia transformatora



Rys. 2.4. Kondensator średniego napięcia

2.3. Pomiar i obliczanie wielkości elektrycznych w obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego

Podstawowe wielkości mierzone w obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego to napięcie skuteczne, prąd skuteczny i moc czynna. Pozostałe istotne wielkości można obliczyć na podstawie tych zmierzonych. Do pomiaru napięcia i prądu w obwodach prądu zmiennego stosuje się woltomierze i amperomierze elektromagnetyczne lub elektroniczne. Przyrządy te mierzą wartości skuteczne. Do pomiaru mocy czynnej stosuje się watomierze elektrodynamiczne lub cyfrowe, niektóre wyposażone w układy pozwalające wyznaczyć także inne rodzaje mocy oraz energię (rys. 2.5). Wykorzystuje się także multimetry, w tym przypadku przydatna jest funkcja pomiaru pojemności, indukcyjności oraz częstotliwości. Bardzo przydatne są oscyloskopy, niektóre z funkcją pomiaru mocy, umożliwiające wizualizację przebiegów zmien-

nych oraz wykonywanie na nich operacji matematycznych (rys. 2.6). Elektryczne przyrządy pomiarowe zostały szerzej opisane w rozdziale 1.

Prąd skuteczny jest równy prądowi stałemu, który płynąc przez odbiornik o rezystancji R spowoduje wytworzenie w czasie jednego okresu T takiej samej energii cieplnej jak prąd sinusoidalnie zmienny:

$$R \cdot I^2 \cdot T = \int_0^T R \cdot i^2 dt \quad (1)$$

Dla przebiegu sinusoidalnie zmiennego prąd skuteczny obliczono z zależności:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m \quad (2)$$

Wartość skuteczną napięcia wyznacza się analogicznie:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_m \quad (3)$$

Wartość średnia półokresowa prądu sinusoidalnie zmiennego jest równa:

$$I_{sr} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{2}{\pi} \cdot I_m \approx 0,637 I_m \quad (4)$$

Wartość średnią półokresową napięcia sinusoidalnie zmiennego wyznacza się analogicznie:

$$U_{sr} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} u(t) dt = \frac{2}{\pi} \cdot U_m \approx 0,637 U_m \quad (5)$$

Interpretując graficznie powyższe zależności można stwierdzić, że prąd średni jest równy wysokości prostokąta, którego podstawa jest równa $T/2$, a pole jest równe polu powierzchni ograniczonemu krzywą prądu płynącego przez pół okresu, czyli ładunkowi elektrycznemu przeniesionemu przez prąd sinusoidalnie zmienny w czasie równym $T/2$. Ten ładunek jest równy ładunkowi przeniesionemu przez prąd stały I_{sr} w czasie $T/2$. W obwodach prądu stałego wszystkie elementy odbiorcze (pasywne) posiadają tylko rezystancję R . W obwodach prądu zmiennego każdy odbiornik posiada rezystancję R , nazywaną w tym przypadku oporem czynnym, oraz reakcje – indukcyjną X_L i pojemnościową X_C , nazywane oporami biernymi. Opór całkowity (impedancja) odbiornika jest sumą geometryczną oporu czynnego i biernego:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (6)$$

Zgodnie z prawem Ohma impedancję odbiornika można obliczyć z zależności:

$$Z = \frac{U}{I} \quad (7)$$

Indukcyjność jest to stosunek strumienia magnetycznego wytworzonego przez cewkę i skojarzonego z nią do prądu płynącego przez ten element:

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (8)$$

Napięcie indukowane w cewce jest proporcjonalne do szybkości zmian strumienia magnetycznego:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (9)$$

Pojemność jest to stosunek ładunku elektrycznego zgromadzonego na okładkach kondensatora do napięcia występującego na tym elemencie:

$$C = \frac{q}{U} \quad (10)$$

Prąd płynący przez kondensator wyraża się zależnością:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (11)$$

Reaktancja indukcyjna jest proporcjonalna do częstotliwości prądu i indukcyjności elementu:

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L \quad (12)$$

Reaktancja pojemnościowa jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości prądu i pojemności elementu:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \quad (13)$$

Cewka ma zdolność gromadzenia energii w polu magnetycznym:

$$W_L = L \frac{I^2}{2} \quad (14)$$

Kondensator ma zdolność gromadzenia energii w polu elektrycznym:

$$W_C = C \frac{U^2}{2} \quad (15)$$

Odbiornik w obwodzie prądu zmiennego posiada moc czynną oraz bierną, która jest wielkością opisującą pulsowanie energii elektrycznej między elementami obwodu elektrycznego. Oscylująca energia nie jest zamieniana na pracę użyteczną lub ciepło ale konieczna do działania maszyn elektrycznych. Jest ona pobierana ze źródła w części okresu przebiegu zmiennego, magazynowana przez odbiornik w postaci pola elektrycznego lub magnetycznego, a następnie oddawana do źródła w innej części okresu, co jest związane z zanikiem pola w odbiorniku.

Moc całkowita (pozorna) jest sumą geometryczną mocy czynnej i biernej:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(U \cdot I \cdot \cos\varphi)^2 + (U \cdot I \cdot \sin\varphi)^2} = U \cdot I \quad (16)$$

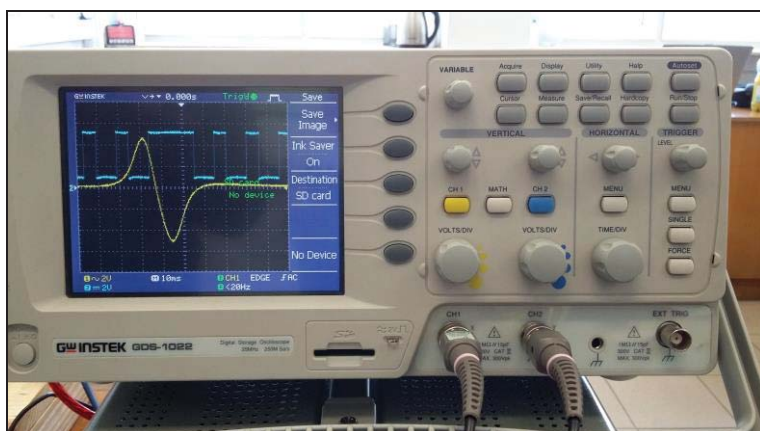
Wielkość φ (ωt) jest kątem fazowym pomiędzy napięciem i prądem odbiornika. Dla idealnego odbiornika rezystancyjnego napięcie i prąd są w fazie, a więc kąt $\varphi=0$. Dla idealnego odbiornika indukcyjnego napięcie wyprzedza prąd o kąt fazowy $\varphi=90^\circ$. Dla idealnego odbiornika pojemnościowego prąd wyprzedza napięcie o kąt fazowy $\varphi=90^\circ$. W praktyce każdy odbiornik zasilany prądem zmiennym jest częściowo rezystancyjny, indukcyjny i pojemnościowy, istotne jest który z tych

czynników jest przeważający. Współczynnik mocy $\cos \varphi$ określa charakter odbiornika (rezystancyjny, indukcyjny lub pojemnościowy). Gdy odbiornik ma charakter rezystancyjny $\cos \varphi$ dąży do wartości 1, natomiast dla odbiorników o charakterze indukcyjnym lub pojemnościowym $\cos \varphi$ dąży do wartości 0. Współczynnik mocy $\cos \varphi$ jest to stosunek mocy czynnej do mocy pozornej lub stosunek oporu czynnego (rezystancji) do oporu całkowitego (impedancji):

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z} \quad (17)$$



Rys. 2.5. Cęgowy miernik mocy



Rys. 2.6. Oscyloskop cyfrowy dwukanałowy

Tab. 2.1. Wielkości fizyczne występujące w obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego

Wielkość fizyczna	Symbol wielkości	Jednostka wielkości	Symbol jednostki
Ładunek	Q, q	Culomb	C
Potencjał	V, φ	Wolt	V
Napięcie maksymalne	U_m	Wolt	V
Napięcie skuteczne	U	Wolt	V
Napięcie średnie	U_{AV}, U_{sr}	Wolt	V
Napięcie chwilowe	$u, u(t)$	Wolt	V
Prąd maksymalny	I_m	Amper	A
Prąd skuteczny	I	Amper	A
Prąd średni	I_{AV}, I_{sr}	Amper	A
Prąd chwilowy	$i, i(t)$	Amper	A
Rezystancja	R	Om	Ω
Reaktancja indukcyjna	X_L	Om	Ω
Reaktancja pojemnościowa	X_C	Om	Ω
Impedancja	Z	Om	Ω
Moc czynna	P	Wat	W
Moc bierna indukcyjna	Q_L	War	Var
Moc bierna pojemnościowa	Q_C	War	Var
Moc pozorna	S	Woltoamper	VA
Indukcyjność	L	Henr	H
Pojemność	C	Farad	F
Energia	W	Jull	J
Częstotliwość	f	Herz	Hz
Okres	T	Sekunda	s
Pulsacja	ω	Radian na sekundę	rad/s
Kąt przesunięcia fazowego	φ	Stopień, radian	$^\circ$, rad

3. Trójfazowe obwody prądu sinusoidalnie zmiennego

3.1. Rodzaje połączeń źródeł energii i odbiorników w układach trójfazowych, zależności matematyczne

Podstawowe rodzaje połączeń źródeł energii i odbiorników w układach trójfazowych to gwiazda i trójkąt. Źródła i odbiorniki mogą być kojarzone w układy gwiazda-gwiazda, gwiazda-trójkąt, trójkąt-trójkąt i trójkąt-gwiazda (rys. 3.2, 3.3, 3.4). W układach trójfazowych występują siły elektromotoryczne, napięcia i prądy w poszczególnych fazach, zwane wielkościami fazowymi, a także siły elektromotoryczne i napięcia przewodowe (międzyfazowe) oraz prądy przewodowe, płynące w przewodach łączących źródło z odbiornikiem. W układach symetrycznych napięcia i prądy w poszczególnych fazach przesunięte są względem siebie o kąt elektryczny 120° . Siły elektromotoryczne chwilowe trzech źródeł energii tworzących układ trójfazowy można opisać zależnościami:

$$e_U = E_{mU} \sin \omega t \quad (1)$$

$$e_V = E_{mV} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$e_W = E_{mW} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = E_{mW} \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

Dla odbiornika trójfazowego, którego elementy połączone są w gwiazdę:

$$U_p = \sqrt{3} \cdot U_f \quad (4)$$

$$I_p = I_f \quad (5)$$

Dla odbiornika trójfazowego, którego elementy połączone są w trójkąt:

$$U_p = U_f \quad (6)$$

$$I_p = \sqrt{3} \cdot I_f \quad (7)$$

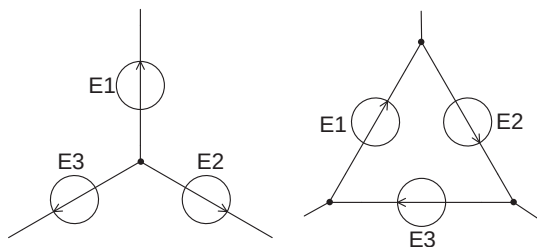
gdzie:

U_p – napięcie przewodowe (międzyfazowe),

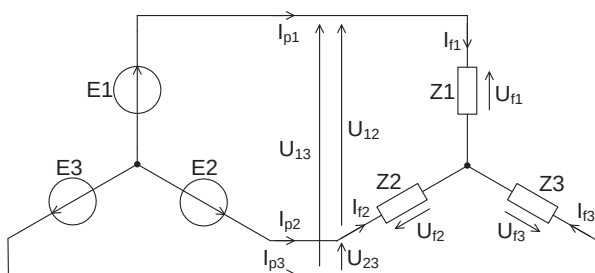
I_p – prąd przewodowy,

U_f – napięcie fazowe,

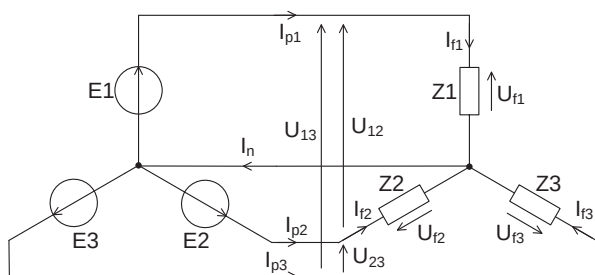
I_f – prąd fazowy.



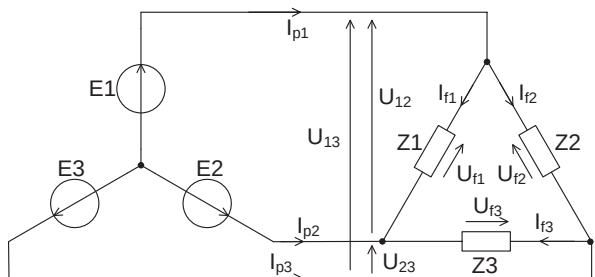
Rys. 3.1. Schemat połączenia trzech źródeł energii w gwiazdę i w trójkąt



Rys. 3.2. Schemat układu trójfazowego gwiazda-gwiazda z zaznaczonymi napięciami i prądami



Rys. 3.3. Schemat układu trójfazowego gwiazda-gwiazda (z przewodem neutralnym) z zaznaczonymi napięciami i prądami



Rys. 3.4. Schemat układu trójfazowego gwiazda-trójkąt z zaznaczonymi napięciami i prądami

3.2. Pomiar i obliczanie mocy w obwodach trójfazowych

W układzie trójfazowym czteroprzewodowym (trzy przewody fazowe i przewód neutralny), w przypadku odbiornika symetrycznego, należy zmierzyć moc czynną w jednej fazie P_f , a moc całego odbiornika obliczyć ze wzoru:

$$P_{3f} = 3 \cdot P_f \quad (8)$$

W przypadku odbiornika niesymetrycznego należy równocześnie zmierzyć moc czynną w każdej fazie, a moc całego odbiornika obliczyć ze wzoru:

$$P_{3f} = P_{f1} + P_{f2} + P_{f3} \quad (9)$$

W układzie trójfazowym trójprzewodowym (trzy przewody fazowe), moc czynną należy zmierzyć równocześnie dwoma watomierzami, włączając ich cewki prądowe i początki cewek napięciowych do dwóch dowolnych faz, a końce cewek napięciowych do trzeciej fazy (układ Arona). Moc całego odbiornika trójfazowego oblicza się ze wzoru:

$$P_{3f} = P_1 + P_2 \quad (10)$$

gdzie:

P_1, P_2 – moce zmierzone w układzie Arona.

Odbiornik trójfazowy, tak jak każdy odbiornik prądu zmiennego, posiada moc czynną oraz bierną. Moc całkowita (pozorna) jest sumą geometryczną mocy czynnej oraz biernej i dla odbiornika symetrycznego wynosi:

$$S_{3f} = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi)^2 + (3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \sin \varphi)^2} = 3 \cdot U_f \cdot I_f \quad (11)$$

Moc pozorną odbiornika można także obliczyć z równoważnej zależności:

$$S_{3f} = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(\sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi)^2 + (\sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_p \cdot \sin \varphi)^2} = \sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_p \quad (12)$$

W przypadku odbiornika niesymetrycznego moc pozorną oblicza się jako sumę mocy w poszczególnych fazach:

$$S_{3f} = U_{f1} \cdot I_{f1} + U_{f2} \cdot I_{f2} + U_{f3} \cdot I_{f3} \quad (13)$$

4. Elektryczne źródła światła

4.1. Wiadomości ogólne i wielkości fizyczne w technice świetlnej

W elektrycznych źródłach światła występuje zjawisko inkadescencji lub luminescencji. Inkadescencja polega na temperaturowym wytwarzaniu światła, a luminescencja to zjawisko polegające na emisji światła przez wzbudzone atomy lub cząsteczki materii, które przechodzą na niższy lub podstawowy poziom energetyczny. Bezpośrednie przejście do poziomu podstawowego wytwarza promieniowanie rezonansowe o jednej długości fali, jeżeli podczas takiego przejścia osiągane są pośrednie poziomy energetyczne to wysyłane promieniowanie ma różne długości fal. Wytworzenie kwantu energii może także wystąpić w wyniku rekombinacji zjonizowanych atomów ze swobodnym elektronem, który oddaje część lub całą swoją energię. Zjawisko to powoduje emisję kwantów energii o różnych długościach fal, a wytwarzane promieniowanie ma widmo złożone z wielu prążków. Przyczyna wzbudzenia atomów i cząsteczek oraz wywołania ich świecenia może być różna, dlatego istnieją różne rodzaje luminescencji. Wzbudzanie za pomocą pola elektrycznego nazywa się elektroluminescencją, wykorzystywane jest w lampach wyładowczych, gdzie dochodzi do emisji światła przez luminofory wzbudzane uderzającymi w nie elektronami, które są przyspieszane za pomocą napięcia występującego między elektrodami. Natomiast fotoluminescencja występuje w świetłówkach, gdzie światło wytwarzane jest przez luminofory wzbudzane padającymi na nie fotonami. Zjawisko to dzieli się jeszcze na fluorescencję (emisja światła zanika w krótkim czasie po ustaniu czynnika wzbudzającego) i fosforescencję (emisja światła występuje dłużej). Świetlówka jest lampą fluorescencyjną, w której promieniowanie nadfioletowe zamieniane jest na światło przez luminofor.

Podstawowe wielkości fotometryczne charakteryzujące źródła światła:

- strumień świetlny Φ [lm],
- światłość (natężenie promieniowania źródła światła) I [cd],
- luminancja (jaskrawość, blask) L [cd/m²],
- ogólny wskaźnik oddawania barw R_a [0–100],
- temperatura barwowa światła T_c [K].

Wielkości elektryczne charakteryzujące źródła światła:

- moc znamionowa P_n [W],
- znamionowe napięcie zasilania U_n [V],
- prąd znamionowy I_n [A],
- współczynnik mocy $\cos \varphi$.

Podstawowe wielkości eksploatacyjne charakteryzujące źródła światła:

- trwałość T [h],
- skuteczność świetlna η [lm/W],
- średnia trwałość T_{sr} [h],
- współczynnik utrzymania strumienia świetlnego,

- dopuszczalny zakres temperatury otoczenia,
- dopuszczalna pozycja pracy źródła światła,
- charakterystyki eksploatacyjne.

Podstawowe parametry konstrukcyjne charakteryzujące źródła światła:

- rodzaj bańki zewnętrznej (przezroczysta, matowa),
- kształt bańki zewnętrznej,
- typ trzonka,
- kształt żarnika, jarznika.

Poniżej zdefiniowano najważniejsze z wymienionych wielkości fizycznych.

Strumień świetlny Φ jest to moc promieniowania świetlnego określonej wiązki promieni świetlnych, w zakresie widzialnym dla człowieka, w danym miejscu przestrzeni. Promieniowanie widzialne (światło) obejmuje zakres fal od 380 nm (nadmocne) do 760 nm (podczerwień).

$$\Phi = k_m \sum_{i=1}^n F_{e\lambda} V_{\lambda} (\lambda_i - \lambda_{i-1}) \quad (1)$$

gdzie:

k_m – fotometryczny równoważnik promieniowania (680 lm/W),

$F_{e\lambda}$ – wartość mocy promieniowania odpowiadająca promieniowaniu w zakresie długości fal $\lambda_{i-1} \dots \lambda_i$ [W],

V_{λ} – względna skuteczność świetlna odpowiadająca wrażeniu wzrokowemu przeciętnego człowieka wywołanemu daną długością fali świetlnej.

Światłość I jest to kąтова gęstość strumienia świetlnego. Fizycznie ta wielkość charakteryzuje energię świetlną wypromieniowaną do danego kąta bryłowego ω :

$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (2)$$

Luminancja L źródła światła lub powierzchni związana jest z reakcją oka na bodziec świetlny i z przekazaniem do mózgu wrażenia jaskrawości. Luminancja w określonym kierunku, w punkcie powierzchni, jest to stosunek światłości I pola elementarnego dA otaczającego ten punkt do rzutu prostokątnego tego pola na płaszczyznę prostopadłą do tego kierunku:

$$L = \frac{I}{dA \cos \alpha} \quad (3)$$

Wskaźnik oddawania barw szczególny R_i jest miarą stopnia zgodności psychofizycznego wrażenia barwy wzorcowej próbki barwnej, oświetlonej badanym źródłem światła z wrażeniem barwy tej samej próbki, oświetlonej wzorcowym źródłem światła.

Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a jest wartością średnią z ośmiu szczególnych wskaźników oddawania barw, obliczoną dla określonych wzorcowych próbek barwnych, przyjmuje wartości od 0 do 100 i uznawany jest za korzystny gdy przyjmuje wartość większą od 85, a niekorzystny gdy jest równy lub mniejszy od 70 (tab. 4.1).

Temperatura barwowa światła T_c jest to temperatura ciała czarnego, które promieniuje światło o takiej samej chromatyczności, co światło badane. Wielkość ta jest odpowiednia dla źródeł żarowych, wytwarzających światło o rozkładzie widmowym zbliżonym do rozkładu widmowego światła promieniowanego przez ciało czarne, natomiast dla lamp wyładowczych, które mają widmo prążkowe, określa się temperaturę barwową najbliższą T_{cp} , czyli temperaturę ciała czarnego, którego barwa jest najbardziej podobna do barwy światła badanego.

Skuteczność świetlna źródła światła η jest to stosunek mocy promieniowania świetlnego Φ do mocy dostarczonej do źródła P :

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (4)$$

Trwałość źródła światła jest to czas, w którym ono świeciło, zanim stało się bezużyteczne lub uznane za takie zgodnie z przyjętymi kryteriami. Trwałość diod LED określa się w inny sposób, jest to czas, po którym dioda wytwarza 70 lub 50% początkowego strumienia świetlnego. Podczas badania skuteczności oświetlenia i spełnienia wymaganych norm mierzy się za pomocą przyrządu pomiarowego, wyposażonego w odpowiedni czujnik światłoczuły, natężenie oświetlenia w ściśle określonych miejscach badanego obiektu.

Natężenie oświetlenia E [lx] jest to powierzchniowa gęstość strumienia świetlnego. Fizycznie wielkość ta odpowiada jasności widzenia na powierzchni A oświetlonej strumieniem świetlnym Φ o danej światłości I :

$$E = \frac{\Phi}{A \cos \alpha} \quad (5)$$

gdzie:

α – kąt nachylenia powierzchni A do kierunku strumienia świetlnego Φ .

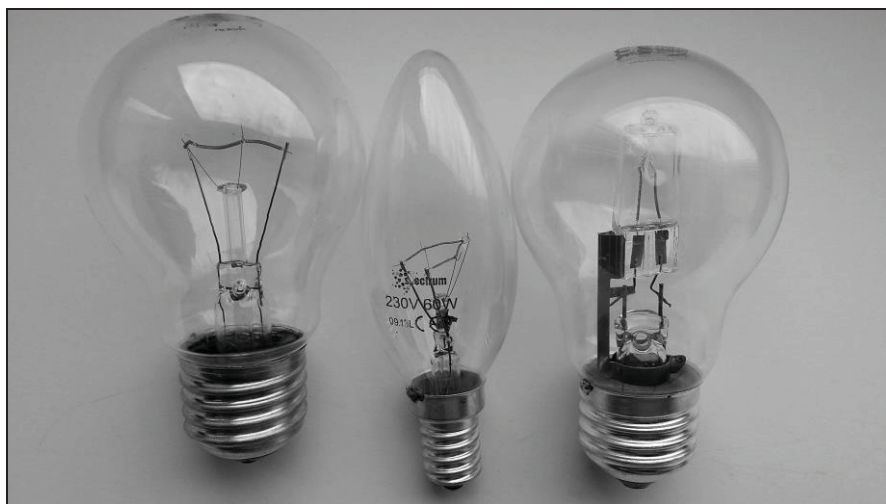
4.2. Żarówki

W lampach żarowych elementem świecącym jest przewód wykonany z wolframu (żarnik) rozgrzany na skutek przepływu prądu do temperatury, w której zaczyna emitować światło. Żarnik wykonany w postaci skrętki, zawieszony na molibdenowych podpórkach wtopionych w szklaną nóżkę, jest umieszczony w bańce wykonanej ze szkła sodowo-wapniowego lub krzemowego, wypełnionej gazem szlachetnym (argon, krypton, ksenon, azot) w celu zmniejszenia szybkości parowania jego materiału (rys. 4.1). W bańce żarówki może także panować próżnia. Skrętka wolframowa rozgrzewana jest do temperatury 2500–3000 K. Połączenie elektryczne żarówki zapewnia trzonek, który może mieć kształt gwintowy lub bagnetowy. Pierwszy z nich ma najczęściej oznaczenia E14 i E27, w których liczby oznaczają średnicę zewnętrzną, a drugi stosowany jest w celu zwiększenia odporności na drgania, np. w motoryzacji.

Widmo promieniowania żarówek jest ciągłe, a jego maksimum przypada na długość fali ok. 1000 nm i znajduje się poza zakresem widzialnym. Duża część promieniowania żarówki znajduje się w zakresie podczerwieni.

Wadą żarówek jest mała skuteczność świetlna, która zależy od ich mocy, rodzaju gazu wypełniającego i napięcia zasilającego. Żarówka przetwarza od 5 do 8% energii elektrycznej na świetlną, a pozostałą część na promieniowanie ciepłe. Żarówka w momencie włączenia pobiera ze źródła zasilania moc około dwunastokrotnie większą od znamionowej. Jej żywotność maleje w dużym stopniu przy pracy ze zwiększonym napięciem zasilającym. Światło uzyskiwane z żarówek jest światłem zbliżonym do słonecznego i charakteryzuje się wysokim wskaźnikiem oddawania barw. Źródła światła tego rodzaju dzieli się na żarówki głównego szeregu, reflektorowe, barwne i specjalistyczne (w sprzęcie AGD, medyczne, sygnalizacyjne, wstrząsoodporne, o przedłużonej trwałości).

W żarówkach halogenowych zastosowano cykl regeneracyjny, który zwiększa ich trwałość i dłużej utrzymuje skuteczność świetlną. Do gazu wypełniającego bańkę żarówki wprowadza się pierwiastki z grupy nazywanej halogenami (fluor, jod, brom), które w niższej temperaturze tworzą związki chemiczne z parami wolframu, a w wyższej temperaturze panującej blisko żarnika rozpadają się oddając wolfram. W żarówkach tego typu żarnik podgrzewany jest do wyższej temperatury niż w rozwiązaniach tradycyjnych, co powoduje zwiększenie skuteczności świetlnej i trwałości (2900–3100 K). Podstawową cechą konstrukcyjną żarówek halogenowych jest ich niewielki rozmiar, dla utrzymania wysokiej temperatury i efektu halogenowego, a także szkło kwarcowe odporne na wysoką temperaturę. Poprawę parametrów żarówek halogenowych, głównie zmniejszenie strat cieplnych, można uzyskać dzięki pokryciu ich wnętrza powłoką odbijającą promieniowanie podczerwone w kierunku żarnika.

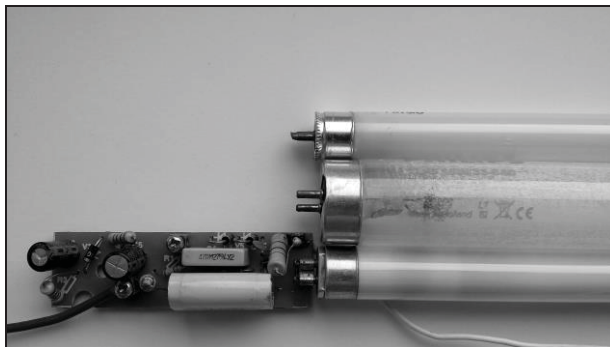


Rys. 4.1. Żarówki klasyczne z trzonkami E27 i E14 oraz żarówka halogenowa z trzonkiem E27

4.3. Świetlówki

Świetlówki są powszechnie stosowane w oświetleniu ogólnym wnętrz (rys. 4.2). Posiadają dużą skuteczność świetlną, wysoki ogólny wskaźnik oddawania barw, dużą trwałość i różne temperatury barwowe. Światło wytwarzane jest przez lumino-for pobudzany do świecenia promieniowaniem rezonansowym rtęci, które jest następstwem wyładowania między elektrodami. Lumino-for to związek chemiczny naniesiony na wewnętrzną powierzchnię lampy, przetwarzający promieniowanie nadfioletowe na widzialne o barwie światła zależnej od jego składu. Wnętrze świetlówki wypełnione jest argonem lub mieszaniną argonu i neonu pod ciśnieniem 2,5–5 hPa. Ciśnienie par rtęci w czasie pracy lampy wynosi 0,6–1 Pa i jest zależne od temperatury, a więc od tego czynnika zależy też skuteczność świetlna. Elektrody wykonane są z drutu wolframowego w postaci skrętki i pokryte emiterem ułatwiającym emisję elektronów. Wewnątrz znajduje się kilka miligramów rtęci, a w świetlówkach amalgamatowych rtęć występuje w związku chemicznym z metalem, z którego uwalniana jest w wyższej temperaturze, a wiązana w niższej. W ten sposób można uzyskać stałe ciśnienie par rtęci w pewnym zakresie temperatury, stabilny strumień świetlny i mniejszy wpływ temperatury na skuteczność świetlną. Świetlówki mają postać prostej lub zakrzywianej w różny sposób rurki szklanej. Świetlówki kompaktowe mają wbudowany elektroniczny układ zapłonowy i stabilizujący oraz taki sam trzonek jak żarówki, ale przewyższają około pięciokrotnie ich skuteczność świetlną i od sześciu do dwudziestu razy średnią trwałość (rys. 4.3).

Świetlówki do zapoczątkowania wyładowania jarzącego w gazie potrzebują zwiększonego napięcia, które wytwarzane jest w klasycznym lub elektronicznym układzie zapłonowym. W klasycznym układzie zapłonowym po włączeniu zasilania układu prąd płynie przez dławik, elektrody świetlówki i zapłonnik, który jest małą wyładowczą lampką neonową ze stykami termobimetalowymi. Styki te początkowo są rozwarne, wyładowanie w neonie zwiększa ich temperaturę, powoduje wygięcie i połączenie. Prąd płynący w układzie zwiększa się i podgrzewa elektrody świetlówki. Następnie temperatura styków zmniejsza się i dochodzi do ich rozwarcia, duży prąd płynący przez dławik (cewkę indukcyjną) szybko zanika, co powoduje zaindukowanie się w nim wysokiego napięcia (1000–1500 V) i zapłon świetlówki. Po zapłonie niskie napięcie panujące na lampie nie pozwala ponownie zaświecić się neonówce zapłonnika, a wartość prądu płynącego przez świetlówkę jest ograniczona przez reaktancję indukcyjną dławika. Wadą klasycznego układu zapłonowego świetlówki jest to, że proces trwa stosunkowo długo, a w tym czasie elektrody są podgrzewane i zużywają się w znacznym stopniu. Dławik jest elementem o dużej masie i zużywającym znaczną część energii. Elektroniczny układ zapłonowy działa znacznie szybciej i skuteczniej, wydłuża trwałość świetlówki, zużywa znikomą część energii i zapewnia znacznie większą częstotliwość prądu o przebiegu prostokątnym (40–120 kHz), zwiększającą skuteczność świetlną lampy.



Rys. 4.2. Światłówki liniowe i elektroniczny układ zapłonowy



Rys. 4.3. Światłówki kompaktowe

4.4. Lampy wyładowcze

Głównym elementem lampy rtęciowej jest jarznik wykonany ze szkła kwarcowego i umieszczony w zewnętrznej bańce szklanej wykonanej ze szkła sodowego. Wewnątrz jarznika wypełnionego argonem i rtęcią zatopione są wolframowe elektrody, połączone z doprowadnikami prądu za pomocą taśmy molibdenowej. Elektrody główne i pomocnicze umożliwiają zapoczątkowanie pracy lampy bez stosowania specjalnego układu zapłonowego. Wyładowanie łukowe rozpoczyna się między elektrodą główną i pomocniczą, a następnie stopniowo przenosi się między elektrody główne. Po odparowaniu rtęci znajdującej się w jarzniku wyładowanie łukowe staje się stabilne. W celu ograniczania i stabilizacji prądu stosuje się dławiki indukcyjne. Luminofor, którym pokryta jest bańka zewnętrzna, przekształca znaczną część promieniowania ultrafioletowego na światło widzialne, poprawia sprawność lampy i widmo emitowanego światła oraz ogranicza emisję szkodliwego dla wzroku ultrafioletu. Zmieszanie niebieskiego światła lampy rtęciowej z czerwonym światłem wytwarzanym przez luminofor powoduje powstanie białego światła o ogólnym wskaźniku oddawania barw R_a równym 50.

Zwiększenie tego wskaźnika jest możliwe w lampie rtęciowo-żarowej, w której skrętka wolframowa jest połączona szeregowo z jarznikiem i dodatkowo ogranicza prąd lampy. Widmo światła lamp rtęciowych wysokoprężnych jest prążkowe, a rtęciowo-żarowych uzupełnione jest światłem o widmie ciągłym. Rtęciówki są sukcesywnie wycofywane i zastępowane lampami sodowymi i metalohalogenkowymi. Lampy sodowe charakteryzują się dużą skutecznością świetlną i trwałością do 32000 godzin (rys. 4.4). Ze względu na niski ogólny wskaźnik oddawania barw są głównie stosowane w oświetleniu zewnętrznym. Jarznik zamknięty w bańce ze szkła sodowego wykonany jest z polikrystalicznego tlenku glinu i wypełniony sodem, rtęcią oraz gazem pomocniczym (argon lub ksenon). Zapłon lampy rozpoczyna się przez podanie do elektrod impulsu wysokiego napięcia o wartości 4–5 kV, wytworzonego przez elektroniczny układ zapłonowy. Wyładowanie w parach sodu powoduje, że widmo wytwarzanego światła jest prążkowe, a barwa światła żółta. Zwiększenie ciśnienia sodu w jarzniku do wartości 10^5 Pa powoduje wzrost ogólnego wskaźnika oddawania barw, ale zmniejsza skuteczność świetlną.

Lampy sodowe niskoprężne mają bardzo wysoką skuteczność świetlną, jednak widmo ich światła o barwie żółtej składa się tylko z dwóch prążków (589 i 589,6 nm) i nie mają praktycznie możliwości oddawania barw. Jarznik wypełniony jest argonem, neonem i sodem. Po zapłonie przez kilka minut neon wytwarza światło czerwone, a po odparowaniu sodu powstaje monochromatyczne światło barwy żółtej. Promieniowanie wytwarzane przez neon zanika, ponieważ napięcie jonizacji sodu jest znacznie niższe niż neonu.

W lampach wysokoprężnych ciśnienie par sodu z dodatkiem par rtęci i gazu pomocniczego wynosi ok. 2 MPa. Barwa światła jest złocistożółta, monochromatyczna. W lampach niskoprężnych strumień świetlny powstaje w wyniku wyładowania elektrycznego w parach sodu o ciśnieniu 1 Pa. Barwa światła jest żółtopomarańczowa. Stabilizacja prądu odbywa się za pomocą dławików.



Rys. 4.4. Lampa sodowa i samochodowa lampa ksenonowa

Lampa metalohalogenkowa jest udoskonaloną konstrukcją wysokoprężnej lampy rtęciowej, w jej jarzniku znajdują się związki chemiczne nazywane halogenkami (jodki i bromki metali ziem rzadkich), które powodują wzbogacenie widma światła o prążki charakterystyczne dla promieniowania metali występujących w halogenkach. Jarznik wykonywany jest ze szkła kwarcowego lub polikrystalicznego tlenku glinu, o kształcie walcowym lub sferycznym. Przykładowe metale emitujące widmo wieloprążkowe to dysproz (Dy), holm (Ho), tul (Tm), cyna (Sn). Prążki w zakresie różnych barw światła emitują tytan (Ti), sód (Na), lit (Li), ind (In). Odpowiedni skład związków chemicznych wypełniających jarznik umożliwia uzyskanie światła o różnej barwie. Do zapłonu i prawidłowej pracy lampy stosuje się takie same układy zapłonowe i dławiki jak dla lamp sodowych wysokoprężnych. Stosowane są w oświetleniu wewnętrznym (sklepy, zakłady przemysłowe, hale sportowe) jak i zewnętrznym (architektura, reklamy) oraz w samochodach (lampy ksenonowe).

4.5. Diody elektroluminescencyjne

Diody LED (Light Emitting Diode) są coraz częściej stosowane w różnych obszarach, gdzie wymagane jest światło barwne lub białe. W diodzie spolaryzowanej w kierunku przewodzenia zachodzi zjawisko rekombinacji czyli przemieszczania się elektronów z wyższego poziomu energetycznego na niższy, z obszaru N do obszaru P, z emitowaniem kwantów energii elektromagnetycznej w zakresie widzialnym.

Do wytwarzania diod typu LED stosuje się pierwiastki z III i V grupy układu okresowego. W zależności od rodzaju półprzewodnika i sposobu jego domieszkowania uzyskuje się różne barwy światła. Główne problemy związane z działaniem diody świecącej to częściowe wewnętrzne pochłanianie promieniowania i konieczność odprowadzania intensywnie wytwarzanego ciepła, powstającego z powodu dużej gęstości prądu. Istotne jest także ograniczanie dużej luminancji, charakterystycznej dla tego rodzaju źródła światła, a szkodliwej dla narządu wzroku. Podstawowe konstrukcje diod LED to elementy pojedyncze, panele diodowe i lampy zasilane napięciem sieciowym o mocach od kilku do kilkunastu watów, wyposażone w tradycyjne trzonki gwintowe (rys. 4.5). Zalety lamp diodowych typu LED to duża skuteczność świetlna i trwałość od 25000 do 100000 godzin. W celu uzyskania światła białego stosuje się technologię RGB, polegającą na zmieszaniu w równych proporcjach trzech barw światła wytwarzanych przez diodę czerwoną, zieloną i niebieską. Rzadziej stosuje się inny sposób, polegający na wytworzeniu przez diodę promieniowania nadfioletowego, które pobudza do świecenia luminofor. Możliwe jest także wykorzystanie luminoforu do przetwarzania światła niebieskiego w żółte i po zmieszaniu tych barw uzyskanie światła białego lub zastosowanie różnych typów luminoforów, pobudzanych do świecenia światłem niebieskim.

Diody organiczne wytwarzające światło OLED (Organic Lighting Emitting Diode) to powierzchniowe źródła światła zbudowane z półprzewodników polimerowych, w których grubość aktywnych warstw nie przekracza 500 nm, a całkowita

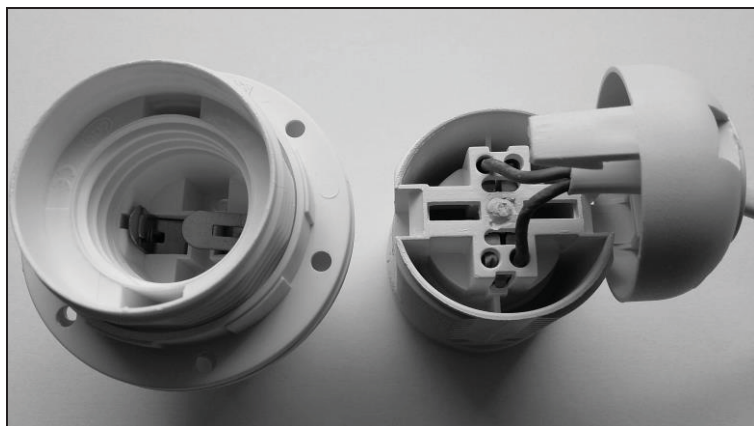
grubość wszystkich elementów składowych wynosi kilka milimetrów. Wykorzystywane są głównie przy produkcji wyświetlaczy i ekranów. Światło wytwarzane jest w wyniku rekombinacji elektronów i dziur w warstwie emisyjnej cząstek organicznych. Pomiędzy anodą i katodą znajdują się organiczne związki półprzewodnikowe (polimery) i amorficzne materiały małowartościowe. Anody wytwarzane są z roztworu stałego tlenku indy i tlenku indowo-cynowego, a katody z glinu i wapnia o niskiej pracy wyjścia elektronów. Dioda nie zasilana stanowi substancję przezroczystą. Białe światło emitowane przez OLED ma wysoki wskaźnik oddawania barw, nie zawiera promieniowania nadfioletowego i podczerwonego. Dioda OLED wykonana w technologii powierzchniowej charakteryzuje się znacznie mniejszą luminancją niż dioda LED wytwarzana w technologii punktowej i nie wymaga dodatkowych elementów do odprowadzania ciepła.



Rys. 4.5. Lampy diodowe

4.6. Oprawy oświetleniowe

Oprawa oświetleniowa to element, którego zadaniem jest zamocowanie jednego lub wielu źródeł światła i połączenie z instalacją elektryczną w sposób ułatwiający jego wymianę, nadanie odpowiedniego kierunku strumieniowi świetlnemu oraz rozproszenie go lub skupienie w odpowiednim miejscu przez zastosowanie odbłyśnika, soczewki albo klosza rozpraszającego (rys. 4.6). Oprawa oświetleniowa może zawierać również elementy pozwalające na zmianę kierunku strumienia świetlnego. Niektóre oprawy zmieniają barwę światła w celach estetycznych lub użytkowych. Do funkcji oprawy należy także zabezpieczenie źródła światła przed uszkodzeniem.



Rys. 4.6. Podstawowe oprawy oświetleniowe do lamp z trzonkiem E27

Tab. 4.1. Skuteczność świetlna i wskaźnik oddawania barw dla różnych źródeł światła

Źródło światła	Skuteczność świetlna η [lm/W]	Ogólny wskaźnik oddawania barw R_a (0–100)
Żarówka	5,75–16,6	około 100
Żarówka halogenowa	14–28,5	około 100
Lampa żarowo-rtęciowa	10–26	40–60
Lampa rtęciowa	36–61	15–55
Świetlówka	40–105	52–95
Lampa metalohalogenkowa	70–120	70–95
Wysokoprężna lampa sodowa	68–150	22–75
Niskoprężna lampa sodowa	100–206	0 (monochromatyczna)
Dioda LED	50–120 35–75 (wart. średnia)	0 (monochromatyczna) 80 (światło białe)

5. Maszyny prądu stałego

5.1. Ogólna charakterystyka maszyn elektrycznych prądu stałego

Maszyny elektryczne prądu stałego można ogólnie podzielić na silniki i prądnice. Silnik to maszyna przetwarzająca energię elektryczną w mechaniczną. Prądnica to maszyna przetwarzająca energię mechaniczną w elektryczną. Działanie silnika oparte jest na zjawisku oddziaływania siły mechanicznej na przewodnik przewodzący prąd i umieszczony w polu magnetycznym. Działanie prądnicy oparte jest na indukowaniu napięcia w przewodniku poruszającym się w polu magnetycznym lub w przewodniku nieruchomym, który jest obejmowany przez zmienne w czasie pole magnetyczne. Źródłem pola magnetycznego w maszynach są magnesy trwałe lub uzwojenia nawinięte na rdzeniach magnetycznych i przewodzące prąd (wzbudzenie elektromagnetyczne). Podstawowe uzwojenia występujące w maszynach prądu stałego to uzwojenie wzbudzenia oraz twornika.

Pierwsze z nich jest źródłem pola magnetycznego, natomiast w drugim indukuje się (tworzy) napięcie (gdy pole magnetyczne przenikające uzwojenie jest zmienne w czasie lub uzwojenie porusza się w stałym polu magnetycznym) i działa na niego siła mechaniczna (oddziaływanie pola magnetycznego na ruchome ładunki elektryczne przepływające przez uzwojenie). Właściwości maszyn elektrycznych opisywane są za pomocą charakterystyk graficznych. Dla silnika najważniejszą krzywą jest charakterystyka mechaniczna czyli zależność prędkości obrotowej od momentu obciążenia $n=f(M)$. Działanie prądnicy opisywane jest za pomocą charakterystyki biegu jałowego $E_0=f(I_w)$ (zależność indukowanej siły elektromotorycznej od prądu wzbudzenia) i charakterystyki zewnętrznej $U=f(I)$ (zależność napięcia na zaciskach prądnicy od prądu obciążenia).

5.2. Maszyny komutatorowe

Nazwa tych maszyn ma związek z ich głównym elementem, mającym za zadanie zmianę kierunku prądu w poszczególnych zwojach uzwojenia twornika, które w czasie wirowania zmieniają swoje położenie i przemieszczają się od jednego bieguna magnetycznego do drugiego. Zjawisko to nazywane jest komutacją. Komutator wykonany jest w postaci pierścienia złożonego z miedzianych wycinków przewodzących prąd, połączonych z końcami zwojów i oddzielonych od siebie warstwami izolacji. Jest osadzony na wałku wirnika i współpracuje z nieruchomymi szczotkami grafitowymi, dociskanymi do niego za pomocą sprężyn i umieszczonymi w szczotkotrzymaczach. Szczotki umożliwiają połączenie ruchomego uzwojenia twornika z nieruchomym uzwojeniem wzbudzenia i źródłem zasilania. Uzwojenia wykonuje się z emaliowanego drutu miedzianego, umieszczonego w żłobkach rdzenia i zabezpieczonego przed wypadnięciem za pomocą klinów żłobkowych.

W celu ochrony połączeń czołowych uzwojenia twornika przed uszkodzeniem można stosować bandaż z drutu stalowego nieferromagnetycznego lub taśmy izolacyjnej z włókna szklanego. Ze zjawiskiem komutacji związane są duże siły tarcia

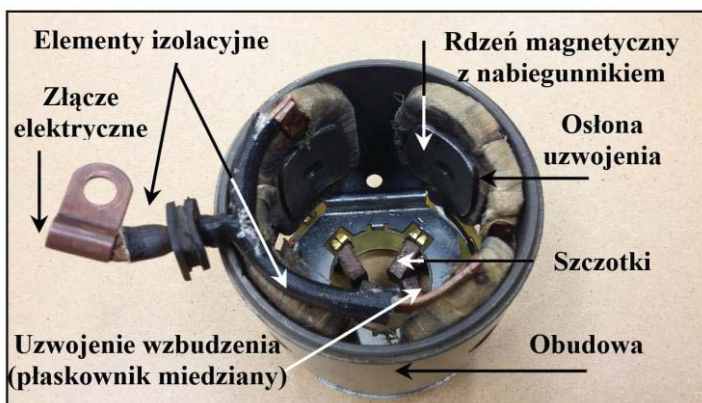
oraz iskrzenie spowodowane dużą gęstością prądu i przerywaniem jego przepływu, co zmniejsza trwałość i przyspiesza zużycie zespołu szczotki-komutator. Ponadto pole magnetyczne twornika osłabia i zniekształca pole wytwarzane przez uzwojenie wzbudzenia lub magnesy trwałe. Jest to zjawisko oddziaływania twornika, powodujące zmianę rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej i przesunięcie strefy neutralnej maszyny. W tej strefie znajdują się szczotki, a w prętach uzwojenia twornika, które tam się znajdują w czasie ruchu obrotowego, nie indukuje się napięcie. Z tego względu w większych maszynach stosuje się uzwojenia kompensacyjne i bieguny komutacyjne. Uzwojenie kompensacyjne jest szeregowo połączone z uzwojeniem twornika i w taki sposób umieszczone w nabiegownikach głównych, żeby jego pole magnetyczne przeciwdziało oddziaływaniu twornika. Bieguny komutacyjne wytwarzane są przez uzwojenia i nabiegunniki umieszczone pomiędzy nabiegownikami głównymi, w strefie neutralnej. Komutacja powoduje zmianę kierunku prądu w uzwojeniu twornika i wytwarzanie zmiennego strumienia magnetycznego. Z tego powodu rdzeń magnetyczny wirnika jest wykonywany w postaci pakietu złożonego z warstw blachy magnetycznej przedzielonych warstwami izolacji, w celu zmniejszenia wartości prądów wirowych indukowanych w rdzeniu przez zmienny strumień magnetyczny i związanych z tym strat energii w postaci ciepła. Rdzeń stojana czyli jarzmo może być wykonany z materiału litego, ponieważ występujące tam pole magnetyczne jest stałe w czasie. Odpowiednio ukształtowana zewnętrzna część rdzenia stojana nazywa się nabiegunnikiem. Tradycyjne maszyny prądu stałego można podzielić na kilka rodzajów:

- maszyny z magnesem trwałym (brak uzwojenia wzbudzenia),
- maszyny obcowzbudne (uzwojenie wzbudzenia zasilane jest z zewnętrznego źródła energii),
- maszyny szeregowo (uzwojenie wzbudzenia jest połączone w szereg z uzwojeniem twornika),
- maszyny bocznikowe (uzwojenie wzbudzenia jest połączone równolegle z uzwojeniem twornika),
- maszyny szeregowo-bocznikowe (uzwojenie wzbudzenia jest częściowo połączone w szereg, a częściowo równolegle z uzwojeniem twornika).

Silnik bocznikowy posiada sztywną charakterystykę mechaniczną (zależność prędkości obrotowej od momentu obciążenia), a silnik szeregowy miękka (elastyczną). Zaletą silnika bocznikowego jest niewielka zmiana prędkości obrotowej w funkcji obciążenia, a silnika szeregowego duży moment rozruchowy. Charakterystyka silnika szeregowo-bocznikowego łączy w sobie zalety silnika bocznikowego i szeregowego.

Maszyny komutatorowe dużej mocy stosowane są w energetyce, transporcie, przemyśle wydobywczym i galwanizacyjnym. W elektrowni prądnice pełnią funkcję zasilania uzwojenia wzbudzenia generatorów synchronicznych, a silniki stanowią rezerwę w przypadku awarii układu zasilania potrzeb własnych bloku energetycznego. Silniki pracujące w układach napędowych pojazdów mechanicznych (tro-

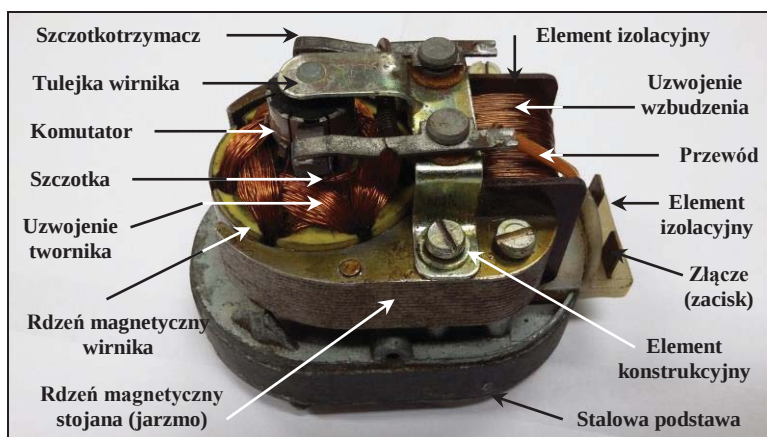
lejbusey, tramwaje, lokomotywy) zastępowane są przez bardziej sprawne, mające mniejszą masę i koszt produkcji, jednostki z komutacją elektroniczną lub maszyny prądu zmiennego. Przyczynił się do tego również rozwój oraz spadek kosztów wytwarzania materiałów i układów elektronicznych, przetwarzających prąd stały na zmienny i sterujących pracą nowoczesnych silników. Maszyny komutatorowe małej mocy stosowane są głównie w pojazdach samochodowych do napędu różnych elementów mechanicznych oraz w użytkowych lub hobbystycznych urządzeniach i narzędziach przenośnych, zasilanych za pomocą akumulatorów lub baterii (rys. 5.1, 5.2, 5.3). W tych przypadkach maszyny komutatorowe są chętnie wykorzystywane z powodu ich niewysokiej ceny oraz występujących tam źródeł zasilania wytwarzających prąd stały.



Rys. 5.1. Elementy nieruchome komutatorowego silnika prądu stałego pracującego w rozruszniku samochodowym



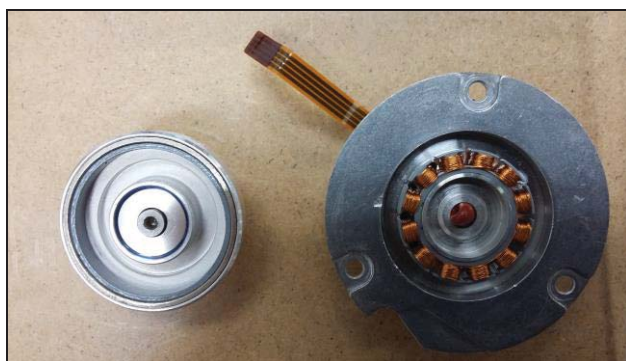
Rys. 5.2. Elementy ruchome komutatorowego silnika prądu stałego pracującego w rozruszniku samochodowym



Rys. 5.3. Budowa komutatorowego silnika prądu stałego małej mocy

5.3. Silniki z komutacją elektroniczną

W celu wyeliminowania problemu mechanicznej zmiany kierunku prądu w uzwojeniu twornika skonstruowano silnik bez szczotek i komutatora, w którym zasilanie i przerywanie przepływu prądu w poszczególnych cewkach jest realizowane przez sterujący układ elektroniczny. Silniki te posiadają uzwojenie twornika w stojanie i magnes trwały w wirniku (żelazny lub neodymowy) (rys. 5.4). Sterowanie prądem twornika odbywa się z wykorzystaniem sygnału z czujników umieszczonych wewnątrz maszyny w stojanie lub nawet bez udziału takich elementów. Dominujące znaczenie w tej technice mają silniki typu BLDC (BrushLess Direct Current motor). Uzwojenie twornika jest sekwencyjnie zasilane i generuje wirujące pole magnetyczne. Pole oddziałuje z magnesem trwałym wirnika wprowadzając go w ruch obrotowy. Układ elektroniczny zasilany jest ze źródła prądu stałego, a jego tranzystory wykonawcze sterowane są za pośrednictwem czujników Halla umieszczonych w stojanie silnika.



Rys. 5.4. Wirnik z magnesem trwałym i stojan z uzwojeniem silnika bezszczotkowego z komutacją elektroniczną

Działanie silnika podobne jest do pracy maszyny synchronicznej, nie występuje tu poślizg jak w przypadku silnika indukcyjnego. Zaletą maszyny jest duża moc i moment obrotowy w stosunku do jej masy i objętości, znaczna sprawność, a przede wszystkim brak szczotek i komutatora. Uszkodzenie silnika występuje praktycznie tylko z powodu zużycia łożysk. Silniki tego typu stosuje się w motoryzacji, urządzeniach gospodarstwa domowego, napędach komputerowych, lotnictwie, zabawkach mechanicznych.

5.4. Silniki krokowe

W silnikach krokowych (skokowych) występuje przekształcanie impulsów elektrycznych w ruchy mechaniczne. W maszynach tych każdy impuls podany na uzwojenia silnika powoduje obrót wirnika o niewielki kąt, a więc silniki mogą pracować w napędach wymagających precyzyjnych ustawień elementów ruchomych. Występują one jako bipolarne z dwoma uzwojeniami lub unipolarne z większą liczbą cewek i wyprowadzeń, do których dołącza się układ sterujący umożliwiający zmianę kierunku obrotów, prędkości i obrót o określony kąt. Częstotliwość impulsów sterujących decyduje o prędkości wirnika. Pojedynczy skok wirnika w silnikach krokowych wynosi 0,72–3,6 stopnia. Wirnik silnika można precyzyjnie ustawić w potrzebnym położeniu podając odpowiednią liczbę impulsów. Maksymalna prędkość obrotowa może przyjmować wartość rzędu kilku do kilkunastu obrotów na sekundę, przy czym silnik dysponuje cały czas pełnym momentem obrotowym. Dzięki temu takie silniki mogą zastąpić stosowane wcześniej klasyczne rozwiązania z przekładnią i serwomechanizmy. Zaletą ich jest możliwość pracy w pętli otwartej czyli bez sprzężenia zwrotnego i informacji o aktualnym położeniu wirnika. Silniki krokowe nie mają szczotek, komutatora i elementów, w których występuje znaczne tarcie, z tego powodu są bardzo trwałe. Czas ich niezawodnego działania zależy od stanu i wytrzymałości łożysk, występują w napędach komputerowych, drukarkach, serwomechanizmach.

5.5. Podstawowe zależności matematyczne

Napięcie rotacji indukujące się w przewodniku poruszającym się w polu magnetycznym określa zależność:

$$e_r = l_i \cdot v \cdot B \quad (1)$$

gdzie:

l_i – czynna długość jednego przewodu znajdującego się w polu o indukcji B ,

v – prędkość liniowa przewodu,

B – maksymalna wartość indukcji.

Całkowita długość czynna przewodów twornika maszyny elektrycznej, znajdujących się w ruchu w polu magnetycznym wzbudzenia jest równa:

$$l_t = l_i \frac{N}{2a} \cdot \frac{b_p}{\tau_p} \quad (2)$$

gdzie:

N – całkowita liczba prętów połączonych szeregowo,

a – liczba par gałęzi równoległych,

b_p – szerokość nabiegunnika,

τ_p – podziałka biegunowa.

W przypadku uzwojenia pętlicowego liczba par gałęzi równoległych jest równa liczbie par biegunów, natomiast dla uzwojenia falistego $a=1$. Znając wartość strumienia wzbudzenia ϕ indukcję magnetyczną można obliczyć ze wzoru:

$$B = \frac{\phi}{b_p \cdot l_i} \quad (3)$$

Prędkość obwodowa, z jaką poruszają się pręty, wyraża się zależnością:

$$v = \frac{2\tau_p \cdot p \cdot n}{60} \quad (4)$$

gdzie:

p – liczba par biegunów magnetycznych,

n – prędkość obrotowa wirnika.

Na podstawie zależności 1, 2, 3 i 4 oblicza się napięcie indukowane we wszystkich czynnych prętach uzwojenia twornika:

$$E = \frac{N \cdot p}{60a} \cdot \phi \cdot n = c_e \cdot \phi \cdot n \quad (5)$$

gdzie:

c_e – stała elektromagnetyczna maszyny.

Napięcie indukowane w uzwojeniu twornika maszyny można również wyrazić w postaci:

$$E = G_{sr} \cdot I_f \cdot \omega \quad (6)$$

gdzie:

G_{sr} – indukcyjność wzajemna między uzwojeniami stojana i wirnika,

I_f – prąd wzbudzenia,

ω – prędkość kątowna wirnika.

Napięcie na zaciskach prądnicy:

$$U_a = E - I_a \cdot R_{ac} = G_{sr} \cdot I_f \cdot \omega - I_a \cdot R_{ac} \quad (7)$$

gdzie:

I_a – prąd twornika,

R_{ac} – rezystancja całkowita w obwodzie twornika.

Napięcie na zaciskach silnika:

$$U_a = E + I_a \cdot R_{ac} = G_{sr} \cdot I_f \cdot \omega + I_a \cdot R_{ac} \quad (8)$$

Rezystancja całkowita w obwodzie twornika:

$$R_{ac} = R_a + R_k + R_p + R_{sz} \quad (9)$$

gdzie:

R_a – rezystancja uzwojenia twornika,

R_k – rezystancja komutatora,

R_p – rezystancja przejścia między szczotkami i komutatorem,

R_{sz} – rezystancja szczotek.

Moment elektromagnetyczny działający na uzwojenie twornika maszyny:

$$M_e = c_m \cdot \phi \cdot I_a \quad (10)$$

gdzie:

c_m – stała elektromechaniczna maszyny,

ϕ – maksymalna wartość strumienia wzbudzenia,

I_a – prąd twornika.

Moc elektryczna maszyny:

$$P_e = U \cdot I \quad (11)$$

gdzie:

U – napięcie zasilania silnika lub napięcie na zaciskach prądnicy,

I – prąd zasilania silnika lub prąd obciążenia prądnicy.

Moc mechaniczna maszyny:

$$P_m = \omega \cdot M \quad (12)$$

gdzie:

ω – prędkość kątowna wirnika,

M – moment obrotowy.

Sprawność silnika oblicza się jako stosunek mocy mechanicznej do elektrycznej, a w przypadku prądnicy odwrotnie.

6. Maszyny prądu zmiennego

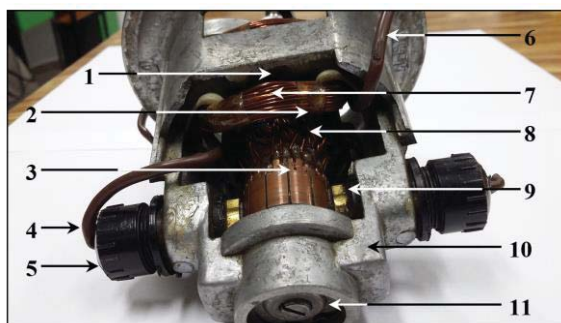
6.1. Ogólna charakterystyka maszyn elektrycznych prądu zmiennego

Maszyny elektryczne prądu zmiennego można ogólnie podzielić na jednofazowe i trójfazowe silniki, prądnice i transformatory. Silnik to maszyna przetwarzająca energię elektryczną w mechaniczną. Prądnica to maszyna przetwarzająca energię mechaniczną w elektryczną. Transformator to maszyna służąca do zmiany wartości napięcia elektrycznego za pośrednictwem zmiennego pola magnetycznego, wykorzystująca zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Działanie silnika oparte jest na zjawisku oddziaływania siły mechanicznej na przewodnik przewodzący prąd i umieszczony w polu magnetycznym. W silniku indukcyjnym siła mechaniczna działa na prąd indukowany w uzwojeniu twornika pod wpływem wirującego pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie wzbudzenia. Działanie prądnicy oparte jest na indukowaniu napięcia w przewodniku poruszającym się w polu magnetycznym lub w przewodniku nieruchomym, który jest obejmowany przez zmienne w czasie pole magnetyczne. Źródłem pola magnetycznego w maszynach są magnesy trwałe lub uzwojenia nawinięte na rdzeniach magnetycznych i przewodzące prąd. Rdzenie maszyn prądu zmiennego wykonywane są najczęściej w postaci pakietowanej (warstwy blachy przedzielone izolatorem), ponieważ zmienny strumień magnetyczny indukuje w rdzeniu prądy wirowe i w ten sposób zwiększa jego temperaturę. Podstawowe uzwojenia w maszynach wirujących prądu zmiennego to uzwojenie wzbudzenia i twornika. Pierwsze z nich jest źródłem pola magnetycznego, natomiast w drugim indukuje się (tworzy) napięcie oraz działa siła mechaniczna na płynący przez nie prąd. Uzwojenia transformatora określa się jako pierwotne i wtórne. Z grupy maszyn wirujących prądu zmiennego najczęściej są stosowane silniki komutatorowe, silniki indukcyjne (asynchroniczne) oraz prądnice synchroniczne. Worniki silników asynchronicznych obracają się z prędkością mniejszą od prędkości wirującego pola magnetycznego, a worniki maszyn synchronicznych wirują z prędkością równą prędkości pola magnetycznego. Worniki silników komutatorowych osiągają większe prędkości obrotowe od rotorów silników indukcyjnych i synchronicznych. Maszyny z komutatorem posiadają także większy moment rozruchowy.

6.2. Silnik komutatorowy jednofazowy

Najczęściej stosowany silnik komutatorowy jednofazowy szeregowy zbudowany jest podobnie i działa analogicznie jak silnik prądu stałego tego samego typu (rys. 6.1). Moment wytworzony w tym silniku jest momentem pulsującym o częstotliwości dwukrotnie większej od częstotliwości napięcia zasilającego. Momentem użytecznym jest moment średni. Silnik zasilany prądem stałym może posiadać rdzeń stojana wykonany z litego materiału, natomiast zasilany prądem przemiennym wyposażony jest w rdzeń pakietowany, zbudowany z warstw blach magnetycznych izolowanych między sobą, w celu zmniejszenia strat energii z powodu

indukowania się w nim prądów wirowych. W fazie projektowania silnika należy uwzględnić, że opór dla przepływającego prądu ma charakter impedancyjny, a więc będzie bardziej ograniczał natężenie prądu niż w przypadku występowania tylko rezystancji. W porównaniu z silnikiem prądu stałego takie samo napięcie powinno zasilać mniejszą liczbę zwojów. Regulacja prędkości obrotowej odbywa się przez zmianę napięcia zasilającego. Można w tej grupie wyróżnić silniki uniwersalne, które mogą być zasilane zarówno prądem stałym jak i zmiennym. Ze względu na stosunkowo małe wymiary i dużą moc oraz znaczne prędkości obrotowe (15000–30000 obr/min), silniki te znalazły liczne zastosowania w urządzeniach gospodarstwa domowego i elektronarzędziach (odkurzacze, roboty kuchenne, młynki, suszarki, sokowirówki, wiertarki, szlifierki) (rys. 6.2).



Rys. 6.1. Budowa silnika komutatorowego prądu zmiennego: 1 – rdzeń magnetyczny stojana; 2 – rdzeń magnetyczny wirnika; 3 – komutator; 4 – przewód łączący uzwojenie wzbudzenia ze szczotką; 5 – szczotkotrzymacz; 6 – przewód łączący uzwojenie wzbudzenia z zaciskiem silnika; 7 – uzwojenie wzbudzenia; 8 – uzwojenie twornika; 9 – szczotka; 10 – obudowa; 11 – łożysko wałka wirnika



Rys. 6.2. Zastosowanie silnika komutatorowego w mikserze kuchennym

6.3. Maszyny indukcyjne (asynchroniczne)

Silnik indukcyjny posiada nieruchome uzwojenie wzbudzenia, a ruchome uzwojenie twornika może być wykonane w postaci przewodów lub sztywnych prętów zwartych z dwóch stron za pomocą pierścieni. Wirnik silnika pierwszego rodzaju wyposażony jest w pierścienie ślizgowe połączone z trzema uzwojeniami i stykającymi się ze szczotkami przewodzącymi prąd do zewnętrznych impedancji, z tego względu silnik nazywany jest pierścieniowym. Wirnik silnika drugiego rodzaju wyposażony jest w rdzeń magnetyczny oraz osadzone na nim pręty przewodzące i pierścienie zwierające, tworzące tak zwaną klatkę, silnik jest nazywany klatkowym (rys. 6.3, 6.4, 6.5). Silniki klatkowe są często i chętnie stosowane ze względu na prostotę konstrukcji i mniejszy koszt produkcji. Dominujące znaczenie w zasadzie działania tych silników ma zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Silniki nazywane są również asynchronicznymi, co oznacza że pole magnetyczne wiruje z inną prędkością niż wirnik. Przemienny prąd w symetrycznym trójfazowym uzwojeniu stojana silnika powoduje powstanie zmiennego pola magnetycznego dla każdej z faz, w wyniku czego wypadkowe pole maszyny jest wirujące. Pole takie powoduje indukcję napięcia w uzwojeniach wirnika i przepływ prądu. Wzajemne oddziaływanie pól magnetycznych stojana i wirnika wywołuje powstanie momentu elektromagnetycznego oraz ruch obrotowy wirnika. Inaczej interpretując to zjawisko można stwierdzić, że wirujące pole magnetyczne stojana działa siłą na prąd wirnika, który został wywołany (zaindukowany) przez to pole. Napięcie w uzwojeniach wirnika powstaje gdy wirnik obraca się z prędkością inną niż prędkość wirowania pola magnetycznego (asynchronizm). Jeżeli prędkość wirnika osiągnęłaby prędkość pola, wówczas pole magnetyczne byłoby nieruchome względem uzwojeń wirnika i nie mogłoby zaindukować w nim napięcia elektrycznego.



Rys. 6.3. Obudowa, rdzeń i uzwojenie wzbudzenia silnika indukcyjnego klatkowego

Prędkość wirującego pola magnetycznego nazywa się prędkością synchroniczną:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{obr/min}] \quad (1)$$

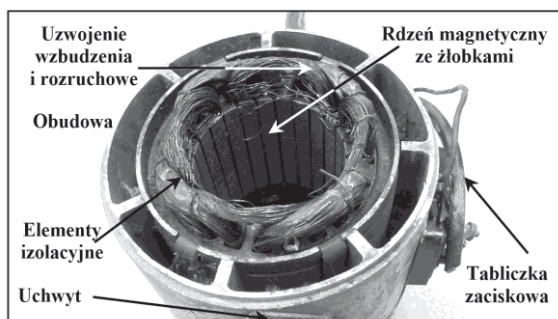
gdzie:

f – częstotliwość prądu,

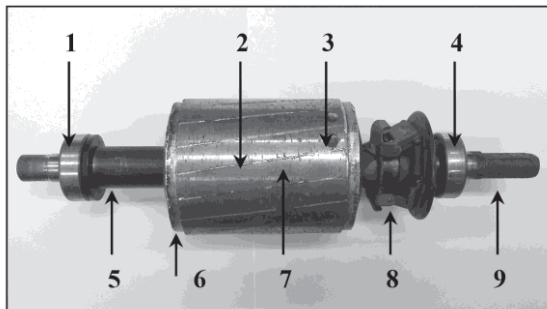
p – liczba par biegunów magnetycznych w maszynie.

W typowych silnikach przy obciążeniu znamionowym prędkość wirnika n jest około 2–4% mniejsza niż prędkość wirowania pola magnetycznego n_s . Występuje tak zwany poślizg. Silnik asynchroniczny pracujący bez obciążenia uzyskuje prędkość obrotową prawie równą prędkości synchronicznej. Poślizg w maszynie indukcyjnej wyraża się zależnością:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$



Rys. 6.4. Elementy nieruchome silnika indukcyjnego klatkowego



Rys. 6.5. Elementy ruchome silnika indukcyjnego klatkowego: 1, 4 – łożysko, 2 – przewodzący pręt wirnika, 3 – wyżłobienie wykonane w celu wyważenia wirnika, 5, 9 – wałek wirnika, 6 – rdzeń magnetyczny, 7 – elementy izolacyjne, 8 – mechanizm załączający i odłączający uzwojenie rozruchowe

Efekt wirowania pola jest uzyskiwany naturalnie w uzwojeniach trójfazowych stojana, natomiast w silnikach jednofazowych konstruuje się układy uzwojeń, w których płyną prądy przesunięte względem siebie w fazie. Można to uzyskać przez wprowadzenie kondensatora do uzwojenia jednej fazy lub zastosowanie dodatkowego uzwojenia zwartego. Prędkość wirowania silnika zależy od prędkości wirowania pola stojana. Prędkość wirowania pola stojana zależy od częstotliwości napięcia zasilania oraz od konstrukcji uzwojeń (liczby par biegunów). W polskiej sieci energetycznej prąd ma częstotliwość 50 Hz, co odpowiada prędkości synchronicznej 3000 obr/min, a prędkość znamionowa silnika asynchronicznego wynosi 2800–2900 obr/min. Największe wady silnika indukcyjnego klatkowego to brak bezpośredniej możliwości regulacji prędkości obrotowej oraz gwałtowny rozruch.

Wraz z rozwojem elektroniki, a w szczególności tranzystorów mocy, triaków i mikroprocesorów, zaczęto stosować układy łagodnego rozruchu (soft start) oraz regulować prędkość obrotową za pomocą przemienników częstotliwości (falowników). Rozwój technologiczny i spadek kosztów produkcji układów falownikowych są przyczyną coraz częstszego stosowania tego typu urządzeń do sterowania silnikami klatkowymi (rys. 6.6). Silniki indukcyjne trójfazowe stosowane są powszechnie w przemyśle, rolnictwie i trakcji elektrycznej (pompy, wentylatory, klimatyzatory, pojazdy szynowe, trolejbusy). Silniki indukcyjne jednofazowe klatkowe są stosowane najczęściej w przemyśle oraz w gospodarstwie domowym (pralki, lodówki). Prądnice asynchroniczne są wykorzystywane w mniejszym stopniu niż silniki, znajdują jednak zastosowanie w małych elektrowniach wodnych oraz wiatrowych.



Rys. 6.6. Silnik indukcyjny trójfazowy z układem falownikowym

6.4. Maszyny synchroniczne

W maszynach synchronicznych wirnik wiruje z prędkością równą prędkości pola magnetycznego stojana. Stosunek częstotliwości indukowanego napięcia do prędkości obrotowej nie zmienia się. Maszyny stosowane są głównie jako prądnice dużej mocy zwane generatorami i pracujące w elektrowniach. Prądnice synchroniczne

małej mocy, nazywane alternatorami, wykorzystywane są powszechnie w pojazdach samochodowych. Silniki synchroniczne mogą być stosowane w układzie napędowym elektrycznych i hybrydowych pojazdów samochodowych. Generatory dużej mocy są budowane jako maszyny z biegunami utajonymi lub wydawnymi. Pierwsze z nich są najczęściej dwubiegunowe, wirnik wykonany jest z odkuwki, a uzwojenie wzbudzenia rozłożone w wyfrezowanych w nim żłobkach. W przypadku biegunów wydawnych ich liczba wynosi cztery lub więcej, a uzwojenie wzbudzenia jest skupione i umieszczone na nabiegunnikach. Prądnice napędzane przez turbinę parową lub gazową nazywane są turbogeneratorami i osiągają moc 1700 MVA, a maszyny napędzane przez turbinę wodną to hydrogeneratory osiągające moc 840 MVA. Część generatorów przystosowana jest do napędu z wykorzystaniem wysokoprężnego silnika spalinowego.

Do budowy jarzma stojana stosowana jest blacha prądnicowa o grubości 0,5 mm, obustronnie izolowana, ponieważ z powodu zmienności strumienia magnetycznego indukują się tam prądy wirowe. Między pakietami blach występują kanały wentylacyjne umożliwiające przepływ powietrza i chłodzenie rdzenia. Wentylacja w tego typu maszynach może być również realizowana za pomocą czynnika ciekłego (woda) i gazowego (wodór). Warstwy uzwojeń w żłobkach izolowane są między sobą za pomocą folii, a w połączeniach czołowych stosuje się izolację sztywną i owijanie taśmą, aby zapobiec zniekształceniu uzwojenia. Prąd do uzwojenia wzbudzenia doprowadzany jest za pomocą pierścieni ślizgowych i szczotek. Może być to prąd stały lub odpowiednio sterowany prąd o zmiennym przebiegu. Na wspólnym wale z generatorem może pracować wzbudnica zasilająca uzwojenie wirnika. Elementy te są tak umieszczane, aby oddziaływał na nie nadmuch chłodzącego powietrza. Część maszyn synchronicznych wyposażona jest w magnes trwały umieszczony na wirniku, są to głównie silniki o mocy do 1 MW i generatory w elektrowniach wiatrowych. Silnik synchroniczny nie posiada własnego momentu rozruchowego i musi być sztucznie doprowadzony do prędkości synchronicznej za pomocą dodatkowego rezystora (rozruch asynchroniczny), silnika rozruchowego lub przekształtnika częstotliwości. Po rozruchu prędkość silnika pozostaje niezmienna dopóki moment obciążenia nie przekroczy wartości maksymalnej. Wtedy silnik może wypaść z synchronizmu, gwałtownie zmniejszyć swoją prędkość lub się zatrzymać. Szczególnym rodzajem prądnicy synchronicznej jest alternator samochodowy (rys. 6.7). Posiada charakterystyczną, odmienną budowę niż klasyczne generatory dużej mocy.

Najbardziej różni się budową rdzenia i uzwojenia wirnika, poza tym wyposażony jest w dodatkowe elementy pozwalające na ładowanie akumulatora, takie jak układ prostowniczy i regulator napięcia.

W maszynie synchronicznej wirujący strumień magnetyczny wytworzony przez prąd wzbudzenia indukuje w uzwojeniach stojana trójfazowe napięcie rotacji, którego wartość skuteczna jest określona równaniem:

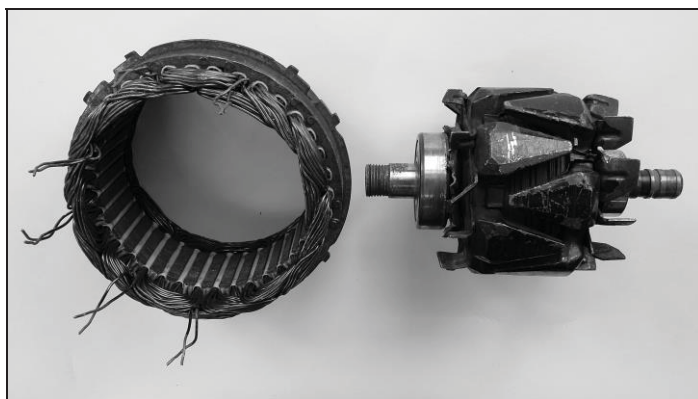
$$E = 4,44 \cdot \phi_m \cdot N_s \cdot k_{ws} \frac{p \cdot n}{60} \quad (3)$$

gdzie:

ϕ_m – strumień wzbudzenia (wartość maksymalna),

N_s – liczba zwojów uzwojenia fazowego stojana,

k_{ws} – współczynnik uzwojenia.



Rys. 6.7. Elementy stojana i wirnika synchronicznej prądnicy samochodowej

6.5. Transformatory

Transformator jest to urządzenie elektromagnetyczne, nie zawierające części ruchomych, służące do zmiany wartości napięcia elektrycznego, a tym samym natężenia prądu, przy stałej częstotliwości. Podstawowe elementy transformatora to rdzeń magnetyczny oraz umieszczone na nim uzwojenia pierwotne i wtórne. Rdzeń stanowi obwód magnetyczny, jego części łączące kolumny to jarzma, a przestrzeń zawarta między kolumną a jarzmem nazywa się "oknem". Rdzeń jest wykonany w postaci pakietu blach odizolowanych od siebie, co zmniejsza straty mocy powstające w postaci ciepła w wyniku indukowania się w rdzeniu prądów wirowych. Blachy pokrywa się cienką warstwą materiału izolacyjnego (np. papieru, lakieru, szkła wodnego) i składa w pakiety (rys. 6.8). Izolacja stosowana jest również na przewodzie i między warstwami uzwojenia (preszpan, materiały celulozowe). Do stali, z której są wykonane blachy dodaje się ok. 4% krzemu w celu zmniejszenia strat mocy występujących z powodu przemagnesowywania rdzenia (straty histerezy) i indukcji prądów wirowych.

Zasada działania transformatora jest oparta na zjawisku indukcji elektromagnetycznej wzajemnej. Pod wpływem przyłożonego napięcia przemiennego w uzwojeniu pierwotnym płynie prąd, który wytwarza przemienny strumień magne-

tyczny indukujący w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym siły elektromotoryczne (skuteczne) E_1 i E_2 :

$$E_1 = 4,44 \cdot f \cdot N_1 \cdot \phi_m \quad (4)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \phi_m \quad (5)$$

gdzie:

f – częstotliwość napięcia i prądu,

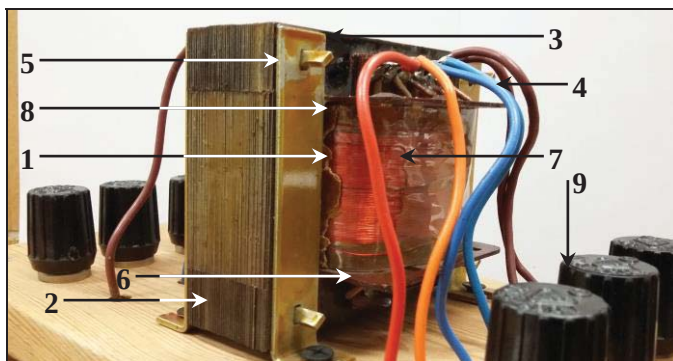
N_1, N_2 – liczba zwojów uzwojeń pierwotnego i wtórnego,

Φ_m – amplituda głównego strumienia magnetycznego (wartość maksymalna).

Z zależności 4 i 5 wynika, że stosunek sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniach transformatora jest równy stosunkowi liczby ich zwojów i jest nazywany przekładnią napięciową lub zwojową transformatora:

$$\nu = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6)$$

Szczególnym przypadkiem transformatora jest autotransformator, służący do płynnej regulacji napięcia przemiennego w laboratoriach. Występuje w nim tylko jedno uzwojenie, przy czym część tego uzwojenia jest wspólna dla strony pierwotnej i wtórnej. Uzwojenie jest nawinięte na stalowy rdzeń, najczęściej o kształcie toroidalnym.



Rys. 6.8. Budowa transformatora małej mocy: 1 – uzwojenia pierwotne i wtórne; 2, 3 – rdzeń magnetyczny pakietowany (kolumna i belka); 4 – przewody zewnętrzne; 5 – obudowa rdzenia; 6, 7, 8 – elementy izolacyjne (bakelit, folia, preszpan); 9 – zaciski elektryczne zewnętrzne

Transformator można badać w trzech stanach pracy (stan jałowy, zwarcie, obciążenie) wyznaczając jego charakterystyczne parametry. W stanie jałowym jedno z uzwojeń jest zasilane napięciem, a drugie pozostaje rozwarne. W stanie zwarcia pomiarowego jedno z uzwojeń jest zasilane obniżonym napięciem, a drugie (najczęściej wtórne) zwarte. W stanie obciążenia uzwojenie pierwotne jest zasilane napięciem znamionowym, a wtórne obciążone odbiornikiem.

Z próby stanu jałowego można wyznaczyć straty w żelazie ΔP_{Fe} , prąd stanu jałowego I_0 oraz jego składowe czynną I_{0cz} i bierną I_μ , przekładnię napięciową ν_u i współczynnik mocy $\cos \varphi_0$. Składową czynną prądu jałowego oblicza się według wzoru:

$$I_{0cz} = I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (7)$$

Składową bierną (magnesującą) prądu jałowego oblicza się według wzoru:

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{0cz}^2} \quad (8)$$

Przyjmuje się, że straty mocy czynnej w stanie jałowym zmierzone za pomocą watomierza są równe stratom w żelazie ΔP_{Fe} z powodu małej wartości prądu I_0 i strat mocy w miedzi uzwojenia ΔP_{Cu0} . Straty mocy w żelazie wynikają z przemagnesowywania rdzenia przy zmianie zwrotu strumienia (straty histerezy ΔP_{Feh}) oraz indukowania prądów wirowych w blachach rdzenia (straty na prądy wirowe ΔP_{Feo}). W stanie zwarcia transformator pobiera energię, ale jej nie oddaje. Na podstawie pomiarów przeprowadzanych w stanie zwarcia można wyznaczyć napięcie zwarcia U_z , przy którym nastąpi przepływ prądów znamionowych w uzwojeniach, przekładnię prądową ν_i , współczynnik mocy $\cos \varphi_z$ oraz straty mocy obciążeniowe ΔP_{Cu} i w żelazie rdzenia ΔP_{Fe} . Napięcie zwarcia wyraża się w procentach napięcia znamionowego, przyjmuje ono wartości od 3% (dla małych transformatorów) do 15% (dla jednostek najwyższych napięć i mocy):

$$u_z = \frac{U_z}{U_n} \cdot 100 \quad (9)$$

Straty w żelazie zależą od kwadratu napięcia, które w stanie zwarcia jest niewielkie, dlatego można przyjąć, że są one pomijalnie małe w stosunku do strat obciążeniowych, które zależą od kwadratu prądu i rezystancji uzwojeń. Przy stałym napięciu zasilającym straty w żelazie rdzenia są stałe i równe stratom określonym przy pracy jałowej. Sprawność transformatora jest to stosunek mocy czynnej strony wtórnej do mocy czynnej strony pierwotnej, najczęściej wyrażany w procentach. Przy stałej wartości napięcia zasilającego sprawność zależy od stanu obciążenia transformatora, a więc od wartości prądu i współczynnika mocy. Ze wzrostem obciążenia mocą czynną sprawność rośnie i ma wartość najwyższą, gdy straty obciążeniowe osiągną wartość równą wartości strat w żelazie. Najczęściej jest osiągana przy obciążeniu 75% w stosunku do znamionowego. Sprawność znamionowa wynosi od 95% dla małych jednostek do 99,7% dla transformatorów dużych.

7. Pomiary wielkości nieelektrycznych

7.1. Podstawowe pojęcia

Pomiar jest to zespół czynności wykonywanych w celu ustalenia miary określonej wielkości fizycznej lub umownej, jako iloczynu jednostki miary oraz liczby określającej wartość liczbową tej wielkości (porównywanie wartości danej wielkości z jednostką miary tej wielkości). Wielkość fizyczna jest to cecha obiektu (ciała, substancji, zjawiska), którą można wyróżnić jakościowo i określić ilościowo. Wartość wielkości fizycznej jest to ilościowe wyrażenie wielkości poprzez podanie liczby i jednostki miary. Narzędzia pomiarowe to wzorce miar, przyrządy pomiarowe i przetworniki pomiarowe, których szczególnym rodzajem są czujniki. Wzorce miar odtwarzają wzorcową wartość danej wielkości. Przyrząd pomiarowy jest to urządzenie przeznaczone do wykonywania pomiarów, samodzielnie lub w połączeniu z urządzeniami dodatkowymi. Przetwornik pomiarowy jest to urządzenie przetwarzające, zgodnie z określonym prawem, wielkość wejściową na wielkość wyjściową, które nazywane są sygnałami pomiarowymi. Sygnał pomiarowy jest to wielkość reprezentująca wielkość mierzoną i związana z nią funkcjonalnie. Nośnik sygnału pomiarowego jest to wielkość opisująca proces energetyczny przenoszący informację (np. napięcie, prąd). Parametr sygnału pomiarowego jest to funkcja realizowana na nośniku sygnału pomiarowego (np. amplituda, wartość skuteczna, częstotliwość, okres, wypełnienie).

Układ pomiarowy jest to kompletny zbiór przyrządów pomiarowych i innych zestawionych urządzeń, przeznaczony do wykonywania określonych pomiarów, może go również stanowić pojedynczy przyrząd pomiarowy. Czujnik (sensor) jest to element przyrządu pomiarowego lub łańcucha pomiarowego, na który oddziałuje bezpośrednio wielkość mierzona (początkowy przetwornik pomiarowy w łańcuchu pomiarowym). Zadaniem czujnika jest zamiana wielkości wejściowej nieelektrycznej na wielkość wyjściową elektryczną, według jednoznacznej, powtarzalnej i znanej zależności funkcyjnej, najlepiej liniowej. Tor pomiarowy (łańcuch pomiarowy) jest to ciąg elementów przyrządu pomiarowego lub układu pomiarowego, tworzący drogę sygnału pomiarowego od wejścia do wyjścia. Początkowym elementem toru pomiarowego jest czujnik, a ostatnim elementem jest wskaźnik. Wielkość elektryczna może być zmierzona bezpośrednio przez system pomiarowy, zbudowany z komponentów wykorzystujących zjawiska elektryczne. Natomiast pomiar wielkości nieelektrycznych wymaga zastosowania czujników. Najważniejsze wielkości elektryczne to napięcie, prąd, ładunek, moc, energia, rezystancja, indukcyjność, pojemność. Najczęściej mierzone wielkości nieelektryczne to temperatura, siła, masa, natężenie przepływu, położenie, przesunięcie, odkształcenie, kąt obrotu, prędkość liniowa i obrotowa, drgania, ciśnienie, indukcja magnetyczna, natężenie pola magnetycznego, wilgotność, gęstość, lepkość, współczynnik załamania światła.

7.2. Pomiar temperatury

Do pomiaru temperatury wykorzystuje się następujące czujniki:

- termistory (NTC, PTC, CTR),
- termorezystory (platynowe, nikłowe, miedziane),
- czujniki termoelektryczne (termoelementy, termopary),
- czujniki półprzewodnikowe złączowe (diody, tranzystory, układy scalone),
- pirometry optyczne.

Czujniki termistorowe wykonuje się z polikrystalicznych półprzewodników, które stanowią mieszaniny związków chromu, manganu, żelaza, kobaltu i niklu. Są zmieszane z plastycznym środkiem wiążącym. Termistorowy czujnik temperatury działa na zasadzie zmiany wartości rezystancji w zależności od temperatury. Czujniki NTC (Negative Temperature Coefficient) zmniejszają swój opór ze wzrostem temperatury, czujniki PTC (Positive Temperature Coefficient) zwiększają swój opór ze wzrostem temperatury, a czujniki CTR (Critical Temperature Resistor) charakteryzują się skokową zmianą rezystancji przy określonej wartości temperatury i są stosowane w układach stabilizacji temperatury. Termorezystory to oporniki metalowe, które zwiększają swoją rezystancję pod wpływem wzrostu temperatury. Powinny mieć duży temperaturowy współczynnik rezystancji, liniową zależność rezystancji od temperatury, odporność na korozję, utlenianie, parowanie oraz korzystne właściwości mechaniczne (giętkość, miękkość, łatwość łączenia przez zgrzewanie i spawanie). Charakterystyka czujnika opisana jest równaniem:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (1)$$

gdzie:

R_T – rezystancja czujnika w temperaturze T ,

R_0 – rezystancja czujnika w temperaturze 273 K,

α – temperaturowy współczynnik rezystancji (odniesiony do R_0),

β – współczynnik opisujący nieliniowość,

T – temperatura.

Czujniki termoelektryczne generują siłę elektromotoryczną (termoelektryczną) proporcjonalną do mierzonej temperatury. Jeżeli końce przewodnika A znajdują się w miejscach, które mają różne temperatury T_1 i T_2 to wzdłuż niego wystąpi przepływ ciepła powodujący uporządkowanie przemieszczania się chmur elektronów swobodnych i powstanie siły elektromotorycznej między jego końcami:

$$E_A = \int_{T_1}^{T_2} S_A(T, x) dT \quad (2)$$

gdzie:

S_A – współczynnik Seebecka zależny od rodzaju materiału i temperatury,

x – współrzędna długości przewodnika.

Powyższe równanie można wyrazić również z uwidocznieniem gradientu temperatury dT/dx , występującego wzdłuż przewodnika:

$$E_A = \int_{x_1}^{x_2} S_A(T, x) \frac{dT}{dx} dx \quad (3)$$

Aby wykorzystać to zjawisko i zmierzyć siłę termoelektryczną E , proporcjonalną do różnicy temperatur na końcach przewodnika A, należy połączyć koniec innego przewodnika B z końcem przewodnika A znajdującym się w temperaturze T_2 , a napięcie zmierzyć między wolnymi końcami dwóch przewodników, znajdującymi się w temperaturze T_1 :

$$E = E_A + E_B = (S_A - S_B) \int_{T_1}^{T_2} dT = (S_A - S_B)(T_2 - T_1) \quad (4)$$

Miejsce połączenia przewodów tworzy spoinę pomiarową umieszczaną w miejscu, którego temperatura jest mierzona, a wolne końce nazywane zimnymi znajdują się w temperaturze odniesienia (rys. 7.1). Stosuje się różne układy kompensacji zmian temperatury odniesienia.

W czujnikach półprzewodnikowych wykorzystuje się zależność napięcia U złącza PN od temperatury bezwzględnej T :

$$U = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (5)$$

gdzie:

k – stała Boltzmanna,

q – ładunek elektronu,

I – prąd czujnika,

I_0 – prąd nasycenia złącza.

Czujniki wykorzystuje się często do pomiaru temperatury w zakresie od -50 do $+150$ °C, niedokładność może wynosić $0,5$ – 3 °C, a czułość od 2 do $2,3$ mV/°C. Wynik pomiaru zależy jednak od prądu zasilającego i rozrzutu parametrów, wady tej są pozbawione czujniki scalone, w których kompensuje się zmienność prądów I oraz I_0 w funkcji temperatury. Pirometr (termometr optyczny) działa na zasadzie bezstykowego pomiaru mocy promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez ciało stałe lub ciekłe nieprzezroczyste o temperaturze T . Najważniejszym elementem pirometru jest detektor promieniowania (fotodioda, termostos), którego wyjściowy sygnał napięciowy jest proporcjonalny do mocy promieniowania, a tym samym do temperatury ciała.



Rys. 7.1. Multimetr z czujnikiem termoelektrycznym

7.3. Pomiar ciśnienia

Dla tej wielkości fizycznej można wyróżnić ciśnienie absolutne (bezwzględne), atmosferyczne, nadciśnienie i podciśnienie. Nadciśnienie jest to różnica pomiędzy ciśnieniem absolutnym i atmosferycznym. Podciśnienie jest to różnica pomiędzy ciśnieniem atmosferycznym i absolutnym. Ciśnienie statyczne związane jest z siłą, jaką płyn zamknięty w zbiorniku wywiera na ścianki, a źródłem tej siły jest energia kinetyczna nieuporządkowanego ruchu molekuł płynu. Podczas przepływu płynu występuje dodatkowo ciśnienie dynamiczne, którego źródłem jest energia kinetyczna ruchu uporządkowanego cząsteczek płynu.

Przetworniki ciśnienia (manometry) działają na zasadzie przetwarzania ciśnienia na przemieszczenie, odkształcenie lub zmianę rezystancji czujnika spowodowaną zmianą rozmiarów, rezystywności lub temperatury. Do pomiarów niskiego ciśnienia (10^{-2} – 10^3 Pa) stosuje się czujniki wykonane z cienkiego drutu platynowego lub wolframowego, podgrzewanego prądem o stałej wartości. Przewodność cieplna gazów zależy od ciśnienia. Z tego powodu ciepło oddawane przez drut i jego temperatura są uzależnione od ciśnienia. Natomiast z powodu zmiany temperatury zmienia się rezystancja czujnika. Do pomiarów średniego ciśnienia (10^3 – 10^6 Pa) stosuje się czujniki wyposażone w tensometry, elementy indukcyjne i pojemnościowe, które ulegają odkształceniom. Tensometr jest rezystorem wykonanym w postaci cienkiego drutu lub folii metalowej, przyklejonym do dielektryka. Wytwarza się także tensometry półprzewodnikowe o znacznie większej czułości w stosunku do metalowych. W wyniku oddziaływania ciśnienia występuje rozciąganie lub ściskanie czułego elementu tensometru i zmiana jego długości, co powoduje zmianę rezystancji. W praktyce tensometry pracują w układzie mostka czteroramiennego. Jedna para elementów ulega rozciąganiu, a druga ścisaniu, wszystkie tensometry znajdują się w tych samych warunkach, co pozwala zmniejszyć wpływ temperatury i innych zakłóceń na wynik pomiaru.

W czujnikach pojemnościowych odkształcenie elementu sprężystego powoduje zmianę pola elektrycznego między elektrodami kondensatora i jego pojemności C :

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (6)$$

gdzie:

ε – stała dielektryczna materiału między okładkami kondensatora,

A – powierzchnia okładek,

d – odległość między okładkami.

W celu uzależnienia ciśnienia od pojemności w czujnikach występuje zmiana jednej z trzech powyższych wielkości, najczęściej odległości między okładkami. Wtedy jedna z elektrod jest związana ze sprężystą membraną, na którą działa mierzone ciśnienie. Membrana może być wykonana z krystalu krzemu. Integralną częścią czujnika ciśnienia jest czujnik temperatury, którego sygnał wykorzystuje się do kompensacji błędów temperaturowych. Czujniki pojemnościowe są dokładniejsze od elementów tensometrycznych (błąd pomiaru może być na poziomie 0,1% zakresu) ale droższe w produkcji. Do wad należy mała odporność na wibracje i pojemności pasożytnicze. Czujniki indukcyjnościowe umożliwiają pośredni pomiar ciśnienia poprzez zmianę reluktancji obwodu magnetycznego spowodowaną zmianą wymiarów szczeliny powietrznej między rdzeniem ferromagnetycznym a zwoją cewki, co w rezultacie powoduje zmianę indukcyjności własnej cewki L . W tej grupie czujników wykorzystuje się również zmianę sprzężenia magnetycznego między uzwojeniem pierwotnym i wtórnym transformatora przez przesunięcie rdzenia ferromagnetycznego sprzęgającego te uzwojenia, co powoduje zmianę indukcyjności wzajemnej między uzwojeniami M . Duży sygnał wyjściowy i wysoka rozdzielczość to zalety czujników indukcyjnościowych, wadą jest możliwość wpływu obcych pól magnetycznych na pomiar i wrażliwość na wibracje. Do pomiaru dużego ciśnienia stosuje się czujniki rezystancyjne wykonane w kształcie bifilarnej spirali. Zmiana rezystancji jest spowodowana zmianą geometrycznych wymiarów czujnika i rezystywności jego materiału. Rezystancja czujnika zmienia się liniowo w funkcji ciśnienia:

$$R_p = R_0[1 + k_p(p - p_0)] \quad (7)$$

gdzie:

R_p – rezystancja przewodnika pod ciśnieniem p ,

R_0 – rezystancja przewodnika pod ciśnieniem odniesienia p_0 ,

k_p – ciśnieniowy współczynnik rezystancji.

Do pomiaru ciśnienia zmiennego w szerokim zakresie (10^4 – 10^9 Pa) stosuje się czujniki piezoelektryczne, które charakteryzują się wysoką rozdzielczością, łatwością montażu, odpornością na trudne warunki pracy i trwałością. Zjawisko piezoelektryczne polega na generowaniu w materiale o strukturze krystalicznej ładunku elektrycznego pod wpływem naprężenia mechanicznego.

Właściwości takie wykazują niektóre naturalne materiały krystaliczne (kwarc, turmalin), syntetyczne spolaryzowane materiały ceramiczne oraz niektóre polimery.

Czujnik ten posiada elektrody przewodzące na przeciwległych powierzchniach materiału, między którymi występuje różnica potencjałów. Jest to szczególnie rodzaj kondensatora. Ładunek wytworzony przez piezoelektryk jest proporcjonalny do siły, która może działać prostopadle lub równolegle do elektrod. Czujnik stosuje się do pomiaru ciśnienia zmiennego, ponieważ wygenerowany ładunek nie jest stabilny i zanika po czasie kilku sekund. Dla zwiększenia ładunku czujnik wykonuje się w postaci stosu z określonej liczby płytek kwarcowych. Napięcie takiego układu można wyznaczyć ze wzoru:

$$U = p \frac{nkA_{em}}{nC_0 + C_p} \quad (8)$$

gdzie:

p – ciśnienie na jednej płytce kwarcowej,

n – liczba płytek,

k – czułość piezoelektryczna materiału,

A_{em} – powierzchnia efektywna membrany,

C_0 – pojemność płytki,

C_p – pojemność pasożytnicza.

7.4. Pomiar poziomu

Poziomomierze można podzielić na kontaktowe i bezkontaktowe, do zbiorników otwartych i zamkniętych, z czujnikami mechanicznymi i elektronicznymi, mierzące poziom cieczy, ciał sypkich i powierzchnię rozdziału między dwoma cieczami. W technice pomiaru poziomu metodą elektryczną stosuje się najczęściej rezystory i kondensatory. W najprostszym rozwiązaniu opornik potencjometryczny może być połączony mechanicznie z ramieniem pływaka. Regulowany w ten sposób opór elektryczny powoduje zmiany spadku napięcia występującego przy przepływie prądu i jego zależność od poziomu cieczy w naczyniu. Ten sposób wykorzystywany jest często w pojazdach samochodowych do pomiaru poziomu paliwa w zbiorniku. W przemyśle stosuje się poziomomierze oporowe i pojemnościowe. W pierwszym przypadku można również mierzyć poziom płynów przewodzących, metodą ciągłą lub dyskretną. Zasada działania polega na pomiarze przewodności elektrycznej między sondą rezystancyjną i ścianą zbiornika lub między dwoma sondami zanurzonymi w cieczy.

W poziomomierzu pojemnościowym sonda i ściana zbiornika, sonda i rura, w której znajduje się sonda, lub dwie sondy tworzą okładki kondensatora, którego pojemność zależy od substancji wypełniającej przestrzeń między okładkami. Pojemność zwiększa się gdy ciecz zaczyna wypełniać tę przestrzeń.

7.5. Pomiar prędkości i przepływu płynów

Anemometr elektryczny zbudowany jest z czujnika i układu elektrycznego, w praktyce najczęściej stosowany do pomiaru prędkości gazów i turbulencji ze względu na małe wymiary i korzystne właściwości dynamiczne. Główną częścią

czujnika jest cienki drut wykonany z platyny, platyny w otulinie srebra, wolframu lub nić kwarcowa pokryta platyną. Czujnik jest nagrzewany płynącym przez niego prądem i osiąga temperaturę 50–250 °C. Ciepło Q_d doprowadzane do czujnika określone jest wzorem:

$$Q_d = I^2 R_0 (1 + \alpha T) \quad (9)$$

gdzie:

I – prąd grzejny,

R_0 – rezystancja drutu w temperaturze 0 °C,

α – temperaturowy współczynnik rezystancji,

T – temperatura.

Ciepło Q_0 odprowadzane przez konwekcję zależy od rodzaju gazu i jego prędkości:

$$Q_0 = \gamma F (T - T_g) \quad (10)$$

gdzie:

γ – współczynnik wnikania ciepła,

F – powierzchnia drutu,

T – temperatura drutu,

T_g – temperatura otoczenia (gazu).

Układy elektryczne anemometrów mają postać mostka, stosuje się rozwiązania ze stałą temperaturą czujnika dla prędkości większych od 2 m/s i ze stałym prądem dla prędkości do 2 m/s. W pierwszym przypadku miarą prędkości gazu jest prąd zasilania mostka, regulowany w celu utrzymania stałej temperatury czujnika. W drugim przypadku miarą prędkości jest temperatura drutu, a tym samym jego rezystancja i napięcie na przekątnej zerowej mostka. Sygnał wejściowy anemometru może mieć postać analogową lub cyfrową. W przypadku pomiarów prędkości przepływu konieczna jest także rejestracja temperatury gazu, w celu kompensacji jej wpływu na wynik pomiaru. W przepływomierzu z termooanemometrem warstwowym wszystkie elementy są zminiaturyzowane, zespolone i umieszczone na spieku ceramicznym, znajdują się poza strumieniem głównym gazu i nie są narażone na zanieczyszczenia.

7.6. Pomiar hałasu

Czujniki do pomiaru dźwięku są nazywane mikrofonami. Działanie ich opiera się na wykorzystaniu zmian parametrów ośrodka związanych z propagacją fali dźwiękowej (ciśnienie, prędkość cząstki, gęstość, temperatura). W mikrofonie magnetoelektrycznym ruch membrany pod wpływem drgań akustycznych jest przenoszony na cewkę, która przemieszcza się w polu magnetycznym, co powoduje indukowanie w niej siły elektromotorycznej. W mikrofonie elektromagnetycznym cewka jest nawinięta na rdzeniu magnetycznym i nieruchoma, a napięcie indukuje się w niej z powodu zmiany długości szczeliny powietrznej w obwodzie magnetycznym, spowodowanej ruchem membrany połączonej z ferromagnetyczną kotwicą.

Mikrofon elektrostatyczny (pojemnościowy) zbudowany jest z kondensatora powietrznego, którego okładka nieruchoma zamocowana jest do obudowy, a okładką ruchomą jest przewodząca membrana. Drgania membrany powodują zmiany długości szczeliny powietrznej między okładkami, a tym samym zmianę pojemności i napięcia kondensatora. Mikrofony elektretowe są odmianą mikrofonów elektrostatycznych, w których wyeliminowano konieczność stosowania zewnętrznych źródeł napięcia polaryzującego, a ich funkcję przejął elektret, materiał dielektryczny, który trwale utrzymuje polaryzację. Spolaryzowane membrany elektretowe po wprowadzeniu do nich ładunku, wytwarzają trwałe pole elektryczne. Warstwa elektretu może być naniesiona na ruchomą elektrodę kondensatora (membranę) lub na okładkę nieruchomą, wtedy membrana może być wykonana z materiału o lepszych właściwościach mechanicznych. W mikrofonach piezoceramicznych i piezopolimerowych wykorzystuje się zjawisko piezoelektryczne czyli generowanie napięcia pod wpływem naprężeń wywołanych drganiem membrany. Krzemowe mikrofony elektrostatyczne, piezoelektryczne i piezorezystancyjne mają podobne czujniki do stosowanych w pomiarze ciśnienia, które pozwalają na większą miniaturyzację tych urządzeń.

7.7. Pomiar siły i naprężenia mechanicznego

Siłę F mierzy się pośrednio przez pomiar skutków jej działania, takich jak względne i bezwzględne odkształcenie elementu sprężystego oraz przyspieszenie obiektu:

$$F = EA\varepsilon = \Delta l \frac{EA}{l} = am \quad (11)$$

gdzie:

E – moduł Younga elementu sprężystego,

A – pole przekroju poprzecznego,

ε – względne odkształcenie,

Δl – bezwzględne odkształcenie,

l – długość elementu sprężystego,

a – przyspieszenie obiektu,

m – masa obiektu.

Małe wartości odkształcenia sprężystego przetwarza się na wielkość elektryczną za pomocą tensometrów, natomiast duże za pomocą przetworników indukcyjnościowych i pojemnościowych.

W określonych miejscach elementów sprężystych nakleja się tensometry, które łączy się w układ mostka czteroramiennego. Naprężenie mechaniczne σ można obliczyć jako iloczyn względnego wydłużenia ε i modułu Younga E materiału elementu, na który działa siła w kierunku prostopadłym do przekroju:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (12)$$

Do bezpośredniego pomiaru naprężenia mechanicznego i siły stosuje się przetworniki magnetosprężyste, zbudowane z rdzenia ferromagnetycznego, uzwojenia magnesującego i pomiarowego. Do pomiarów siły szybkozmiennej stosuje się przetworniki piezoelektryczne kwarcowe.

7.8. Pomiar parametrów ruchu

Do pomiarów przemieszczenia stosuje się najczęściej przetworniki optyczne, indukcyjnościowe i pojemnościowe. Wykorzystywane w tym celu są również półprzewodnikowe przetworniki przemieszczeń liniowych, w których źródłem światła są diody laserowe o dużej trwałości. Do pomiaru prędkości stosuje się przetworniki cyfrowe, elektromagnetyczne, elektrodynamiczne, fotoelektryczne i inne. Cyfrowe przetworniki prędkości liniowej lub kątowej działają na zasadzie pomiaru przemieszczenia w ściśle określonym przedziale czasu (duże prędkości) lub pomiaru czasu odpowiadającego ściśle określonemu przemieszczeniu (małe prędkości). Pomiar prędkości obrotowej realizowany jest z wykorzystaniem czujników indukcyjnych, hallotronowych i optycznych. Zasada działania polega na wyznaczeniu częstotliwości napięcia powstającego w czujniku pod wpływem oddziaływania obracającego się elementu, który powoduje indukcję tego napięcia lub jego okresową zmianę (rys. 7.2). Podstawowe elementy czujnika indukcyjnego to cewka, magnes, rdzeń ferromagnetyczny, zaciski elektryczne, części izolacyjne, obudowa. Tego rodzaju czujnik wykorzystywany jest powszechnie w pojazdach samochodowych. Współpracuje z ferromagnetycznym kołem zębatym wału korbowego, generując sygnały napięciowe o częstotliwości i amplitudzie proporcjonalnej do prędkości obrotowej. Napięcie e indukuje się w cewce o liczbie zwojów N na skutek zmienności strumienia magnetycznego w czasie, spowodowanej zmienną przewodnością magnetyczną na drodze strumienia (ząb i szczelina koła):

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (13)$$

Podstawowe elementy czujnika Halla to płytka półprzewodnikowa, zaciski elektryczne, części izolacyjne, obudowa. Przetworniki współpracują z elementem namagnesowanym generując prostokątny sygnał napięciowy o częstotliwości proporcjonalnej do prędkości obrotowej. Tego typu czujniki również są stosowane w pojazdach i służą do określania położenia wału rozrządu oraz położenia i prędkości obrotowej wału korbowego (rys. 7.3).

Napięcie powstaje z powodu działania siły pola magnetycznego na przepływające elektrony i ich przesunięcie w kierunku jednej z płaszczyzn bocznych czujnika (efekt Halla):

$$U_H = \frac{IB}{nqc} = \frac{RIB}{c} \quad (14)$$

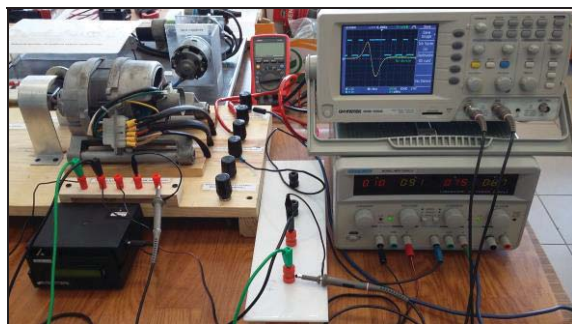
gdzie:

I – natężenie prądu,

B – indukcja magnetyczna,

n – koncentracja nośników ładunku,
 q – ładunek nośnika (elektronu lub dziury),
 c – grubość płytki (w kierunku działania pola magnetycznego),
 R – stała zależna od materiału (stała Halla).

Czujniki optyczne są przetwornikami, których działanie opiera się na zasadzie wysyłania wiązki promieni świetlnych przez nadajnik i ich odbieraniu przez odbiornik. Czujniki optyczne reagują na obiekty, które znajdują się na drodze przebiegu wiązki światła. Zaletą czujników optycznych jest duży zasięg działania, uzyskiwany przy ich niewielkich rozmiarach. Duże znaczenie w czujnikach optycznych odgrywa długość fali świetlnej emitowanej przez nadajnik. W większości czujniki te wykorzystują modulowane światło z zakresu bliskiej podczerwieni. Zaletą w tym przypadku jest mała wrażliwość czujników na widzialne światło z otoczenia. Dodatkowo poprzez wzajemną synchronizację nadajnika i odbiornika gwarantowana jest duża odporność czujników na zakłócenia i możliwość pracy w warunkach zanieczyszczenia powietrza oraz przy zabrudzeniu układu optycznego czujnika. Wytworzony w nadajniku silny impuls świetlny, nawet częściowo osłabiony rozproszeniem dociera do odbiornika, gdzie jest wzmocniony i analizowany zapewniając poprawne działanie czujnika.



Rys. 7.2. Stanowisko do pomiaru prędkości obrotowej silnika elektrycznego



Rys. 7.3. Wybrane czujniki stosowane w pojazdach samochodowych

Czujniki optyczne dzielą się na trzy główne grupy – odbiciowe, refleksyjne i jednowiązkowe bariery świetlne. Przetworniki prędkości liniowej działają na zasadzie indukowania się siły elektromotorycznej e (napięcia) w uzwojeniu o liczbie zwojów N i długości zwoju l , poruszającym się z prędkością V w polu magnetycznym o indukcji B :

$$e = B l N V \quad (15)$$

Do pomiarów przyspieszenia stosuje się przetworniki piezoelektryczne (akcelerometry), elektrokinetyczne i pojemnościowe. Przyspieszenie jest jednym z parametrów drgań mechanicznych, czyli oscylacyjnego ruchu obiektu mechanicznego wokół położenia równowagi. W wielu przypadkach nie występuje okresowość tego zjawiska. Obiekt może się poruszać ze stałym lub liniowo zmieniającym się przyspieszeniem. W przypadku wstrząsów mechanicznych zmiana przyspieszenia jest krótkotrwała i szybka, a jego amplituda osiąga bardzo duże wartości. W konstrukcji akcelerometrów można wyróżnić układ mechaniczny oraz przetwornik przemieszczenia masy względem obudowy na sygnał elektryczny. Elementarny akcelerometr piezoelektryczny zbudowany jest z masy, obudowy oraz znajdującego się pomiędzy nimi piezoelektryka. Spełnia on funkcję sprężyny, tłumika oraz przetwornika przemieszczenia masy na sygnał elektryczny. Dodatkowy element sprężysty zapewnia wstępne naprężenie w piezoelektryku, co jest niezbędne do tego, aby sensor był czuły na przyspieszenia działające w przeciwnych kierunkach. Przyspieszenie obiektu badanego powoduje, że na płytkę piezoelektryczną działa zmienna siła, wprost proporcjonalna do masy i przyspieszenia, powodująca powstanie na elektrodach ładunków o przeciwnych znakach. W akcelerometrach pojemnościowych występuje przemieszczenie masy względem obudowy kondensatora o zmiennej odległości między okładkami. Jedna z okładek jest zamocowana do masy, a druga do obudowy. W akcelerometrach piezorezystancyjnych do pomiaru przemieszczenia masy względem obudowy służy układ tensometryczny.

Pod wpływem ruchu masy, w sprężystych belkach łączących ją z obudową, powstają naprężenia, które powodują zmianę rezystancji piezorezystorów. Układ mostka niezrównoważonego zamienia zmiany rezystancji na sygnał napięciowy. Konstrukcja obwodów elektrycznych tego czujnika jest bardzo podobna do układów stosowanych w piezorezystancyjnych czujnikach ciśnienia.

W akcelerometrach termicznych rolę masy pełni uwięziony w obudowie czujnika gaz. Brak ruchomych elementów mechanicznych zwiększa niezawodność takiego układu i odporność na przeciążenia udarowe. Przyspieszenie działające na akcelerometr powoduje przemieszczenie z powodu działania siły bezwładności cząsteczek gorącego gazu w kierunku przeciwnym. Powstaje różnica temperatur między czujnikami, która jest proporcjonalna do wartości przyspieszenia. Termosy mierzy różnicę temperatur i przetwarza ją na wartość napięcia wyjściowego akcelerometru.

7.9. Pomiary wielkości magnetycznych

Wielkości fizyczne charakteryzujące pole magnetyczne to strumień magnetyczny, indukcja magnetyczna i natężenie pola magnetycznego. Pomiary mogą dotyczyć też wielkości charakteryzujących właściwości materiałów magnetycznych. Najczęściej stosowanym czujnikiem jest cewka indukcyjna, w której indukuje się napięcie przy oddziaływaniu zmiennego pola magnetycznego. Na podstawie pomiaru tego napięcia określa się wielkości magnetyczne:

$$\phi_{\max} = \frac{E_{av}}{4 fN} = \frac{E}{4,44 fN} \quad (16)$$

$$B_{\max} = \frac{E_{av}}{4 fNA} = \frac{E}{4,44 fNA} \quad (17)$$

gdzie:

$\phi_{\max}$ – maksymalna wartość strumienia magnetycznego,

$B_{\max}$ – maksymalna wartość indukcji magnetycznej,

E_{av} – wartość średnia napięcia indukowanego,

E – wartość skuteczna napięcia indukowanego,

f – częstotliwość zmian strumienia,

N – liczba zwojów cewki pomiarowej,

A – pole powierzchni cewki.

Pomiar wielkości magnetycznych w polu stałym może odbywać się z wykorzystaniem cewki indukcyjnej zmieniającej położenie (przesunięcie, obrót) zgodnie z zależnością (15). Przyrządy pomiarowe wykorzystujące czujnik Halla (teslomiernice) wykorzystywane są do pomiaru indukcji magnetycznej w oparciu o zależność (14). Natężenie pola magnetycznego wyznacza się na podstawie pomiaru indukcji lub prądu w cewce wytwarzającej to pole.

W ośrodku nieferromagnetycznym stosuje się zależność:

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (18)$$

gdzie:

H – natężenie pola magnetycznego,

B – indukcja magnetyczna,

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni.

W ośrodku ferromagnetycznym zależność $B=f(H)$ jest nieliniowa, dlatego nie można bezpośrednio obliczyć natężenia pola magnetycznego na podstawie znanej indukcji. Wyznaczenie i wykreślenie tej zależności pozwala również na określenie wielkości charakteryzujących materiały magnetyczne:

- względna przenikalność magnetyczna μ_r ,
- indukcja nasycenia B_s ,

- remanencja (pozostałość magnetyczna) B_r ,
- natężenie koercyjne H_c ,
- stratność magnetyczna.

Natężenie pola magnetycznego H cewki długiej lub toroidalnej umieszczonej w powietrzu oraz w obwodach z rdzeniami ferromagnetycznymi oblicza się ze wzoru:

$$H = \frac{IN}{l} \quad (19)$$

gdzie:

I – prąd cewki,

N – liczba zwojów cewki,

l – długość cewki.

8. Chemiczne źródła energii elektrycznej

8.1. Podstawy elektrochemii

Przepływ prądu w roztworach elektrolitów odbywa się przez transport jonów powstających w procesie dysocjacji, natomiast na elektrodach zachodzą reakcje utleniania i redukcji, w których występuje wymiana elektronów pomiędzy reagentami. Elektrolity to sole, kwasy i zasady, których cząsteczki w roztworach wodnych ulegają dysocjacji czyli samoistnemu rozpadowi na jony dodatnie (kationy) i ujemne (aniony) będące nośnikami ładunku elektrycznego. Ładunek dodatni otrzymują metale i wodor, a ładunek ujemny reszty kwasowe i zasadowe. Proces oddawania elektronów przez reagenty nazywa się utlenianiem, a ich przyjmowanie to redukcja. Elektroda, na której zachodzi utlenianie nazywa się anodą, a druga, na której odbywa się redukcja jest katodą. Nazewnictwo to jest związane z rodzajem reakcji, a nie z polaryzacją elektrody, która zależy od tego czy prąd jest pobierany z układu elektrochemicznego, czy też jego przepływ jest wymuszany w tym układzie przez zewnętrzne źródło zasilania. Prąd w roztworach elektrolitów przepływa po przyłożeniu napięcia do elektrod w nich zanurzonych (elektroliza) lub gdy pomiędzy elektrodami powstaje różnica potencjałów (napięcie) i zostanie do nich dołączone obciążenie (odbiornik). W pierwszym przypadku urządzeniem zasilanym może być elektrolizer lub ładowany akumulator, który stanowi ogniwo odwracalne.

W układach elektrochemicznych reakcje zachodzą często na pograniczu trzech stanów skupienia reagentów (ciało stałe, ciecz, gaz). Oprócz głównych reakcji chemicznych występują procesy cząstkowe i uboczne. Wymagane są odpowiednie warunki do zajścia reakcji (temperatura, ciśnienie) oraz substancje katalizujące, które łączą się w związki chemiczne ułatwiając reakcje główne, a następnie wracają do postaci pierwotnej. Wszystkie te czynniki powodują, że charakterystyka napięciowo-prądowa ogniwa lub elektrolizera jest liniowa tylko w środkowej części, a w jej strefie początkowej i końcowej widoczne są znaczne nieliniowości. Spadki napięć mają związek nie tylko z rezystancją, ale występują również z powodu strat energii na różnych etapach reakcji chemicznych. W przebiegu charakterystyki napięciowo-prądowej wyróżnić można najczęściej początkową strefę spadku napięcia spowodowaną głównie przez polaryzację aktywacyjną, strefę liniowego przebiegu, w której dominują rezystancyjne spadki napięć oraz strefę końcowego „załamania” się napięcia spowodowaną głównie polaryzacją stężeniową. Siłę elektromotoryczną ogniwa można obliczyć na podstawie wzoru Nernsta lub z zależności termodynamicznych.

Wzór Nernsta określa równowagowy potencjał elektrody E :

$$E = E^0 - \frac{RT}{zF} \ln \frac{a_r}{a_0} \quad (1)$$

gdzie:

E^0 – standardowy potencjał elektrody (298 K, 101325 Pa),

R – stała gazowa (8,31 Pa·m³/K·mol),

T – temperatura,

z – liczba elektronów biorących udział w elementarnej reakcji elektrodowej,

F – stała Faradaya ($96485 \text{ C/mol} = 96485 \text{ A} \cdot \text{s/mol}$),

a_r – aktywność postaci zredukowanej reagenta na powierzchni elektrody,

a_0 – aktywność postaci utlenionej reagenta na powierzchni elektrody.

Siłę elektromotoryczną ogniwa ΔE możemy obliczyć jako różnicę równowagowych potencjałów dwóch elektrod (anody i katody), zwanych inaczej półogniwami:

$$\Delta E = E_a - E_c \quad (2)$$

Między zmianą potencjału termodynamicznego reakcji (wolnej entalpii) a siłą elektromotoryczną zachodzi następujący związek (równanie odnosi się do jednego mola substancji czynnej):

$$-\Delta G = z \cdot F \cdot \Delta E \quad (3)$$

Zmiana wolnej entalpii w reakcji chemicznej jest różnicą pomiędzy zmianą entalpii a iloczynem temperatury i zmiany entropii:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4)$$

Zjawiska związane z przepływem prądu jonowego opisywane są przez prawa Faradaya. Pierwsze prawo Faradaya mówi, że masa substancji, które wydzielają się na każdej elektrodzie podczas przepływu prądu wynosi:

$$m = k \cdot I \cdot t \quad (5)$$

gdzie:

k – współczynnik proporcjonalności,

I – prąd,

t – czas przepływu prądu.

Drugie prawo Faradaya mówi, że stosunek mas różnych substancji wydzielonych podczas elektrolizy przy przepływie takiego samego ładunku jest równy stosunkowi gramorównoważników tych substancji. Gramorównoważnik pierwiastka jest to, wyrażona w gramach masa pierwiastka, która łączy się w związki z 8 g tlenu.

8.2. Ogniwa pierwotne – baterie

Baterie to chemiczne źródła energii elektrycznej, w których reakcje chemiczne są nieodwracalne, a pierwiastki tworzące elektrody biorą w nich udział. Większość współczesnych baterii pracuje na bazie wynalazków i projektów powstałych w XIX wieku (rys. 8.1 i tab. 8.1). Wprowadzane są nowe materiały i udoskonalane technologie produkcyjne. Ogniwo cynkowo-manganowe powstało na bazie ogniwa Leclanchégo czyli cynkowo-węglowego. Wprowadzenie do materiału katody dwutlenku manganu zapobiega wydzielaniu się wodoru na tej elektrodzie, ponieważ ten związek przyjmuje elektrony i redukuje się do Mn_2O_3 , zapobiegając w ten sposób redukcji jonów wodorowych H^+ . Kluczowe znaczenie dla właściwości ogniwa ma także stopień oczyszczenia zastosowanego w nim manganu i jego struktura krystaliczna. Poza tym tego rodzaju ogniwa charakteryzują się znaczną rezystancją we-

wnętrzną. Dodatkowe problemy przysparza woda zawarta w ogniwie, która może wyparować w zbyt dużej temperaturze przechowywania lub pracy, natomiast w niskiej temperaturze dodatniej, a tym bardziej w ujemnej, ogniwo traci znaczną część pojemności. Pod wpływem wzrostu ciśnienia wewnętrznego i nieszczelności mogą występować wycieki elektrolitu, szczególnie w zużytych bateriach. Zastąpienie chlorku amonu chlorkiem cynku powoduje szybszą dyfuzję nośników ładunku, mniejszą ilość osadów, odporność na większe obciążenie oraz większą wydajność w niskich temperaturach.

Jeszcze większym udoskonaleniem było skonstruowanie baterii alkalicznych, których główną zaletą jest powiększenie i stabilność pojemności w dużym zakresie obciążeń oraz odporność na samorozładowanie. Zalety ogniwa rtęciowego to niezmienny skład roztworu, stała wartość potencjału chemicznego i brak gazowych produktów w czasie pracy oraz duża wartość objętościowej energii właściwej. Wady to duży koszt produkcji, utrata pojemności w niskiej temperaturze i możliwość wycieku substancji toksycznych. Podobne właściwości ale większe napięcie posiadają ogniwa cynk-tlenek srebra. Ogniwa typu metal-powietrze charakteryzują się katodą o niewielkiej masie i praktycznie nieograniczonej pojemności elektrycznej (tlen z powietrza). W rezultacie znajdują wiele różnorodnych zastosowań (przemysł, pojazdy elektryczne i hybrydowe) osiągając znaczące pojemności i moc właściwą. Mogą być obciążane dużym prądem, podczas rozładowania zachowują stabilne napięcie, mają niewielki opór wewnętrzny i mały wpływ temperatury na wartość pojemności. Cechą charakterystyczną są porowate elektrody zapewniające wiele miejsc reakcji chemicznych na pograniczu trzech faz (stałej, ciekłej i gazowej). Zastosowanie litu do budowy baterii było zjawiskiem przełomowym, dzięki najmniejszej masie atomowej wśród metali spowodował on znaczne zwiększenie stosunku energii do masy ogniwa.

W bateriach z anodami litowymi stosuje się niewodne, głównie organiczne rozpuszczalniki elektrolitu, ponieważ metal ten redukuje wodę i powoduje wydzielanie wodoru. Katoda zbudowana może być ze związków stałych, ciekłych lub rozpuszczonych w elektrolicie podstawowym. Brak wody w elektrolicie powoduje większą odporność ogniwa na pracę w niskich temperaturach i możliwość długiego przechowywania, wadą tego rodzaju baterii jest ograniczone natężenie prądu obciążenia. W wyniku reakcji litu z rozpuszczalnikiem na powierzchni anody powstaje cienka warstwa pasywna, która oddziela metal od elektrolitu. Jest to dodatkowy czynnik pozwalający na długie przechowywanie baterii ale powoduje też niekorzystny spadek potencjału w początkowym okresie pracy ogniwa. Natomiast po uzyskaniu pełnego napięcia, ogniwa tego rodzaju charakteryzują się niewielkim jego spadkiem pod obciążeniem, a po przekroczeniu kolejnych progów wyładowania, napięcie ogniwa zmniejsza się wyraźnie w sposób skokowy. W ogniwach z ciekłą katodą związki chemiczne stanowiące rozpuszczalnik elektrolitu są równocześnie materiałem katody (np. chlorek tionylu SOCl_2 , chlorek siarczyny SO_2Cl_2 , chlorek fosforylu POCl_3). Funkcję kolektora prądu katodowego spełnia grafit.



Rys. 8.1. Baterie — popularne rodzaje



Rys. 8.2. Akumulatory — różne rodzaje

Tab. 8.1. Budowa i zasada działania wybranych baterii

Nazwa baterii (ogniwa)	Materiał anody	Materiał katody	Elektrolit	Reakcje chemiczne	Napięcie [V]
Ogniwo cynkowo-manganowe	Zn	MnO ₂ , C	NH ₄ Cl ZnCl ₂	$Zn \Rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ $2MnO_2 + 2H^+ + 2e^- \Rightarrow Mn_2O_3 + H_2O$	1,5
Alkaliczne ogniwo cynkowo-manganowe	Zn	MnO ₂ , C	ZnO, KOH, NaOH	$Zn + 2MnO_2 \Rightarrow ZnO + Mn_2O_3$	1,55
Ogniwa rtęciowe	Zn	HgO, C	ZnO, KOH, K ₂ ZnO ₂	$ZnO + 2KOH \Rightarrow K_2ZnO_2 + H_2O$ $Zn + 2OH^- \Rightarrow ZnO + H_2O + 2e^-$ $HgO + H_2O + 2e^- \Rightarrow Hg + 2OH^-$	1,35
	In	HgO	KOH	$2In + 3HgO \Rightarrow In_2O_3 + 3Hg$	1,4
Ogniwo cynk-tlenek srebra	Zn, ZnO	Ag ₂ O, C	KOH	$Zn + Ag_2O \Rightarrow ZnO + 2Ag$	1,6
Ogniwa cynkowo-powietrzne	Zn	C, O ₂	NaOH	$Zn + 4OH^- \Leftrightarrow ZnO_2^{2-} + 2H_2O + 2e^-$ $1/2O_2 + H_2O + 2e^- \Rightarrow 2OH^-$	1,6
	Zn	C, O ₂	NH ₄ Cl	$2Zn + 4NH_4^+ + 4Cl^- + O_2 \Rightarrow$ $\Rightarrow 2Zn(NH_3)_2Cl_2 + 2H_2O$	1,4
Ogniwo glinowo-powietrzne	Al	M, O ₂	NaCl	$Al \Rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ $1/2O_2 + H_2O + 2e^- \Rightarrow 2OH^-$	2,1
Ogniwa litowe z nierozpuszczalnymi katodami	Li	Ag ₂ CrO ₄ , C	LiClO ₄ , PC	$2Li + Ag_2CrO_4 \Rightarrow 2Ag + Li_2CrO_4$	3,5
	Li	(CF _x) _n	LiBF ₄ , PC-DME	$nxLi + (CF_x)_n \Rightarrow nC + nxLiF$	3
Ogniwo litowe z rozpuszczalną katodą	Li	C	LiBr, SO _{2 (rozp)} , AN	$2Li + 2SO_2 \Rightarrow LiS_2O_4$	3
Ogniwo litowe z ciekłą katodą	Li	C	LiAlCl ₄ , SOCl ₂	$4Li + 2SOCl_2 \Rightarrow 4LiCl + SO_2 + S$	3,6

8.3. Ogniwa wtórne – akumulatory

Akumulatory to chemiczne źródła energii elektrycznej, w których reakcje są odwracalne, mogą przetwarzać energię chemiczną w elektryczną i odwrotnie (tab. 8.2). Akumulator kwasowo-ołowiowy to najbardziej popularny w tej grupie przetwornik, stosowany powszechnie i w różnych odmianach do rozruchu silników spalinowych pojazdów samochodowych (rys. 8.2). Akumulator samochodowy zbudowany jest z sześciu ogniw elementarnych połączonych szeregowo. W skład ogniwa wchodzi zespół płyt dodatnich i ujemnych oraz naczynie z elektrolitem. Płyty elektrod mają postać krutek ołowianych, stanowiących szkielet i wypełnionych porowatą masą czynną. Dla poprawy właściwości akumulatora do materiału kratki wprowadza się antymon, wapń lub srebro. Antymon dodawany do ołowiu zwiększa odporność szkieletu elektrody na wibracje, uderzenia i deformacje. Wadą tego rozwiązania jest zwiększenie gazowania i ubytek wody z roztworu elektrolitu. Wapń dodany do innych miękkich metali znacznie zwiększa ich twardość. Jego domieszka (1 promil masy) powoduje obniżenie zużycia wody przez akumulator i zmniejszenie samorozładowania. Kratka wykonana z drobnokrystalicznego stopu wykorzystującego srebro ma mniejszą rezystancję wewnętrzną od tradycyjnej, wykonanej ze stopu ołowiu z wapniem. Zastosowanie srebra zwiększa odporność na wstrząsy, ogranicza erozję masy czynnej z płyt akumulatora, zmniejsza korozję, zwiększa odporność na niskie i wysokie temperatury, a także na częste cykle ładowania i rozładowania. Pomiędzy płytami dodatnimi i ujemnymi znajduje się separator przewodzący jony i blokujący przepływ elektronów.

W akumulatorach kwasowo-ołowiowych w czasie pracy, a szczególnie w stanach przeładowania, zachodzi proces elektrolizy wody i wydzielanie wodoru na anodzie oraz tlenu na katodzie. Udoskonalone wersje akumulatorów kwasowo-ołowiowych stanowią ogniwa bezobsługowe typu VRLA (Valve Regulated Lead Acid), posiadające zawory odprowadzające do otoczenia nadmiar gazów powstających w wyniku elektrolizy wody. Jednak kluczowym procesem w nich zachodzącym jest rekombinacja gazów wewnątrz akumulatora i odzyskiwanie wody. Tlen poprzez pory separatora doprowadzany jest do elektrody ujemnej, gdzie reaguje z wodorem. Akumulatory VRLA można jeszcze podzielić na żelowe oraz typu AGM (Absorbent Glass Matt). W pierwszym przypadku kwas siarkowy w połączeniu z krzemianami przyjmuje postać żelu, a w drugim jest absorbowany w mikroporowatym separatorze z włókna szklanego. Przez taki rodzaj wypełnienia przestrzeni międzyelektrodowej zlikwidowano możliwość wycieku elektrolitu z uszkodzonego mechanicznie akumulatora oraz zwiększono moc maksymalną akumulatora ze względu na małą rezystancję wewnętrzną tego typu konstrukcji. Akumulator AGM charakteryzuje się też odpornością na wstrząsy oraz częste cykle ładowania i dużego rozładowania. Akumulator tego typu ze spiralnie zwiniętymi elektrodami posiada jeszcze mniejszą rezystancję wewnętrzną i większą pojemność.

W grupie akumulatorów kwasowo-ołowiowych wyróżnia się jeszcze ogniwo o oznaczeniu EFB (Enhanced Flooded Battery), w którym płyty dodatnie pokryte są

dotatkową powłoką poliestrową, umożliwiającą uzyskanie większej stabilności masy czynnej i jej odporność na pracę cykliczną przy dużych prądach.

Akumulator niklowo-kadmowy występuje w dużym zakresie pojemności, w wersjach przenośnych i stacjonarnych oraz w różnorodnych zastosowaniach. Częściowo jest zastępowany bardziej nowoczesnymi typami ogniw. Charakteryzuje się niedużym spadkiem napięcia w funkcji czasu wyładowania, długim okresem użytkowania, powolnym samorozładowaniem i zdolnością do pracy w niskich temperaturach. Wadą ogniwa jest tzw. "efekt pamięci" czyli zmniejszenie jego pojemności z powodu zatykania się porów elektrody przez nierozpuszczalne formy wodorotlenków kadmu, powstające przy niepełnym rozładowaniu ogniwa lub niepełnym naładowaniu. Efekt ten można wyeliminować przez całkowite rozładowanie akumulatora, a następnie jego pełne naładowanie na początku eksploatacji. Akumulatory niklowo-kadmowe są bardziej kosztowne od kwasowo-ołowiowych i wymagają specjalnej utylizacji z powodu zawartości szkodliwego kadmu oraz jego związków. Pewną alternatywę stanowi akumulator niklowo-żelazowy, w którym jako materiał anody stosuje się tańsze i nietoksyczne żelazo, jednak w tym przypadku proporcje napięć, przy których zachodzi redukcja żelaza i wydzielanie wodoru są niekorzystne. Ogniwo tego typu nie ma "efektu pamięci", jest wytrzymałe na przeładowania i posiada stabilne napięcie w fazie rozładowywania. Jednak prąd obciążenia jest mniejszy niż w ogniwie Ni-Cd, a praca w niskich temperaturach mniej wydajna.

Udoskonaloną wersją akumulatorów niklowo-kadmowych są ogniwa niklowo-wodorkowe Ni-MH, charakteryzujące się bardzo dużą gęstością objętościową energii (360 MJ/m^3), kilkukrotnie większą pojemnością i małą rezystancją wewnętrzną. W szczelnej obudowie odpornej na wewnętrzne ciśnienie znajduje się porowata anoda wykonana ze stopu kilku metali, płytka niklowa stanowiąca katodę, elektrolit zasadowy oraz separator wykonany z poliamidu lub polietylenu. Przykładowe metale tworzące elektrodę ujemną to wanad, tytan, cyrkon, nikiel, chrom, kobalt, żelazo. Materiał elektrody charakteryzuje się dużą pojemnością absorpcyjną wodoru, jest on nim nasycany podczas elektrolizy wodnego roztworu elektrolitu. Wodór tworzy związek chemiczny z materiałem elektrody. Podczas rozładowania wodór jest uwalniany tworząc jony wodorowe, które reagują z grupami OH^- . Pojemność anody jest większa niż katody, co ułatwia rekombinację gazów powstających w przypadku przeładowania ogniwa, tlen dyfunduje przez separator do elektrody wodorkowej i tworzy wodę, a elektroda ładuje się nadal tworząc wodorek. Dzięki tym zjawiskom ogniwo jest odporne na przeładowanie i głębokie rozładowanie. Wady tego rodzaju akumulatora to krótki czas przechowywania, brak odporności na pracę w temperaturze poniżej 253 K i możliwość niewielkiego spadku napięcia w wyniku niepełnego rozładowania (stosuje się ładowarki z funkcją rozładowania).

Akumulatory litowe to najnowsza rodzina przetworników w grupie chemicznych ładowalnych źródeł energii, która rozpoczęła swoją ekspansję w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Ogniwa tego typu są kosztowne ale pozbawione wielu istotnych wad swoich poprzedników. Posiadają największą gęstość energii, dużą

trwałość, niewielkie samorozładowanie, możliwość pracy w dużym zakresie temperatur i brak "efektu pamięciowego". W ich użytkowaniu istotne jest, żeby nie były przeładowywane i wyładowywane maksymalnie oraz nie pracowały w stanie przeciążenia i w wysokiej temperaturze. Transport ładunku elektrycznego odbywa się przez dodatnie jony litu, natomiast do budowy elektrod stosuje się związki tego metalu, ponieważ użycie czystego litu powodowało poważne problemy eksploatacyjne. Ważnym aspektem decydującym o trwałości i pojemności ogniwa jest sposób jego ładowania, które w pierwszej fazie powinno odbywać się przy stałej wartości prądu, a następnie przy stałym napięciu i samoczynnie malejącym prądzie. W pierwszej fazie osiąga się przeciętnie 60% pojemności, dlatego w przypadku ładowania do pełnej pojemności nie można zmniejszyć czasu tego procesu. Wśród ogniw litowych znane są wersje litowo-jonowe (Li-ion), litowo-polimerowe (Li-poly), litowo-żelazowo-fosforanowe (Li-FePO₄), litowo-siarkowe (Li-S), litowo-manganowe (LiMn₂O₄). W najpopularniejszych akumulatorach litowo-jonowych materiały elektrodowe są nanoszone na cienkie folie miedziane lub aluminiowe, elektrolitem są sole litowe rozpuszczone w mieszaninie organicznych rozpuszczalników. W ciągu 25 lat gęstość energii elektrycznej w tych ogniwach zwiększała się średnio od 3 do 4% rocznie, a najnowsze technologie zapewniają osiągi na poziomie 600 Wh/l. Akumulator cynkowo-powietrzny posiada dużą masową gęstość energii, znaczną obciążalność i niski koszt produkcji. Jego podstawowe wady to mała odporność na wilgoć i skrajne temperatury, samorozładowanie przy dostępie powietrza i duży opór wewnętrzny przy znacznym obciążeniu.

8.4. Ogniwa paliwowe

Wodorowe ogniwo paliwowe jest elektrochemicznym przetwornikiem energii, którego nie można zaliczyć do baterii ani akumulatorów. Główne części elementarnego ogniwa paliwowego stanowią dwie elektrody, elektrolit w roztworze wodnym lub w postaci stałej oraz kanały przepływowe dla gazów. Najbardziej skomplikowaną technologicznie i kosztowną częścią jest elektroda ujemna (anoda), która oprócz materiału przewodzącego, zawiera w postaci rozdrobnionej pierwiastki katalizujące reakcję utleniania (platyna, pallad, srebro, kobalt). Teoretycznie elektrody nie powinny ulegać zużyciu w czasie pracy, w praktyce ulegają powolnym przemianom z powodu ubocznych reakcji chemicznych oraz procesów korozyjnych. Pojedyncze ogniwo osiąga niewielkie napięcie, w stanie jałowym około 1 V, a przy obciążeniu prądem znamionowym od 0,6 do 0,75 V.

Tab. 8.2. Budowa i zasada działania wybranych akumulatorów

Nazwa akumulatora	Materiał anody	Materiał katody	Elektrolit	Reakcje chemiczne	Napięcie [V]
kwasowo-ołowiowy	Pb	PbO ₂	H ₂ SO ₄	$Pb + SO_4^{2-} \Rightarrow PbSO_4 + 2e^-$ $PbO_2 + 4H^+ + SO_4^{2-} + 2e^- \Rightarrow 2H_2O + PbSO_4$	2,2
niklowo-kadmowy	Cd	KOH	NiO(OH)	$Cd + 2NiO(OH) + 4H_2O \Leftrightarrow Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2 \cdot H_2O$	1,3
niklowo-żelazowy	Fe	KOH	NiO(OH)	$Fe + 2NiO(OH) + 2H_2O \Rightarrow Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$	1,4
niklowo-wodorkowy	MH	KOH	Ni(OH)	$MH + OH^- \Rightarrow M + H_2O + e^-$ $NiO(OH) + H_2O + e^- \Rightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$	1,2
litowo-jonowy	Li _x C ₆	Li _(1-x) CoO ₂	organiczny	$Li_xC_6 + Li_{(1-x)}CoO_2 \Leftrightarrow LiCoO_2 + C_6$	4,1
cynkowo-powietrzny	Zn	C, O ₂	KOH	$Zn + OH^- \Leftrightarrow Zn(OH)_2 + 2e^-$ $O_2 + 2H_2O + 4e^- \Leftrightarrow 4OH^-$	1,65

Dlatego w praktyce ogniwa posiadają budowę modułową, jednostki elementarne łączone są w sposób szeregowy i równoległy, w celu uzyskania odpowiednich wartości napięcia i prądu (rys. 8.3). Ogniwa elementarne mogą stanowić odrębne jednostki lub znajdować się w jednej obudowie i być połączone w sposób trwały. Taka konfiguracja nazywa się stosem ogniw paliwowych, a ich poszczególne elementarne jednostki mają zróżnicowane charakterystyki i właściwości. Różnice w przebiegach charakterystyk napięciowo-prądowych poszczególnych ogniw pracujących grupowo mogą mieć charakter trwały lub powstawać chwilowo w wyniku zjawisk dynamicznych, mających związek z dostarczaniem reagentów do elektrod poszczególnych ogniw i odprowadzaniem produktów reakcji chemicznych. Ogniwa paliwowe przetwarzają energię chemiczną wodoru na energię elektryczną i ciepłą. Teoretycznie energia elektryczna stanowi 83%, a energia cieplna 17% całkowitej przetwarzanej energii. W praktyce sprawność uzyskiwania energii elektrycznej osiąga w tego rodzaju przetwornikach wartość 40–60%. W ogniwie paliwowym zachodzą reakcje utleniania i redukcji rozdzielone na dwie elektrody. Na anodzie zachodzi reakcja utleniania wodoru, na katodzie reakcja redukcji tlenu:



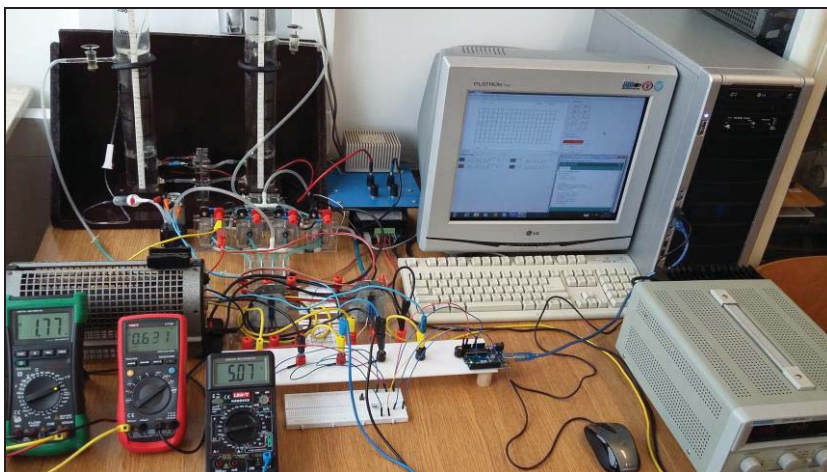
Dzięki rozdzieleniu tych reakcji nie występuje bezpośrednio spalanie wodoru w tlenie, a powstała energia jest w przeważającej części energią elektryczną, a nie ciepłą. W zewnętrznej części obwodu elektrycznego płynie prąd elektronowy, natomiast wewnątrz ogniwa przepływają jony w środowisku wodnym lub przez elektrolit w stanie stałym. W wyniku rozdzielonych na dwie elektrody reakcji utleniania wodoru i redukcji tlenu uzyskiwana jest woda, która może rozcieńczać roztwór elektrolitu lub tylko utrudniać dostęp reagentów do elektrod. Pierwszy przypadek zachodzi gdy elektrolit występuje w roztworze wodnym, a drugi ma miejsce gdy elektrolitem jest ciało stałe w postaci polimerowej membrany protonowymiennej PEM. Ogniwo nie posiada części mechanicznych i związanych z tym strat energii. Występują w nim straty energii elektrycznej na skutek spadków napięć w różnych częściach ogniwa przy przepływie prądu i w poszczególnych etapach reakcji chemicznych (polaryzacja elektrod). Spadki napięcia w ogniwie zależą od jego parametrów konstrukcyjnych i warunków pracy (czynników eksploatacyjnych). Mają one wpływ na charakterystykę napięciowo-prądową i sprawność ogniwa, dlatego rozpatrywane są dokładnie w szczegółowych modelach matematycznych ogniw. Ogniwa paliwowe można podzielić ze względu na budowę, rodzaj paliwa, zachodzące w nim reakcje chemiczne oraz temperaturę pracy. Ogniwa niskotemperaturowe stosowane są głównie w prototypowych pojazdach samochodowych z silnikiem elektrycznym. Ogniwa wysokotemperaturowe występują w przemyśle energetycznym jako źródła energii elektrycznej i ciepłej.

Z grupy jednostek niskotemperaturowych najczęściej wykorzystywane jest ogniwo typu PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) (rys. 8.3). Część główną jego elektrody stanowi warstwa porowata o dużej powierzchni czynnej,

połączona z gładkim elementem metalowym przewodzącym prąd elektronowy. Między elektrodami znajduje się membrana wykonana w postaci cienkiej folii, która stanowi polimerowy elektrolit mający zdolność przewodzenia jonów dodatnich i blokowania przepływu elektronów. Membrana zawiera rozdrobnioną platynę, która jest katalizatorem reakcji utleniania wodoru. Elektrody i membrana podczas montażu powinny być równo złożone i dociśnięte do siebie z określoną siłą. Istotne jest także właściwe zamontowanie warstwy uszczelniającej pomiędzy obudową i elektrodą oraz unieruchomienie całości za pomocą śrub ściągających. Ogniwo typu AFC (Alkaline Fuel Cell) posiada ciekły elektrolit (roztwór KOH), co stwarza pewne ograniczenia i problemy techniczne podczas jego eksploatacji (rys. 8.4). Ponadto istnieje potrzeba oczyszczania powietrza dostarczanego do katody z dwutlenku węgla i zanieczyszczeń. Jego zaletą stanowi mniejszy koszt produkcji (stosowane są tańsze katalizatory reakcji chemicznych) oraz krótszy czas rozruchu niż w przypadku ogniwa PEMFC. Alternatywnym rozwiązaniem w tym przypadku są ogniwa metanolowe, wyposażone w membranę protonowymienną, ale zasilane metanolem, który jest związkiem bardziej bezpiecznym i łatwiejszym w magazynowaniu niż wodór. Jednak tego typu ogniwa muszą być wyposażone w dodatkowe urządzenia, służące do wytwarzania wodoru z metanolu przed dostarczeniem paliwa do anody.

W grupie ogniw wysokotemperaturowych wyróżnia się również jednostki z elektrolitem w postaci ciekłej lub w stanie stałym. Ogniwo typu PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) pracuje w temperaturze 150–210 °C i posiada elektrolit w postaci stężonego kwasu fosforowego H_3PO_4 , umieszczony w porowatym węgliku krzemu SiC oraz elektrody wykonane najczęściej z porowatego grafitu z domieszką platyny. Ogniwo typu MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) pracuje w temperaturze 600–900 °C i posiada elektrolit w postaci mieszaniny stopionych węglanów alkalicznych umieszczonych w spieku ceramicznym Li_2O . Ogniwo może być zasilane gazem ziemnym, benzyną, propanem i wodorem. Reforming paliwa, czyli jego konwersja do wodoru, może zachodzić wewnątrz ogniwa bez konieczności stosowania reformerów zewnętrznych, wyposażonych w kosztowne katalizatory. Duża reaktywność elektrolitu może być powodem korozji i roztwarzania elektrod, które także charakteryzują się znaczną wrażliwością na zmiany temperatury elektrolitu. Ogniwo typu SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) pracuje w temperaturze 700–1100 °C i posiada elektrolit stały wykonany z nieporowatego tlenku cyrkonu ZrO_2 stabilizowanego tlenkiem itru Y_2O_3 , który zaczyna przewodzić aniony O^{2-} w temperaturze 700–800 °C, a stanowi skuteczną barierę dla elektronów. W strukturze elektrolitu występują oddziaływania elektryczne ładunków, podobnie jak w membranie protonowymiennej ogniwa typu PEMFC lub DMFC.

W tym ogniwie również stosuje się różne paliwa, z których wewnątrz uzyskuje się wodór, posiada ono tolerancję na tlenki węgla i siarkę, co stanowi istotną zaletę.



Rys. 8.3. Stanowisko do badania ogniw paliowych typu PEM



Rys. 8.4. Ogniw paliowe typu AFC na stanowisku badawczym

9. Elementy i zabezpieczenia w instalacji elektrycznej

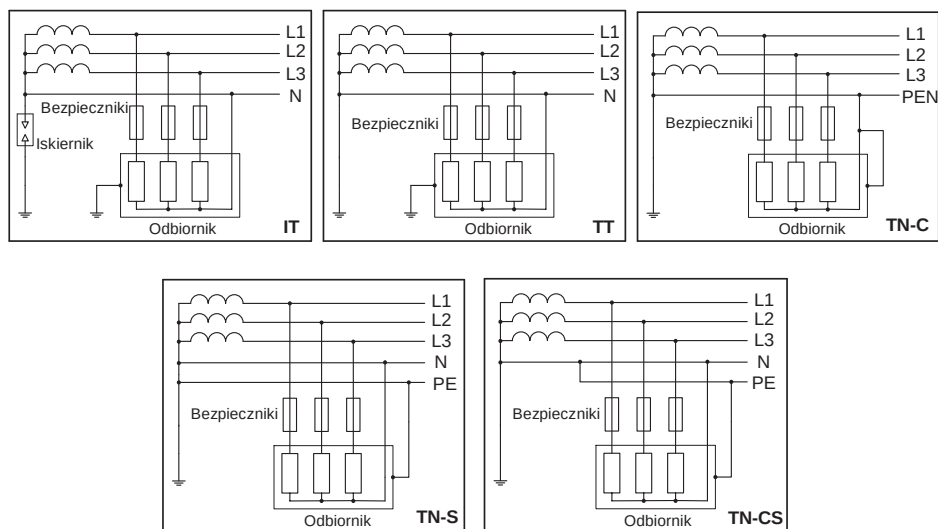
9.1. Rodzaje instalacji elektrycznych i ochrona przeciwporażeniowa

Instalacja elektryczna to najczęściej część sieci niskiego napięcia stanowiąca układ przewodów w budynku lub na zewnątrz niego wraz ze sprzętem elektroinstalacyjnym. Służy do dostarczania energii lub sygnałów elektrycznych do odbiorników. Instalacja zaczyna się w miejscu podłączenia do sieci elektroenergetycznej, a kończy na odbiornikach, ze względu na ich charakter instalacje dzieli się ogólnie na oświetleniowe i siłowe. Według kryterium miejsca występowania wyróżnia się instalacje nieprzemysłowe, przemysłowe, stałe i tymczasowe. Najważniejsze wielkości fizyczne określone dla instalacji elektrycznych to napięcie znamionowe, rezystancja izolacji, dopuszczalny spadek napięcia, rodzaj i skuteczność ochrony przeciwporażeniowej. Sieć zasilająca niskiego napięcia jest wyposażona w transformator, którego uzwojenie wtórne jest połączone w gwiazdę lub zygzak i posiada punkt neutralny. Od tego punktu jest prowadzony przewód neutralny N lub ochronno-neutralny PEN. Przewody zasilające sieci są prowadzone od uzwojeń wtórnych transformatora. Sposób wykonania ochrony przeciwporażeniowej w instalacji zależy od konfiguracji sieci zasilającej (rys. 9.1). Układy sieci zasilających oznaczane są symbolami literowymi, w których pierwsza litera informuje czy punkt neutralny transformatora jest połączony z ziemią (T) czy od niej izolowany (I), druga litera oznacza rodzaj ochrony – uziemienie (T) lub przewód ochronny przyłączony do punktu neutralnego transformatora (N), trzeci znak symbolu informuje o sposobie prowadzenia przewodu ochronnego – wspólnie z neutralnym (C), oddzielnie (S) lub gdy rozdział tych przewodów występuje w pewnej odległości od stacji transformatorowej (CS). Układ **IT** posiada izolowany punkt neutralny, połączony z uziomem za pośrednictwem iskiernika, przez który w stanie normalnej pracy nie płynie żaden prąd. Środkiem ochrony przeciwporażeniowej w tym przypadku jest uziemienie metalowych elementów obudów odbiorników i konstrukcji uziomami lokalnymi albo za pośrednictwem uziemionej sieci ochronnej.

Układ **TT** posiada uziemiony punkt neutralny transformatora, ale ze względów konstrukcyjnych (za mały przekrój, duże obciążenia, niemożność uziemienia wzdłuż trasy przy znacznych odległościach) przewód neutralny nie może być stosowany w celach ochronnych. Z tego powodu ochrona jest realizowana w taki sam sposób jak w układzie **IT**. Układ **TN-C** posiada uziemiony punkt neutralny transformatora i przewód neutralny, który w tym przypadku pełni także funkcję ochronnego i jest nazywany ochronno-neutralnym PEN. Musi posiadać odpowiedni przekrój, ciągłość i dodatkowe uziemienia wzdłuż trasy. Ochrona przeciwporażeniowa jest realizowana przez przyłączenie metalowych obudów i konstrukcji do przewodu PEN. Układ **TN-S** posiada uziemiony punkt neutralny transformatora i odchodzące od niego dwa przewody – neutralny N i ochronny PE, do którego przyłącza się metalowe obudowy odbiorników.

Oddzielny przewód, przeznaczony tylko do ochrony, zapewnia jej dużą skuteczność. Układ **TN-CS** ma uziemiony punkt neutralny transformatora, ale ze względów

konstrukcyjnych na pewnym odcinku występuje przewód ochronno-neutralny PEN, a dopiero dalej następuje jego rozdzielanie na N i PE. Ochronę przeciwporażeniową realizuje się przed węzłem rozdzielającym tak jak w układzie **TN-C**, a za węzłem tak jak w sieci **TN-S**. W Polsce sieci niskiego napięcia mają najczęściej układ **TN-C**, a rozdział na przewody N i PE dokonywany jest w złączu (punkt, w którym przyłącze łączy się z wewnętrzną linią zasilającą obiektu). Układy **TT** i **TN-S** są najczęściej rozwiązaniami lokalnymi, stosowanymi w obiektach o odbiorach zasilanych bezpośrednio z sieci transformatorowo-rozdzielczej. Poza wymienionymi elementami w początkowej części instalacji elektrycznych występują jeszcze rozdzielnice i układy pomiaru energii.



Rys. 9.1. Układy sieci zasilających niskiego napięcia

9.2. Przewody i kable w instalacjach elektrycznych

Przewód elektryczny zbudowany jest z żyły, izolacji, ekranu i warstw ochronnych. Żyła jest elementem przewodzącym prąd i powinna się charakteryzować małą rezystancją, powszechnie wykonywana jest z miedzi, która oprócz znacznej przewodności właściwej posiada dużą wytrzymałość mechaniczną, odporność na wpływ środowiska i umiarkowaną cenę. Jeszcze lepsze właściwości przewodzące posiada srebro, ale z powodu dużych kosztów stosowane jest tylko w niektórych miejscach przewodzących prąd w urządzeniach wyższej klasy. Aluminium wykorzystuje się w liniach napowietrznych i kablach energetycznych. Pole przekroju poprzecznego żyły jest ściśle związane z możliwością przewodzenia prądu o określonym natężeniu i znormalizowane (0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; ... 1000 mm²).

W instalacjach budynków mieszkalnych obwody oświetleniowe układa się przewodami o przekroju 1,5 mm², a zasilanie gniazd wtyczkowych wykonuje się przewodami o przekroju 2,5 mm². Obwody oświetleniowe zabezpiecza się zwykle

wyłącznikami instalacyjnymi o prądzie znamionowym 10 A, a obwody gniazd wtyczkowych chronione są przez wyłączniki, dla których prąd znamionowy wynosi 16 A. W zależności od przeznaczenia żyły mogą być wykonywane w postaci drutu (do układania na stałe) lub linki (do odbiorników przenośnych). Najważniejsze wymagania stawiane izolacji przewodów to wytrzymałość na przebicia elektryczne i uszkodzenia mechaniczne, elastyczność, odporność na wpływ środowiska, nietoksyczność. Najczęściej stosowane materiały to polwinit (zmodyfikowany polichlorek winylu), polietylen (powyżej 1 kV i kable koncentryczne), guma i kauczuk silikonowy. W przewodach wielożyłowych stosuje się warstwy ochronne w postaci powłoki, pancerza i odzieży. Powłoka jest szczelną warstwą zapobiegającą przedostawaniu się wilgoci do wnętrza przewodu, w przewodach układanych na stałe wykonywana jest z polwinitu i oddzielona talkiem od izolacji żył (przewody kabelkowe). Przewody do odbiorników ruchomych pokrywane są polwinitem lub gumą, taka osłona nazywana jest oponą, a przewody oponowymi. Polwinit w niskich i wysokich temperaturach ma tendencję do twardnienia i pęknięcia. Kable, które układane są w ziemi mają powłokę o zwiększonej wytrzymałości i szczelności. Pancerz jest osłoną ochronną powstałą przez owinięcie przewodu taśmą lub drutem stalowym w celu ochrony przed uszkodzeniem mechanicznym (przewód uzbrojony). Odzież jest to warstwa materiału włóknistego nałożona na izolację lub powłokę przewodu w celu zabezpieczenia go przed wpływami zewnętrznymi. Ekran jest to cienka warstwa wykonana z metalu (folia aluminiowa lub oplót z cienkich drutów miedzianych) lub przewodzącego tworzywa (polietylen z dodatkiem grafitu) stosowana w celu ograniczenia różnych zakłóceń wywoływanych przez zewnętrzne pole magnetyczne lub stabilizacji rozkładu pola elektrycznego wokół żyły (kable wysokonapięciowe). W przewodach telekomunikacyjnych występują pary żył, skręcane ze sobą w celu zmniejszenia wzajemnego wpływu transmitowanych nimi sygnałów, a w instalacjach telewizyjnych stosuje się przewody koncentryczne.

W oznaczeniach literowo-cyfrowych przewodów zawarte są informacje o zastosowanych materiałach, konstrukcji, przekroju, przeznaczeniu. Przykładowe oznaczenia i ich wyjaśnienie:

- YDYp 3x1,5 – powłoka polwinitowa, drut miedziany w izolacji polwinitowej, płasko ułożone trzy żyły o przekroju 1,5 mm² każda,
- YWDXpek 75–0,75/4,8 – powłoka polwinitowa, przewód koncentryczny wysokiej częstotliwości, drut miedziany o przekroju 0,75 mm² w izolacji z polietylenu o średnicy 4,8 mm, ekran w postaci oplotu z drutu miedzianego na folii aluminiowej.

Bardzo ważnym parametrem określającym dla przewodów elektrycznych jest napięcie, na które wykonano izolację żył. Przewody telekomunikacyjne i stosowane w sieciach komputerowych są przeznaczone do pracy przy napięciach kilkukrotnie mniejszych od sieciowego i nie mogą być stosowane w instalacjach siłowych. Światłowodowy są specjalną grupą przewodów telekomunikacyjnych, ich żyły przewodzą światło i są cienkimi włóknami ze szkła kwarcowego lub specjalnych tworzyw sztucznych. Są przystosowane do transmisji impulsów światła podczerwonego

o odpowiedniej długości fali lub światła widzialnego w systemach oświetleniowych. Przewody w instalacjach mogą być układane pod tynkiem, w tynku, na tynku, uchwytych i drabinkach oraz w rurkach, korytkach, listwach i kanałach.

9.3. Łączniki – rodzaje i przeznaczenie

Łączniki służą do załączania i wyłączania obwodów elektrycznych, mogą być uruchamiane ręcznie lub automatycznie i dzielą się na odłączniki, rozłączniki oraz wyłączniki. Odłączniki (łączniki izolacyjne) mają za zadanie zapewnić widoczną przerwę między stykami, nie posiadają układu gaszenia łuku i zdolności szybkiego otwarcia, a więc nie są przeznaczone do wyłączania żadnych prądów. Rozłączniki (łączniki robocze) służą do załączania i wyłączania prądów roboczych, które płyną podczas normalnej pracy urządzenia, posiadają podstawowy układ gaszenia łuku i wymaganą szybkość działania. Wyłączniki (łączniki zwarciovowe) mogą wyłączać prądy robocze i zwarciovowe (kilkadziesiąt razy większe od znamionowego), mają rozbudowany układ gaszenia łuku i automatyczny napęd zapewniający bardzo szybkie otwarcie styków. Łączniki instalacyjne o napędzie ręcznym należą do grupy rozłączników. Najprostszym rozwiązaniem w tej grupie jest łącznik jednobiegunowy, częściej stosuje się przełącznik szeregowy nazywany też świecznikowym (łączenie dwóch niezależnych obwodów z jednego miejsca), przełącznik schodowy (łączenie jednego obwodu z dwóch niezależnych miejsc), przełącznik krzyżowy (używany z przełącznikami schodowymi do sterowania pojedynczego obwodu z wielu miejsc), przycisk chwilowy (dzwonkowy) i rozłącznik bezpiecznikowy (dźwigniowy łącznik umożliwiający wyciągnięcie noży stykowych bezpieczników z ich sprężynowych gniazd w stanie bez przepływu prądu). W technice oświetleniowej oprócz łączników o napędzie ręcznym stosuje się układy elektroniczne: przekaźnik bistabilny (sterowanie obwodem oświetleniowym z wielu miejsc), przekaźnik czasowy (samoczynne wyłączenie po ustalonym czasie), czujniki ruchu, wyłączniki zmierzchowe (załączanie o zmierzchu, wyłączanie o świcie), regulatory oświetlenia (ściemniacze, głównie żarówek i diod). Szczególny rodzaj odłącznika, nazywany łącznikiem wtyczkowym, stanowią gniazdo wtyczkowe i wtyczka. Gniazda jednofazowe produkowane są na prądy znamionowe 10 i 16 A. Gniazda i wtyczki trójfazowe wykonuje się w trzech rozmiarach przystosowanych do prądów znamionowych 16, 32 i 63 A.

Podstawowe wielkości fizyczne charakteryzujące właściwości łączników to napięcie znamionowe, prąd znamionowy ciągły i maksymalny prąd wyłączalny. Łączniki automatyczne to wyłączniki, których zadaniem jest natychmiastowe samoczynne wyłączenie instalacji lub odbiornika spod napięcia w przypadku wystąpienia zakłócenia, którym może być przeciążenie, zwarcie, zanik lub wzrost napięcia. Najprostszym rozwiązaniem w tym przypadku jest zastosowanie bezpiecznika topikowego czyli wyłącznika jednorazowego. Topik jest odcinkiem cienkiej taśmy metalowej lub drutu, stanowi przewężenie na drodze prądu, więc najszybciej się nagrzewa i przepala w czasie krótszym niż 0,2 s. Topik jest umieszczony wewnątrz szklanej lub ceramicznej obudowy i zasypany czystym piaskiem kwarcowym. Wkładka

topikowa może mieć charakterystykę o działaniu bardzo szybkim, szybkim i zwłocznym. Bezpieczniki topikowe znacznie gorzej reagują na przeciążenia, czas wyłączenia jest wtedy zbyt długi. Obecnie w instalacjach elektrycznych zamiast bezpieczników używane są powszechnie wyłączniki instalacyjne, które posiadają styki i mogą wykonać ok. 10000 cykli łączeniowych (rys. 9.2). Załączane są ręcznie, natomiast wyłączenie może być ręczne lub automatyczne, w wyniku zadziałania wyzwalacza. W jednym wyłączniku występują dwa wyzwalacze – zwarciovyy i przeciążeniowy. Zasadnicze elementy elektromagnetycznego wyzwalacza zwarciovowego to cewka połączona szeregowo ze stykami i zwora, wciągana do jej wnętrza pod wpływem pola magnetycznego wytwarzanego przez prąd zwarciovowy, której trzpień uderza w zapadkę wyzwalającą mechanizm styków. Elementem wykonawczym wyzwalacza przeciążeniowego jest termobimetal, który pod wpływem przepływającego przez niego zwiększonego prądu rozgrzewa się i wygina, wyzwalając sprężynowy mechanizm otwierający styki. Czas zadziałania wyzwalacza przeciążeniowego zależy od natężenia prądu i jest znacznie dłuższy od czasu zadziałania wyzwalacza zwarciovowego.

Poszczególne typy wyłączników różnią się wykonaniem członu zwarciovowego, który może działać według różnych charakterystyk oznaczonych literami A, B, C i D. Człony nadprądowe o charakterystyce A reagują na prądy zwarciovowe dwukrotnie większe od prądu znamionowego, o charakterystyce B wyłączają prądy od trzech do pięciu razy większe od znamionowego, z charakterystyką C działają przy prądach od pięciu do dziesięciu razy większych niż znamionowe, a zgodnie z charakterystyką D wyłączają prądy od dziesięciu do dwudziestu razy większe od nominalnego. Pośrednim rozwiązaniem między bezpiecznikami topikowymi i wyłącznikami instalacyjnymi były bezpieczniki automatyczne, wyposażone w człony zwarciovowe i przeciążeniowe, o charakterystykach podobnych do jednorazowych bezpieczników topikowych. Wyłączniki różnicowoprądowe (przeciwporażeniowe) służą do ochrony użytkowników instalacji i urządzeń elektrycznych, przerywają obwód elektryczny gdy pojawią się niewielkie prądy płynące poza głównym obwodem z powodu uszkodzenia izolacji przewodów i odbiorników.

W praktyce najczęściej prądy te płyną przez ciało człowieka do ziemi z powodu dotknięcia obudowy urządzenia, na której pojawiło się napięcie lub przewodu z uszkodzoną izolacją. Wyłącznik ten nie chroni użytkownika przed porażeniem w przypadku jednoczesnego dotknięcia dwóch przewodów fazowych albo fazowego i neutralnego. Podczas prawidłowej pracy urządzenia jednofazowego lub trójfazowego geometryczna suma prądów w przewodach zasilających jest równa zero. Jeżeli powstanie dodatkowe połączenie elektryczne z ziemią lub przewodem ochronnym, suma prądów nie jest równa zero i w rdzeniu wyłącznika, który jest obejmowany przez pole magnetyczne przewodów, powstanie strumień magnetyczny. W dodatkowym uzwojeniu nawiniętym na rdzeniu strumień ten indukuje napięcie, które zasilą wyzwalacz elektromagnetyczny wyłączający przepływ prądu w obwodzie głównym (rys. 9.3).

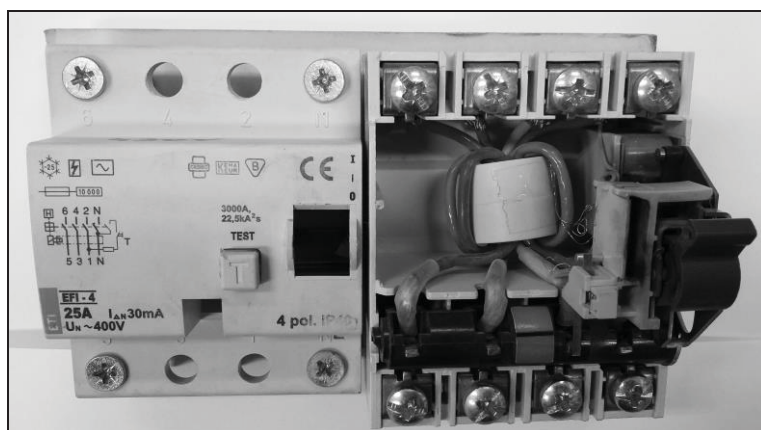
W praktyce w prawidłowo działającym urządzeniu elektrycznym występują prądy upływu i geometryczna suma prądów w przewodach zasilających nie jest dokładnie równa zero. W związku z tym definiuje się znamionowy prąd różnicowy, poniżej którego wyłącznik nie działa. W większości instalacji stosuje się wyłączniki różnicowoprądowe o prądzie zadziałania równym 30 mA. Poza tym wyłącznik jest charakteryzowany przez znamionowy prąd ciągły, napięcie znamionowe, obciążalność zwarciovą przepustową, zdolność załączania i wyłączania, dopuszczalną temperaturę otoczenia oraz typ wyzwolenia i zwłoczność zadziałania. Ograniczniki przepięć nie są wyposażone w mechaniczne styki, ale wykonują czynności łączeniowe przy bardzo dużych wartościach prądów i napięć w celu ochrony instalacji i odbiorników przed impulsami wysokiego napięcia. Włączane są między przewód fazowy lub neutralny i przewód ochronny. W stanie normalnej pracy nie przewodzą prądu, natomiast przy znacznym wzroście napięcia zwierają impuls przepięciowy do ziemi. Zasadnicze elementy ograniczników to iskiernik lub warystor – elementy, których rezystancja zmniejsza się w znacznym stopniu pod wpływem wzrostu napięcia.

Podstawowe łączniki stosowane w sterowniczych i sygnalizacyjnych układach automatyki stykowej to styczniki, należące do grupy rozłączników. Są to łączniki manewrowe o napędzie elektromagnetycznym, ich zasadnicze elementy to elektromagnes z ruchomą zworą i zespoły styków zwiernych oraz rozwiernych, utrzymywane w stanie zamknięcia lub otwarcia przez pole magnetyczne, wytwarzane przez prąd przepływający przez cewkę nawiniętą na rdzeniu, które przez ruchomą część rdzenia pokonuje opór sprężyny. Układy zbudowane w oparciu o styczniki są sterowane przez różnego rodzaju przyciski, zwykle z zestykami chwilowymi przełączanymi tylko podczas ich naciśnięcia. Podobnie jak w stycznikach występują tu styki zwiernie o oznaczeniu NO (normalnie otwarte) i styki rozwiernie o oznaczeniu NC (normalnie zamknięte). W celu zautomatyzowania działania urządzeń z napędem nawrotnym i nie dopuszczenia do przekroczenia skrajnych położenia stosuje się wyłączniki krańcowe. Zwykle mają one parę styków (NO i NC) napędzanych odpowiednim mechanizmem.

Oprócz wyłączników mechanicznych stosuje się w tym celu bardziej nowoczesne czujniki zbliżeniowe (indukcyjne, ultradźwiękowe, optyczne). W automatyce stykowej występują również przekaźniki wielkości elektrycznych i nieelektrycznych, służące do przełączania styków po przekroczeniu wartości progowych kontrolowanych parametrów i przesyłania w ten sposób informacji w postaci sygnału elektrycznego. W tej grupie można wyróżnić przekaźnik elektromagnetyczny, działający podobnie jak stycznik i przekaźnik termobimetalowy, działający podobnie jak wyzwalacz termiczny wyłącznika instalacyjnego. W dużej grupie różnorodnych łączników występują jeszcze łączniki bezstykowe, realizujące czynności łączeniowe za pomocą złączy półprzewodnikowych takich elementów elektronicznych jak tranzystory mocy i tyrystory. Charakteryzują się dużą trwałością i zdolnością łączeniową, jednak są czułe na przepięcia i przeciążenia.



Rys. 9.2. Wyłączniki instalacyjne i wyłącznik różnicowoprądowy jednofazowy



Rys. 9.3. Budowa zewnętrzna i wewnętrzna wyłącznika różnicowoprądowego trójfazowego

9.4. Skutki przepływu prądu przez organizm człowieka i środki ochrony przeciwporażeniowej

Prąd rażeniowy, przepływający przez ciało człowieka, powoduje zaburzenia w funkcjonowaniu wielu układów organizmu, a skutki ich zależne są od jego natężenia i częstotliwości oraz czasu i drogi przepływu. W ciele człowieka występują przemiany fizyczne i chemiczne, wyszczególnić tu można skurcze mięśni, oparzenia, utratę przytomności, zatrzymanie oddechu, zakłócenia pracy serca. Najbardziej niebezpieczny jest prąd zmienny o częstotliwości 40–60 Hz, a najbardziej czułe części ciała to klatka piersiowa, głowa i rdzeń kręgowy. Najmniejsze niebezpieczne dla człowieka wartości natężenia prądu wynoszą 30 mA (dla prądu przemiennego o częstotliwości 40–60 Hz) i 70 mA (dla prądu stałego). Na podstawie tych wartości i średniej rezystancji ciała człowieka równej 1000Ω obliczono maksymalne wartości napięć dotykowych dopuszczalnych dla człowieka. W warunkach gdy rezystan-

cja ciała człowieka wynosi co najmniej 1000 Ω , przyjęto bezpieczne napięcia równe 50 i 100 V, odpowiednio dla prądu zmiennego i stałego. W warunkach gdy rezystancja ciała człowieka nie przekracza 1000 Ω , wyznaczono bezpieczne napięcia równe 25 i 50 V, odpowiednio dla prądu zmiennego i stałego.

Ochrona przeciwporażeniowa dzieli się na podstawową (przed dotykiem bezpośrednim), zapewniającą bezpieczeństwo w warunkach normalnej pracy urządzeń oraz dodatkową (przed dotykiem pośrednim), spełniającą swoją funkcję w warunkach pracy zakłócenieniowej. Środki ochrony podstawowej to izolacja robocza, obudowa, ogrodzenie, przeszkoda, ograniczenie napięcia i prądu rażeniowego, umieszczenie części czynnych poza zasięgiem ręki. Ochronę podstawową można uzupełnić przez zastosowanie wyłącznika różnicowoprądowego. Ochrona dodatkowa ma za zadanie szybko wyłączyć zasilanie albo ograniczyć napięcie w przypadku uszkodzenia urządzenia i pojawienia się napięcia na metalowych częściach obudowy. Środki ochrony dodatkowej to samoczynne wyłączenie zasilania, połączenia wyrównawcze, separacja elektryczna, izolowanie stanowiska, stosowanie urządzeń II klasy ochronności lub urządzeń o izolacji równoważnej.

10. Elementy elektroniczne bierne i półprzewodnikowe bezzłączowe

10.1. Rezystory

Rezystory (oporniki) to elementy liniowe, charakteryzujące się stałą wartością rezystancji, niezależną od czynników zewnętrznych. Prąd płynący przez taki element jest wprost proporcjonalny do napięcia występującego na jego zaciskach i odwrotnie proporcjonalny do jego rezystancji.

Charakterystyka prądowo-napięciowa $I=f(U)$ jest linią prostą. Energia elektryczna w rezystorze przetwarzana jest w energię cieplną. Rezystory w układach elektronicznych służą głównie do ograniczania lub ustalania wartości prądów i napięć w poszczególnych gałęziach oraz elementach obwodu. Wartość oporu rezystora wyraża się ogólnym wzorem:

$$R = \frac{\xi \cdot l}{A} \quad (1)$$

gdzie:

ξ – rezystywność materiału przewodzącego,

l – długość drogi przepływu prądu,

A – powierzchnia przekroju dla przepływu prądu.

Rezystory mogą być wykonane w postaci drutowej (spirale z drutu oporowego nawinięte na korpusie izolacyjnym), warstwowej (warstwa materiału oporowego naniesiona na korpus lub podłoże ceramiczne), objętościowej i cienkowarstwowej. Drut i warstwy materiału rezystywnego pokrywa się zewnętrznie substancją ceramiczną lub lakierem. Rezystory stosowane w układach elektronicznych i montowane ręcznie mają najczęściej postać niewielkich walców z napisem lub kolorowymi paskami, które umożliwiają odczyt ich rezystancji i procentowej tolerancji tej wartości, ustalonej przez producenta (rys. 10.1). Odczytu dokonuje się na podstawie tabeli według zasady, że cyfry oznaczające dwa pierwsze kolory pasków tworzą liczbę, którą mnoży się przez czynnik oznaczający kolor trzeciego paska, a tolerancję odczytuje się według koloru czwartego paska, który jest najczęściej złoty lub srebrny. W przypadku braku tego oznaczenia tolerancja jest równa 20%. Gdy występuje sześć kolorowych pasków, trzeci z nich oznacza trzecią cyfrę znaczącą, a szósty informuje o temperaturowym współczynniku rezystancji. Rezystory mogą przyjmować standardowe wartości rezystancji według ustalonych szeregów. W zapisie wartości oporu stosuje się charakterystyczne oznaczenia (np. 100k=100 k Ω , 100R=100 Ω , 2R2=2,2 Ω , 4M7=4,7 M Ω). Oporniki produkowane są w postaci elementów ze stałą wartością rezystancji lub z możliwością jej skokowej albo płynnej zmiany (potencjometry, rezystory suwakowe i dekadowe). Potencjometry mają postać elementu z trzema końcówkami i częścią ruchomą przesuwającą się po ścieżce oporowej, dzięki temu można je odpowiednio połączyć w celu płynnej regulacji napięcia lub natężenia prądu. Opór elektryczny tych elementów może się zmieniać

liniowo, logarytmicznie lub wykładniczo. Szczotka może poruszać się po ścieżce oporowej ruchem obrotowym lub w linii prostej, z tego względu potencjometry nazywane są obrotowymi lub suwakowymi. W potencjometrach węglowych ścieżka oporowa wykonana jest z grafitu naniesionego na podstawę izolacyjną, w cermetowych ścieżka przewodząca znajduje się na płytce ceramicznej, a w drutowych szczotka przesuwana się po drucie oporowym. Najważniejsze wielkości fizyczne charakteryzujące rezystor to:

- rezystancja znamionowa,
- tolerancja (klasa dokładności),
- moc znamionowa,
- napięcie graniczne,
- temperaturowy współczynnik rezystancji,
- współczynnik szumów.

Tolerancja jest to wyrażona w procentach maksymalna, dopuszczalna wartość odchyłki rezystancji opornika od jego rezystancji znamionowej. Moc znamionowa (dopuszczalna moc strat w rezystorze) jest to największa wartość mocy, powodująca wydzielanie się energii cieplnej przy zachowaniu pozostałych parametrów w granicach ustalonych dla danego typu rezystora. Temperaturowy współczynnik rezystancji określa jej zmiany pod wpływem temperatury według zależności:

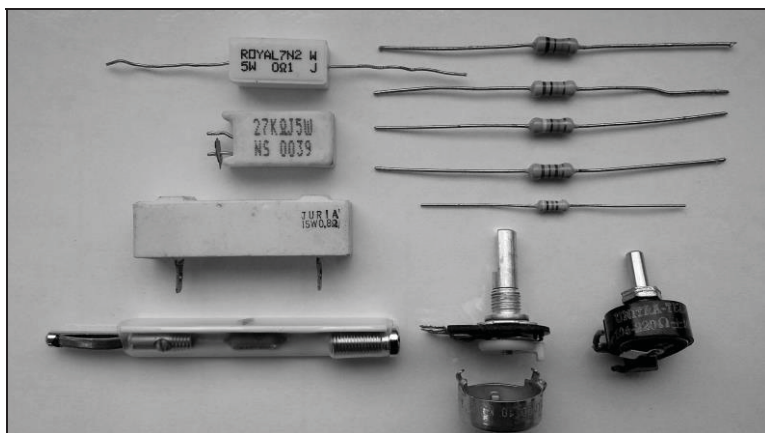
$$TWR = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T} \quad (2)$$

gdzie:

ΔR – zmiana rezystancji spowodowana zmianą temperatury o ΔT ,

R – rezystancja rezystora w temperaturze odniesienia (przed jej zmianą).

W celu osiągnięcia wymaganej wartości rezystancji należy stosować metalowe rezystory wysokiej klasy i nie obciążać ich pełną mocą znamionową.



Rys. 10.1. Rezystory stosowane w układach elektronicznych

10.2. Termistory

Termistor jest rezystorem półprzewodnikowym, którego rezystancja zależy od temperatury. Wytwarzany jest z tlenków metali lub polimerów. W zależności od przebiegu charakterystyki $R=f(T)$ wyróżnia się trzy rodzaje termistorów:

- NTC (Negative Temperature Coefficient), wzrost temperatury powoduje zmniejszanie rezystancji,
- PTC (Positive Temperature Coefficient), wzrost temperatury powoduje zwiększanie rezystancji,
- CTR (Critical Temperature Resistor), niewielka zmiana temperatury powoduje skokowy wzrost lub spadek rezystancji.

Dla termistorów NTC i PTC w stosunkowo niewielkim przedziale temperatur zależność rezystancji od temperatury jest traktowana jak liniowa i wyrażana zależnością:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (3)$$

gdzie:

R – rezystancja termistora w temperaturze T ,

R_0 – rezystancja w temperaturze odniesienia T_0 ,

α – współczynnik temperaturowy termistora.

Termistory stosuje się jako czujniki temperatury, zabezpieczenia termiczne silników elektrycznych i w celu ograniczania prądów początkowych w układach zasilających.

10.3. Warystory

Warystor (Voltage Dependent Resistor) jest rezystorem, którego opór w dużym stopniu zmniejsza się ze wzrostem napięcia na jego zaciskach. Najważniejsze wielkości fizyczne charakteryzujące warystor to:

- napięcie charakterystyczne,
- prąd przy napięciu charakterystycznym,
- moc znamionowa,
- tolerancja wartości napięcia charakterystycznego.

Napięcie charakterystyczne jest to taka wartość napięcia, którego przekroczenie prowadzi do zwiększenia prądu powyżej ustalonej wartości. Warystory stosuje się do ochrony urządzeń, układów i elementów elektrycznych przed skutkami przepięć w układach elektronicznych, elektrycznych i sieciach energetycznych. W instalacjach prądu przemiennego montowane są pomiędzy przewodami fazowymi i przewodem ochronnym PE oraz w listwach zasilających w celu tłumienia przepięć mogących wystąpić w czasie wyładowań atmosferycznych lub przełączania elementów indukcyjnych. Istotnym zastosowaniem warystorów jest ochrona styków w przekaźnikach i stycznikach przed iskrzeniem i przyspieszonym zużyciem występującym podczas odłączania obciążeń indukcyjnych.

W elektroenergetyce warystory stosuje się jako odgromniki do ochrony sieci napowietrznych przed skutkami przebiegów powstających z powodu wyładowań atmosferycznych.

10.4. Magnetorezystory

Magnetorezystory (gaussotrony) są to elementy półprzewodnikowe bezzłączowe, których rezystancja zależy od indukcji pola magnetycznego. Zjawisko magnetorezystancji polega na wzroście rezystywności materiału półprzewodnikowego pod wpływem pola magnetycznego działającego prostopadle do warstwy powierzchni materiału, w którym płynie prąd. Siła działa na przemieszczające się ładunki i w ten sposób zwiększa długość ich drogi. Magnetorezystory posiadają niewielkie rozmiary i mogą być umieszczane w wąskich szczelinach obwodów magnetycznych, nie zaburzają pola magnetycznego i mogą pracować w polu stałym oraz zmiennym w czasie. Stosowane są do pomiaru indukcji magnetycznej, przesunięć w układach sterowania automatycznego oraz w układach pomiaru prądu i mocy elektrycznej.

10.5. Hallotrony

Hallotron jest to czterozaciskowy półprzewodnikowy czujnik pola magnetycznego, zasilany prądem i wytwarzający napięcie o wartości zależnej od indukcji pola magnetycznego przenikającego jego strukturę. Siła pola magnetycznego działa na poruszające się ładunki elektryczne powodując ich nierównomierną koncentrację w elemencie półprzewodnikowym i powstanie napięcia między jego ściankami. Największa wartość napięcia Halla powstaje wtedy gdy kierunek linii pola magnetycznego jest prostopadły do powierzchni hallotronu i do kierunku płynącego w nim prądu. Wartość napięcia Halla wyraża się wzorem:

$$U_H = \frac{R_H}{h} \cdot B \cdot I \quad (4)$$

gdzie:

R_H – stała Halla,

h – grubość warstwy półprzewodnika,

B – indukcja magnetyczna,

I – natężenie prądu.

Hallotrony stosowane są do pomiaru i wykrywania pola magnetycznego, a także do pośredniego pomiaru natężenia prądu za pomocą mierników cęgowych i bezstykowych przetworników.

10.6. Kondensatory

Kondensator jest zbudowany z dwóch elementów wykonanych z materiału przewodzącego, rozdzielonych dielektrykiem i posiada zdolność magazynowania ładunków elektrycznych czyli gromadzi energię w polu elektrycznym. Podstawową wielkością charakteryzującą kondensator jest pojemność czyli stosunek ładunku

zgromadzonego na jego okładkach do napięcia występującego na jego zaciskach. Pojemność elektryczna kondensatora płaskiego wyraża się zależnością:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d} \quad (5)$$

gdzie:

ε_r – przenikalność elektryczna względna dielektryka,

ε_0 – przenikalność elektryczna próżni,

A – powierzchnia elektrody,

d – odległość pomiędzy elektrodami.

Energia W_C zgromadzona w kondensatorze o pojemności C i naładowanym do napięcia U wyraża się zależnością:

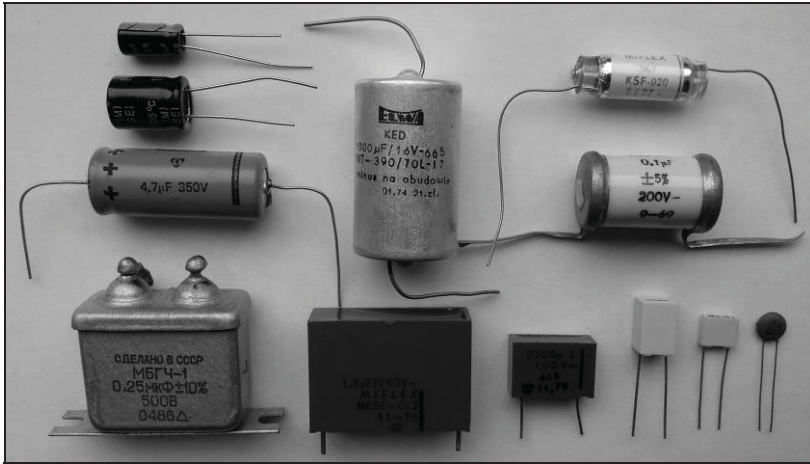
$$W_C = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (6)$$

W zależności od rodzaju dielektryka rozróżnia się kondensatory papierowe, tworzywowe, mikowe, ceramiczne, elektrolityczne (rys. 10.2). Kondensatory mogą mieć stałą pojemność lub regulowaną za pomocą zmiany powierzchni czynnej elektrod zachodzących na siebie podczas obrotu elektrody ruchomej.

W kondensatorach elektrolitycznych elektrolit stanowi jedną z elektrod (np. w postaci nasączonego papieru), a drugą może być folia aluminiowa lub materiał wykonany z tantalum. Posiadają one dużą pojemność w stosunku do swojej objętości i są elementami z określoną polaryzacją, której zmiana powoduje zniszczenie kondensatora i może uszkodzić układ, w którym on pracuje.

W kondensatorach elektrolitycznych końcówka ujemna jest krótsza i oznaczona znakiem "-". Podstawowe parametry kondensatorów to pojemność znamionowa, napięcie znamionowe, tolerancja pojemności i stratność. Straty energii powstają z powodu rezystancji okładzin i zacisków oraz niedoskonałości dielektryka. Tangens kąta stratności $\tan \delta$ określa straty energii w dielektryku dla składowej zmiennej sygnału, jest to stosunek mocy czynnej wydzielającej się w kondensatorze do mocy biernej magazynowanej w nim, dla napięcia sinusoidalnie zmiennego o określonej częstotliwości. Kondensatory stosowane są do przepuszczania napięć przemiennych, odcinania napięć i prądów stałych, ustalania czasów przepływu prądu w obwodach RC, układach rozruchu jednofazowych silników indukcyjnych, a także w celu zmniejszenia wahań (zmian) napięcia spowodowanych zakłóceniami przenikającymi z sieci prądu zmiennego oraz niedoskonałością prostowania napięcia zmiennego.

Naładowany kondensator spełnia funkcję dodatkowej baterii wspomagającej główne źródło zasilania. Typowo kondensatory filtrujące stosowane są w obwodach zasilania wszelkich układów elektronicznych, często jako zestaw złożony z połączonych równolegle kondensatorów elektrolitycznego i ceramicznego. Dodatkowo do takiego zestawu można jeszcze dołączyć szeregowo cewkę (dławik), która ma zdolność "wygładzania" prądu.



Rys. 10.2. Kondensatory stosowane w układach elektronicznych

10.7. Cewki indukcyjne

Podstawowym elementem indukcyjnym jest cewka czyli uzwojenie wykonane z izolowanego drutu i nawinięte na karkasie z dielektryka, a w praktyce najczęściej na rdzeniu ferromagnetycznym (rys. 10.3 i 10.4). Cewka ma zdolność indukowania napięcia przy zmianach obejmującego ją pola magnetycznego i przeciwstawiania się zmianom prądu poprzez indukowanie napięcia, które jest skierowane przeciwnie do napięcia źródła wymuszającego przepływ tego prądu. Podstawową wielkością charakteryzującą cewkę jest indukcyjność własna czyli stosunek strumienia magnetycznego wytworzonego przez cewkę i skojarzonego z nią do prądu płynącego przez ten element:

$$L = \frac{\psi}{I} \quad (7)$$

Napięcie indukowane w cewce jest proporcjonalne do szybkości zmian strumienia magnetycznego:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (8)$$

Cewka ma zdolność magazynowania energii w polu magnetycznym, która wyraża się zależnością:

$$W_L = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad (9)$$

W technice może także występować układ dwóch cewek sprzężonych magnetycznie, gdy pole magnetyczne wytworzone przez jedną z nich obejmuje swoim działaniem drugą.

Część strumienia magnetycznego przenika do drugiej cewki i gdy jest on wynikiem przepływu zmiennego prądu, indukuje w niej napięcie zależne od indukcyjności wzajemnej M dwóch cewek:

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (10)$$

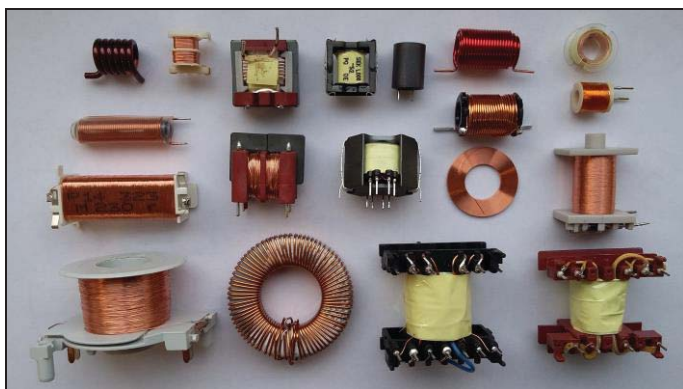
gdzie:

k – współczynnik sprzężenia obwodów,

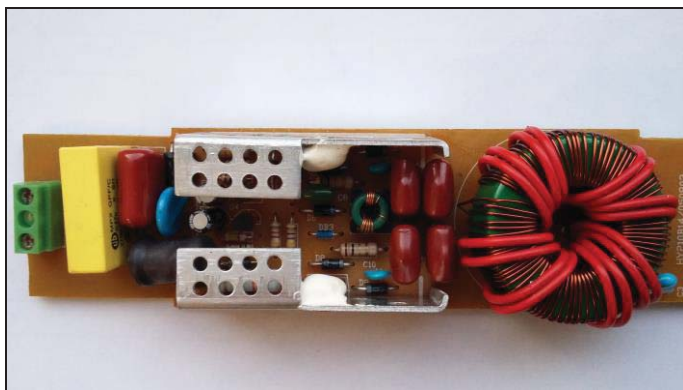
L_1 – indukcyjność własna cewki zasilanej prądem,

L_2 – indukcyjność własna cewki sprzężonej z cewką zasilaną.

Elementy indukcyjne stosowane w elektronice to cewki i dławiki, a urządzenia zbudowane w oparciu o te elementy i wykorzystujące ich właściwości to transformatory i przekładniki.



Rys. 10.3. Cewki indukcyjne stosowane w układach elektronicznych



Rys. 10.4. Dławik o kształcie toroidalnym w układzie elektronicznym

11. Elementy półprzewodnikowe złączowe

11.1. Półprzewodniki – zjawiska fizyczne w sieci atomowej

Półprzewodniki stosowane do budowy elementów i układów elektronicznych posiadają przewodność elektryczną na poziomie pośrednim pomiędzy przewodnikami i izolatorami. Przykładowe pierwiastki i związki chemiczne należące do tej grupy to krzem (Si), german (Ge), arsenek galu (GaAs), fosforek indu (InP), węglík krzemu (SiC), azotek galu (GaN). Półprzewodniki mają strukturę krystaliczną, ich atomy tworzą uporządkowaną sieć z regularnie powtarzającymi się komórkami w trzech kierunkach przestrzeni. Pomiędzy atomami występują wiązania kowalencyjne, w których elektrony walencyjne są współdzielone między te atomy. W sieci krystalicznej krzemu podstawową komórkę tworzy pięć atomów wpisanych w bryłę czworoscianu. Każdy atom posiada cztery elektrony walencyjne wiążące się z elektronami walencyjnymi czterech sąsiednich atomów. Wiązanie kowalencyjne może zostać zerwane po dostarczeniu energii o konkretnej wartości do elektronu walencyjnego. Elektron przechodzi wtedy do międzyatomowej przestrzeni swobodnej stając się swobodnym nośnikiem ładunku ujemnego i pozostawia po sobie wolne miejsce, które nazywa się dziurą i traktuje jak swobodny nośnik ładunku dodatniego.

Wszystkie elektrony w obrębie atomu znajdują się w zróżnicowanych stanach energetycznych i umownie przyjmuje się, że zajmują i poruszają się po odpowiednich orbitach (powłokach), oznaczanych literami K, L, M, N, O, P, Q. Kluczowe stany energetyczne to poziom walencyjny, występujące tam elektrony są najściabiej związane z jądrem atomowym, poziom wzbudzenia, gdzie elektrony oddziałują z jądrem z jeszcze mniejszą siłą oraz poziom jonizacji, na którym elektrony stają się swobodne. Dyskretne poziomy energetyczne występują w pojedynczych atomach, natomiast w całym ciecie stałym, na skutek ogromnej ilości, w niewielkim stopniu różniących się między sobą stanów energetycznych elektronów, wyróżnia się ciągłe pasma energetyczne. Kluczowe pasma stanowią pasmo walencyjne, w tym zakresie energii elektrony tworzą wiązania kowalencyjne, pasmo zabronione, gdzie elektrony nie mogą się znajdować czyli przyjmować takiego przedziału energii oraz pasmo przewodnictwa, w którym elektron staje się swobodnym nośnikiem ładunku. Szerokość pasma zabronionego (przerwa energetyczna) to wartość zmiany energii elektronu, która spowoduje jego przejście z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa lub odwrotnie. W zależności od rodzaju półprzewodnika przerwa energetyczna przyjmuje różne wartości (dla krzemu 1,1 eV; dla germanu 0,7 eV; dla arsenku galu 1,4 eV). Zjawisko, w którym elektron walencyjny zwiększa swoją energię, staje się swobodny i pozostawia po sobie dziurę, nazywa się generacją samoistną. Zjawisko odwrotne, gdy elektron swobodny zapełnia dziurę i odbudowuje wiązanie kowalencyjne, nazywa się rekombinacją.

Liczba zerwanych wiązań w półprzewodniku zależy od energii drgań sieci krystalicznej atomów oraz szerokości przerwy energetycznej. Energię drgań atomu można zwiększyć poprzez dostarczenie energii z zewnątrz w postaci ciepła lub pro-

mieniowania elektromagnetycznego. W określonych warunkach procesy generacji i rekombinacji zachodzą samoistnie, a ich natężenie określane jest za pomocą wielkości nazywanej samoistną koncentracją nośników, której jednostką jest liczba nośników na cm^3 materiału. Koncentracja samoistna elektronów swobodnych n_i jest równa koncentracji dziur p_i . Koncentracja nośników zwiększa się wraz z temperaturą według funkcji wykładniczej. Przykładowe wartości koncentracji nośników samoistnych w temperaturze 300 K wynoszą: dla krzemu 10^{10} cm^{-3} , dla germanu 10^{13} cm^{-3} , dla arsenku galu 10^6 cm^{-3} .

W elektronice dominujące znaczenie mają półprzewodniki domieszkowane, które powstają w procesie wprowadzania atomów obcych pierwiastków lub związków chemicznych do materiału podstawowego. Możliwe jest wtedy wytworzenie większościowych i mniejszościowych nośników ładunku elektrycznego czyli większej koncentracji elektronów swobodnych w stosunku do dziur elektronowych lub odwrotnie. Krzem jest pierwiastkiem czwartej grupy układu okresowego, a więc jego atomy posiadają cztery elektrony walencyjne. Jeżeli zostanie domieszkowany pierwiastkiem z grupy piątej (np. fosforem) wtedy atomy tego pierwiastka zaburzają strukturę kryształu, zajmując miejsca atomów krzemu w węzłach sieci krystalicznej. Cztery elektrony walencyjne atomu pierwiastka domieszkującego tworzą wiązania kowalencyjne z czterema sąsiednimi atomami krzemu, natomiast piąty elektron nie jest w stanie utworzyć wiązania i może łatwo zostać oderwany od swojego atomu, stając się nośnikiem swobodnym. Atom tego pierwiastka ulega dodatniej jonizacji, nie może być jednak traktowany tak jak dziura, ponieważ jest stabilnie związany z siecią krystaliczną i unieruchomiony. Z powodu tych zjawisk przyjmuje się, że w modelu pasmowym półprzewodnika powstaje nowy dyskretny poziom energetyczny w paśmie zabronionym, zwany donorowym i ulokowany tuż pod dnem pasma przewodnictwa, ponieważ energia jonizacji potrzebna do oderwania elektronu od atomu jest niewielka. Atomy pierwiastków, które po wprowadzeniu do kryształu półprzewodnikowego powodują generację elektronów swobodnych, nazywane są donorami (dawcami) elektronów lub domieszkami donorowymi. Jeżeli krzem zostanie domieszkowany pierwiastkiem z grupy trzeciej układu okresowego (np. borem) wtedy atomy tego pierwiastka zaburzają strukturę kryształu, zajmując najczęściej miejsca atomów krzemu. Trzy elektrony walencyjne atomu pierwiastka domieszkującego tworzą wiązania z trzema sąsiednimi atomami krzemu, natomiast czwarte wiązanie może zostać utworzone tylko przez zerwanie któregoś z sąsiednich wiązań kowalencyjnych atomów krzemu. Powoduje to powstanie dziury, czyli nośnika swobodnego o ładunku dodatnim. Atom pierwiastka wprowadzanego do krzemu ulega ujemnej jonizacji ale jest on stabilnie związany z siecią krystaliczną i nie może poruszać się w kryształach.

Z powodu tych zjawisk przyjmuje się, że w modelu pasmowym półprzewodnika powstaje nowy dyskretny poziom energetyczny w paśmie zabronionym, zwany akceptorowym i ulokowany tuż nad wierzchołkiem pasma walencyjnego, ponieważ energia jonizacji potrzebna do oderwania elektronu od atomu krzemu i przyłączenia go do atomu pierwiastka domieszkującego jest niewielka. Atomy pierwiastków,

które po wprowadzeniu do kryształu półprzewodnikowego powodują generację dziur jako nośników swobodnych, nazywane są akceptorami (biorcami) elektronów lub domieszkami akceptorowymi. W procesie generacji samoistnej, oraz dodatkowo z powodu domieszkowania, powstają swobodne nośniki ładunku elektrycznego, jednak cały półprzewodnik pozostaje obojętny elektrycznie, gdyż w atomach domieszki znajdują się nieruchome ładunki przeciwnego znaku (ładunki kompensują się wzajemnie). Półprzewodnik, w którym wytwarza się przewaga elektronów swobodnych nad dziurami, nazywa się półprzewodnikiem typu N. Półprzewodnik, w którym wytwarza się przewaga dziur nad elektronami swobodnymi, nazywa się półprzewodnikiem typu P. Koncentracja większościowych nośników ładunku jest równa koncentracji domieszek, dodatkowo w półprzewodniku domieszkowanym zmniejsza się intensywność generacji samoistnej, ponieważ poszczególne poziomy energetyczne w paśmie przewodnictwa i paśmie walencyjnym mogą być zajęte tylko przez określoną liczbę nośników. Przyjmuje się, że tyle razy ile wzrośnie koncentracja nośników większościowych w wyniku domieszkowania, zmaleje równocześnie koncentracja nośników mniejszościowych. Przykład wyjaśniający powyższą zasadę:

- $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (koncentracja domieszki donorowej),
- $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (koncentracja elektronów swobodnych powstałych w procesie generacji samoistnej, równa koncentracji dziur),
- $n_n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (koncentracja elektronów swobodnych po procesie domieszkowania),
- $p_n = 10^2 \text{ cm}^{-3}$ (koncentracja dziur po procesie domieszkowania).

Dla zróżnicowania stopnia koncentracji nośników w półprzewodniku, wprowadzono pojęcie siły domieszkowania. Półprzewodniki silnie domieszkowane mają większą koncentrację nośników i mniejszą rezystywność. Półprzewodniki słabo domieszkowane mają mniejszą koncentrację nośników i większą rezystywność. Nośniki swobodne mogą przemieszczać się w całej przestrzeni półprzewodnika pod wpływem przyłożonego napięcia elektrycznego i stanowić prąd elektryczny. Ruch elektronów swobodnych należy traktować dosłownie, natomiast ruch dziur należy rozumieć jako przemieszczanie się (przeskakiwanie) elektronów z sąsiednich wiązań w miejsce dziur, dające efekt przemieszczania się dziury w kierunku przeciwnym do ruchu elektronu. Każde przemieszczenie się dziury oznacza ruch innego elektronu, dlatego w tym przypadku wygodniej jest traktować ten proces jako ruch ładunku dodatniego (dziury). Bez obecności napięcia (pola elektrycznego) występuje chaotyczny ruch cieplny cząsteczek, atomów, jonów oraz nośników swobodnych (elektronów i dziur).

Jednak składowe tego ruchu uśredniają się do zera, co traktuje się jako brak przemieszczenia. Jeżeli w półprzewodniku występuje nierównomierny rozkład koncentracji nośników ładunku, wówczas pod wpływem chaotycznego ruchu cieplnego, nośniki będą dążyły do wyrównania koncentracji. Zjawisko to nazywane jest dyfuzją, a nośniki wykonują ruch dyfuzyjny, zwany także prądem dyfuzyjnym.

11.2. Półprzewodniki – złącze P-N

Wykonanie złącza półprzewodników typu P i N odbywa się w wyniku skomplikowanych procesów technologicznych, tak aby zachować ciągłość struktury krystalicznej i nie dopuścić do znacznych defektów sieci atomowej. W wyniku połączenia dwóch półprzewodników o różnych koncentracjach elektronów swobodnych i dziur dojdzie do procesu dyfuzji i elektrony z półprzewodnika typu N będą się przemieszczały do półprzewodnika typu P, a dziury w odwrotnym kierunku, z półprzewodnika typu P do półprzewodnika typu N. Z powodu nieskompensowanych ładunków zjonizowanych atomów domieszek na złączu powstaje pole elektryczne (generowane przez ładunek przestrzenny). Powstaje różnica potencjałów nazywana napięciem dyfuzyjnym i stanowiąca barierę potencjału dla dyfundujących nośników. Po przyłożeniu do półprzewodnika typu P potencjału ujemnego, a do półprzewodnika typu N potencjału dodatniego, dziury przemieszczają się w kierunku ujemnej elektrody (pozostawiając po sobie ujemne nieskompensowane jony domieszek zwiększające napięcie na warstwie zaporowej i jej szerokość), a elektrony przemieszczają się w kierunku dodatniej elektrody (pozostawiając po sobie dodatnie nieskompensowane jony domieszek zwiększające napięcie na warstwie zaporowej i jej szerokość). Jest to polaryzacja w kierunku zaporowym. Przy odwrotnej polaryzacji złącza czyli polaryzacji w kierunku przewodzenia, dziury napływają od elektrody dodatniej, a znajdujące się w pobliżu warstwy zaporowej, wpływają do niej. Podobnie elektrony napływają od elektrody ujemnej, a znajdujące się w pobliżu warstwy zaporowej, wpływają do niej. W ten sposób zmniejsza się szerokość warstwy zaporowej i rośnie prąd dyfuzyjny.

11.3. Półprzewodniki – zjawiska optyczne

Emitory światła (nadajniki) to elementy emitujące światło czyli przetwarzające energię elektryczną w świetlną (emisja). Detektory światła (odbiorniki) to elementy reagujące na światło czyli przetwarzające energię świetlną w elektryczną (absorpcja). Elektron w półprzewodniku może przejść z jednego poziomu energetycznego do drugiego (wyższego) po dostarczeniu wymaganej energii, w tym przypadku jest to energia fotonów przekazywana elektronom. Przejście elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa powoduje generację pary elektron-dziura (generacja bezpośrednia).

Przejście elektronu z pasma walencyjnego do akceptorowego poziomu domieszkowego powoduje generację dziury (generacja pośrednia). Przejście elektronu z donorowego poziomu domieszkowego do pasma przewodnictwa powoduje generację elektronu (generacja pośrednia).

Energia fotonu w przypadku przejścia elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa musi być większa od szerokości pasma zabronionego W_g (przerwy energetycznej):

$$E_f = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1)$$

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} > W_g \Rightarrow \lambda < \frac{h \cdot c}{W_g} \quad (2)$$

gdzie:

E_f – energia fotonu,

h – stała Plancka ($6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$),

f – częstotliwość światła,

c – prędkość światła w próżni ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$),

λ – długość fali.

Podczas przejścia elektronu z wyższego poziomu energetycznego na niższy jego energia ulega zmniejszeniu, część energii zostaje wypromieniowana w postaci zależnej od konfiguracji poziomów energetycznych. Przejście elektronu może mieć charakter prosty (wtedy jego energia przetwarzana jest tylko w energię fotonu) lub skośny, gdy zmianie ulega jego pęd (wtedy jego energia przetwarzana jest w energię fotonu i energię fononu lub tylko w energię fononu). Energia fononu jest to kwant drgań sieci krystalicznej i występuje w postaci ciepła przekazanego półprzewodnikowi. W zależności od rodzaju półprzewodnika oraz wprowadzonych do niego domieszek, jest on zdolny do emisji lub absorpcji światła o różnej długości fali (barwie) w zależności od szerokości przerwy energetycznej W_g między pasmami walencyjnym i przewodnictwa.

11.4. Diody

Złącze P-N dwóch półprzewodników domieszkowanych o różnych rodzajach przewodnictwa, zaprojektowane i wykonane w celu uzyskania odpowiednich właściwości elektrycznych, nazywa się diodą. Różne rodzaje diod, o charakterystycznych właściwościach, uzyskuje się dzięki zastosowaniu odpowiednich materiałów, różnej siły domieszkowania oraz właściwej technologii wykonania. Właściwości, zastosowanie i parametry diod zamieszczono w tabeli 11.1.

Tab. 11.1. Diody – właściwości, zastosowanie, parametry

Rodzaj diody (symbol)	Właściwości	Zastosowanie	Najważniejsze parametry
Dioda prostownicza 	• przewodzenie prądu przy polaryzacji w kierunku przewodzenia z niewielkim spadkiem napięcia • duża wartość napięcia przebicia	• prostowanie prądu przemiennego o małej częstotliwości dla odbiornika średniej i dużej mocy	• napięcie przewodzenia U_f • prąd przewodzenia I_f • szczytowe wsteczne napięcie pracy U_{RWM} • maksymalny średni prąd przewodzenia I_0 • prąd wsteczny I_R • maksymalna moc strat P_{max}
Dioda uniwersalna 	• przewodzenie prądu przy polaryzacji w kierunku przewodzenia z niewielkim spadkiem napięcia • praca w dużym zakresie częstotliwości	• w odbiornikach małej mocy ($U_R \leq 100V$, $I_f \leq 100mA$) • prostowanie prądu przemiennego • detektory • ograniczniki	• szczytowy prąd przewodzenia I_{FM} • szczytowe napięcie wsteczne U_{RM} • pojemność C_R przy określonym napięciu wstecznym U_R
Dioda stabilizacyjna (Zenera) 	• przewodzenie prądu przy polaryzacji w kierunku zaporowym przy określonej (stabilnej) wartości napięcia • podczas pracy występuje zjawisko przebicia Zenera lub przebicia lawinowego	• stabilizacja napięcia (od 3V do kilkuset V) • ograniczanie napięcia • układy zabezpieczające • jako źródło napięcia odniesienia	• napięcie stabilizacji U_z • rezystancja różniczkowa (przyrostowa) r_z • temperaturowy współczynnik napięcia stabilizacji α_{uz}
Dioda impulsowa 	• duża szybkość działania • mała rezystancja w kierunku przewodzenia • duża rezystancja w kierunku zaporowym	• przepuszczanie impulsów w jednym kierunku • kształtowanie stromego zbocza impulsów prostokątnych	• czas przełączania t_{rr} (dolna granica - kilka pikosekund) • pojemność dynamiczna C_r (powinna być mała) • czas opadania t_f (powinien być krótki)

Tab. 11.1. Diody - właściwości, zastosowanie, parametry (c. d.)

Rodzaj diody (symbol)	Właściwości	Zastosowanie	Najważniejsze parametry
Dioda pojemnościowa (warikap, waraktor) 	• zjawisko zależności pojemności złączonej od napięcia polaryzującego • pracują w kierunku zaporowym	• jako zmienne lub regulowane napięciem pojemności (warikapy) • jako zmienne reaktancje (waraktory) • generatory przebiegów okresowych • wzmacniacze parametryczne	• pojemność C_r (przy określonej częstotliwości i napięciu wstecznym U_R) • iloraz pojemności C_r przy dwóch różnych wartościach napięcia wstecznego • rezystancja szeregową r_s lub dobroć Q ($1/\omega C_r r_s$)
Dioda tunelowa 	• silnie domieszkowane obszary półprzewodnikowe • cienka warstwa zaporowa (ok. 10 nm) • dobre przewodzenie prądu w kierunku wstecznym i słabe w pewnym zakresie polaryzacji przewodzenia	• generowanie szybkich i stromych impulsów prostokątnych • wytwarzanie sygnałów sinusoidalnych w generatorach • wzmacniacze mikrofalowe • odtłumianie obwodów rezonansowych	• wartości napięć i prądów w dwóch ekstremalnych punktach ch-ki napięciowo-prądowej (szczyt i dolina) • rezystancja dynamiczna dla opadającego odcinka ch-ki $I=f(U)$
Dioda mikrofalowa (warystor-dioda ostrzowa, Schottky'ego, zwrotna; waraktor; sterowane impedancje; ujemne rezystancje) 	• pracują w zakresie bardzo dużych częstotliwości • mała pojemność • krótkie czasy przełączania	• układy detekcji i mieszacze mikrofalowe • przełączniki, bezpieczniki, modulatory i dzielniki • kształtowanie zboczy impulsów prostokątnych • generatory	• napięcie przewodzenia U_f • prąd przewodzenia I_f • napięcie wsteczne U_R • prąd wsteczny I_R • pasmo częstotliwości pracy • czułość • impedancja wejściowa Z_{we}

11.5. Tranzystory

Złącze trzech półprzewodników domieszkowanych o różnych rodzajach przewodnictwa, wykonane w celu uzyskania odpowiednich właściwości elektrycznych, nazywa się tranzystorem. Tranzystor jest kluczowym elementem elektronicznym stosowanym zarówno w układach analogowych jak i cyfrowych, dzięki wykorzystaniu trzech warstw półprzewodników uzyskano możliwość sterowania jego pracą z uwzględnieniem wielkości wejściowych i wyjściowych w różnych konfiguracjach połączeń. Tranzystory dzieli się ogólnie na bipolarne i unipolarne, a główne obszary ich zastosowania to:

- wzmacnianie sygnałów elektrycznych (napięcie, prąd, moc),
- przełączanie (kluczowanie) sygnałów,
- generowanie sygnałów.

11.5.1. Tranzystor bipolarny

W tranzystorach bipolarnych występuje obecność i transport dwóch rodzajów nośników ładunku elektrycznego, elektronów i dziur. W jednej strukturze półprzewodnikowej występują dwa złącza P-N, z których jedno (emiterowe) spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia i wstrzykuje nośniki mniejszościowe do obszaru bazy (zwiększając tam ich koncentrację), a drugie (kolektorowe) spolaryzowane jest zaporowo i odbiera te nośniki, co prowadzi do wzrostu prądu nasycenia tego złącza. Tranzystor bipolarny spełnia funkcję źródła prądowego sterowanego napięciowo lub prądowo oraz wzmacniacza. Obszary i zaciski tranzystora nazywane są emiterym, bazą i kolektorem. Tworzą one złącza emiter-baza oraz baza-kolektor. Podczas działania tranzystora płyną prądy I_E (emitera), I_B (bazy), I_C (kolektora) oraz występują napięcia U_{EB} (emiter-baza), U_{CB} (kolektor-baza) i U_{EC} (emiter-kolektor). Wyróżnia się tranzystory typu NPN, gdzie baza jest obszarem typu P oraz PNP, gdzie baza jest obszarem typu N. W tranzystorze PNP napięcie U_{EB} , polaryzujące złącze w kierunku przewodzenia, powoduje wstrzykiwanie dziur z emitera do bazy. Napięcie U_{EB} wynosi 0,6–0,8 V. Dziury przepływają następnie w pobliże złącza baza-kolektor pod wpływem pola elektrycznego powstającego z powodu nierównomiernego domieszkowania bazy (koncentracja domieszki donorowej maleje w kierunku od emitera do kolektora) lub bez obecności pola elektrycznego na zasadzie dyfuzji z powodu większej ich koncentracji w części bazy graniczącej z emiterym. W pierwszym opisanym wyżej przypadku tranzystor nazywany jest dryftowym, a w drugim bezdryftowym. Dziury z obszaru bazy graniczącej z kolektorem przepływają do niego pod wpływem pola elektrycznego warstwy zaporowej, zwiększając prąd nasycenia. Strumień dziur płynących (wstrzykiwanych) z emitera do bazy tworzy prąd emitera I_E płynący w części zewnętrznej obwodu, a strumień dziur płynących (unoszonych) z bazy do kolektora tworzy prąd kolektora I_C płynący w części zewnętrznej obwodu. Przy założeniu, że wszystkie dziury wstrzyknięte do bazy trafiają następnie do kolektora, można stwierdzić, że prąd $I_E = I_C$ i zależy tylko od napięcia U_{EB} . W rzeczywistości część dziur w bazie rekombinuje z elektronami

i z tego powodu mniej ich dociera do kolektora, a niedobór elektronów uzupełniany jest za pomocą prądu płynącego ze źródła zasilania przez zacisk bazy. Prąd bazy jest jednak znacznie mniejszy niż prąd emitera czy prąd kolektora i może osiągać wartość z przedziału $0,01\text{--}0,002 I_E$. Stosunek prądu kolektora do prądu bazy jest oznaczany literą β i nazywany współczynnikiem wzmocnienia prądowego.

Zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa dla tranzystora można zapisać równanie $I_E = I_B + I_C$. Poza tym istnieje jeszcze kilka składowych prądów emitera, bazy i kolektora mających związek ze zjawiskiem generacji i rekombinacji nośników ładunku elektrycznego w różnych obszarach tranzystora. Prądy te uwzględniane są tylko w dokładnej i szczegółowej analizie. Dla tranzystora typu NPN zachodzące zjawiska są identyczne, jednak głównymi nośnikami ładunku są elektrony, a napięcia U_{EB} oraz U_{CB} mają przeciwne zwroty.

Tranzystor może znajdować się w trzech stanach pracy. Przy niedużych obciążeniach prąd kolektora jest proporcjonalny do prądu bazy, wtedy tranzystor pracuje w zakresie liniowym i jest wzmacniaczem. Małe zmiany prądu bazy I_B powodują duże zmiany prądu kolektora I_C , a małe zmiany napięcia U_{BE} powodują duże zmiany napięcia U_{CE} . Jeżeli dalsze zwiększanie prądu bazy nie powoduje już zwiększania prądu kolektora, oznacza to, że tranzystor wszedł w stan nasycenia. Napięcie U_{CE} jest wtedy bliskie zeru, w praktyce przyjmuje wartość z zakresu $0,01\text{--}0,5\text{ V}$. Gdy prąd bazy zostanie zmniejszony do zera, tranzystor znajdzie się w stanie odcięcia (zatkania, zablokowania). Prąd kolektora praktycznie nie płynie, a napięcie U_{CE} jest równe napięciu zasilania. Stan taki można osiągnąć także przez zwarcie bazy z emiterem tranzystora. Podczas pracy tranzystora należy zwrócić uwagę na osiąganą przez niego moc, ponieważ od niej zależy wytwarzająca się energia cieplna. Największa moc w tranzystorze wydzielą się wtedy, gdy napięcie U_{CE} jest równe połowie napięcia zasilania (w połowie liniowego zakresu pracy). Tranzystor powinien pracować w dopuszczalnych zakresach mocy, w celu odprowadzenia nadmiernej ilości ciepła do otoczenia stosuje się radiator. Tranzystory mocy są wyposażone w obudowy umożliwiające przykręcenie do metalowego radiatora. Temperatura pracy tranzystora wpływa na jego napięcie U_{BE} , które dla krzemowego tranzystora zmniejsza się od 2 do $2,5\text{ mV}/^\circ\text{C}$. Podobna zależność istnieje dla napięcia przewodzenia diody krzemowej. Z tego powodu elementy te mogą być czujnikami temperatury, z drugiej strony jest to poważny problem i w układach elektronicznych konieczna jest kompensacja wpływu temperatury na ich parametry i stabilizacja punktu pracy. Szczególnie w przypadku tranzystora należy pamiętać, że zmienność napięcia U_{BE} powoduje zmianę prądu bazy, a ten z kolei przez zjawisko wzmocnienia, będzie przyczyną wielokrotnie większej zmiany prądu kolektora. W analizie praktycznej tranzystor traktowany jest jako czwórnik i opisywany napięciami i prądami wejściowymi oraz wyjściowymi. Jest to łatwiejsze podejście niż analiza i opis zjawisk zachodzących w jego strukturze wewnętrznej.

Aby tranzystor stał się czwórnikiem należy jeden z jego zacisków połączyć jako wspólny do wejścia oraz wyjścia. W praktyce stosuje się następujące układy połączeń:

- układ wspólnej bazy (oznaczenie WB lub OB), $U_{we}=U_{EB}$, $I_{we}=I_E$, $U_{wy}=U_{CB}$, $I_{wy}=I_C$,
- układ wspólnego emitera (oznaczenie WE lub OE), $U_{we}=U_{BE}$, $I_{we}=I_B$, $U_{wy}=U_{CE}$, $I_{wy}=I_C$,
- układ wspólnego kolektora (oznaczenie WC lub OC), $U_{we}=U_{BC}$, $I_{we}=I_B$, $U_{wy}=U_{EC}$, $I_{wy}=I_E$.

W układzie WB definiuje się współczynnik wzmocnienia prądowego $\alpha=I_C/I_E$, a w układzie WE definiuje się współczynnik wzmocnienia prądowego $\beta=I_C/I_B$.

W celu analizy właściwości tranzystora bipolarnego wyznacza się jego charakterystyki:

- charakterystyka wejściowa $I_{we}=f(U_{we})$, $U_{wy}=const$,
- charakterystyka wyjściowa $I_{wy}=f(U_{wy})$, $I_{we}=const$,
- charakterystyka zwrotna $U_{we}=f(U_{wy})$, $I_{we}=const$,
- charakterystyka przejściowa $I_{wy}=f(I_{we})$, $U_{wy}=const$.

11.5.2. Tranzystory unipolarne (polowe)

W tranzystorach unipolarnych występuje obecność i transport jednego rodzaju nośników ładunku elektrycznego, elektronów lub dziur. W tranzystorze złączowym pole elektryczne wpływa na rozmiar (szerokość kanału), a w tranzystorze z izolowaną bramką pole elektryczne ma wpływ na przewodność kanału.

W tranzystorze złączowym PNFET na silnie domieszkowane podłoże półprzewodnikowe typu P lub N, zwane bramką, nanosi się warstwę półprzewodnika przeciwnego typu, stanowiącą kanał, a w niej wykonuje się ponownie obszar silnie domieszkowany półprzewodnika takiego typu jak podłoże, który stanowi drugą bramkę. W takim elemencie wykonuje się metalowe styki do poszczególnych obszarów: G (Gate) – bramka (dwie bramki zwykle zwiera się wewnątrz struktury tranzystora), S (Source) – źródło oraz D (Drain) – dren, które stanowią elektrody kanału. Nośniki z obszaru zewnętrznego są wstrzykiwane przez źródło do obszaru kanału, a dren wyprowadza je z powrotem do obwodu zewnętrznego. Napięcie U_{DS} wymusza przepływ prądu przez kanał. Napięcie sterujące U_{GS} polaryzuje złącza bramka-kanał przez elektrodę źródła. Najpopularniejszym systemem połączeń jest układ ze wspólnym źródłem, gdzie $U_{we}=U_{GS}$ i $U_{wy}=U_{DS}$. Dla tranzystora z kanałem typu N napięcie $U_{GS}<0$ (G^- , S^+), a napięcie $U_{DS}>0$ (D^+ , S^-). Dla tranzystora z kanałem typu P napięcie $U_{GS}>0$ (G^+ , S^-), a napięcie $U_{DS}<0$ (D^- , S^+). Tranzystor pracuje przy zaporowej polaryzacji złączy bramka-kanał (P-N), w ten sposób napięcie U_{GS} wpływa na szerokość kanału (jego rezystancję), a tym samym na prąd I_D , który płynie przez kanał po przyłożeniu napięcia U_{DS} . W miarę wzrostu napięcia U_{GS} zwiększa się szerokość warstw zaporowych między bramką i kanałem (obszarów o zmniejszonej koncentracji nośników), które zmniejszają szerokość kanału, zwiększają jego rezystancję i zmniejszają prąd drenu I_D . Warstwy zaporowe zetkną się ze sobą

i zamkną kanał przy napięciu U_{GS} nazywanym napięciem odcięcia lub zatkania (U_P), a ten stan pracy tranzystora jest nazywany stanem odcięcia lub zatkania. W celu analizy właściwości tranzystora złączeniowego wyznacza się jego charakterystyki:

- charakterystyka przejściowa tranzystora z kanałem typu N $I_D=f(U_{GS}), U_{DS}=const$,
- charakterystyka wyjściowa tranzystora z kanałem typu N $I_D=f(U_{DS}), U_{GS}=const$.

W tranzystorze z izolowaną bramką (typu MIS) na półprzewodnikowym podłożu N lub P wykonuje się dwa obszary silnie domieszkowane (źródło i dren) o przeciwnym typie przewodnictwa niż podłoże, oddalone od siebie na bardzo małą odległość, nazywaną długością kanału. Obszary te mają metalizowane styki, a na resztę powierzchni podłoża nałożona jest warstwa izolująca, najczęściej SiO_2 . Na warstwę dielektryka, między źródłem a drenem, nakłada się warstwę metalu stanowiącą bramkę. Odizolowanie bramki od podłoża powoduje bardzo dużą rezystancję wejściową, dzięki temu prąd upływu przyjmuje wartości rzędu pikoampera, co stanowi zaletę takiego rozwiązania. Jednak brak odpływu ładunku z bramki może powodować przebicia dielektryka i nieodwracalne uszkodzenie tranzystora. Użyteczny prąd drenu przepływa od źródła do drenu przez obszar podłoża leżący pod dielektrykiem i zwany kanałem. Prąd ten może płynąć gdy kanał stanie się obszarem typu P i połączy źródło z drenem. Możliwe jest to po przyłożeniu napięcia $U_{GB}<0$ (dość ujemnego), wtedy elektrony znajdujące się w podłożu najbliższej bramki, będą odpychane i ich koncentracja w tym obszarze zmniejszy się (powstanie warstwa zubożona). Jednocześnie z głębi podłoża zaczną być przyciągane przez ujemną bramkę nośniki mniejszościowe, czyli dziury. Utworzą one kanał przewodzący między źródłem a drenem. Nazywa się to stanem inwersji, a warstwę dziur pod dielektrykiem warstwą inwersyjną. W praktyce najczęściej zacisk podłoża B jest zwierany z zaciskiem źródła S już wewnątrz struktury tranzystora. Wtedy $U_{we}=U_{GS}$, a $U_{wy}=U_{DS}$. Napięcie progowe U_T jest to napięcie, przy którym dochodzi do powstania kanału.

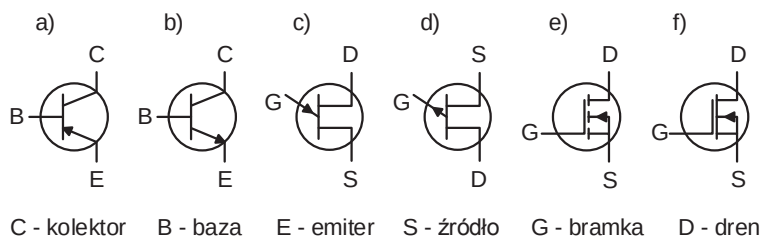
Występują dwa rodzaje tranzystorów typu MIS, w których:

- kanał przewodzący jest uzyskiwany w wyniku zjawiska inwersji - tranzystor normalnie wyłączony lub tranzystor z kanałem wzbogacanym ($U_{GS}<0, U_{DS}<0$ dla kanału typu P i $U_{GS}>0, U_{DS}>0$ dla kanału typu N),
- kanał przewodzący istnieje, ponieważ podłoże jest półprzewodnikiem tego samego typu co źródło i dren, zanika natomiast po wprowadzeniu jego obszaru w stan inwersji – tranzystor normalnie włączony lub tranzystor z kanałem zubożonym ($U_{GS}>0, U_{DS}<0$ dla kanału typu P i $U_{GS}<0, U_{DS}>0$ dla kanału typu N).

Dla tranzystora z izolowaną bramką wyznacza się charakterystyki:

- charakterystyka przejściowa $I_D=f(U_{GS}), U_{DS}=const$,
- charakterystyka wyjściowa $I_D=f(U_{DS}), U_{GS}=const$.

Symbole graficzne tranzystorów bipolarnych i unipolarnych zamieszczono na rysunku 11.1.



Rys. 11.1. Przykładowe symbole tranzystorów: a) bipolarny PNP, b) bipolarny NPN, c) złączowy JFET z kanałem N, d) złączowy JFET z kanałem P, e) z izolowaną bramką MOSFET wzbogacony z kanałem N (normalnie zatkany), f) z izolowaną bramką MOSFET zubożony z kanałem N (normalnie otwarty)

11.6. Elementy przełączające

W układach elektronicznych często wykorzystuje się elementy służące do kontrolowanego zamykania i rozłączania obwodów elektrycznych w celu sterowania pracą różnych odbiorników z odpowiednią częstotliwością i szybkością działania. Poniżej omówiono typowe elementy przełączające.

11.6.1. Tyrystory

Złącze zbudowane z czterech półprzewodników domieszkowanych o różnych rodzajach przewodnictwa nazywa się tyrystorem. Tyrystory są stosowane w układach elektronicznych małej oraz dużej mocy (energetyka). W energetyce stosuje się tyrystory silnoprądowe (przewodzące prąd rzędu kilku tysięcy amperów) i wysokonapięciowe (blokujące napięcia rzędu kilku tysięcy woltów). Przykłady zastosowania:

- układy zasilania,
- przełączniki,
- regulatory mocy (silniki, źródła światła),
- prostowniki sterowane.

W podrozdziałach 11.6.3, 11.6.4 i 11.6.5 opisano bardziej szczegółowo poszczególne rodzaje tyrystorów, a ich symbole graficzne zamieszczono na rysunku 11.2.

11.6.2. Dynistor

Dynistor jest dwuzaciskowym jednokierunkowym elementem przełączającym zbudowanym z czterech warstw półprzewodników w układzie PNPN. W strukturze takiej występują trzy złącza P-N. Przy zasilaniu zewnętrznych warstw półprzewodników zgodnie z kierunkiem przewodzenia (+ do anody, - do katody), dwa zewnętrzne złącza P-N spolaryzowane są w kierunku przewodzenia, natomiast złącze wewnętrzne w kierunku zaporowym. Występuje wstrzykiwanie dziur z zewnętrznej warstwy P do sąsiedniej typu N oraz wstrzykiwanie elektronów z zewnętrznej warstwy N do sąsiedniej typu P. Następnie dziury są unoszone przez pole elektryczne

warstwy zaporowej i trafiają do kolejnej warstwy P, zwiększając tam swoją koncentrację. Natomiast elektrony są unoszone przez pole elektryczne warstwy zaporowej i trafiają do kolejnej warstwy N, zwiększając tam swoją koncentrację. Wprowadzenie środkowego złącza P-N w stan przewodzenia i przejście dynistora ze stanu blokowania do stanu przewodzenia może być spowodowane następującymi sposobami:

- przebicie lawinowe środkowego złącza w wyniku zwiększenia napięcia anoda-katoda U_{AK} ,
- zwiększenie prądu generacji I_g , od którego zależy prąd anodowy I_A , przez zwiększenie temperatury złącza, oświetlenie lub poddanie innemu promieniowaniu,
- nagła zmiana napięcia U_{AK} i przepływ dodatkowego prądu z powodu przeładowania pojemności złączowej złącza środkowego.

Wyłączenie dynistora odbywa się przez zmniejszenie prądu I_A do określonej wartości (w praktyce zmniejszenie napięcia U_{AK} do zera lub zmianę jego polaryzacji). Charakterystyka opisująca pracę dynistora to zależność $I_A=f(U_{AK})$.

11.6.3. Tyrystor triodowy

Tyrystor triodowy zbudowany jest podobnie jak dynistor, z tą różnicą, że jest elementem trzyzaciskowym, a dodatkowy zacisk jest nazywany bramką G i wyprowadzony z warstwy P od strony katody. Tyrystor przechodzi w stan przewodzenia po przyłożeniu napięcia U_{GK} i przepływ prądu bramki I_G , który może stanowić bardzo krótki impuls i wprowadzić tyrystor w stabilny stan przewodzenia prądu I_A . W przypadku zwiększenia prądu I_G tyrystor powinien się załączyć przy mniejszym napięciu U_{AK} . Prąd I_G jest znacznie mniejszy od prądu I_A , wyłączenie tyrystora odbywa się tak samo jak w przypadku dynistora. W celu analizy właściwości tyrystora triodowego wyznacza się jego charakterystyki prądowo-napięciowe:

$$\begin{aligned} I_A &= f(U_{AK}), I_G = \text{const}, \\ I_G &= f(U_{GK}), U_{AK} = \text{const}, \\ U_{AK} &= f(I_G). \end{aligned}$$

11.6.4 Diak

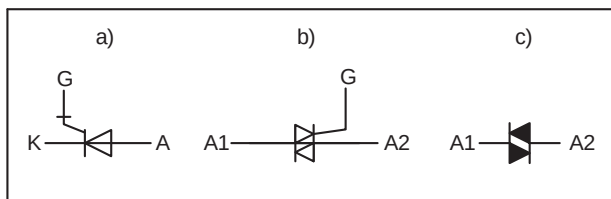
Diak jest elementem podobnym do dynistora, dwuzaciskowym ale zbudowanym z pięciu warstw półprzewodników, co umożliwia symetryczny przepływ prądu w obydwu kierunkach. W jego strukturze można wyróżnić dwa dynistory połączone równolegle i przeciwsobnie (zorientowane w przeciwnych kierunkach).

Diak wyzwalany jest tak jak dynistor, ale może działać przy różnej polaryzacji zacisków lub po przyłożeniu napięcia przemiennego. Charakterystyka opisująca pracę diaka to zależność $I_A=f(U_{AK})$.

11.6.5. Triak

Triak jest elementem podobnym do tyrystora, trzyzaciskowym ale zbudowanym z pięciu warstw półprzewodników, co umożliwia symetryczny przepływ prądu w obydwu kierunkach. W jego strukturze można wyróżnić dwa tyrystory połączone

równolegle i przeciwsobnie (zorientowane w przeciwnych kierunkach). Triak wyzwalany jest tak jak tyrystor, ale może działać przy różnej polaryzacji zacisków lub po przyłożeniu napięcia przemiennego (napięcie główne i napięcie na bramce powinny być w fazie). Charakterystyka opisująca pracę triaka to zależność $I_A = f(U_{AK})$.



Rys. 11.2. Symbole tyrystorów: a) tyrystor triodowy, b) triak, c) diak

11.6.6. Tranzystor typu IGBT

Tranzystor IGBT jest to tranzystor bipolarny z izolowaną bramką, stanowi połączenie tranzystora polowego typu MIS z tranzystorem bipolarnym. Elementy IGBT sterowane są napięciem bramki, posiadają bardzo dużą rezystancję wejściową i duże napięcie przebicia (podobnie jak tranzystory typu MIS), a także mają dużą szybkość przełączania, do kilkuset kHz, możliwość przewodzenia dużych prądów, do kilku tysięcy A oraz blokowania dużych napięć, do kilku tysięcy woltów (podobnie jak tranzystory bipolarnie). Prąd kolektora I_C tranzystora bipolarnego zależy od prądu bazy, który jest prądem drenu tranzystora typu MIS, zależnym od napięcia bramka-emiter U_{GE} . W celu analizy właściwości tranzystora IGBT wyznacza się następujące charakterystyki:

- charakterystyka przejściowa $I_C = f(U_{GE}), U_{CE} = \text{const}$,
- charakterystyka wyjściowa $I_C = f(U_{CE}), U_{GE} = \text{const}$.

Tranzystory IGBT stosowane są często w energetyce, w układach zasilania do przełączania i sterowania urządzeń dużych i średnich mocy. Poniżej wyszczególniono urządzenia i dziedziny nauki, w których wykorzystuje się te elementy:

- zasilacze impulsowe,
- nagrzewnice indukcyjne,
- klimatyzatory,
- przemienniki częstotliwości i falowniki (regulacja prędkości obrotowej silników trakcyjnych i przemysłowych),
- przekształtniki impulsowe (czopery) w pojazdach o napędzie elektrycznym i hybrydowym,
- fizyka cząstek elementarnych,
- fizyka plazmowa.

11.7. Elementy optoelektroniczne

Elementy przetwarzające energię elektryczną w świetlną lub odwrotnie i wykorzystywane w elektronice nazywa się optoelektronicznymi. Do grupy fotoelementów zaliczane są:

- diody świecące i lasery półprzewodnikowe (elementy aktywne),
- wyświetlacze ciekłokrystaliczne (elementy pasywne).

W grupie fotodetektorów wyróżnia się:

- fotoogniwa (elementy aktywne),
- fotorezystory, fotodiody, fototranzystory, fototyristory (elementy pasywne).

Transoptory to elementy, które działają na zasadzie optycznego sprzężenia fotodetektora z fotoemitorem.

11.7.1. Fotorezystor

Fotorezystory mogą być zbudowane z następujących związków chemicznych: PbS (siarczek ołowiu), CdS (siarczek kadmu), PbSe (selenek ołowiu), CdSe (selenek kadmu), PbTe (tellurek ołowiu), CdTe (tellurek kadmu). Oświetlenie fotorezystora powoduje generację nośników, a więc zwiększenie koncentracji dziur i elektronów, a tym samym zmniejszenie rezystancji. Światło musi mieć odpowiednią długość, a rezystancja fotorezystora zależy od jego natężenia.

11.7.2. Fotoogniwo

Fotoogniwo (ogniwo fotowoltaiczne) występuje najczęściej w postaci krzemowego złącza P-N o dużej powierzchni. Oświetlenie złącza światłem o odpowiedniej długości powoduje generację dziur i elektronów w warstwie zaporowej i jej sąsiedztwie. Istniejące tam pole elektryczne przenosi elektrony do obszaru N, a dziury do obszaru P i w ten sposób na zaciskach elementu powstaje różnica potencjałów. Napięcie w stanie jałowym ogniwa U_0 osiąga wartość do 0,5 V, prąd w stanie zwarcia I_z jest rzędu setek mikroamperów do kilku miliamperów. W praktyce w celu uzyskania odpowiedniej wartości napięcia i prądu ogniwa łączy się szeregowo i równolegle.

11.7.3. Fotodioda

Fotodioda może być wytworzona z krzemu, germanu, arsenku galu jako złącze typu P-N, m-s (metal-półprzewodnik), heterozłącze, dioda ostrzowa, dioda PIN. Spolaryzowanie złącza w kierunku zaporowym powoduje przepływ niewielkiego prądu unoszenia przez warstwę zaporową. Oświetlenie złącza powoduje wygenerowanie większej liczby nośników w warstwie zaporowej, wytworzenie dodatkowego strumienia prądu unoszenia i wzrost prądu wstecznego. Prąd wsteczny nie zależy od napięcia, a tylko od natężenia światła i osiąga wartość rzędu setek mikroamperów do kilku miliamperów. Fotodiody działają z większą szybkością niż fotorezystory.

11.7.4. Fototranzystor

Fototranzystor jest elementem dwukońcówkowym (emiter i kolektor), baza nie jest połączona z zaciskiem, ale w wyniku jej oświetlenia generowane są dziury i elektrony. W fototranzystorze typu NPN, przy polaryzacji normalnej, elektrony przepływają przez zaporowo spolaryzowane złącze do kolektora, zwiększając jego prąd. Dziury zwiększają potencjał dodatni bazy, co powoduje wzrost natężenia prądu elektronów wstrzykiwanych z emitera do bazy. Następnie te elektrony przepływają do kolektora zwiększając jeszcze bardziej jego prąd (wzmocnienie prądu fotoelektrycznego). Charakterystyka $I_C=f(U_{CE})$ ma identyczny przebieg jak dla tranzystora pracującego w układzie WE, jednak krzywe zależne są nie od prądu bazy tylko od natężenia oświetlenia. Fototranzystor posiada dużą czułość (stosunek prądu do natężenia światła), małą szybkość działania (pojemności dyfuzyjne i złączowe) i małe napięcie przebicia (do 7 V).

11.7.5. Fototyrystor

W fototyrystorze pod wpływem oświetlenia i generacji nośników ładunku elektrycznego, przy polaryzacji w kierunku blokowania, może dojść do przepolaryzowania się środkowego złącza P-N i przełączenia tego elementu w stan przewodzenia. Charakterystyka prądowo-napięciowa jest podobna do krzywej typowego tyrystora, jednak zamiast prądu bramki występuje natężenie światła.

11.7.6. Dioda świecąca LED

Przy polaryzacji diody LED w kierunku przewodzenia, elektrony są wstrzykiwane z obszaru N do P, a dziury z P do N, tam stają się nośnikami mniejszościowymi i rekombinują z przeciwnymi do nich nośnikami większościowymi, emitując promieniowanie świetlne. Diody LED wykonywane są z dwóch pierwiastków łączonych w różnych proporcjach lub z półprzewodników domieszkowanych różnymi pierwiastkami, w celu uzyskania różnych barw światła, powstających w wyniku rekombinacji bezpośredniej lub pośredniej i zależnych od różnicy poziomów energetycznych. W praktyce diody różniące się budową wymagają różnych napięć zasilających w celu pokonania przerwy energetycznej o różnych szerokościach i wytworzenia światła o różnych barwach. Przykładowo diody czerwone wymagają napięcia 1,6–2 V, a diody białe i niebieskie 3–3,5 V. Napięcie przewodzenia diod LED zależy też od temperatury i może się zmniejszać o 3–5,2 mV/°C, a więc w większym stopniu niż dla diody krzemowej. Wielkości fizyczne charakterystyczne dla diody LED:

- sprawność kwantowa,
- skuteczność świetlna,
- długość fali emitowanego światła,
- szerokość widmowa emitowanego światła,
- maksymalny prąd przewodzenia,
- napięcie przewodzenia,
- maksymalne napięcie wsteczne.

11.7.7. Wyświetlacz ciekłokrystaliczny LCD

Wyświetlacze ciekłokrystaliczne LCD nie emitują własnego promieniowania świetlnego, wykorzystując obce źródła działają na zasadzie przepuszczania i blokowania światła, co powoduje zaciemnienie lub rozjaśnienie odpowiednich obszarów po doprowadzeniu lub odłączeniu napięcia. Ciekły kryształ jest materiałem organicznym, który w pewnym zakresie temperatur (najczęściej 0–55 °C) znajduje się w stanie pośrednim między krystaliczną fazą stałą a fazą ciekłą. W zależności od natężenia pola elektrycznego działającego na kryształ zmienia się ułożenie jego cząsteczek, co wpływa na polaryzację przechodzącego przez nie światła. Zaletą wyświetlaczy LCD jest bardzo mały pobór mocy. Elementy składowe wyświetlacza ciekłokrystalicznego:

- polaryzator (polaryzuje wstępnie światło),
- przezroczyste elektrody (dwie sztuki),
- szklane płytki (dwie sztuki),
- ciekły kryształ (grubość kilkadziesiąt μm),
- analizator (przepuszcza światło o wybranej polaryzacji).

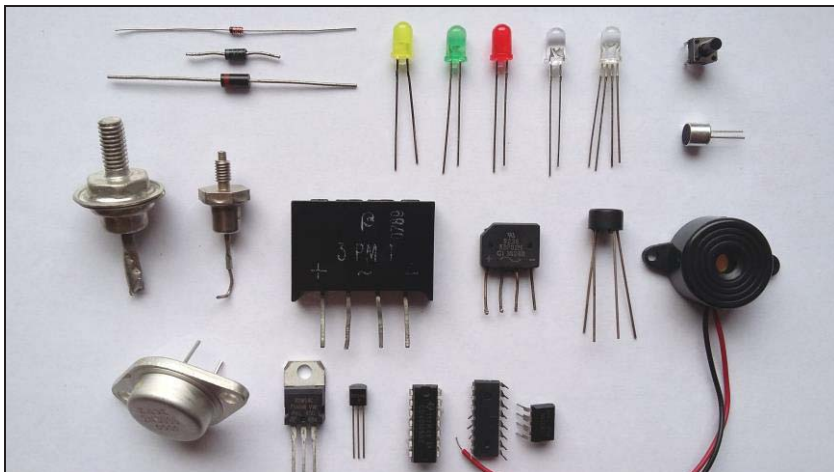
11.7.8. Transoptor

W transoptorze występuje optyczne sprzężenie fotoemitery z fotodetekтором. Fotoemitery to najczęściej diody świecące LED, a w funkcji fotodetektora mogą występować fotodiody, fototranzystory lub fototyristory. Fotoemiter przetwarza sygnał elektryczny na optyczny, który jest przesyłany do fotodetektor i przetworzony przez niego na sygnał elektryczny. W tym przypadku nie występuje elektryczne połączenie między obwodem wejściowym i wyjściowym (duża rezystancja), a przesył sygnału odbywa się tylko w jednym kierunku i nie występuje sprzężenie zwrotne (sens stosowania i zaleta). Przykładem zastosowania układu transoptora jest fotokomórka.

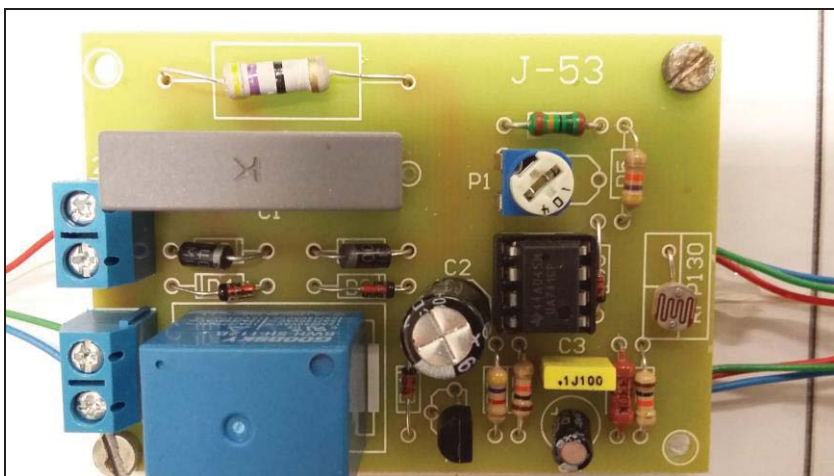
Charakterystyki transoptora:

- charakterystyka wejściowa prądowo-napięciowa fotoemitery,
- charakterystyka wyjściowa prądowo-napięciowa fotodetektora ($I_{we}=const$),
- charakterystyka przejściowa $I_{wy}=f(I_{we})$, $U_{wy}=const$.

Najpopularniejsze elementy elektroniczne półprzewodnikowe złączowe zamieszczono na rysunkach 11.3 (osobno) oraz 11.4 (połączone w układzie).



Rys. 11.3. Elementy elektroniczne półprzewodnikowe złączowe (diody, układy prostownicze, tranzystory, układy scalone)

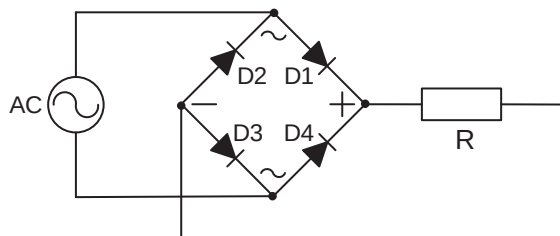


Rys. 11.4. Elementy elektroniczne półprzewodnikowe złączowe w układzie wyłącznika zmierzchowego (diody prostownicze, diody Zenera, tranzystor, układ scalony, fotorezystor)

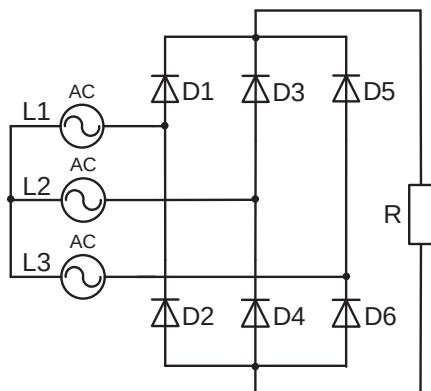
12. Analogowe układy elektroniczne

12.1. Układy prostownicze

Głównym elementem tych układów jest dioda prostownicza, która w zależności od polaryzacji, może dobrze przewodzić prąd z niedużym spadkiem napięcia lub praktycznie uniemożliwiać jego przepływ. Podczas przepływu prądu sinusoidalnie zmiennego polaryzacja zmienia się cyklicznie, a więc dioda będzie przewodziła prąd przez pół okresu. Będzie on płynął w jednym kierunku, ale jego natężenie będzie zmienne, jest to prostowanie jednopółkowe (półokresowe). W celu uzyskania efektu prostowania dwupółkowego (pełnookresowego) stosuje się najczęściej cztery diody w układzie Graetza (rys. 12.1). Przez pół okresu napięcia prąd przewodzi jedna para diod prostowniczych (D1 i D3), a w drugiej połowie okresu druga para (D4 i D2). Przez odbiornik prąd płynie w jednym kierunku. W celu uzyskania przebiegu prądu jak najbardziej zbliżonego do stałego, stosuje się filtry pojemnościowe i indukcyjne. W pierwszym przypadku równolegle z odbiornikiem łączy się kondensator, a w drugim szeregowo z odbiornikiem łączy się cewkę. Kondensatory stosuje się dla odbiorników mniejszej mocy, a cewki w przypadku odbiorników o większych mocach. Elementy te mają zdolność gromadzenia energii i oddawania jej do odbiornika w momencie obniżania się napięcia zasilającego, w ten sposób zmniejszając znacznie jego składową zmienną czyli tętnienie. W celu wyprostowania napięcia w obwodzie trójfazowym stosuje się układ zbudowany z sześciu diod (rys. 12.2). W poszczególnych fazach pracy układu prąd przewodzą dwie diody (dodatnia i ujemna), na których występuje największe napięcie międzyfazowe. Przez odbiornik prąd płynie w jednym kierunku, a jego tętnienia są naturalnie znacznie mniejsze niż w układzie jednofazowym. Układy prostownicze opisane powyżej mogą być używane również w postaci prostowników sterowanych. W prostownikach takich diody zastępuje się tyrystorami, które sterowane są za pomocą odpowiednich układów analogowych lub cyfrowych. Prostowniki sterowane są stosowane wszędzie tam, gdzie wymagana jest płynna regulacja mocy wyjściowej urządzenia, takie rozwiązanie jest powszechnie stosowane np. w spawarkach transformatorowych lub automatycznych ładowarkach akumulatorów samochodowych.



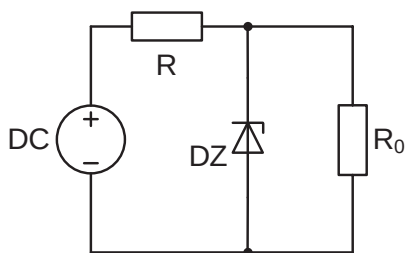
Rys. 12.1. Układ Graetza ze źródłem zasilania i obciążeniem



Rys. 12.2. Prostownik diodowy w układzie trójfazowym

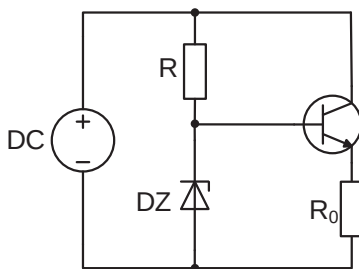
12.2. Układy stabilizacji napięcia i prądu

Zadaniem tych układów jest utrzymywanie stałej wartości napięcia wyjściowego niezależnie od zmian napięcia zasilającego i rezystancji obciążenia. Proces stabilizacji może przebiegać w sposób impulsowy lub ciągły, a stabilizatory dzieli się na parametryczne i kompensacyjne. W układach parametrycznych do stabilizacji wykorzystuje się elementy o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej, dla których zmiana napięcia lub prądu przeciwdziała zmianom wielkości stabilizowanej. Układy tego typu nie mają możliwości porównania wartości stabilizowanej wielkości wyjściowej z wymaganą wartością wzorcową. W układach kompensacyjnych do stabilizacji wykorzystuje się elementy, które mają zdolność dynamicznej zmiany rezystancji pod wpływem zmiany wartości wielkości stabilizowanej. Typowym stabilizatorem parametrycznym jest układ z diodą Zenera (rys. 12.3). Jeżeli wzrasta napięcie zasilania (przy stałej wartości prądu obciążenia) to dioda Zenera przewodzi większy prąd i utrzymuje stałe napięcie na wyjściu. Jest to możliwe w określonym zakresie napięcia zasilania. Jeżeli wzrasta prąd obciążenia to maleje prąd płynący przez diodę, jeśli obciążenie maleje wtedy prąd diody rośnie, natomiast napięcie wyjściowe jest stałe w określonym zakresie zmian prądów. Rezystor R służy do obniżenia napięcia wejściowego do wartości napięcia Zenera.



Rys. 12.3. Stabilizator napięcia z diodą Zenera

Pomimo odpowiedniego doboru rezystora R sprawność tego układu wynosi tylko około 25%, na elemencie stabilizującym tracona jest energia w postaci ciepła. Wadą układu jest też brak możliwości zmiany wartości oporu rezystora R podczas jego pracy. W układzie stabilizatora kompensacyjnego rezystor o stałej wartości oporu zastąpiono tranzystorem, czyli aktywnym elementem regulacyjnym (rys. 12.4). Napięcie wzorcowe (odniesienia) na diodzie Zenera porównywane jest z napięciem wyjściowym stabilizatora. Tranzystor spełnia funkcję sterowanego rezystora, którego opór zależy od prądu bazy I_B , a tym samym od napięcia baza-emiter U_{BE} . Przy zmianach napięcia wejściowego U_{we} lub obciążenia R_0 , zmniejszeniu lub zwiększeniu ulega wartość prądu kolektora tranzystora I_C oraz spadek napięcia na rezystorze R_0 czyli napięcie U_{wy} . Przy założeniu stałej wartości napięcia na diodzie Zenera U_Z , zmianom musi ulegać napięcie U_{BE} i związany z nim prąd I_B , a to z kolei wymusza przeciwne zmiany prądu I_C . Na tym polega działanie kompensujące tranzystora czyli przeciwdziałające zmianom zewnętrznym i utrzymujące stabilną wartość prądu i napięcia na wyjściu układu. Schemat układu zamieszczony na rysunku 12.4 służy do wyjaśnienia zasady działania stabilizatora kompensacyjnego, natomiast w praktyce stosuje się najczęściej stabilizatory w postaci układu scalonego, zawierającego jeszcze człon wzmacniający różnicę napięć – wzorcowego U_Z i wyjściowego U_{wy} jako sygnał sterujący tranzystorem regulacyjnym, który z kolei dla zmniejszenia strat ciepłych pracuje zwykle w sposób impulsowy.



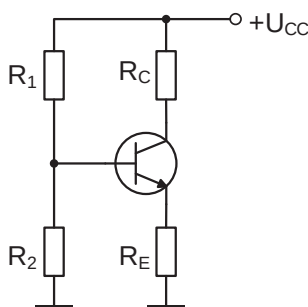
Rys. 12.4. Stabilizator kompensacyjny (wtórnik emiterowy)

12.3. Wzmacniacze

Tranzystor to główny element wchodzący w skład wzmacniaczy różnego rodzaju i przeznaczenia. Do wzmacniacza doprowadza się stałe napięcie zasilające nazywane polaryzującym i zmienne napięcie nazywane sterującym, które jest wzmacniane. Dla oceny działania wzmacniacza istotny jest kształt napięcia zmiennego. Sygnał prostokątny jest nienaturalny i występują w nim skokowe zmiany wartości, co pozwala dobrze ocenić zdolność wzmacniacza do przeniesienia tych skoków z jak najmniejszymi zniekształceniami. Sygnał harmoniczny jest przeciwieństwem sygnału prostokątnego, występują w nim łagodne zmiany wartości, które odzwierciedlają wiele naturalnych zjawisk fizycznych (np. propagacja światła). Ponadto każdy dowolny przebieg można przedstawić jako sumę sygnałów harmonicznych o różnych częstotliwościach.

Sygnal harmoniczny po przejściu przez układ liniowy nie zmienia kształtu, natomiast w przypadku przebiegu nieharmonicznego, dochodzi do zmiany jego kształtu (zniekształcenia liniowe), ponieważ każda ze składowych harmonicznnych jest przenoszona inaczej. Przebiegi prostokątne i harmoniczne są najbardziej wartościowymi sygnałami dla wzmacniaczy.

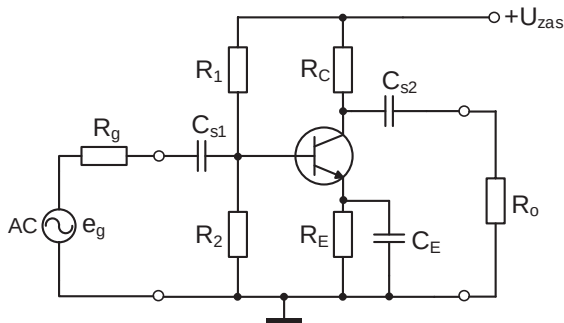
W celu uzyskania odpowiedniego wzmocnienia sygnału, jego właściwego kształtu i sprawności układu, należy uwzględnić szereg aspektów związanych z pracą tranzystora. Układy polaryzacji tranzystora mają za zadanie ustalenie odpowiedniego punktu pracy i jego stabilizację. Destabilizacja punktu pracy tranzystora występuje z powodu zmiany jego parametrów w funkcji temperatury oraz rozrzut technologiczny. Wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się współczynnik wzmocnienia stałoprądowego β (liniowo) oraz prąd zerowy I_{CB0} (wykładniczo), a napięcie U_{BE} zmniejsza się liniowo. Na rysunku 12.5 zamieszczono schemat potencjometrycznego układu ze sprzężeniem emiterowym, który jest podstawowym układem polaryzacji i stabilizacji punktu pracy tranzystorów bipolarnych.



Rys. 12.5. Potencjometryczny układ polaryzacji i stabilizacji punktu pracy tranzystora ze sprzężeniem emiterowym

Niestabilność temperaturowa punktu pracy tranzystora polowego jest znacznie mniejsza niż w przypadku tranzystora bipolarnego, większe znaczenie ma tutaj produkcyjny rozrzut parametrów i pod tym kątem głównie projektuje się układy polaryzacji. Na rysunku 12.6 zamieszczono schemat wzmacniacza pracującego w układzie wspólnego emitera WE, w którym jedna elektroda źródła sterującego, jeden zacisk rezystora obciążenia i emiter tranzystora znajdują się na wspólnym potencjale (najczęściej jest to potencjał masy). Należy zwrócić szczególną uwagę na odrębne obwody prądowe dla składowej stałej i zmiennej. Równoległe dołączenie kondensatora C_E do rezystora R_E likwiduje emiterowe sprzężenie zwrotne dla składowej zmiennej. Kondensator o dużej pojemności, dla sygnałów zmiennych, ma reaktancję bliską zero, a więc w tym przypadku impedancja łącząca emiter z masą również będzie prawie zerowa i nie będzie sprzężenia dla składowej zmiennej. W przeciwnym przypadku układ miałby bardzo małe wzmocnienie napięciowe. Zmienny sygnał sterujący wejściowy, wzmacniany w układzie, jest dostarczany ze

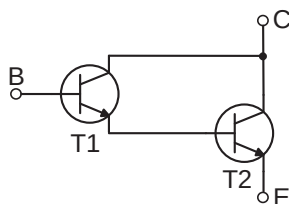
źródła e_g o rezystancji wewnętrznej R_g . Prąd bazy tranzystora zmienia się zgodnie z charakterem zmian sygnału sterującego. Odpowiednio duży prąd bazy powoduje przejście tranzystora w stan nasycenia i jego pełne otwarcie, natomiast gdy natężenie tego prądu maleje do zera, powoduje to przejście tranzystora w stan odcięcia i jego zatkanie. Obwód wyjściowy wzmacniacza stanowią szeregowo połączone tranzystor i rezystor kolektorowy R_C oraz rezystor obciążenia R_o , włączony między kolektor a masę poprzez kondensator sprzęgający C_{s2} . Napięcie wyjściowe to wzmocniona składowa zmienna napięcia występującego między emiterem a kolektorem tranzystora, odkładająca się na rezystancji obciążenia R_o . Kondensator C_{s1} separuje wzmacniacz od obwodu sterującego, a kondensator C_{s2} oddziela obwód prądu stałego, który polaryzuje stopień wzmacniający od obciążenia. W stanie nasycenia tranzystora napięcie U_{CE} osiąga niewielką wartość ($U_{CEsat} \approx 0,2 \text{ V}$), a pozostała część napięcia zasilającego U_{zas} występuje na rezystancji R_C . W stanie odcięcia tranzystora jest odwrotnie, prawie całe napięcie zasilania występuje na jego zaciskach CE , a niewielki prąd wsteczny tranzystora, płynący przez rezystor R_C , wywołuje na nim bardzo mały spadek napięcia. W czasie pracy wzmacniacza wartość międzyszczytowa napięcia wyjściowego oscyluje między potencjałem U_{CEsat} a potencjałem zasilania i zawsze jest mniejsza od U_{zas} .



Rys. 12.6. Wzmacniacz z tranzystorem bipolarnym w układzie WE (wspólny emiter)

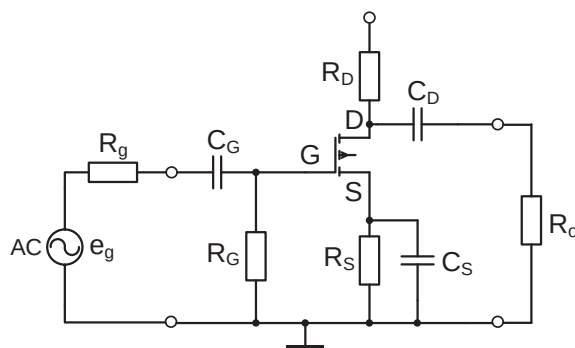
W celu zwiększenia wzmocnienia prądowego i rezystancji wejściowej oraz zmniejszenia rezystancji wyjściowej wzmacniacza stosuje się układ Darlingtona, w którym łączy się dwa tranzystory o jednakowej lub przeciwnej polaryzacji (rys. 12.7). Dla dwóch takich samych tranzystorów wzmocnienie układu Darlingtona wynosi:

$$K_1 = h_{21e1} \cdot h_{21e2} = (h_{21e})^2 \quad (1)$$



Rys. 12.7. Układ Darlingtona z tranzystorami o jednakowej polaryzacji

Tranzystor unipolarny umożliwia budowę stopni wzmacniających w układach podobnych jak w przypadku tranzystorów bipolarnych, są to wzmacniacze w układzie ze wspólnym źródłem (WS), wspólną bramką (WG) i wspólnym drenem (WD). Tranzystor unipolarny, w odróżnieniu od bipolarnego, jest elementem sterowanym napięciowo, a więc inaczej jest realizowana jego polaryzacja i w odmienny sposób są określane jego parametry. Schemat wzmacniacza z tranzystorem unipolarnym w układzie ze wspólnym źródłem, analogiczny do układu z tranzystorem bipolarnym ze wspólnym emiterem, zamieszczono na rysunku 12.8.



Rys. 12.8. Wzmacniacz z tranzystorem unipolarnym w układzie WS (wspólne źródło)

We wzmacniaczach występuje sprzężenie zwrotne, które polega na wprowadzeniu części sygnału wyjściowego na wejście układu. Jeżeli sygnał sprzężenia jest odwrócony w fazie, czyli przesunięty o 180° względem sygnału wejściowego i odejmuje się od niego, to sprzężenie jest ujemne. Jeżeli sygnał sprzężenia jest w fazie z sygnałem wejściowym to sprzężenie jest dodatnie. We wzmacniaczach stosowane jest najczęściej sprzężenie ujemne, a korzyści takiego rozwiązania są następujące:

- zmniejszenie szumów i zakłóceń,
- zmniejszenie zniekształceń przez poprawę liniowości charakterystyki dynamicznej i korekcję kształtu charakterystyki częstotliwościowej,
- możliwość regulacji rezystancji wejściowej i wyjściowej,
- możliwość doboru wzmocnienia i pasma przenoszenia wzmacniacza (przez zmniejszenie wzmocnienia można rozszerzyć pasmo).

W zależności od sposobu, w jaki sygnał sprzężenia zwrotnego jest pobierany z wyjścia układu, sprzężenie zwrotne dzieli się na napięciowe i prądowe. W zależności od sposobu podania sygnału sprzężenia na wejście wzmacniacza, wyróżnia się sprzężenia szeregowo i równoległe.

Wzmacniacz operacyjny jest wielostopniowym, scalonym wzmacniaczem prądu stałego, mającym dwa wejścia i jedno niesymetryczne wyjście. Jest charakteryzowany przez zewnętrzne parametry, zdefiniowane jednakowo dla wszystkich rozwiązań technologicznych i pomimo złożonej struktury wewnętrznej można go traktować jako pojedynczy element układu. Podstawowe układy pracy wzmacniacza operacyjnego to jednowejściowe systemy odwracające i nieodwracające oraz dwuwejściowy układ różnicowy. Ponadto występują inne układy realizujące różne funkcje.

Wzmacniacze mocy to układy, których zadaniem jest dostarczenie do obciążenia dużej mocy użytecznej, przy jak najmniejszym poborze mocy z zasilacza i małych zniekształceniach. Cechą charakterystyczną tych układów jest duże wzmocnienie prądowe, a najczęściej wykorzystywany w praktyce jest wzmacniacz akustyczny. Wzmacniacz mocy zbudowany jest z dwóch niezależnych elementów, wzmacniacza wstępnego napięciowego (operacyjny lub różnicowy) i wzmacniacza końcowego, nazywanego stopniem końcowym lub końcówką mocy, ze wzmocnieniem napięciowym równym jedności i dużym wzmocnieniem prądowym.

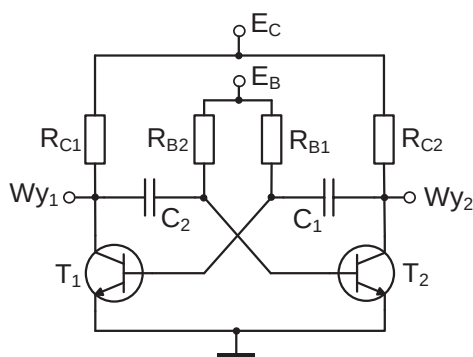
Wzmacniacze szerokopasmowe służą do wzmacniania sygnałów o szerokim widmie częstotliwości, np. sygnałów okresowych złożonych z dużej liczby harmonicznych. Charakteryzują się nie tyle szerokim pasmem przenoszenia, co odpowiednim kształtem charakterystyki fazowej (stała wartość przesunięcia fazowego w dużym zakresie częstotliwości).

Wzmacniacze selektywne to układy, których zadaniem jest wzmacnianie sygnałów o częstotliwości zawartej w wąskim paśmie wokół pewnej częstotliwości środkowej. Sygnały o częstotliwości odległej od środkowej, leżące poza pasmem przenoszenia wzmacniacza, są silnie tłumione.

12.4. Generatory

Najczęściej wykorzystywane w różnych dziedzinach techniki są napięciowe przebiegi sinusoidalne oraz prostokątne. Generatory sygnałów harmonicznym wytwarzają w kontrolowany sposób sygnały sinusoidalne o określonej częstotliwości i amplitudzie. Generatory można podzielić na lampowe, diodowe, tranzystorowe i oparte na układzie scalonym. Ze względu na elementy decydujące o częstotliwości drgań występują generatory typu LC, RC i elektromechaniczne (np. kwarcowe). Układy LC pracują na dużych częstotliwościach (setki kiloherców i megaherców), a generatory RC ze wzmacniaczami operacyjnymi wytwarzają sygnały o małych częstotliwościach (ułamki herców do setek kiloherców). W grupie układów typu LC występują generatory Meissnera ze sprzężeniem transformatorowym, Hartleya ze sprzężeniem pojemnościowym, Colpittsa ze sprzężeniem indukcyjnym oraz takie, w których kolektor tranzystora połączony jest z bazą przez kondensator. Generatory sygnałów prostokątnych nazywane są multiwibratorami, które dzieli się na astabilne,

monostabilne i bistabilne. Pierwszy z nich ma dwa stany quasi-stabilne, a przejście z jednego stanu do drugiego odbywa się samoczynnie. Czasy trwania poszczególnych stanów zależą wyłącznie od elementów układu. Istota działania polega na cyklicznym przemiennym przechodzeniu tranzystorów ze stanu nasycenia do stanu zatkania (rys. 12.9). Układ monostabilny ma jeden stan stabilny i jeden quasi-stabilny, a przejście od pierwszego do drugiego odbywa się pod wpływem zewnętrznego impulsu wyzwalającego. Czas trwania stanu quasi-stabilnego jest określony wartościami elementów układu, który samoczynnie powraca do stanu stabilnego. Multiwibrator bistabilny ma dwa stany stabilne, których czas trwania może być dowolnie długi, a przejście z jednego do drugiego i odwrotnie odbywa się pod wpływem impulsów wyzwalających. Generatory przebiegów prostokątnych są także układami ze sprzężeniem zwrotnym.

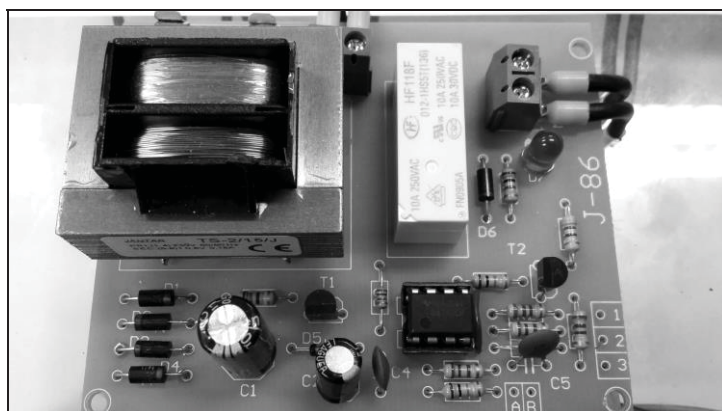


Rys. 12.9. Multiwibrator astabilny

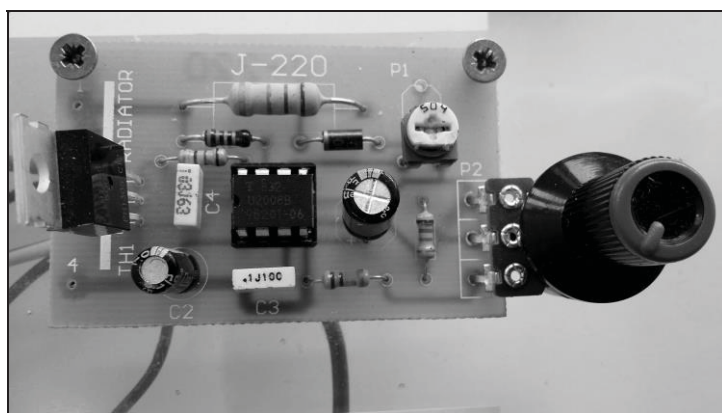
12.5. Regulatory mocy

Układy elektroniczne stosowane do płynnej lub skokowej zmiany mocy występują często w urządzeniach mechanicznych, grzewczych i oświetleniowych, zasilanych z sieci prądu przemiennego w gospodarstwie domowym. Umożliwiają ręczną regulację mocy w trakcie użytkowania urządzenia, łagodny rozruch oraz oszczędność energii poprzez dopasowanie mocy do aktualnych potrzeb. Elementy elektroniczne tych układów, w zależności od mocy i stopnia komplikacji, występują jako pojedyncze o różnej wielkości lub w postaci scalonej. Główne elementy wykonawcze, które są najbardziej obciążone prądem, mogą zawierać dodatkowe radiatory odprowadzające ciepło. Główna idea działania polega na cyklicznym załączaniu i wyłączaniu przepływu prądu, tak aby nie dopływał on do urządzenia w sposób ciągły, a jego wartość średnia była regulowana. Prąd jest załączany na każdej "półwie sinusoidy" z opóźnieniem tym większym im mniejsza moc ma być uzyskana, a jego przepływ jest samoczynnie przerywany do czasu ponownego załączenia, gdy napięcie osiąga wartość zerową (jego sinusoida przecina oś czasu). Głównym elementem wykonawczym umożliwiającym ten proces jest tyrystor. Element ten może występować w postaci klasycznej i przewodzić prąd w jednym kierunku lub jako

triak, mający zdolność dwukierunkowego przewodzenia. W tym pierwszym przypadku w urządzeniu regulacyjnym występuje diodowy układ prostowniczy. Przygotowanie impulsu powodującego wyzwolenie tyrystora za pomocą prądu bramki może odbywać się w układzie zbudowanym z tranzystorów i kondensatorów, kondensatora i diaka lub w układzie scalonym. W regulatorze występują też rezystory, a głównym z nich jest potencjometr, za pomocą którego użytkownik ustala prąd w obwodzie przygotowującym impuls wyzwalaający tyrystor, a tym samym czas opóźnienia załączenia prądu głównego odbiornika i jego moc. Fotografie przykładowych regulatorów elektronicznych małej mocy zamieszczono na rysunkach 12.10 i 12.11.



Rys. 12.10. Elektroniczny regulator temperatury



Rys. 12.11. Elektroniczny regulator mocy odbiornika prądu zmiennego

13. Cyfrowe układy elektroniczne

13.1. Wprowadzenie

Cyfrowe układy elektroniczne mają zdolność pamiętania, przetwarzania i przesyłania informacji cyfrowej z wykorzystaniem sygnałów, które mogą przyjmować tylko dwa poziomy napięcia, jedno nazywane wysokim i oznaczane literą H (High), a drugie nazywane niskim i oznaczane literą L (Low). Wyższemu napięciu odpowiada wartość logiczna **1**, a niższemu **0**. W praktycznych rozwiązaniach górny poziom napięcia jest równy 5 V, wartość logiczna **1** odpowiada napięciu z zakresu od 2,4 do 5 V, a wartość logiczna **0** odpowiada napięciu z zakresu od 0 do 0,8 V. Główne zadania układów cyfrowych to wykonywanie obliczeń i sterowanie urządzeniami. W technice cyfrowej liczby zapisywane są w systemie dwójkowym w postaci ciągu cyfr **0** i **1** oraz szesnastkowym, stosowanym najczęściej w celu skróconego zapisu liczb dwójkowych i zawierającym także znaki alfabety łańciskiego. Cyfry **0** i **1** w kodzie binarnym nazywane są bitami, a ich ciąg tworzy słowa, wśród których charakterystyczne jest wyrażenie 8-bitowe nazywane bajtem. Za pomocą słowa n-bitowego można utworzyć 2^n kombinacji czyli przesłać taką liczbę informacji w postaci cyfrowej. Jeden bajt zawiera 256 informacji.

Wyrażenia logiczne przedstawiane są graficznie w formie schematów za pomocą symboli operacji logicznych. Symbole podstawowych operacji logicznych oraz ich funkcje w postaci wyrażen boolowskich i tablic prawdy stanowią wzorzec do utworzenia symboli reprezentujących bardziej złożone operacje (tab. 13.1). Układy elektroniczne służące do fizycznej realizacji operacji logicznych nazywane są bramkami. Budowane są z tranzystorów i stanowią elementarne komórki układów cyfrowych. Działanie bramki logicznej polega na odczycie jednego z dwóch poziomów napięć występujących na wejściach i wytwarzaniu również jednego z dwóch poziomów napięć na wyjściu. Bramki wszystkich rodzajów występują w różnych kombinacjach w postaci układów scalonych. W konstruowaniu sieci logicznych najczęściej używa się bramek typu NAND i NOR, ponieważ zgodnie z prawami De Morgana można z nich zbudować układ realizujący dowolnie złożoną funkcję logiczną:

$$\overline{x1 + x2} = \overline{x1} \cdot \overline{x2} \quad (1)$$

$$\overline{x1 \cdot x2} = \overline{x1} + \overline{x2} \quad (2)$$

13.2. Rodzaje układów cyfrowych

Ze względu na sposób działania i projektowania układy cyfrowe dzieli się na kombinacyjne i sekwencyjne. W układzie kombinacyjnym o n wejściach i m wyjściach stan wyjść zależy tylko od aktualnego stanu wejść, nie ma on zdolności pamiętania stanów wcześniejszych.

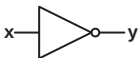
Układy kombinacyjne dzieli się na bramki logiczne oraz kombinacyjne bloki funkcjonalne:

- konwertery kodów (kodery, dekodery, transkodery),
- komutatory (multipleksery, demultipleksery),

- bloki arytmetyczne (sumatory, komparatory, bloki arytmetyczno-logiczne ALU – Arithmetic Logic Unit).

Konwertery kodów służą do przekształcania zapisu informacji (danych) wykonanego w jednym z kodów na zapis w innym kodzie. Dekodery zmieniają dowolny kod binarny na dowolny kod "1 z n" (najczęściej dziesiętny). Kodery (enkodery) zmieniają dowolny kod "1 z n" na dowolny kod binarny, działają odwrotnie do dekoderek. Transkodery zmieniają dowolny kod dwójkowy na inny kod dwójkowy. Komutatory działają jako przełączniki sygnałów cyfrowych. Multipleksery posiadają od kilku do kilkunastu wejść, a tylko jedno wyjście. Działanie ich polega na przekazywaniu informacji podanej na jedno z wejść układu na jego wyjście, a więc w celu odczytania i przetworzenia jednej informacji z wielu dopływających równocześnie z różnych źródeł. Demultipleksier działa odwrotnie, posiada jedno wejście oraz od kilku do kilkunastu wyjść i służy do przekazania sygnału z wejścia układu na jedno z wyjść. Bloki arytmetyczne zawierają układy cyfrowe wykonujące podstawowe działania matematyczne i logiczne na liczbach binarnych. Sumatory realizują operację dodawania, za pomocą której i odpowiednich algorytmów można wykonać inne operacje matematyczne (odejmowanie, mnożenie, dzielenie).

Tab. 13.1. Symbole bramek logicznych i tablice stanów

Bramka NOT		Sygnały wejściowe		Bramka OR	Bramka AND	Bramka NOR	Bramka NAND
							
Sygnał wejściowy	Sygnał wyjściowy			Sygnał wyjściowy			
x	$y = \overline{x}$	x1	x2	$y = x1 + x2$	$y = x1 \cdot x2$	$y = \overline{x1 + x2}$	$y = \overline{x1 \cdot x2}$
0	1	0	0	0	0	1	1
		0	1	1	0	0	1
1	0	1	0	1	0	0	1
		1	1	1	1	0	0

Zadaniem komparatora jest porównanie dwóch liczb binarnych. Jednostka arytmetyczno-logiczna to wielofunkcyjny układ cyfrowy, który wykonuje operacje arytmetyczne i logiczne na dwóch liczbach całkowitych binarnych. Pojedynczy układ nie ma pamięci ale wchodzi w skład mikroprocesora. W układzie sekwencyjnym o n wejściach oraz m wyjściach występuje pamiętanie stanów, stan wyjść jest

zależny od stanu wejść oraz od poprzedniego stanu układu. Są one wyposażone w pamięć, w której jest przechowywana informacja o ich bieżącym stanie pracy, który jest wynikiem poprzednich stanów pracy układu i przeszłych danych wejściowych. Dane zmagazynowane w ten sposób w pamięci mają więc wpływ na działanie układu, zmianę jego stanu w chwili pojawienia się na jego wejściu nowych danych informacyjnych. Ze względu na sposób działania układy sekwencyjne dzieli się na asynchroniczne, które zmieniają swój stan pod wpływem danych wejściowych oraz synchroniczne, w których sygnał wejściowy może oddziaływać na układ i zmieniać jego stan tylko w ściśle określonym odcinku czasu wyznaczonym przez sygnał synchronizujący (zegarowy, taktujący). Pamięć układów sekwencyjnych jest zbudowana z przerzutników, które na wyjściu przyjmują jeden z dwóch stanów logicznych i zachowują go po zaniku sygnału wejściowego, który go wywołał, aż do pojawienia się nowego sygnału zmieniającego stan wyjścia. Przerzutnik jest podstawowym jednobitowym elementem pamięci, występuje w wersji asynchronicznej, a częściej w postaci synchronicznej, jego pracę przedstawia się za pomocą tablicy przejść lub stanów. Wykorzystywany jest jako elementarna część składowa sekwencyjnych bloków funkcjonalnych – rejestrów i liczników. Rejestr jest zbudowany z przerzutników i bramek. Przerzutniki przechowują informację, a bramki tworzą układy kombinacyjne, które wprowadzają i wyprowadzają informację z rejestru. Rejestry służą do zapamiętywania i przechowywania informacji. Zapis i odczyt informacji może odbywać się szeregowo (bit po bicie w takt sygnału zegarowego) lub równolegle (w chwili określonej przez sygnał zegarowy wszystkie bity tworzące słowo są zapisywane równocześnie). Liczniki służą do zliczania i zapamiętywania liczby impulsów podawanych w określonym przedziale czasu na wejście zliczające. Drugie wejście nazywa się zerującym i służy do wyzerowania licznika do stanu początkowego przez ustawienie w stan 0 wszystkich przerzutników, z których zbudowany jest licznik.

13.3. Charakterystyka cyfrowych układów scalonych

Układy cyfrowe występują w postaci scalonej i mogą mieścić w swojej strukturze nawet kilka milionów tranzystorów. Cyfrowe układy scalone mogą być zbudowane z tranzystorów bipolarnych typu NPN (TTL, ECL) lub unipolarnych z izolowaną bramką (MOS, CMOS). Układy TTL (Transistor-Transistor Logic) występują już dzisiaj rzadko w starszych urządzeniach, ECL (Emitter-Coupled Logic) charakteryzują się dużą szybkością działania i występują jeszcze głównie w przemyśle, MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) zbudowane z tranzystorów polowych z kanałem typu N lub P i charakteryzujące się dużym stopniem integracji są stosowane głównie w pamięciach półprzewodnikowych. Najbardziej nowoczesne układy CMOS (Complementary MOS), zawierające dwa komplementarne typy tranzystorów umieszczonych na wspólnym podłożu półprzewodnika i odpowiednio ze sobą połączonych, posiadają bardzo duży stopień integracji, małe straty mocy i mogą być programowalne. Tranzystory unipolarne, z których zbudowane są układy scalone z rodziny CMOS, charakteryzują się wrażliwością na ładunki elektrosta-

tyczne. Układy scalone posiadają odpowiednie zabezpieczenia na wejściach, ale w niektórych przypadkach mogą one okazać się niewystarczające. Dlatego należy stosować zasady, które zmniejszają możliwość ich uszkodzenia. Przechowywanie elementów powinno odbywać się w specjalnych woreczkach antystatycznych lub w stanie zwarcia wszystkich wyprowadzeń za pomocą srebrnej folii albo gąbki przewodzącej. Podczas montażu nie należy dotykać nóżek układu, rozładować ładunek elektryczny, który może znajdować się na dłoniach, zwrócić uwagę na wartość dopuszczalnego napięcia, a wszystkie nieużywane wejścia bramek logicznych układu połączyć z masą (nieużywane wyjścia można pozostawić niepodłączone). W skomplikowanych układach logicznych łączy się ze sobą wiele bramek. Łączyć można jedno wyjście z jednym (lub wieloma) wejściami. Połączenie dwóch wyjść (lub więcej) jest nieprawidłowe i może spowodować uszkodzenie bramek. Każda z nich pobiera pewien prąd z bramki, do której jest dołączona, w związku z tym ważnym parametrem jest obciążalność bramki, określana jako ilość bramek, która może ją obciążać. W działaniu sieci złożonych z tysięcy bramek, istotny jest też czas propagacji (mierzony w ns), czyli czas przełączenia się tranzystorów tworzących bramkę po zmianie sygnału wejściowego.

13.4. Przetwarzanie analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe

Wartość sygnału analogowego zmienia się w sposób ciągły, w przedziale czasu w każdej chwili przyjmuje określoną wartość. Sygnał cyfrowy to ciąg liczbowy składający się ze zmierzonych i odpowiednio przetworzonych wartości sygnału analogowego w określonych chwilach czasu. Pomiedzy komputerowymi układami sterowania i regulacji a elektromechanicznymi elementami wykonawczymi i czujnikami przesyłane są sygnały, które muszą być przetwarzane z postaci analogowej na cyfrową i odwrotnie. Proces zamiany sygnału analogowego na cyfrowy przebiega w trzech etapach, które przyjmują nazwy: próbkowanie, kwantowanie i kodowanie. Próbkowanie polega na pomiarze wartości sygnału analogowego w regularnych odstępach czasu czyli okresach próbkowania i wyznaczeniu skończonej liczby różnych wartości wyników. Poszczególne wartości pomiarów nazywane są próbkami, a odwrotnością okresu jest częstotliwość próbkowania, która powinna być dwukrotnie większa niż częstotliwość zmian sygnału analogowego. Sygnał spróbkowany jest sygnałem dyskretnym w czasie (liczba próbek ma skończoną wartość) ale analogowym w amplitudzie.

Kwantowanie polega na podzieleniu całego zakresu zmian wartości sygnału na skończoną liczbę przedziałów o jednakowej szerokości i równą naturalnej potęgze liczby 2, określeniu poziomu kwantowania dla każdego przedziału i przyporządkowaniu wartości zmierzonej próbki do jednego z tych poziomów.

Po kwantyzacji sygnał staje się cyfrowy czyli dyskretny w czasie i amplitudzie. Kodowanie polega na oznaczeniu każdego poziomu kwantowania za pomocą liczby kodującej czyli n-bitowego słowa.

13.5. Budowa systemów komputerowych

Podstawowym blokiem komputera jest jednostka centralna, przetwarzająca dane według określonego programu. Urządzenia zewnętrzne (peryferyjne) wejściowe (np. klawiatura, mysz) i wyjściowe (np. monitor, drukarka) służą do komunikowania się użytkownika z komputerem. Pamięć służy do przechowywania danych i programów oraz przetwarzania danych i wyników operacji wykonywanych przez komputer. W jednostce centralnej znajduje się procesor, między nim a pozostałymi elementami komputera przesyłane są informacje w postaci cyfrowej za pomocą systemu przewodów elektrycznych (magistral). Procesor (mikroprocesor) jest układem scalonym o niewielkich rozmiarach wykonanym z krystalu krzemu, w którym są wytworzone warstwy półprzewodnikowe tworzące sieć, która zawiera w swej strukturze od kilku tysięcy do kilkuset milionów tranzystorów. Jednym z parametrów opisujących pracę procesora jest długość słowa bitowego, na którym wykonuje on operacje arytmetyczne i logiczne. Współczesne procesory są najczęściej 64-bitowe. Szybkość wykonywania operacji jest określana przez zegar taktujący, który wyznacza początek przedziałów czasu przeznaczonych do wykonania określonej operacji. Procesor tym szybciej wykonuje operacje im krótsze są te okresy czasu (takty), np. przy częstotliwości taktowania równej 4 GHz, mikroprocesor wykonuje cztery miliardy operacji w ciągu sekundy. Mikroprocesor zbudowany jest z trzech połączonych ze sobą podstawowych sekcji:

- sekcja arytmetyczno-logiczna ALU,
- sekcja sterowania,
- sekcja rejestrów.

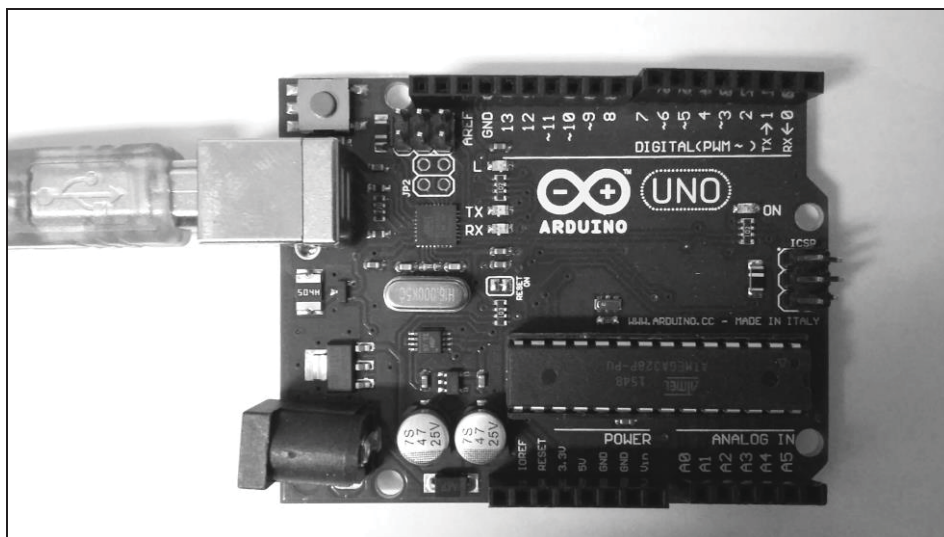
W systemach komputerowych stosuje się dwa rodzaje pamięci. Pamięć wewnętrzna półprzewodnikowa wytwarzana jest w postaci układów scalonych o niewielkich rozmiarach i dużej skali integracji. Pamięć zewnętrzna, której nośnikami są dyski danych, występuje w postaci płyt o różnego rodzaju powierzchniach zapisu. Pamięć charakteryzowana jest przez pojemność, czyli ilość informacji w niej zgromadzoną oraz czas dostępu, określający szybkość jej działania. Pamięć wewnętrzna, współpracująca na bieżąco z procesorem (operacyjna RAM) jest szybka i nazywana pamięcią główną, a zewnętrzna pamięć danych, powolna i o dużej pojemności, jest pamięcią pomocniczą. Pamięć RAM ma zasadniczy wpływ na szybkość działania komputera, ale jej wadą jest utrata przechowywanej informacji po zaniku zasilania. Pamięć stała (ROM), w której informacja jest zapisywana trwale, jest pamięcią pomocniczą i służy wyłącznie do odczytywania przechowywanych informacji. Zapis informacji przez producenta odbywa się podczas wytwarzania tej pamięci, użytkownik nie ma możliwości zmiany tego zapisu. Przechowuje się w niej programy, które nie będą już poprawiane ani ulepszone. Pamięć typu PROM jest też programowana w sposób trwały, poprzez ingerencję w połączenia końcówek tranzystorów bipolarnych i nie ma dużej pojemności. Pamięci EPROM i EEPROM są zbudowane w oparciu o tranzystory polowe i umożliwiają zapisywanie oraz kasowanie informacji. Pamięć dyskowa jest rodzajem masowej pamięci zewnętrznej o bardzo dużej pojemności. Tworzące ją dyski można podzielić na magnetyczne

i optyczne. Dysk magnetyczny jest wykonany najczęściej ze stopu aluminium pokrytego obustronnie warstwą magnetyczną, jest podzielony na ścieżki (sformatowany), w których utworzone są sektory. Dysk twardy, znajdujący się w hermetycznej obudowie, posiada od dwóch do ośmiu wirujących dysków magnetycznych, silnik napędu dysków z układem sterowania, silnik przesuwu głowicy odczytująco-zapisującej oraz układ odczytu i zapisu, którym steruje mikrokontroler nazywany kontrolerem dysku twardego.

Głowica ma postać cewki, a płynący przez nią prąd wytwarza zmienny strumień magnetyczny, który powoduje powstanie na powierzchni dysku obszarów pola magnetycznego. Podczas odczytu informacji zmienne pole magnetyczne indukuje w cewce głowicy siłę elektromotoryczną. Działanie dysków optycznych opiera się na zapisywaniu i odczycie informacji cyfrowej na wirujących płytach różnego typu za pomocą światła laserowego. Na płycie CD bity informacji zapisywane są jako wgłębienia i przerwy między nimi na spiralnej ścieżce biegnącej od środka okrągłej płyty do jej części zewnętrznej. Informacja jest odczytywana za pomocą światła diody laserowej przesuwanej wzdłuż ścieżki z prędkością 1,25 m/s. Prędkość obrotowa płyty jest zmienna w celu zachowania stałej prędkości odczytu 150 kB/s. Promień światła laserowego po odbiciu trafia do detektora, w którym fotodiody lub fototranzystory zamieniają strumień świetlny na impuls elektryczny. Początkowo na płytach CD informacja była zapisana mechanicznie przez producenta i mogła być wielokrotnie odtwarzana. Następnie skonstruowano płyty CD-R, które umożliwiają jednokrotne zapisanie informacji przez użytkownika za pomocą nagrywarki komputerowej i wielokrotne jej odtwarzanie. Jest to możliwe dzięki temu, że informacja jest zapisywana na dodatkowej warstwie utworzonej ze specjalnego tworzywa sztucznego, które w zależności od mocy strumienia lasera nagrzewa się i zmienia barwę. Płyty CD-RW umożliwiają już wielokrotny zapis i kasowanie informacji. Nośnikiem informacji jest warstwa wykonana ze stopu srebra, indy, antymonu i telluru, która pod wpływem zmian mocy promienia lasera zmienia swoją przezroczystość. Płyta DVD charakteryzuje się większą pojemnością (4,7 GB), którą uzyskano dzięki zmniejszeniu przekroju promienia laserowego przez zastosowanie lasera o mniejszej długości fali świetlnej (650 nm) i zmniejszenie średnicy plamki promienia świetlnego. Dzięki zmniejszeniu szerokości odstępu między ścieżkami zwiększono długość całkowitą ścieżki na płycie i dodatkowo zmniejszono minimalną długość obszarów zagłębionych w strukturze czynnej płyty. Płyty DVD mogą być przeznaczone do jednokrotnego i wielokrotnego nagrywania. Płyty BD (Blue-ray disc) wykorzystują wiązkę światła lasera o barwie fioletowej i długości fali 405 nm, charakteryzującego się promieniem świetlnym o jeszcze większej rozdzielczości niż w przypadku płyt DVD. Umożliwiło to zmniejszenie szerokości odstępów między ścieżkami do 0,32 μm i zapis 25 GB informacji, a na płytach wielowarstwowych nawet do 400 GB. Pamięci typu Flash są wykorzystywane w takich urządzeniach jak aparat fotograficzny czy pendrive. Mają budowę podobną do operacyjnej pamięci dynamicznej, informacje są trwale przechowywane za pomocą kondensatorów wysokiej jakości, ale działają znacznie wolniej niż klasyczne pamięci ope-

racyjne. Po dłuższym czasie użytkowania i w wyniku wielokrotnego zapisu pogarszają się sukcesywnie własności izolacyjne kondensatorów.

Mikrokontroler jest układem scalonym, który przez podobną strukturę wewnętrzną i działanie jest najprostszym komputerem (rys. 13.1). Jego zadaniem jest przetwarzanie sygnału wejściowego, według instrukcji zawartych w programie umieszczonym w jego pamięci, na sygnał wyjściowy w celu sterowania pracą prostych urządzeń użytkowych (gospodarstwo domowe, sprzęt AGD, RTV, motoryzacja). Mikrokontroler ma najczęściej procesor 8-bitowy o nie dużej prędkości działania, współpracuje z pamięcią typu EPROM lub ROM o niewielkiej pojemności, a do obliczeń służy nieduża pamięć RAM lub umieszczone w nim rejestry. Peryferyjne urządzenia wejściowe to np. czujniki i przełączniki, a sterowane elementy wyjściowe to diody, silniki, przekaźniki itp. Mikrokontrolery stosowane w pojazdach samochodowych nazywane są sterownikami.



Rys. 13.1. Mikrokontroler Arduino

14. Przepisy BHP w Laboratorium elektrotechniki i elektroniki

1. Przed przystąpieniem do wykonania ćwiczenia należy sprawdzić wizualnie stan sprzętu laboratoryjnego, izolację przewodów oraz stan zamocowania elementów ruchomych. Zauważone uszkodzenia i nieprawidłowości należy zgłosić osobie prowadzącej zajęcia.
2. Przed uruchomieniem urządzeń i sprzętu pomiarowego o znacznej komplikacji technicznej należy dokładnie zapoznać się z instrukcją obsługi.
3. Układy elektryczne należy łączyć zgodnie ze schematem i bez dołączonego źródła energii elektrycznej. Źródło należy odizolować od układu poprzez włączenie odłącznika mechanicznego i pozostawienie go w pozycji otwartej podczas czynności łączeniowych.
4. Przewody zasilające należy zawsze najpierw dołączać do odłącznika, a następnie do źródła energii elektrycznej. Włącznik lub wtyczkę źródła energii włącza się dopiero przed pomiarami.
5. Przewody należy mocować do zacisków w sposób trwały i pewny, nie dołączać do jednego zacisku więcej niż dwa przewody z końcówkami widelkowymi.
6. Elementy, przez które płynie prąd główny w obwodzie należy łączyć przewodami „widelkowymi” o większym przekroju, a woltomierze i cewki napięciowe woltomierzy przewodami „bananowymi” o mniejszym przekroju i długości.
7. Nie należy łączyć układów elektrycznych przewodami z uszkodzoną izolacją.
8. Jeżeli nie ma innych zaleceń zakresy pomiarowe mierników należy ustawić na wartości maksymalne. Przed uruchomieniem układu należy ustawić minimalną wartość napięcia zasilającego i maksymalną wartość rezystancji w obwodzie głównym.
9. Po wykonaniu połączeń elektrycznych układ pomiarowy należy zgłosić do sprawdzenia osobie prowadzącej zajęcia.
10. W czasie przeprowadzania pomiarów nie należy dotykać żadnych elementów układu (poza regulacyjnymi), w szczególności części nieizolowanych oraz przewodów.
11. W razie konieczności naprawy lub modernizacji układu należy najpierw odłączyć napięcie zasilające.
12. Przed otwarciem odłącznika mechanicznego w obwodzie należy zawsze zmniejszyć natężenie prądu do wartości minimalnej.
13. Należy zachować bezpieczną odległość od wirujących części maszyn, obserwować ich zachowanie w czasie pracy, a po wyłączeniu pozwolić na samoistne zatrzymanie.
14. Po zakończeniu pomiarów należy odłączyć źródło energii, poczekać do czasu zatrzymania się elementów ruchomych i rozmontować układ pomiarowy.
15. W razie porażenia prądem lub innego nieszczęśliwego wypadku należy udzielić poszkodowanemu pierwszej pomocy i wezwać pogotowie ratunkowe.

Część druga
Instrukcje do ćwiczeń
laboratoryjnych

1. Pomiary w obwodach prądu stałego

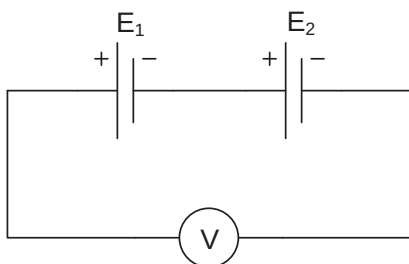
Celem ćwiczenia jest poznanie i doświadczalne sprawdzenie podstawowych praw elektrotechniki, sposobów łączenia źródeł energii i odbiorników oraz metod pomiaru i obliczeń wielkości elektrycznych w obwodach prądu stałego.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

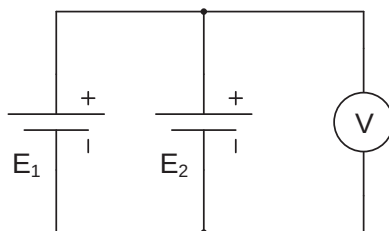
1. Program ćwiczenia
2. Wielkości fizyczne w obwodach prądu stałego
3. Prawa w obwodach elektrycznych – definicja, wzór, zastosowanie
4. Związki matematyczne między wielkościami elektrycznymi
5. Rodzaje mierników stosowanych do pomiaru wielkości elektrycznych w obwodach prądu stałego (obliczanie stałej miernika)
6. Schematy podstawowych obwodów elektrycznych (umiejętność rysowania i opisanie zależnościami matematycznymi)

1.1. Połączenie szeregowe i równoległe dwóch źródeł energii elektrycznej

Należy określić wartość napięcia znamionowego wybranych źródeł energii, a następnie dokonać pomiaru siły elektromotorycznej za pomocą miernika elektro-mechanicznego i elektronicznego, tak wybierając ich zakresy, aby pomiar był jak najbardziej dokładny. Pomiar napięcia należy wykonać dla jednego źródła oraz dla dwóch połączonych szeregowo i równoległe (rys. 1.1 i 1.2). Połączenie równoległe należy wykonać dla źródeł o podobnych napięciach. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 1.1.



Rys. 1.1. Schemat połączenia szeregowego dwóch źródeł energii elektrycznej i woltomierza



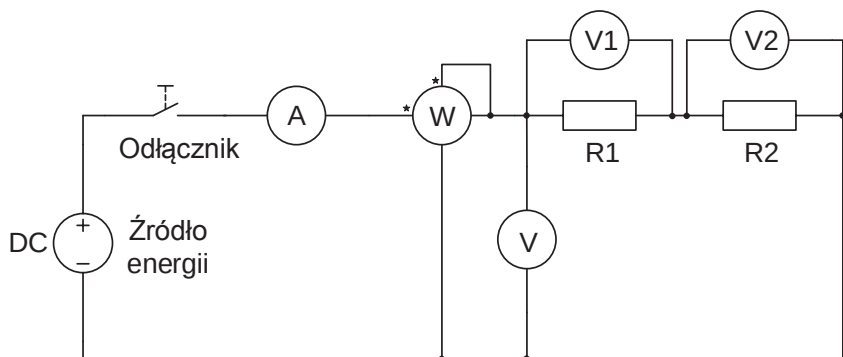
Rys. 1.2. Schemat połączenia równoległego dwóch źródeł energii elektrycznej i woltomierza

Tab. 1.1. Wyniki pomiaru napięcia źródeł energii elektrycznej w różnych połączeniach

Rodzaj i typ źródła energii	Napięcie znamionowe źródła U_n [V]	Pomiar woltomierzem elektromechanicznym			Pomiar woltomierzem elektronicznym		
		U [V]			U [V]		
		jedno źródło	dwa źródła połączone		jedno źródło	dwa źródła połączone	
			szeregowo	równolegle		szeregowo	równolegle

1.2. Połączenie szeregowe dwóch odbiorników

Należy zmierzyć rezystancję odbiorników R1 i R2. Połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 1.3. Zwiększać napięcie źródłowe i dla każdej nastawionej wartości zmierzyć natężenie prądu, moc oraz spadki napięć na odbiornikach. Obliczyć całkowity spadek napięcia, moc całkowitą i moc każdego odbiornika oraz jego rezystancję. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli 1.2. Wykreślić charakterystyki $U=f(I)$, $U_1=f(I)$, $U_2=f(I)$ na jednym wykresie oraz $R_1=f(I)$ i $R_2=f(I)$ na drugim wykresie. Dla jednej wybranej serii pomiarów napisać drugie prawo Kirchhoffa (za pomocą wzoru oraz wartości), obliczyć rezystancję zastępczą dwóch odbiorników i energię elektryczną pobraną ze źródła zasilania w czasie pięciu minut pracy odbiorników (wynik wyrazić w J i Wh). Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli 1.3.



Rys. 1.3. Schemat obwodu do sprawdzenia prawa Ohma i drugiego prawa Kirchhoffa (połączenie szeregowe odbiorników)

Tab. 1.2. Wyniki pomiarów i obliczeń dla odbiorników połączonych szeregowo

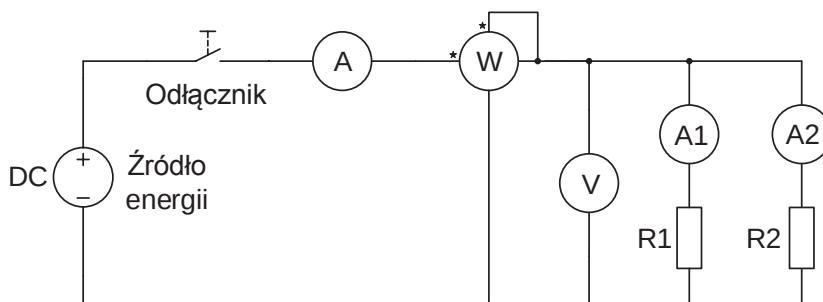
I [A]	U [V]		U1 [V]	U2 [V]	P [W]		P1 [W]	P2 [W]	Rodzaj odbiornika	
	wartość zmierzona	wartość obliczona								
					R1 _{zm} =..... Ω	R2 _{zm} =..... Ω				
									R1 _{obl} [Ω]	R2 _{obl} [Ω]

Tab. 1.3. Wzory i obliczenia dla wybranej serii pomiarów (połączenie szeregowe)

Wybrana seria pomiarów		I [A]	U [V]	U1 [V]	U2 [V]	R1 [Ω]	R2 [Ω]
Wzory i obliczenia							
II Prawo Kirchhoffa	wzór						
	obliczenie						
Rezystancja zastępcza R_z [Ω]	wzór						
	obliczenie						
Energia elektryczna zużyta w czasie pięciu minut W [J], W [Wh]	wzór						
	obliczenie						

1.3. Połączenie równoległe dwóch odbiorników

Należy zmierzyć rezystancje zastosowanych odbiorników R1 i R2. Połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 1.4. Zwiększać napięcie źródłowe i dla każdej nastawionej wartości zmierzyć spadek napięcia na odbiornikach, prądy w poszczególnych gałęziach i moc odbiorników. Obliczyć natężenie prądu pobieranego ze źródła, moc całkowitą i moc każdego odbiornika oraz rezystancje odbiorników. Wyniki pomiarów i obliczeń zanotować w tabeli 1.4. Wykreślić charakterystyki $I=f(U)$, $I1=f(U)$, $I2=f(U)$ na jednym wykresie oraz $R1=f(I1)$ i $R2=f(I2)$ na drugim wykresie. Dla jednej wybranej serii pomiarów napisać pierwsze prawo Kirchhoffa (wzór i obliczenie), obliczyć rezystancję zastępczą dwóch odbiorników i energię elektryczną pobraną ze źródła zasilania w czasie pięciu minut pracy odbiorników (wartość energii wyrazić w J i Wh). Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli 1.5.



Rys. 1.4. Schemat obwodu do sprawdzenia prawa Ohma i pierwszego prawa Kirchhoffa (połączenie równoległe odbiorników)

Tab. 1.4. Wyniki pomiarów i obliczeń dla odbiorników połączonych równolegle

U [V]	I [A]		I1 [A]	I2 [A]	P [W]		P1 [W]	P2 [W]	Rodzaj odbiornika	
	wartość zmierzona	wartość obliczona								
					R1 _{zm} =..... Ω	R2 _{zm} =..... Ω				
									R1 _{obl} [Ω]	R2 _{obl} [Ω]

Tab. 1.5. Wzory i obliczenia dla wybranej serii pomiarów (połączenie równoległe)

Wybrana seria pomiarów		U [V]	I [A]	I1 [A]	I2 [A]	R1 [Ω]	R2 [Ω]
Wzory i obliczenia							
I Prawo Kirchhoffa	wzór						
	obliczenie						
Rezystancja zastępcza R _z [Ω]	wzór						
	obliczenie						
Energia elektryczna zużyta w czasie pięciu minut W [J], W [Wh]	wzór						
	obliczenie						

2. Pomiary w jednofazowych obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego

Celem ćwiczenia jest poznanie i doświadczalne sprawdzenie sposobów pomiaru i obliczeń podstawowych wielkości elektrycznych dla różnych rodzajów odbiorników w jednofazowych obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

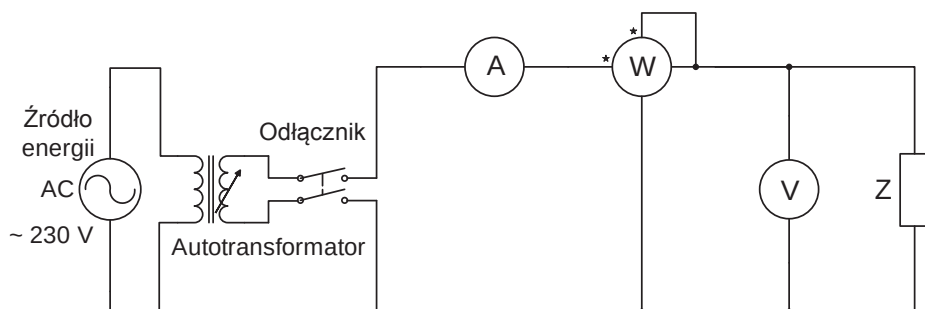
1. Program ćwiczenia
2. Wielkości fizyczne występujące w jednofazowych obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego
3. Rodzaje i charakterystyka odbiorników w obwodach prądu zmiennego
4. Związki matematyczne pomiędzy wielkościami elektrycznymi w obwodach prądu zmiennego

2.1. Pomiar wartości skutecznej napięcia sinusoidalnie zmiennego w sieci jednofazowej

Należy zwiększać napięcie za pomocą autotransformatora i zmierzyć jego wartość miernikiem elektromechanicznym i elektronicznym, tak wybierając zakresy mierników, aby pomiar był jak najbardziej dokładny. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 2.1.

2.2. Pomiar napięcia, prądu i mocy czynnej odbiornika elektrycznego

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 2.1. Zwiększać napięcie źródłowe i dla każdej nastawionej wartości zmierzyć spadek napięcia, prąd i moc czynną odbiornika. Obliczyć impedancję, współczynnik mocy $\cos \varphi$, rezystancję, reaktancję, indukcyjność, pojemność, moc pozorną i bierną odbiornika. Dodatkowo wykonać pomiar napięcia, prądu, mocy i współczynnika mocy odbiornika zasilanego napięciem znamionowym, za pomocą cęgowego miernika mocy. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabelach 2.2–2.5. Dla wybranego przypadku narysować trójkąt oporności i mocy.



Rys. 2.1. Schemat obwodu do pomiaru napięcia, prądu i mocy czynnej odbiornika elektrycznego

Tab. 2.1. Wyniki pomiaru napięcia skutecznego

U [V]	woltomierz elektromechaniczny										
U [V]	woltomierz elektroniczny										

Tab. 2.2. Wyniki pomiarów i obliczeń dla odbiornika rezystancyjnego

Rodzaj, nazwa i wielkości znamionowe odbiornika	Wielkości zmierzone			Wielkości obliczone					
	U [V]	I [A]	P [W]	Z [Ω]	cos φ	R [Ω]	X [Ω]	S [VA]	Q [var]
Odbiornik rezystancyjny									
.....									
.....									
.....									
R _{odb} =.....Ω (wartość zmierzona)									
Pomiar cęgowym miernikiem mocy									

Tab. 2.3. Wyniki pomiarów i obliczeń dla odbiornika indukcyjnego

Rodzaj, nazwa i wielkości znamionowe odbiornika	Wielkości zmierzone			Wielkości obliczone						
	U [V]	I [A]	P [W]	Z [Ω]	cos φ	R [Ω]	X _L [Ω]	L [H]	S [VA]	Q [var]
Odbiornik indukcyjny R _{odb} =.....Ω (wartość zmierzona)										
Pomiar cęgowym miernikiem mocy										

Tab. 2.4. Wyniki pomiarów i obliczeń dla odbiornika pojemnościowego

Rodzaj, nazwa i wielkości znamionowe odbiornika	Wielkości zmierzone			Wielkości obliczone						
	U [V]	I [A]	P [W]	Z [Ω]	cos φ	R [Ω]	X _C [Ω]	C [F]	S [VA]	Q [var]
Odbiornik pojemnościowy R _{odb} =.....Ω (wartość zmierzona)										
Pomiar cęgowym miernikiem mocy										

Tab. 2.5. Wyniki pomiarów i obliczeń dla odbiornika rezystancyjno-indukcyjnego

Rodzaj, nazwa i wielkości znamionowe odbiornika	Wielkości zmierzone			Wielkości obliczone						
	U [V]	I [A]	P [W]	Z [Ω]	cos φ	R [Ω]	X _L [Ω]	L [H]	S [VA]	Q [var]
Odbiornik rezystancyjno- indukcyjny R _{odb} =.....Ω (wartość zmierzona)										
Pomiar cęgowym miernikiem mocy										

3. Pomiary w trójfazowych obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego

Celem ćwiczenia jest poznanie i doświadczalne sprawdzenie sposobów łączenia źródeł energii i odbiorników oraz metod pomiaru i obliczeń wielkości elektrycznych w trójfazowych obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Program ćwiczenia
2. Rodzaje połączeń źródeł energii i odbiorników w układach trójfazowych (schematy, zależności matematyczne dotyczące napięć i prądów)
3. Pomiar i obliczanie mocy odbiorników trójfazowych (odbiornik symetryczny i niesymetryczny, układ czteroprzewodowy i trójprzewodowy) – schematy i zależności matematyczne

3.1. Pomiar wartości skutecznej napięć sinusoidalnie zmiennych w sieci trójfazowej

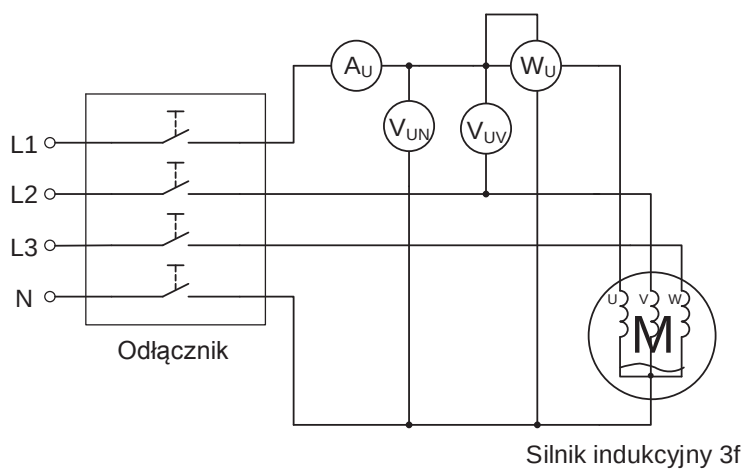
Należy zmierzyć napięcia fazowe (pomiędzy punktem fazowym i neutralnym) oraz napięcia międzyfazowe (pomiędzy punktami fazowymi) za pomocą miernika elektromechanicznego i elektronicznego, tak wybierając ich zakresy aby pomiar był jak najbardziej dokładny. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 3.1.

Tab. 3.1. Wyniki pomiaru napięć w sieci trójfazowej

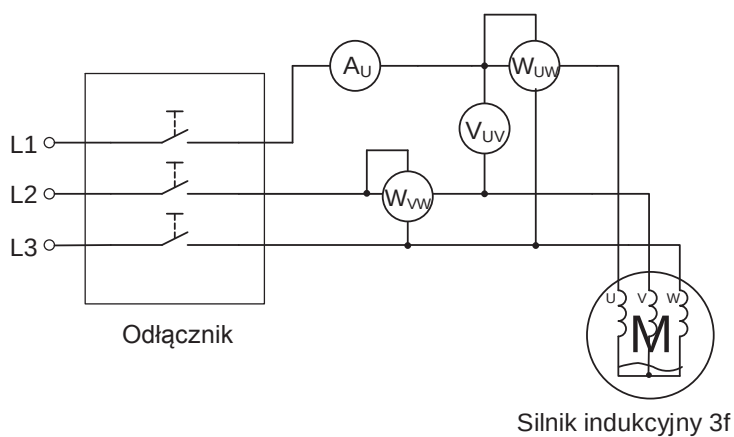
Rodzaj miernika \ Rodzaj napięcia	Napięcia fazowe			Napięcia międzyfazowe		
	U_{L1-N} [V]	U_{L2-N} [V]	U_{L3-N} [V]	U_{L1-L2} [V]	U_{L1-L3} [V]	U_{L2-L3} [V]
Woltomierz elektromechaniczny						
Woltomierz elektroniczny						

3.2. Pomiar spadków napięć, prądów i mocy czynnej odbiornika trójfazowego

Należy połączyć uzwojenia silnika w gwiazdę i zasilić z sieci trójfazowej w układzie czteroprzewodowym i trójprzewodowym (według schematów zamieszczonych na rysunkach 3.1 i 3.2). Następnie dokonać rozruchu silnika i przeprowadzić pomiary napięć, prądów i mocy czynnej w momencie włączenia silnika oraz podczas pracy w stanie ustalonym. Ocenic czy odbiornik jest symetryczny i obliczyć moc czynną oraz jeżeli jest to możliwe moc pozorną, bierną i współczynnik mocy $\cos \varphi$ silnika. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabelach 3.2 i 3.3.



Rys. 3.1. Schemat układu trójfazowego czteroprzewodowego do pomiaru spadków napięć, prądów i mocy czynnej silnika trójfazowego



Rys. 3.2. Schemat układu trójfazowego trójprzewodowego do pomiaru spadków napięć, prądów i mocy czynnej silnika trójfazowego

4. Badanie elektrycznych źródeł światła

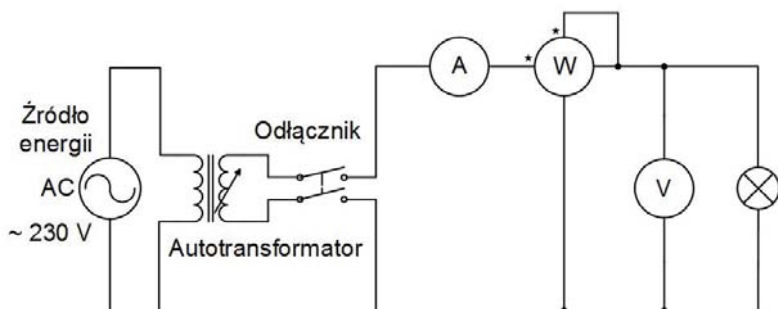
Celem ćwiczenia jest poznanie budowy, zasady działania, specyfiki pracy i metodyki badań elektrycznych źródeł światła oraz sposobów pomiarów i obliczeń wielkości fizycznych charakteryzujących te urządzenia.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Program ćwiczenia
2. Podstawowe wielkości fizyczne w technice oświetleniowej (definicje)
3. Żarowe źródła światła – rodzaje, budowa
4. Fluorescencyjne i wyładowcze źródła światła – rodzaje, budowa, zasada działania
5. Lampy diodowe – zasada działania, budowa, problemy eksploatacyjne
6. Klasyczne i elektroniczne układy zapłonowe świetlówek – przyczyny stosowania, zasada działania, porównanie
7. Zalety i wady żarowych, fluorescencyjnych, wyładowczych i diodowych źródeł światła

4.1. Badanie elektrycznych źródeł światła stosowanych w pomieszczeniach mieszkalnych

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 4.1. Zwiększać napięcie za pomocą autotransformatora i dla każdej nastawionej wartości zmierzyć prąd, moc czynną i natężenie oświetlenia dla badanych źródeł światła. Obliczyć impedancję, rezystancję, reaktancję i współczynnik mocy badanych elementów. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabelach 4.1, 4.2, 4.3 i 4.4. Narysować na wspólnych wykresach charakterystyki dla badanych lamp, prądowo-napięciowe $I=f(U)$ oraz $E=f(P)$.



Rys. 4.1. Schemat układu do badania żarówki, świetlówki kompaktowej i lampy diodowej

Tab. 4.1. Wyniki badania żarówki konwencjonalnej

Żarówka konwencjonalna							
$U_n=$	$I_n=$	$P_n=$	$\Phi_n=$	$\eta=$	$T_c=$	$R_a=$	$T=$
U [V]	I [A]	P [W]	E [lx]	Z [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	cos φ

Tab. 4.2. Wyniki badania żarówki halogenowej

Żarówka halogenowa							
$U_n=$	$I_n=$	$P_n=$	$\Phi_n=$	$\eta=$	$T_c=$	$R_a=$	$T=$
U [V]	I [A]	P [W]	E [lx]	Z [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	cos φ

Tab. 4.3. Wyniki badania świetłówki kompaktowej

Świetłówka kompaktowa							
$U_n=$	$I_n=$	$P_n=$	$\Phi_n=$	$\eta=$	$T_c=$	$R_a=$	$T=$
U [V]	I [A]	P [W]	E [lx]	Z [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	cos φ

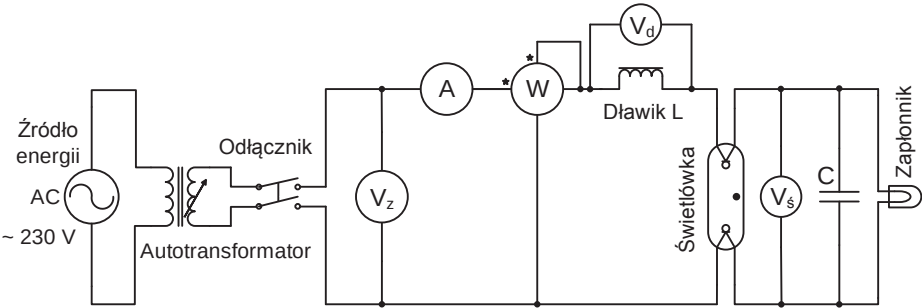
Tab. 4.4. Wyniki badania lampy diodowej

Lampa diodowa							
$U_n=$	$I_n=$	$P_n=$	$\Phi_n=$	$\eta=$	$T_c=$	$R_a=$	$T=$
U [V]	I [A]	P [W]	E [lx]	Z [Ω]	R [Ω]	X [Ω]	cos φ

4.2. Badanie świetłówki z konwencjonalnym układem zapłonowym

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 4.2. Ustawić napięcie za pomocą autotransformatora i zamknąć odłącznik obserwując przebieg zapłonu świetłówki. Zmierzyć napięcia (dławika i świetłówki) w momencie zapłonu oraz napięcia (zasilania, dławika i świetłówki), prąd, moc czynną i natężenie oświetlenia w stanie świecenia świetłówki. Obliczyć współczyn-

nik mocy $\cos \varphi$ dla układu „światłówka-dławik” i wykreślić zależność $E=f(P)$. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli 4.5.



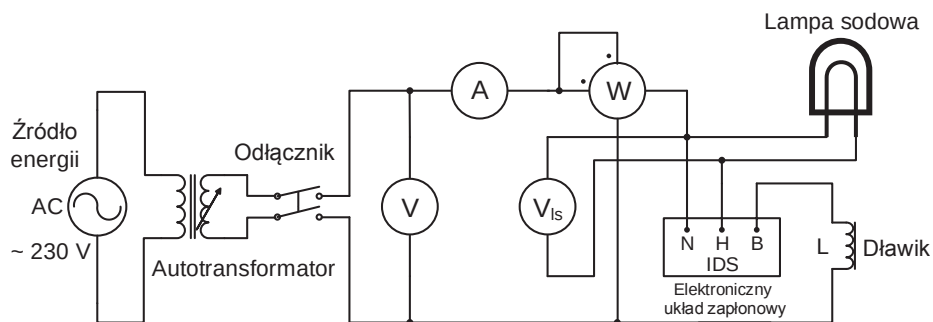
Rys. 4.2. Schemat układu do badania światłówki z konwencjonalnym układem zapłonowym

Tab. 4.5. Wyniki badania światłówki z konwencjonalnym układem zapłonowym

$U_n=$	$I_n=$	$P_n=$	$\Phi_n=$	$\eta=$	$T_c=$	$R_a=$	$T=$
	U_z [V]	U_d [V]	U_s [V]	I [A]	P [W]	E [lx]	$\cos \varphi$ (św.-dł.)
zapłon							
stan świecenia							

4.3. Badanie lampy sodowej

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 4.3. Zamknąć odłącznik obserwując przebieg zapłonu sodówki. Zmierzyć napięcia (zasilania i lampy), prąd, moc czynną i natężenie oświetlenia w momencie zamknięcia odłącznika, a następnie w czasie rozświeclania lampy. Obliczyć współczynnik mocy $\cos \varphi$ lampy wyładowczej. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli 4.6.



Rys. 4.3. Schemat układu do badania lampy sodowej

Tab. 4.6. Wyniki badania lampy sodowej

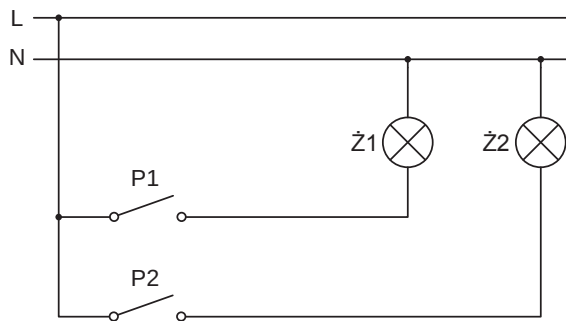
Rodzaj lampy:							
$U_n =$	$I_n =$	$P_n =$	$\Phi_n =$	$\eta =$	$T_c =$	$R_a =$	$T =$
t [s]	U [V]	U_{Is} [V]	I [A]	P [W]	E [lx]	$\cos \varphi$	
0							
30							
60							
90							
120							
150							
180							
210							
240							
270							
300							

4.4. Badanie przełącznika świecznikowego

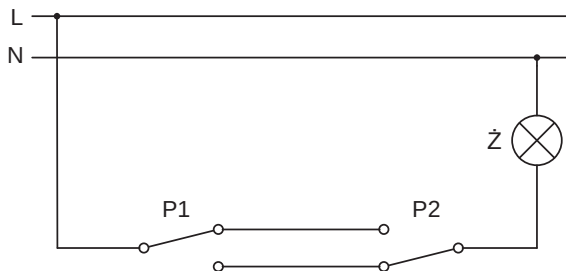
Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 4.4. Przeprowadzić próbę działania układu. W sprawozdaniu należy krótko opisać zasadę działania układu.

4.5. Badanie przełącznika schodowego

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 4.5. Przeprowadzić próbę działania układu. W sprawozdaniu należy krótko opisać zasadę działania układu.



Rys. 4.4. Schemat układu do badania przełącznika świecznikowego



Rys. 4.5. Schemat układu do badania przełącznika schodowego

5. Badanie maszyn prądu stałego

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy, zasady działania i specyfiki pracy maszyn prądu stałego oraz metodyki ich badań, w tym podstawowych pomiarów i wyznaczania charakterystyk w różnych stanach pracy.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Program ćwiczenia
2. Rodzaje maszyn prądu stałego i ich właściwości
3. Budowa i zasada działania maszyn prądu stałego
4. Zależności matematyczne w teorii maszyn prądu stałego

5.1. Oględziny elementów maszyn prądu stałego

Należy przeprowadzić oględziny elementów maszyn prądu stałego pod kątem zapoznania się z budową. Wykonać opis według szablonu „nazwa elementu – funkcja” z umownym podziałem części na trzy grupy:

- a) elementy mechaniczne,
- b) elementy przewodzące prąd,
- c) elementy magnetyczne.

5.2. Badanie silnika prądu stałego dla różnych konfiguracji jego uzwojeń

Uzwojenia twornika i wzbudzenia silnika należy połączyć w taki sposób, aby silnik pracował jako:

- a) obcowzbudny (rys. 5.1),
- b) bocznikowy (rys. 5.2),
- c) szeregowy (rys. 5.3).

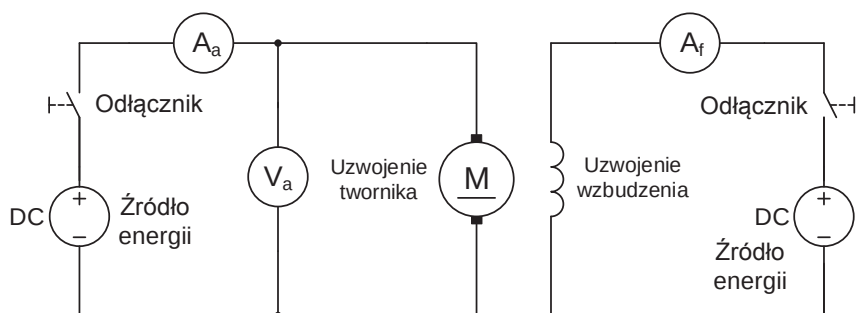
Jako źródła energii elektrycznej do zasilania uzwojeń zastosować zasilacze. Włączyć odpowiednio mierniki do pomiaru napięcia twornika i wzbudzenia oraz prądu twornika i wzbudzenia. Wykonać przykładowe pomiary regulując napięcie i prąd za pomocą zasilaczy. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli 5.1. Zaobserwować właściwości ruchowe i zmiany prędkości obrotowej silnika dla poszczególnych rodzajów połączeń jego uzwojeń.

5.3. Przetwarzanie energii w układzie „silnik-prądnica”

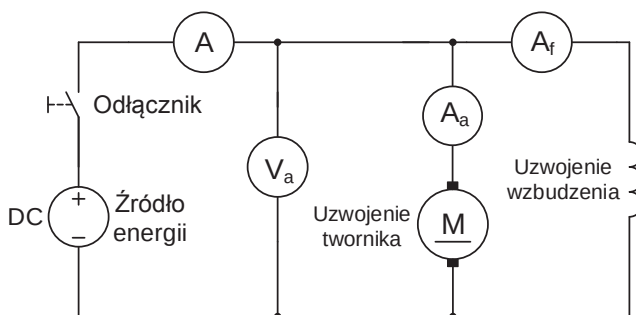
Należy zaprojektować i połączyć elektryczny układ napędowy. Silnik służący do napędu prądnicy należy zasilć napięciem znamionowym. Włączyć mierniki do pomiaru napięcia i prądu silnika oraz prądnicy. Regulować obciążenie prądnicy i zapisać wartości napięć i prądów. Obliczyć moc elektryczną silnika i prądnicy oraz sprawność układu „silnik-prądnica”. Wykreślić charakterystyki $P_s=f(I_s)$, $P_p=f(I_p)$, $\eta=f(I_s)$.

Tab. 5.1. Wyniki badania silnika dla różnych połączeń uzwojeń

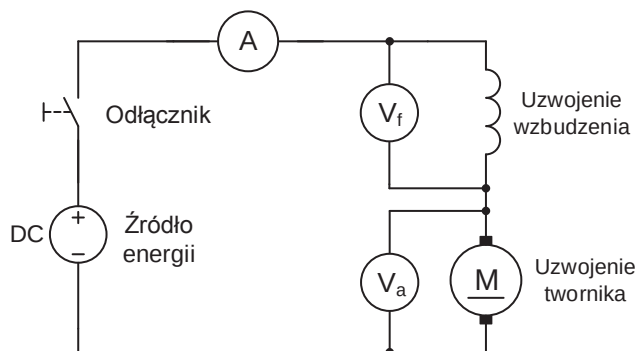
Silnik obcowzbudny			Silnik bocznikowy			Silnik szeregowy		
U_a [V]	I_a [A]	I_f [A]	U [V]	I_a [A]	I_f [A]	U_a [V]	U_f [V]	I [A]



Rys. 5.1. Schemat układu do badania silnika obcowzbudnego



Rys. 5.2. Schemat układu do badania silnika bocznikowego



Rys. 5.3. Schemat układu do badania silnika szeregowego

Tab. 5.2. Wyniki badania układu "silnik-prądnica"

Wielkości zmierzone				Wielkości obliczone		
Napięcie silnika U_s [V]	Prąd silnika I_s [A]	Napięcie prądnicy U_p [V]	Prąd prądnicy I_p [A]	Moc elektryczna silnika P_s [W]	Moc elektryczna prądnicy P_p [W]	Sprawność układu η [%]

5.4. Współpraca silnika elektrycznego z układem sterowania

Należy połączyć wybrany silnik z odpowiednim układem sterowania, zaobserwować możliwości manewrowe tego układu oraz sposób jego obsługi i zmiany programu sterującego. Spostrzeżenia i wyniki analizy zapisać we wnioskach.

6. Badanie maszyn prądu zmiennego

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy, zasady działania i specyfiki pracy maszyn prądu zmiennego oraz metodyki ich badań, w tym podstawowych pomiarów i wyznaczania charakterystyk w różnych stanach pracy.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Program ćwiczenia
2. Rodzaje maszyn prądu zmiennego i ich właściwości
3. Budowa i zasada działania maszyn prądu zmiennego
4. Zależności matematyczne w teorii maszyn prądu zmiennego
5. Stany pracy i parametry transformatora

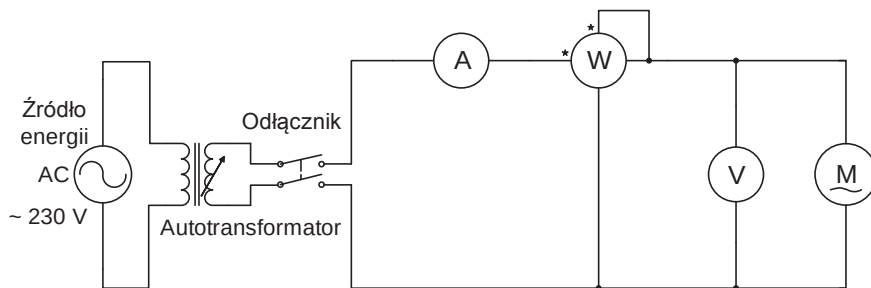
6.1. Oględziny elementów maszyn prądu zmiennego

Należy przeprowadzić oględziny elementów różnych maszyn prądu zmiennego pod kątem zapoznania się z budową. Wykonać opis według szablonu „nazwa elementu – funkcja” z umownym podziałem części na trzy grupy:

- a) elementy mechaniczne,
- b) elementy przewodzące prąd,
- c) elementy magnetyczne.

6.2. Badanie jednofazowego silnika komutatorowego

Należy połączyć układ elektryczny zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 6.1. Regulować napięcie i przeprowadzić pomiary prądu, mocy oraz prędkości obrotowej silnika. Dokonać zmiany obciążenia silnika przy zasilaniu napięciem znamionowym. Obliczyć współczynnik mocy maszyny. Wyniki pomiarów i obliczeń zapisać w tabeli 6.1. Wykreślić charakterystyki $U=f(I)$, $P=f(I)$, $n=f(I)$, $\cos \varphi=f(I)$.

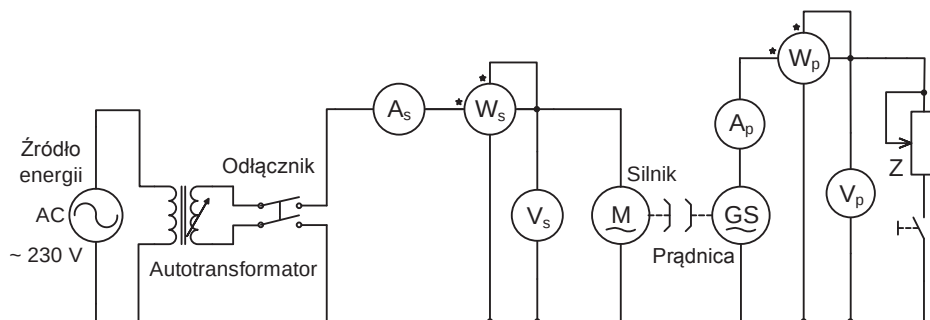


Rys. 6.1. Schemat układu do badania jednofazowego silnika prądu zmiennego

6.3. Badanie jednofazowego silnika indukcyjnego klatkowego

Należy połączyć układ elektryczny zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 6.2. Ustawić znamionowe napięcie zasilania silnika. Regulować obciążenie silnika poprzez zmianę prądu obciążenia prądnicy napędzanej przez niego. Dopuszczalne jest krótkotrwałe przeciążenie silnika, pomiary należy wtedy wykonywać w szybkim tempie. Wyniki pomiarów należy zapisać w tabeli 6.2. Wykreślić charakterystyki $\cos \varphi = f(I_s)$, $\eta = f(I_s)$, $n = f(I_s)$.

Tab. 6.1. Wyniki badania silnika komutatorowego

[illegible]

Rys. 6.2. Schemat układu do badania jednofazowego silnika prądu zmiennego w stanie obciążenia

6.4. Współpraca silnika indukcyjnego z falownikiem

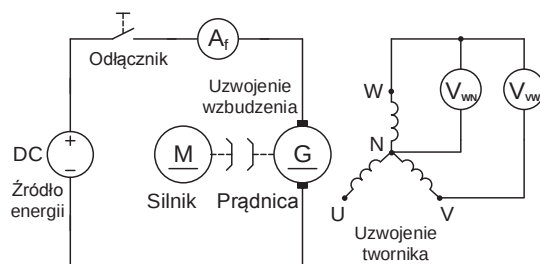
Należy przeprowadzić próbę sterowania trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego za pomocą układu falownikowego. Zaobserwować możliwości manewrowe układu sterującego i zmienność prędkości obrotowej silnika.

Tab. 6.2. Wyniki badania silnika indukcyjnego w stanie obciążenia

Wielkości znamionowe silnika:								
U_s [V]	I_s [A]	P_s [W]	U_p [V]	I_p [A]	P_p [W]	n [obr/min]	Wsp. mocy silnika $\cos \varphi$	Sprawność układu η [%]

6.5. Badanie prądnicy synchronicznej

Należy połączyć układ elektryczny zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 6.3 w celu zbadania trójfazowej prądnicy synchronicznej w stanie jałowym. Do pomiarów wykorzystać alternator samochodowy z wyprowadzonymi końcami uzwojenia twornika i wzbudzenia, bez układu prostowniczego i regulatora napięcia. Regulować prąd wzbudzenia prądnicy przy stałej prędkości obrotowej, a następnie zmieniać prędkość obrotową przy stałym prądzie wzbudzenia. Zanotować wartości indukowanych napięć fazowych i międzyfazowych prądnicy w tabeli 6.3. Wykreślić charakterystyki $E=f(I_f)$ oraz $E=f(n)$ dla wszystkich napięć fazowych i międzyfazowych.



Rys. 6.3. Schemat układu do badania trójfazowej prądnicy synchronicznej w stanie jałowym

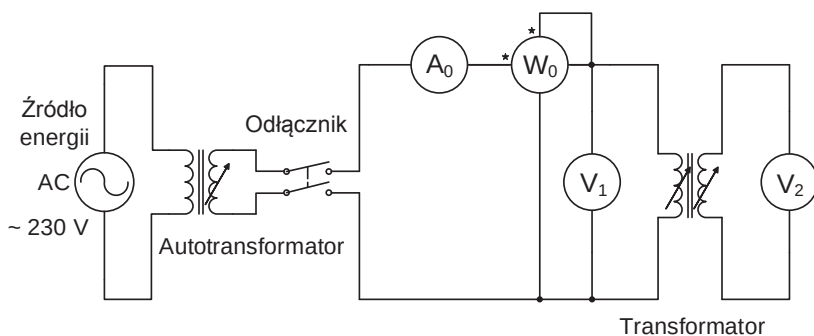
6.6. Badanie transformatora jednofazowego

6.6.1. Pomiar rezystancji uzwojeń

Należy zmierzyć rezystancję uzwojeń badanego transformatora, wyniki pomiarów oraz wartości wielkości znamionowych wpisać do tabeli 6.4.

6.6.2. Stan jałowy

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 6.4. Zmieniając autotransformatorem napięcie zasilające, przeprowadzić próbę stanu jałowego. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawzić w tabeli 6.5. Wykreślić charakterystyki $I_0=f(U_2)$, $\Delta P_0=f(U_2)$, $\cos \varphi_0=f(U_2)$.



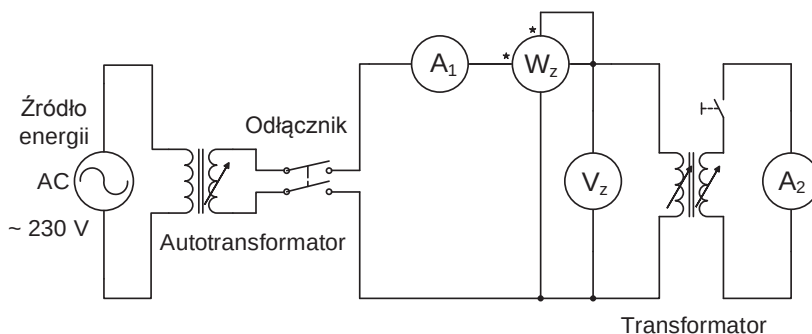
Rys. 6.4. Schemat układu do badania transformatora (stan jałowy)

Tab. 6.5. Wyniki badania transformatora – stan jałowy

U_1 [V]	U_2 [V]	I_0 [A]	ΔP_0 [W]	S_0 [VA]	$\cos \varphi_0$	I_{ocz} [A]	I_μ [A]	v_u

6.6.3. Stan zwarcia pomiarowego

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 6.5. zwracając szczególną uwagę na właściwy dobór zakresów pomiarowych przyrządów. Regulując autotransformatorem napięcie zasilające od zera, nastawić takie jego wartości, przy których w obwodzie wtórnym popłynie prąd równy $0,2I_{2n}$, $0,4I_{2n}$, $0,6I_{2n}$, $0,8I_{2n}$, I_{2n} , $2,2I_{2n}$. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawzić w tabeli 6.6. Wykreślić charakterystyki $I_1 = f(U_z)$, $\Delta P_z = f(U_z)$, $\cos \varphi_z = f(U_z)$.



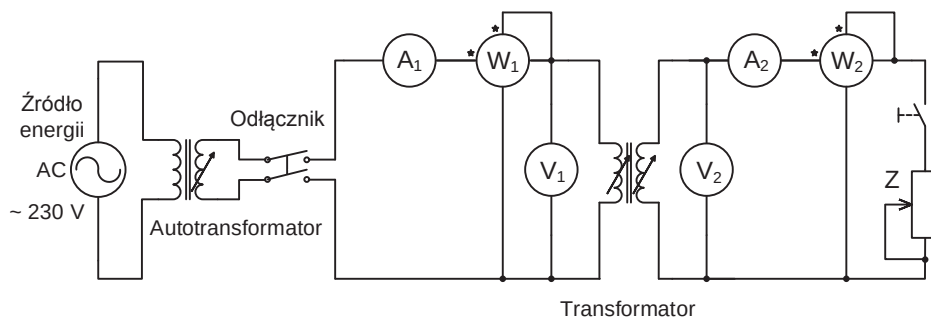
Rys. 6.5. Schemat układu do badania transformatora (stan zwarcia pomiarowego)

6.6.4. Stan obciążenia

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 6.6. Regulując rezystorem wartość prądu uzwojenia wtórnego odczytać wskazania mierników dla wartości $0,2I_{2n}$, $0,4I_{2n}$, $0,6I_{2n}$, $0,8I_{2n}$, I_{2n} , $2,2I_{2n}$. Wyniki pomiarów i obliczeń zestawzić w tabeli 6.7. Wykreślić charakterystyki $U_2 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $\cos \varphi_2 = f(P_2)$.

Tab. 6.6. Wyniki badania transformatora – stan zwarcia pomiarowego

I_1 [A]	I_2 [A]	$\Delta P_z = \Delta P_{Cu}$ [W]	U_z [V]	v_i	$\cos \varphi_z$	u_z [%]



Rys. 6.6. Schemat układu do badania transformatora (stan obciążenia)

Tab. 6.7. Wyniki badania transformatora – stan obciążenia

$U_1 = \dots\dots\dots V$							
I_1 [A]	I_2 [A]	P_1 [W]	P_2 [W]	U_2 [V]	$\cos \varphi_1$	$\cos \varphi_2$	η [%]

7. Pomiary wielkości nieelektrycznych

Celem ćwiczenia jest poznanie metodyki wykonywania pomiarów wielkości nieelektrycznych z wykorzystaniem czujników i przetworników elektrycznych oraz poznanie ich budowy, zasady działania, sposobów łączenia i zależności matematycznych związanych z ich działaniem.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Program ćwiczenia
2. Metodyka pomiaru wielkości nieelektrycznych
3. Czujniki stosowane w pomiarach wielkości nieelektrycznych
4. Sposoby pomiaru temperatury (metodyka i przyrządy)
5. Sposoby pomiaru ciśnienia i siły (metodyka i przyrządy)
6. Sposoby pomiaru prędkości obrotowej (metodyka i przyrządy)
7. Wielkości magnetyczne i metodyka ich pomiarów

7.1. Pomiar temperatury

7.1.1. Badanie czujnika temperatury

Należy umieścić czujnik termistorowy i termometr wzorcowy w naczyniu z wodą, a następnie połączyć czujnik ze wskaźnikiem temperatury i źródłem zasilania oraz wstawić woltomierz i amperomierz do pomiaru napięcia i prądu czujnika. Zwiększać temperaturę wody i zapisywać wskazania termometru wzorcowego T_{wz} oraz wskaźnika T_{ws} . Na podstawie pomiarów napięcia i prądu obliczyć rezystancję czujnika oraz wykreślić charakterystykę $R=f(T_{wz})$. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli 7.1.

Tab. 7.1. Wyniki badania czujnika temperatury

T_{wz} [°C]										
T_{ws} [°C]										
U [V]										
I [A]										
R [Ω]										

7.1.2. Pomiar temperatury za pomocą multimetru

Należy przeprowadzić próbę pomiaru temperatury wody z wykorzystaniem czujnika termoparowego i multimetru. Zwiększać temperaturę wody i wykonać pomiary za pomocą termometru wzorcowego oraz multimetru z czujnikiem. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 7.2. Wykreślić zależność temperatury mierzonej za pomocą multimetru od temperatury wskazywanej przez termometr $T_m=f(T_{wz})$.

Tab. 7.2. Wyniki pomiaru temperatury

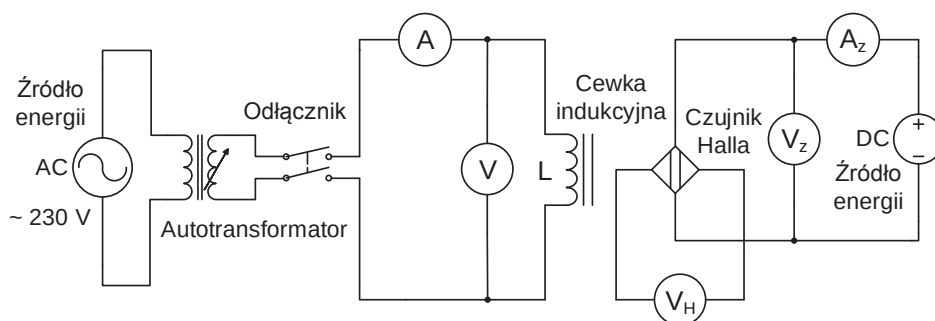
Temperatura wskazywana przez termometr T_{wz} [°C]								
Temperatura wskazywana przez multimetr T_m [°C]								

7.2. Pomiar prędkości obrotowej

Badania należy wykonać na stanowisku do pomiaru prędkości obrotowej wyposażonym w silnik elektryczny, czujniki indukcyjne, zasilacz i oscyloskop. Uzwojenia silnika należy połączyć w sposób szeregowy, a prędkość obrotową regulować przez zmianę napięcia zasilacza. Częstotliwość i amplitudę napięcia czujników zmierzyć za pomocą oscyloskopu dwukanałowego. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 7.3 i naszkicować przebiegi napięć badanych czujników. Obliczyć prędkość obrotową i kątową silnika uwzględniając, że w czujniku zamontowanym fabrycznie występuje osiem uzwojeń (cewek). Wykreślić charakterystyki $n=f(U_s)$ i $U_{max}=f(n)$ dla obydwu czujników na wspólnym wykresie.

7.3. Pomiar indukcji magnetycznej za pomocą czujnika Halla

Należy wprowadzić czujnik Halla w obszar pola magnetycznego cewki solenoidalnej i zwiększając natężenie prądu w uzwojeniu zmierzyć napięcie indukowane w czujniku. Następnie na podstawie wykresu $B=f(U_H)$ wyznaczyć wartość indukcji magnetycznej. Badanie przeprowadzić w układzie elektrycznym, którego schemat zamieszczono na rysunku 7.1. Jako źródło energii elektrycznej do zasilania czujnika Halla zastosować zasilacz prądu stałego z regulacją napięcia i prądu. Wyniki pomiarów i odczytów zapisać w tabeli 7.4. Wykreślić charakterystykę $B=f(I)$.



Rys. 7.1. Schemat układu do pomiaru indukcji magnetycznej

[illegible]

Tab. 7.4. Wyniki pomiaru indukcji magnetycznej

Napięcie zasilania czujnika $U_z = \dots\dots\dots$ V			
Napięcie U [V]	Prąd I [A]	Napięcie czujnika U_H [V]	Indukcja magnetyczna B [T]

7.4. Pomiar natężenia oświetlenia

Należy przeprowadzić próbę pomiaru natężenia oświetlenia wybranych źródeł światła z wykorzystaniem czujnika multimetru lub luksonierza. Zwiększać natężenie oświetlenia i wykonywać pomiary w tym samym punkcie przestrzeni i w jednakowym położeniu miernika. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli 7.5.

Tab. 7.5. Wyniki pomiaru natężenia oświetlenia wybranych źródeł światła

Rodzaj źródła światła i jego parametry:										
E [lx]										
Rodzaj źródła światła i jego parametry:										
E [lx]										

8. Badanie chemicznych źródeł energii elektrycznej

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy, zasady działania, rodzajów i specyfiki pracy chemicznych źródeł energii elektrycznej oraz metodyki ich badań, w tym podstawowych pomiarów i wyznaczania charakterystyki napięciowo-prądowej.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Program ćwiczenia
2. Zależności matematyczne w dziedzinie elektrochemii
3. Charakterystyka techniczna najpopularniejszych baterii i akumulatorów
4. Budowa i zasada działania ogniw paliwowych
5. Problemy związane z rozwojem chemicznych źródeł energii

8.1. Oględziny i pomiar napięcia wybranych chemicznych źródeł energii elektrycznej

Należy określić wartość napięcia znamionowego wybranych źródeł energii, a następnie dokonać pomiaru napięcia za pomocą miernika elektromechanicznego i elektronicznego, tak wybierając ich zakresy, aby pomiar był jak najbardziej dokładny. Na podstawie pomiarów należy określić stan źródła energii i stopień jego rozładowania. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 8.1.

Tabela 8.1. Wyniki pomiaru napięcia i ocena stopnia rozładowania chemicznych źródeł energii

Rodzaj i typ źródła energii	Napięcie znamionowe źródła U_n [V]	Napięcie zmierzone miernikiem elektromechanicznym U_{em} [V]	Napięcie zmierzone miernikiem elektronicznym U_{el} [V]	Stan źródła energii i stopień wyładowania

8.2. Wyznaczanie charakterystyki napięciowo-prądowej baterii i akumulatorów

Należy odpowiednio dobrać regulowany rezystor obciążeniowy oraz woltomierz i amperomierz, następnie połączyć te elementy i wyznaczyć charakterystykę napięciowo-prądową wybranych baterii i akumulatorów. Odczyty z mierników należy wykonywać jak najszybciej, ale po ustabilizowaniu się pomiaru. W przypadku utraty stabilności i dużej zmienności wskazań mierników przy stałym obciążeniu, pomiary należy zakończyć. Wyniki pomiarów wpisać do tabeli 8.2, obliczyć moc i wykreślić charakterystyki $U=f(I)$ oraz $P=f(I)$.

Tabela. 8.2. Wyniki badania chemicznych źródeł energii pod obciążeniem

Rodzaj źródła energii	Wielkości znamionowe	L. p.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		U [V]										
		I [A]										
		I/I_n										
		P [W]										
		U [V]										
		I [A]										
		I/I_n										
		P [W]										
		U [V]										
		I [A]										
		I/I_n										
		P [W]										
		U [V]										
		I [A]										
		I/I_n										
		P [W]										
		U [V]										
		I [A]										
		I/I_n										
		P [W]										

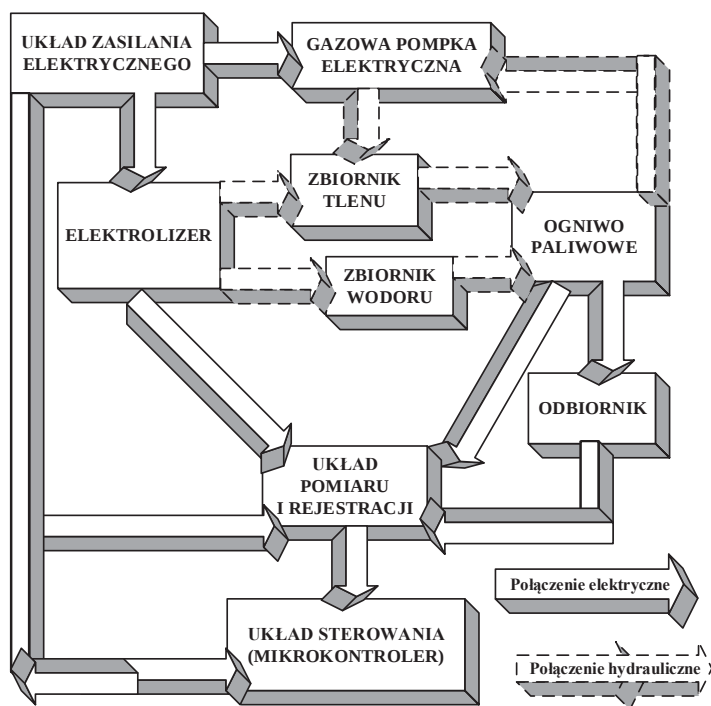
8.3. Badanie ogniwa paliwowego typu PEM

8.3.1. Wyznaczanie charakterystyki napięciowo-prądowej

Należy zapoznać się z zasadą działania i specyfiką stanowiska do badania ogniw paliwowych (rys. 8.1). Następnie odpowiednio dobrać obciążenie oraz woltomierz i amperomierz, połączyć te elementy i wyznaczyć charakterystykę napięciowo-prądową ogniwa. Wyniki pomiarów wpisać do tabeli 8.2, obliczyć moc i wykreślić charakterystyki $U=f(I)$ oraz $P=f(I)$.

8.3.2. Sterowanie ogniwa za pomocą mikrokontrolera

Pomiar wykonać na stanowisku do badania ogniw paliwowych wyposażonym w mikrokontroler, rejestrator i komputer z wymaganym oprogramowaniem. Należy obciążyć ogniwo paliwowe prądem znamionowym i ustalić minimalne napięcie, przy którym mikrokontroler spowoduje włączenie pompki tlenu w celu jego zwiększenia, w tym czasie zarejestrować przebieg napięcia i prądu ogniwa.



Rys. 8.1. Schemat blokowy stanowiska do badania ogniwa paliwowego

8.4. Wykreślenie zbiorczej charakterystyki napięciowo-prądowej

Dla wszystkich badanych chemicznych źródeł energii należy zamieścić na wspólnym wykresie charakterystyki $U=f(I/I_n)$ i porównać ich przebieg.

9. Badanie elementów i zabezpieczeń w instalacji elektrycznej

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy i rodzajów sieci elektrycznych niskiego napięcia, sposobów zabezpieczeń i ochrony przeciwporażeniowej oraz metodyki badań elementów tworzących instalacje elektryczne i sposobów pomiaru podstawowych parametrów tych instalacji.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Rodzaje i symbole układów sieci zasilających niskiego napięcia
2. Skutki przepływu prądu przez ciało człowieka
3. Sposoby ochrony przeciwporażeniowej
4. Rodzaje przewodów i kabli stosowanych w instalacjach niskiego napięcia
5. Klasyfikacja łączników stosowanych w instalacjach elektrycznych niskiego napięcia

9.1. Oględziny elementów instalacji i ochrony przeciwporażeniowej

Należy zapoznać się z budową, zasadą działania i przeznaczeniem poszczególnych elementów instalacji elektrycznych i ochrony przeciwporażeniowej. Rozpoznać poszczególne elementy i krótko je opisać.

9.2. Badanie jednofazowej instalacji elektrycznej niskiego napięcia za pomocą miernika parametrów instalacji

9.2.1. Sprawdzenie poprawności wykonania połączeń przewodu ochronnego

Należy postępować zgodnie z instrukcją obsługi miernika (rys. 9.1) i sprawdzić czy na przewodzie PE nie występuje napięcie elektryczne.

9.2.2. Pomiar parametrów pętli zwarcia w obwodzie L-PE

W zależności od obecności wyłącznika różnicowoprądowego w obwodzie, wybrać odpowiednią metodę badania, zgodnie z instrukcją obsługi miernika. Wprowadzić do pamięci miernika parametry zabezpieczenia występującego w sieci i wartość napięcia potrzebnego do obliczenia prądu zwarcia. Odczytać wartość prądu I_a zapewniającego samoczynne zadziałanie wybranego urządzenia ochronnego w wymaganym czasie t_z . Połączyć miernik z instalacją i wykonać pomiar impedancji pętli zwarcia Z_{L-PE} , spodziewanego prądu zwarcia I_k oraz rezystancji R , reakcji X , napięcia U_{L-PE} i jego częstotliwości f . Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 9.1.

9.2.3. Pomiar parametrów wyłącznika różnicowoprądowego

Po wprowadzeniu do pamięci miernika parametrów wyłącznika i innych niezbędnych informacji należy połączyć miernik z instalacją i wykonać pomiar prądu zadziałania wyłącznika różnicowoprądowego I_A oraz czasu zadziałania t_{At} (dla wy-

znaczonego prądu I_A) i t_A (dla prądu I_{An} i jego krotności). Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 9.1.

9.2.4. Pomiar rezystancji izolacji między przewodami instalacji

Po wyłączeniu napięcia w instalacji za pomocą wyłącznika instalacyjnego należy połączyć miernik z instalacją i zgodnie z instrukcją obsługi wykonać pomiar rezystancji izolacji między przewodem fazowym i neutralnym R_{L-N} , przewodem fazowym i ochronnym R_{L-PE} oraz przewodem neutralnym i ochronnym R_{N-PE} . Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 9.1.

9.2.5. Pomiar rezystancji przewodów i rezystancji izolacji

Zgodnie z instrukcją obsługi miernika wykonać pomiar rezystancji wybranych przewodów elektrycznych oraz rezystancji ich izolacji. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 9.1.



Rys. 9.1. Miernik parametrów instalacji elektrycznej z osprzętem pomiarowym

10. Badanie elementów elektronicznych biernych i półprzewodnikowych bezzłączowych

Celem ćwiczenia jest poznanie rodzajów, budowy, właściwości i zastosowań elementów elektronicznych biernych i półprzewodnikowych bezzłączowych oraz metodyki ich badań, w tym wykonywania podstawowych pomiarów i wyznaczania charakterystyk.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Program ćwiczenia
2. Rodzaje i funkcje elektronicznych elementów biernych
3. Rodzaje i funkcje elektronicznych elementów półprzewodnikowych bezzłączowych
4. Budowa, zasada działania i właściwości rezystorów
5. Budowa, zasada działania i właściwości kondensatorów
6. Budowa, zasada działania i właściwości elementów indukcyjnych

10.1. Badanie rezystorów

10.1.1. Odczyt i pomiar rezystancji oporników

Na podstawie kolorowego kodu paskowego umieszczonego na opornikach i odpowiedniej tabeli należy określić wartość rezystancji wybranych oporników, a następnie dokonać jej pomiaru za pomocą omomierza elektronicznego. Wyniki odczytów i pomiarów zamieścić w tabeli 10.1. Następnie należy połączyć szeregowo oraz równolegle dwa wybrane oporniki i zmierzyć rezystancje tych układów. Wyniki pomiarów należy zamieścić w tabeli 10.1 i porównać z wynikami obliczeń rezystancji zastępczej tych układów.

10.1.2. Wyznaczanie charakterystyki napięciowo-prądowej rezystora

Należy zaprojektować i połączyć układ pomiarowy w celu wyznaczenia charakterystyki napięciowo-prądowej rezystora i obliczenia jego rezystancji. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli 10.2. Wykreślić charakterystyki $U=f(I)$ oraz $R=f(I)$.

Tab. 10.1. Odczytane i zmierzone wartości rezystancji oporników

Rezystancja odczytana $R_{od} [\Omega]$	Rezystancja zmierzona $R_{zm} [\Omega]$	Rezystancja oporników połączonych szeregowo $R_{sz} [\Omega]$		Rezystancja oporników połączonych równolegle $R_r [\Omega]$	
		wartość zmierzona	wartość obliczona	wartość zmierzona	wartość obliczona

Tab. 10.2. Wyniki badania rezystora

U [V]										
I [A]										
R [Ω]										

10.2. Badanie kondensatorów

10.2.1. Odczyt i pomiar pojemności kondensatorów

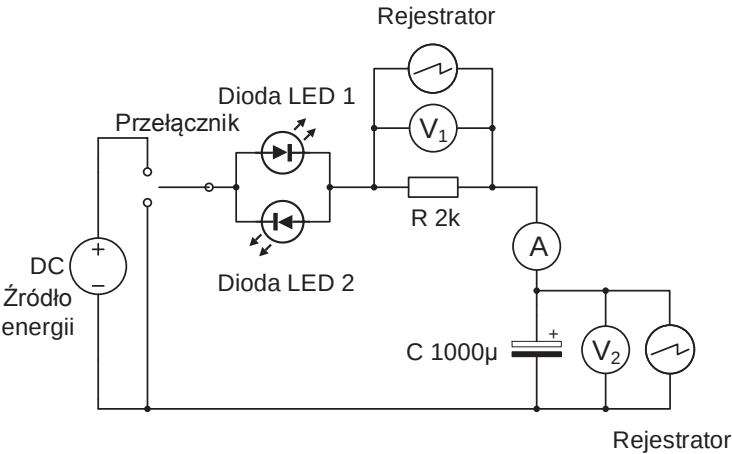
Na podstawie opisu umieszczonego na kondensatorach należy określić wartość ich pojemności, a następnie dokonać jej pomiaru za pomocą multimetru wyposażonego w taką funkcję. Wyniki odczytów i pomiarów zamieścić w tabeli 10.3. Następnie należy połączyć szeregowo oraz równolegle dwa wybrane kondensatory i zmierzyć pojemności tych układów. Wyniki pomiarów należy zamieścić w tabeli 10.3 i porównać z wynikami obliczeń pojemności zastępczej tych układów.

Tab. 10.3. Odczytane i zmierzone wartości pojemności kondensatorów

Pojemność odczytana C_{od} [F]	Pojemność zmierzona C_{zm} [F]	Pojemność kondensatorów połączonych szeregowo C_{sz} [F]		Pojemność kondensatorów połączonych równolegle C_r [F]	
		wartość zmierzona	wartość obliczona	wartość zmierzona	wartość obliczona

10.2.2. Ładowanie i rozładowanie kondensatora

Należy połączyć układ zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 10.1, zastosować źródło zasilania o napięciu 9–12 V, dwie różnokolorowe diody LED, mierniki elektroniczne, rejestrator napięcia i kondensatory elektrolityczne o różnych pojemnościach. Zaobserwować wpływ pojemności kondensatora na czas jego ładowania i rozładowania, przebiegi napięcia na kondensatorze i rezystorze oraz zmiany wartości i kierunku przepływu prądu. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 10.4.



Rys. 10.1. Schemat układu do badania kondensatora

10.3. Badanie cewki indukcyjnej

10.3.1. Wyznaczanie charakterystyki napięciowo-prądowej

Należy zaprojektować i połączyć układ pomiarowy, a następnie wyznaczyć charakterystykę napięciowo-prądową cewki indukcyjnej zasilanej prądem stałym oraz sinusoidalnie zmiennym. Obliczyć rezystancję, reaktancję, impedancję oraz indukcyjność cewki, porównać działanie elementu przy zasilaniu prądem stałym i zmiennym. Wyniki pomiarów i obliczeń zamieścić w tabeli 10.5. Wykreślić charakterystyki $U=f(I)$ dla różnych rodzajów prądu na wspólnym wykresie.

Tab. 10.4. Wyniki badania kondensatora

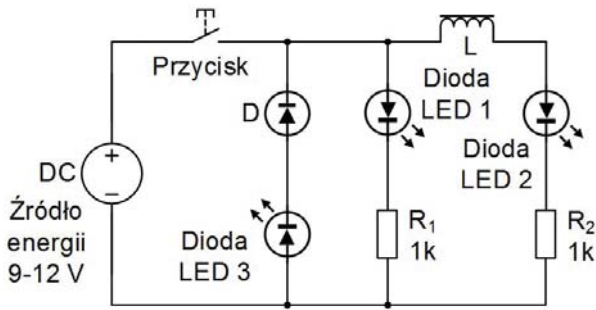
Ładowanie kondensatora				Rozładowanie kondensatora			
C [F]	U ₁ [V]	U ₂ [V]	I [A]	C [F]	U ₁ [V]	U ₂ [V]	I [A]
Przebieg napięcia U ₁				Przebieg napięcia U ₁			
Przebieg napięcia U ₂				Przebieg napięcia U ₂			

Tab. 10.5. Wyniki badania cewki indukcyjnej

Zasilanie prądem stałym			Zasilanie prądem sinusoidalnie zmiennym					
U [V]	I [A]	R [Ω]	U [V]	I [A]	Z [Ω]	X [Ω]	R [Ω]	L [H]

10.3.2. Praca impulsowa cewki, zjawisko samoindukcji

Należy połączyć układ zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 10.2, zastosować źródło zasilania o napięciu 9–12 V, trzy różnokolorowe diody LED i cewkę indukcyjną. Zaobserwować opóźnienie zaświecenia diody LED 2 w stosunku do diody LED 1 po wciśnięciu przycisku oraz krótkotrwałe zaświecenie się diody LED 3 po zwolnieniu przycisku. Omówić we wnioskach zjawiska zachodzące w tym obwodzie.



Rys. 10.2. Schemat układu do badania cewki indukcyjnej

10.4. Oględziny elementów półprzewodnikowych bezzłączowych

Należy przeprowadzić oględziny wybranych elementów półprzewodnikowych, rozpoznać ich rodzaj, podzielić na grupy, opisać pod kątem wyglądu zewnętrznego, kształtu, ilości wyprowadzeń elektrycznych, materiałów i widocznych uszkodzeń.

11. Badanie elementów półprzewodnikowych złączowych

Celem ćwiczenia jest poznanie rodzajów, budowy, właściwości i zastosowań elementów półprzewodnikowych złączowych oraz metodyki ich badań, w tym wykonywania podstawowych pomiarów i wyznaczania charakterystyk.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Program ćwiczenia
2. Rodzaje i właściwości półprzewodników samoistnych i domieszkowanych
3. Zjawiska występujące na złączu półprzewodników P-N
4. Budowa, zasada działania i właściwości diod
5. Budowa, zasada działania i właściwości tranzystorów
6. Rodzaje, budowa, zasada działania i właściwości tyrystorów
7. Analiza porównawcza podstawowych elementów elektronicznych

11.1. Oględziny elementów elektronicznych

Należy przeprowadzić oględziny wybranych elementów elektronicznych, rozpoznać ich rodzaj, podzielić na grupy, opisać pod kątem wyglądu zewnętrznego, kształtu, ilości wyprowadzeń elektrycznych, materiałów i widocznych uszkodzeń.

11.2. Badanie wstępne diody

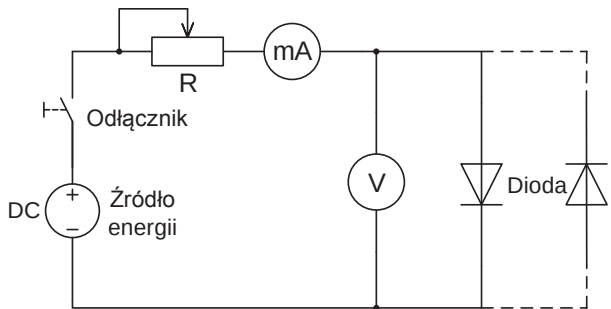
Diodę należy zbadać za pomocą multimetru elektronicznego wykorzystując funkcję pomiaru spadku napięcia na złączu P-N. Pomiar należy wykonać polaryzując diodę w dwóch kierunkach (przewodzenia i zaporowym), a następnie określić jej stan (sprawna lub uszkodzona). Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 11.1.

Tab. 11.1. Wyniki badania wstępnego diody

Typ, rodzaj diody	ΔU [mV]		Stan diody (sprawna, uszkodzona, rodzaj uszkodzenia)
	kierunek przewodzenia	kierunek zaporowy	

11.3. Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej diody

Należy połączyć układ, którego schemat zamieszczono na rysunku 11.1. Zwiększać natężenie prądu płynącego przez diodę i dokonać pomiaru spadku napięcia na elemencie półprzewodnikowym. Należy zwrócić uwagę na nieliniowość charakterystyki i wykonać właściwą ilość pomiarów w poszczególnych zakresach jej zmienności. Pomiary przeprowadzić dla diody włączonej do układu w kierunku przewodzenia i w kierunku zaporowym. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 11.2. Wykreślić zależność $I=f(U)$, dla kierunku przewodzenia w pierwszej ćwiartce, a dla kierunku zaporowego w trzeciej ćwiartce układu współrzędnych.



Rys. 11.1. Schemat układu do wyznaczania charakterystyki prądowo-napięciowej diody

Tab. 11.2. Wyniki wyznaczania charakterystyki prądowo-napięciowej różnych diod

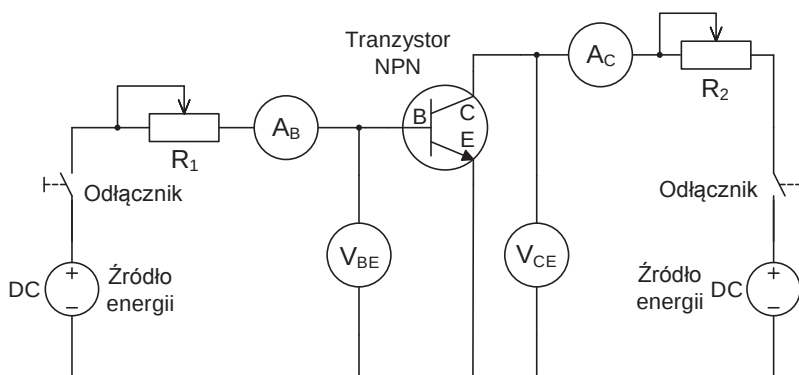
Dioda prostownicza	kierunek przewodzenia	I [mA]												
		U [V]												
	kierunek zaporowy	I [mA]												
		U [V]												
Dioda Zenera	kierunek przewodzenia	I [mA]												
		U [V]												
	kierunek zaporowy	I [mA]												
		U [V]												
Dioda LED	kierunek przewodzenia	I [mA]												
		U [V]												

11.4. Badanie wstępne tranzystora bipolarnego

Tranzystor należy zbadać za pomocą multimetru elektronicznego wykorzystując funkcję pomiaru spadku napięcia na złączu P-N. Pomiar należy wykonać polaryzując złącza emiter-baza i kolektor-baza w dwóch kierunkach (przewodzenia i zaporowym), a następnie określić stan tranzystora (sprawny lub uszkodzony). Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 11.3.

Tab. 11.3. Wyniki badania wstępnego tranzystora bipolarnego

Typ, rodzaj tranzystora	ΔU [mV]		ΔU [mV]		Stan złącz (sprawne, uszkodzone, rodzaj uszkodzenia)
	złącze E-B		złącze C-B		
	kierunek przewodzenia	kierunek zaporowy	kierunek przewodzenia	kierunek zaporowy	
NPN					
NPN					
PNP					
PNP					



Rys. 11.2. Schemat obwodu do wyznaczania charakterystyk tranzystora bipolarnego (układ wspólnego emitera)

11.5. Charakterystyka wyjściowa tranzystora bipolarnego

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 11.2. Wyznaczyć zależność $I_C = f(U_{CE})$ (prąd kolektora w funkcji napięcia między kolektorem a emitorem) dla trzech wartości prądu bazy I_B . Wyniki pomiarów należy zamieścić w tabeli 11.4. Trzy charakterystyki wykreślić na jednym wykresie.

11.6. Charakterystyka przejściowa tranzystora bipolarnego

W obwodzie elektrycznym, którego schemat zamieszczono na rysunku 11.2, należy wyznaczyć zależność $I_C = f(I_B)$ (prąd kolektora w funkcji prądu bazy) dla trzech wartości napięcia U_{CE} (napięcie między kolektorem a emitorem). Obliczyć współczynnik wzmocnienia prądowego β . Wyniki pomiarów i obliczeń należy zamieścić w tabeli 11.5. Wykreślić trzy charakterystyki $I_C = f(I_B)$ na jednym wykresie oraz charakterystykę $\beta = f(I_C)$.

Tab. 11.4. Wyniki wyznaczania charakterystyki wyjściowej tranzystora bipolarnego

$I_B = \dots\dots\dots \text{mA}$		$I_B = \dots\dots\dots \text{mA}$		$I_B = \dots\dots\dots \text{mA}$	
$U_{CE} [\text{V}]$	$I_C [\text{A}]$	$U_{CE} [\text{V}]$	$I_C [\text{A}]$	$U_{CE} [\text{V}]$	$I_C [\text{A}]$

Tab. 11.5. Wyniki wyznaczania charakterystyki przejściowej tranzystora bipolarnego

$U_{CE} = \dots\dots\dots \text{V}$			$U_{CE} = \dots\dots\dots \text{V}$			$U_{CE} = \dots\dots\dots \text{V}$		
I_B [mA]	I_C [A]	β	I_B [mA]	I_C [A]	β	I_B [mA]	I_C [A]	β

11.7. Charakterystyka wyjściowa tranzystora unipolarnego

W obwodzie elektrycznym, którego schemat zamieszczono na rysunku 11.2 należy zamiast tranzystora bipolarnego wstawić tranzystor unipolarny, tak aby w miejsce bazy B dołączyć zacisk bramki G, w miejsce kolektora C dołączyć zacisk drenu D, a w miejsce emitera E dołączyć zacisk źródła S. Następnie wyznaczyć zależność $I_D = f(U_{DS})$ (prąd drenu w funkcji napięcia pomiędzy drenem a źródłem) dla trzech wartości napięcia U_{GS} (napięcie pomiędzy bramką a źródłem). Wyniki pomiarów i obliczeń należy zamieścić w tabeli 11.6. Wykreślić trzy charakterystyki $I_D = f(U_{DS})$ na jednym wykresie.

Tab. 11.6. Wyniki wyznaczania charakterystyki wyjściowej tranzystora unipolarnego

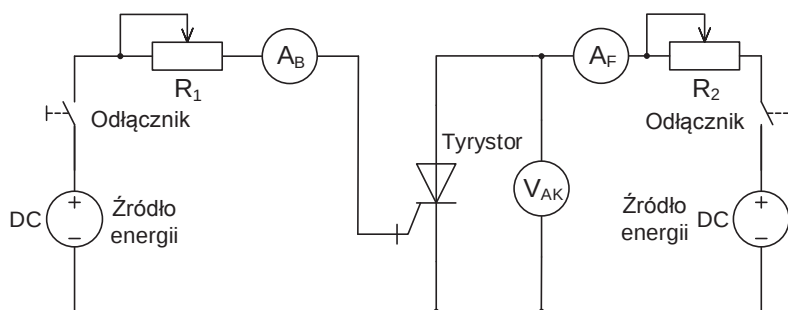
$U_{GS} = \dots\dots\dots V$		$U_{GS} = \dots\dots\dots V$		$U_{GS} = \dots\dots\dots V$	
$U_{DS} [V]$	$I_D [A]$	$U_{DS} [V]$	$I_D [A]$	$U_{DS} [V]$	$I_D [A]$

11.8. Charakterystyka przejściowa tranzystora unipolarnego

W obwodzie elektrycznym, którego schemat zamieszczono na rysunku 11.2 należy zamiast tranzystora bipolarnego wstawić tranzystor unipolarny, tak aby w miejsce bazy B dołączyć zacisk bramki G, w miejsce kolektora C dołączyć zacisk drenu D, a w miejsce emitera E dołączyć zacisk źródła S. Następnie wyznaczyć zależność $I_D = f(U_{GS})$ (prąd drenu w funkcji napięcia pomiędzy bramką a źródłem) dla trzech wartości napięcia U_{DS} (napięcie pomiędzy drenem a źródłem). Wyniki pomiarów i obliczeń należy zamieścić w tabeli 11.7. Wykreślić trzy charakterystyki $I_D = f(U_{GS})$ na jednym wykresie.

Tab. 11.7. Wyniki wyznaczania charakterystyki przejściowej tranzystora unipolarnego

$U_{DS} = \dots\dots\dots V$		$U_{DS} = \dots\dots\dots V$		$U_{DS} = \dots\dots\dots V$	
$U_{GS} [V]$	$I_D [A]$	$U_{GS} [V]$	$I_D [A]$	$U_{GS} [V]$	$I_D [A]$



Rys. 11.3. Schemat obwodu do badania tyrystora triodowego

11.9. Badanie tyrystora triodowego – charakterystyka napięciowo-prądowa

Należy połączyć obwód elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 11.3. Zwiększać napięcie U_{AK} i dla poszczególnych jego wartości określić minimalny prąd bramki I_G załączający tyrystor. W tym celu należy ustawiać odpowiednie wartości napięcia i powoli zwiększać prąd bramki, aby zauważyć przy jakiej jego wartości tyrystor zacznie przewodzić prąd I_A . Następnie należy wyznaczyć charakterystykę napięciowo-prądową tyrystora $I_A=f(U_{AK})$. W tym celu należy załączyć tyrystor, a następnie zwiększać jego obciążenie odczytując wartości prądu i napięcia. Aby wyłączyć tyrystor należy zmniejszyć prąd bramki do minimum i przerwać jego obwód anodowy odłącznikiem. Wyniki pomiarów zamieścić w tabeli 11.8. Wykreślić charakterystyki $I_A=f(U_{AK})$ badanych tyrystorów na jednym wykresie.

Tab. 11.8. Wyniki wyznaczania charakterystyki napięciowo-prądowej tyrystora

Tyrystor nr 1		Tyrystor nr 2	
$I_G = \dots\dots\dots$ A		$I_G = \dots\dots\dots$ A	
U_{AK} [V]	I_A [A]	U_{AK} [V]	I_A [A]

12. Badanie analogowych układów elektronicznych

Celem ćwiczenia jest poznanie budowy, zasady działania, zastosowania i specyfiki pracy analogowych układów elektronicznych oraz doświadczalne sprawdzenie ich działania, wykonanie pomiarów, wykreślenie charakterystyk eksploatacyjnych i ich analiza.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

1. Program ćwiczenia
2. Rodzaje prostowników (schematy, przebiegi napięć)
3. Zasada działania i funkcje stabilizatorów
4. Wzmacniacze – budowa, zasada działania, rodzaje, funkcje
5. Przykłady zastosowań i funkcje tranzystorów oraz tyrystorów w układach elektronicznych

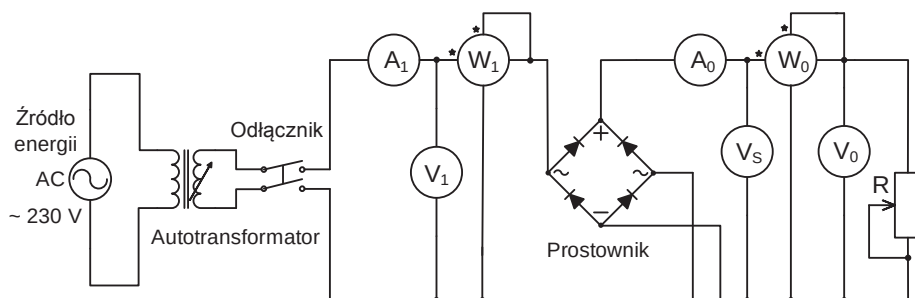
12.1. Badanie jednofazowego układu prostowniczego (mostek Graetza)

Należy połączyć układ elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 12.1. Jako V_1 , A_1 i V_S zastosować mierniki do pomiaru wielkości zmiennych (mierzące wartości skuteczne). Jako V_0 i A_0 zastosować mierniki do pomiaru wielkości stałych (mierzące wartości średnie). Pomiary wykonać dla jednej wartości napięcia zasilającego U_1 zmieniając obciążenie prostownika rezystorem R . Wyniki pomiarów należy zamieścić w tabeli 12.2. Obliczyć wartości wielkości fizycznych charakteryzujących pracę prostownika według wzorów zamieszczonych poniżej. Wykreślić charakterystyki $U_0=f(I_0)$ oraz $k_T=f(I_0)$.

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} - \text{sprawność prostownika}$$

$$U_T = \sqrt{U_S^2 - U_0^2} - \text{napięcie tętnień}$$

$$k_T = \frac{U_T}{U_0} - \text{współczynnik tętnień}$$



Rys. 12.1. Schemat układu do badania prostownika jednofazowego dwupołkowego

Tab. 12.1. Wyniki badania układu prostowniczego jednofazowego

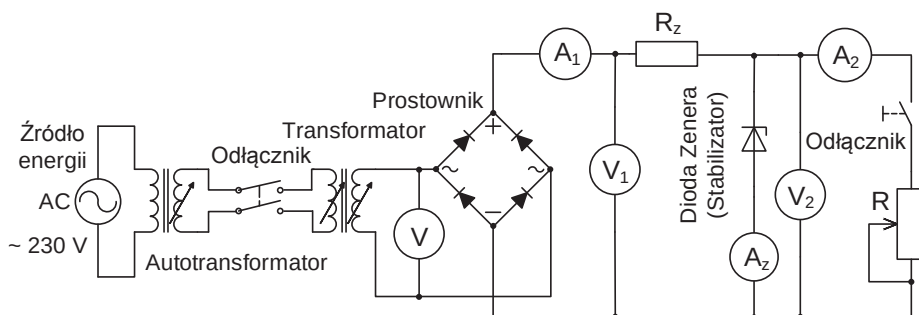
Wielkości zmierzone							Wielkości obliczone				
U_1 [V]	I_1 [A]	P_1 [W]	U_0 [V]	I_0 [A]	P_0 [W]	U_S [V]	U_0/U_1	I_0/I_1	η [%]	U_T [V]	k_T

12.2. Badanie stabilizatora napięcia bez obciążenia

Należy połączyć układ elektryczny według schematu zamieszczonego na rysunku 12.2. Przy otwartym odłączniku w obwodzie obciążenia zwiększać napięcie za pomocą autotransformatora i odczytywać wskazania mierników. Wyniki pomiarów należy zamieścić w tabeli 12.2. Wykreślić charakterystykę napięciową $U_2=f(U_1)$.

12.3. Badanie stabilizatora napięcia ze stałą rezystancją obciążenia

W obwodzie elektrycznym, którego schemat zamieszczono na z rysunku 12.2 zamknąć odłącznik w obwodzie obciążenia i przy stałej rezystancji odbiornika zwiększać napięcie za pomocą autotransformatora oraz odczytywać wskazania mierników. Wyniki pomiarów należy zamieścić w tabeli 12.3. Wykreślić charakterystyki: napięciową $U_2=f(U_1)$ oraz napięciowo-prądową $U_2=f(I_2)$.



Rys. 12.2. Schemat układu do badania stabilizatora napięcia

Tab. 12.2. Wyniki badania stabilizatora napięcia bez obciążenia

Dioda Zenera nr 1					Dioda Zenera nr 2				
typ:					typ:				
U [V]	U ₁ [V]	I ₁ [A]	U ₂ [V]	I _z [A]	U [V]	U ₁ [V]	I ₁ [A]	U ₂ [V]	I _z [A]

Tab. 12.3. Wyniki badania stabilizatora napięcia ze stałym obciążeniem

Dioda Zenera nr 1						Dioda Zenera nr 2					
typ:						typ:					
U [V]	U ₁ [V]	I ₁ [A]	U ₂ [V]	I ₂ [A]	I _z [A]	U [V]	U ₁ [V]	I ₁ [A]	U ₂ [V]	I ₂ [A]	I _z [A]

12.4. Badanie stabilizatora napięcia ze zmienną rezystancją obciążenia

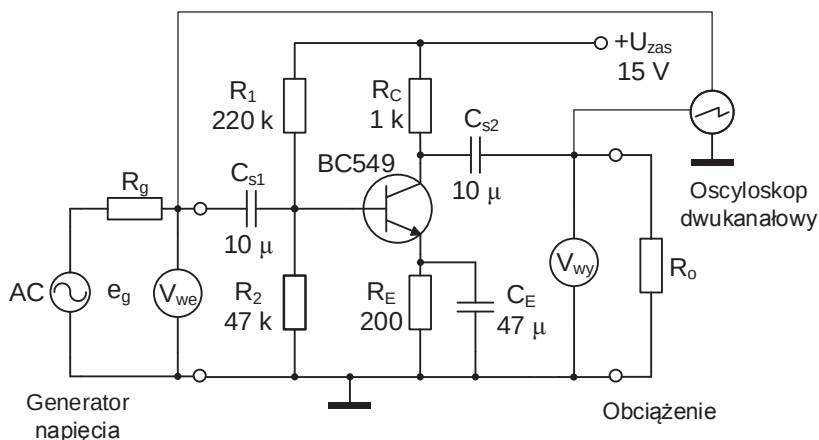
W układzie elektrycznym, którego schemat zamieszczono na rysunku 12.2, zamknąć odłącznik w obwodzie obciążenia, ustawić napięcie zasilania za pomocą autotransformatora i zmieniać rezystancję odbiornika. Wyniki pomiarów należy zamieścić w tabeli 12.4. Wykreślić charakterystyki: napięciową $U_2=f(U_1)$ oraz napięciowo-prądową $U_2=f(I_2)$.

12.5. Badanie wzmacniacza

Należy połączyć układ wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym, pracującego w układzie wspólnego emitera WE zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 12.3, dołączyć generator napięcia sinusoidalnie zmiennego i rezystor obciążenia, a w celu pomiaru i obserwacji przebiegów napięć zastosować woltomierze elektroniczne i oscyloskop. Wyznaczyć charakterystykę przejściową $U_{wy}=f(U_{we})$ przy stałej częstotliwości napięcia wejściowego i na jej podstawie obliczyć wzmocnienie dynamiczne K_{Ud} jako stosunek przyrostu napięcia wyjściowego do odpowiadającego mu przyrostu napięcia wejściowego, w liniowym zakresie charakterystyki, oraz wzmocnienie statyczne K_{Us} jako stosunek napięcia wyjściowego do napięcia wejściowego dla wybranego punktu charakterystyki. Następnie należy poprowadzić prostą styczną do charakterystyki w początkowym jej fragmencie i zaznaczyć punkt rozejścia się obu linii. Współrzędne tego punktu określają napięcie przesterowania U_P i maksymalne, niezniekształcone napięcie wyjściowe wzmacniacza U_{wyp} .

Tab. 12.4. Wyniki badania stabilizatora napięcia ze zmiennym obciążeniem

[illegible]



Rys. 12.3. Schemat układu do badania wzmacniacza

Tab. 12.5. Wyniki badania wzmacniacza – charakterystyka przejściowa

f = Hz		f = Hz	
U _{we} [V]	U _{wy} [V]	U _{we} [V]	U _{wy} [V]

12.6. Badanie regulatora mocy

Na podstawie schematu regulatora należy sporządzić listę elementów zastosowanych w układzie i opisać krótko ich funkcje (nazwa elementu, symbol, funkcja). Opisać zasadę działania regulatora mocy. Połączyć regulator z odbiornikiem i źródłem zasilania, a następnie przeprowadzić próbę jego działania i regulacji mocy. Wykonać pomiary napięć na dostępnych elementach układu w czasie jego pracy, a następnie zmierzyć dla różnych ustawień regulatora napięcie zasilania, napięcie na zaciskach odbiornika oraz jego prąd. Zanotować przykładowe wyniki pomiarów. Ocenąć zakres i płynność regulowanych wartości.

13. Badanie cyfrowych układów elektronicznych

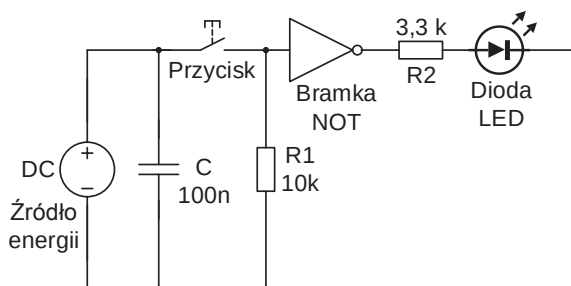
Celem ćwiczenia jest poznanie budowy, specyfiki pracy, rodzajów i zastosowania cyfrowych układów elektronicznych, analiza matematycznych operacji logicznych i przetwarzania sygnałów oraz sposobów badania i projektowania układów logicznych z wykorzystaniem bramek.

Zagadnienia obowiązujące studentów wykonujących ćwiczenie

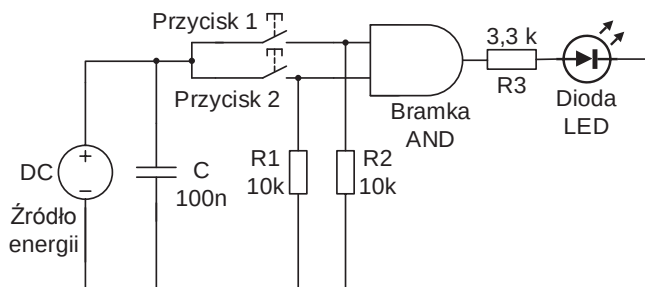
1. Program ćwiczenia
2. Różnice między układem analogowym i cyfrowym
3. Rodzaje bramek logicznych i ich tablice stanów
4. Rodzaje układów cyfrowych
5. Cel i sposoby przetwarzania analogowo-cyfrowego i cyfrowo-analogowego

13.1. Badanie podstawowych bramek logicznych

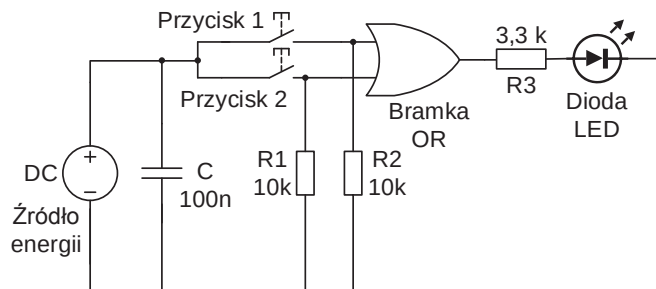
Należy połączyć układy według schematów zamieszczonych na rysunkach 13.1, 13.2 i 13.3, zbadać działanie poszczególnych bramek logicznych, a wyniki badań zamieścić w tabeli 13.1. Należy zwrócić uwagę na właściwą wartość napięcia zasilającego. Podczas badania jednej bramki układu scalonego wszystkie wejścia pozostałych nieużywanych bramek należy połączyć z masą.



Rys. 13.1. Schemat układu do badania bramki NOT



Rys. 13.2. Schemat układu do badania bramki AND



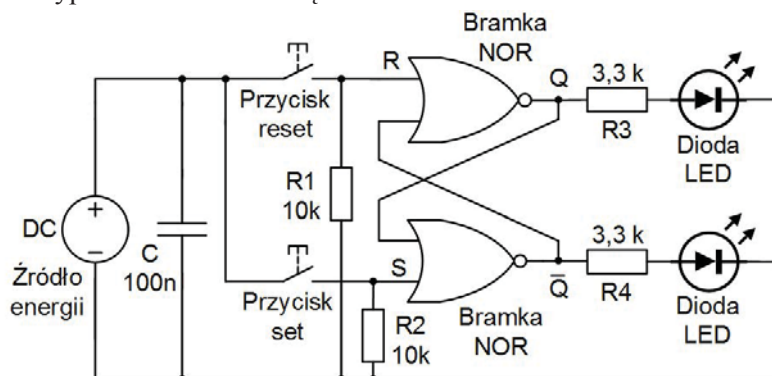
Rys. 13.3. Schemat układu do badania bramki OR

Tab. 13.1. Wyniki badań bramek logicznych

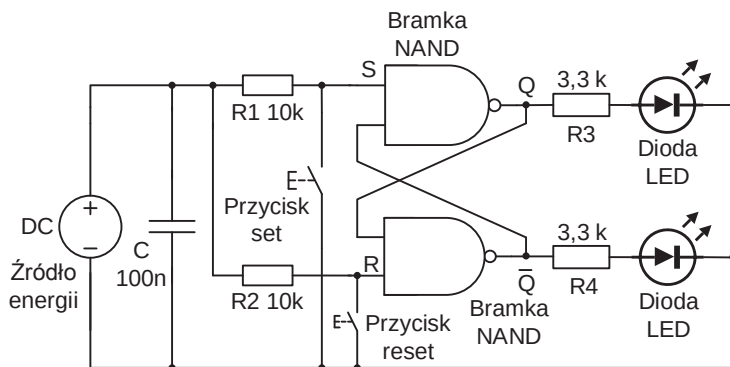
Bramka NOT		Bramka OR			Bramka AND		
Stan przycisku	Stan diody LED	Stan przycisku 1	Stan przycisku 2	Stan diody LED	Stan przycisku 1	Stan przycisku 2	Stan diody LED

13.2. Badanie przerzutników RS

Należy połączyć układy według schematów zamieszczonych na rysunkach 13.4 i 13.5, zbadać dwa układy przerzutników z bramkami typu NOR oraz NAND i wypełnić dla nich tabelę stanów 13.2.



Rys. 13.4. Schemat układu do badania przerzutnika RS z bramkami NOR



Rys. 13.5. Schemat układu do badania przerzutnika RS z bramkami NAND

Tab. 13.2. Wyniki badań przerzutników RS (tablice stanów)

Przerzutnik RS z bramkami NOR				
R	S	Q	$\bar{Q}$	Funkcja
Przerzutnik RS z bramkami NAND				
R	S	Q	$\bar{Q}$	Funkcja

13.3. Projektowanie układów logicznych

Należy ułożyć równanie, a następnie zaprojektować, połączyć i przeprowadzić próbę działania układu logicznego do zadań zamieszczonych poniżej:

- dioda powinna się zaświecić gdy zostanie wciśnięty przycisk 1 lub przycisk 2 pod warunkiem, że będzie wtedy wciśnięty przycisk 3,
- dioda 1 powinna się zaświecić gdy będzie wciśnięty przycisk 1 i przycisk 2, natomiast dioda 2 powinna zgasnąć po zaświeceniu się diody 1,
- dioda 1 powinna się zaświecić gdy będzie wciśnięty przycisk 1 i przycisk 2 lub tylko jeden z tych przycisków, a dioda 2 powinna zgasnąć po zaświeceniu się diody 1, ale tylko przy wciśniętym przycisku 3.

Literatura uzupełniająca

1. Bielawski A., Grygiel J.: *Podstawy elektrotechniki w praktyce*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 2017.
2. Bolkowski S.: *Elektrotechnika*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 2016.
3. Bolkowski S.: *Teoria obwodów elektrycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2013.
4. Czerwiński A.: *Akumulatory, baterie, ogniwa*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2005.
5. Dobrowolski A., Majda E., Jachna Z., Wierzbowski M.: *Elektronika ależ to bardzo proste!* Wydawnictwo BTC. Legionowo 2013.
6. Doległo M.: *Podstawy elektrotechniki i elektroniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2016.
7. Dudzikowski I., Ciurys M.: *Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2011.
8. Filipkowski A.: *Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe*. WNT. Warszawa 2003.
9. Gajek A., Juda Z.: *Czujniki*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2011.
10. Gnat K.: *Podstawy elektrotechniki dla studentów Wydziału Mechanicznego*. Wyższa Szkoła Morska w Szczecinie. Szczecin 2003.
11. Goźlińska E.: *Maszyny elektryczne*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 2007.
12. Górecki P.: *Akumulatory i nie tylko....* "Elektronika praktyczna", nr 3/2015. Wydawnictwo AVT–Korporacja Sp. z o.o.. Warszawa 2015.
13. Górecki P.: *Akumulatory litowe*. "Elektronika praktyczna", nr 3/2015. Wydawnictwo AVT–Korporacja Sp. z o.o.. Warszawa 2015.
14. Hauser J.: *Elektrotechnika. Podstawy elektrotermii i techniki świetlnej*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2006.
15. Hempowicz P. i inni: *Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków*. Podręczniki Akademickie – Mechanika. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2012.
16. Jabłoński W., Płoszajski G.: *Elektrotechnika z automatyką*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 2010.
17. Jankowski A.: *Wybrane zagadnienia funkcjonalne i aplikacyjne ogniw paliwowych*. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych. Warszawa 2012.
18. Kalisz J.: *Podstawy elektroniki cyfrowej*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2007.
19. Kisa A.: *Elektrochemia – Jonika*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2000.

20. Kiswa A.: *Elektrochemia – Elektrodyka*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2001.
21. Kołodziejczyk S.: *Instalacje elektryczne*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2016.
22. Kowalczyk J., Głocki W.: *Podstawy elektroniki*. Wydawnictwo Difin. Warszawa 2015.
23. Krykowski K.: *Silniki PM BLDC, właściwości, sterowanie, aplikacje*. Wydawnictwo BTC. Legionowo 2015.
24. Małek A., Wendeker M.: *Ogniwa paliwowe typu PEM – teoria i praktyka*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej. Lublin 2010.
25. Markiewicz H.: *Instalacje elektryczne*. WNT. Warszawa 2005.
26. Marszałek A.: *Elektronika*. Wydawca: Uniwersytet Rzeszowski, Katedra Mechaniki i Automatyki. Rzeszów 2013.
27. Matulewicz W.: *Elektrotechnika dla mechaników*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2010.
28. Matulewicz W.: *Maszyny elektryczne w energetyce i przemyśle*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2014.
29. Matulewicz W.: *Podstawy teorii maszyn elektrycznych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2014.
30. Miłek M.: *Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych*. Oficyna wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego. Zielona Góra 2006.
31. Opydo W.: *Elektrotechnika i elektronika dla studentów wydziałów nieelektrycznych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2005.
32. Opydo W., Kulesza K., Twardosz G.: *Urządzenia elektryczne i elektroniczne – przewodnik do ćwiczeń laboratoryjnych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2005.
33. Parchański J.: *Miernictwo elektryczne i elektroniczne*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 2014.
34. Piotrowski J. i inni: *Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego*. Wydawnictwa Naukowo Techniczne. Warszawa 2017.
35. Plamitzer A. M.: *Maszyny elektryczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1986.
36. Porada Z., Strzałka-Gołuszka K.: *LED – diody elektroluminescencyjne*. "Dodatek do miesięcznika INPE – SEP", z. 44. Zakład wydawniczy INPE w Bełchatowie, 2013.
37. Przyborowski W., Kamiński G.: *Maszyny elektryczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2014.
38. Rząsa M., Kiczma B.: *Elektryczne i elektroniczne czujniki temperatury*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2005.
39. Suchocki K.: *Sensory i przetworniki pomiarowe. Laboratorium*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2016.

40. Szczegielniak T., Utrata G., Piątek Z.: *Matematyczne podstawy elektrotechniki i automatyki*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2015.
41. Świerżewski M.: *Chemiczne źródła prądu elektrycznego*. "Dodatek do miesięcznika INPE – SEP", z. 42. Zakład wydawniczy INPE w Bełchatowie, 2013.
42. Tąpolska A.: *Podstawy elektroniki w praktyce – część 1 i 2*. Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne. Warszawa 2017.
43. Wiśniewski A.: *Źródła światła*. Stowarzyszenie Elektryków Polskich. Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw. Warszawa 2013.
44. Elportal [online], <https://elportal.pl> [dostęp 10.04.2018].
45. Forbot [online], <https://forbot.pl/blog/> [dostęp 10.04.2018].