

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA

WYTWARZANIE ENERGII
ELEKTRYCZNEJ
LABORATORIUM

Stanisław DUER

Koszalin 2015

ISBN 978-83-7365-390-0

Przewodniczący Uczelnianej Rady Wydawniczej
Mirosław Maliński

Recenzja
Jacek Gołębiowski

Redakcja
Agnieszka Czajkowska

Projekt okładki
Tadeusz Walczak

© Copyright by Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej
Koszalin 2015

WYDAWNICTWO UCZELNIANE POLITECHNIKI KOSZALIŃSKIEJ
75–620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17

Koszalin 2015, wyd. I, ark. wyd. 7,5, nakład 150 egz., format B-5
Druk: INTRO-DRUK, Koszalin

Spis treści

| | |
|--|-----------|
| 1. Obwody magnetyczne w maszynach elektrycznych | 11 |
| 1.1. Zjawiska magnetyczne w obwodach maszyn elektrycznych .. . | 11 |
| 1.2. Wielkości opisujące pole magnetyczne | 12 |
| 1.3. Prawo przepływu – siła magnetomotoryczna | 18 |
| 1.4. Pole magnetyczne w materiałach ferromagnetycznych | 19 |
| 1.5. Obliczanie obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych ... | 20 |
| 1.6. Obliczanie rozgałęzionego obwodu niesymetrycznego z jednym uzwojeniem wzbudzającym | 23 |
| 1.7. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej | 25 |
| 1.8. Wzajemne oddziaływanie dwóch przewodów z prądem | 29 |
| 1.9. Indukcyjność własna | 32 |
| 1.10. Indukcyjność wzajemna | 34 |
| | |
| 2. Badanie akumulatora | 37 |
| 2.1. Wiadomości wstępne | 37 |
| 2.1.1. Podział akumulatorów | 38 |
| 2.2. Akumulator kwasowy | 38 |
| 2.2.1. Budowa klasycznego akumulatora ołowiowego | 38 |
| 2.2.2. Elektrolit | 45 |
| 2.3. Procesy prądotwórcze zachodzące w akumulatorze | 46 |
| 2.4. Akumulatory zasadowe | 48 |
| 2.5. Akumulatory bezobsługowe | 49 |
| 2.5.1. Akumulator bezobsługowy typu MF (Maintenance Free) | 49 |
| 2.5.2. Akumulatory ołowiowe typu VRLA (Valve Regulated Lead – Acid Battery) | 50 |
| 2.6. Badanie diagnostyczne akumulatora | 50 |
| 2.6.1. Określenie przydatności akumulatora bezobsługowego.. | 51 |
| 2.6.2. Pomiar gęstości elektrolitu | 52 |
| 2.6.3. Pomiar napięcia podczas rozruchu | 54 |
| 2.6.4. Pomiar napięcia pod obciążeniem | 55 |
| 2.7. Pomiar napięcia akumulatora | 55 |
| 2.8. Pytania kontrolne | 60 |
| 2.9. Ćwiczenie laboratoryjne | 60 |
| 2.9.1. Pomiar siły elektromotorycznej i napięć w obwodzie | |

| | |
|---|------------|
| zasilania pojazdu-akumulatora | 60 |
| 2.9.2. Pomiar charakterystyki rozruchowe układu zasilania pojazdu-akumulatora | 61 |
| 2.9.3. Pomiar charakterystyki wyładowania układu zasilania pojazdu-akumulatora | 62 |
| 2.10. Opracowanie wyników pomiarów i wnioski | 64 |
| 3. Badanie prądnic prądu stałego | 65 |
| 3.1. Budowa i zasada działania maszyny prądu stałego | 65 |
| 3.2. Podstawowe zależności opisujące pracę maszyn prądu stałego | 69 |
| 3.3. Prądnica obcowzbudna prądu stałego | 72 |
| 3.4. Prądnica samowzbudna prądu stałego | 76 |
| 3.4.1. Warunki samowzbudzenia prądnicy | 77 |
| 3.5. Prądnica samowzbudna bocznikowa | 79 |
| 3.6. Prądnica samowzbudna szeregową | 82 |
| 3.7. Prądnica samowzbudna szeregowo-bocznikowa | 84 |
| 3.8. Praca równoległa prądnic prądu stałego | 86 |
| 3.9. Oddziaływanie twornika w prądnicach prądu stałego | 89 |
| 3.10. Pytania kontrolne | 91 |
| 3.11. Ćwiczenie laboratoryjne | 91 |
| 3.11.1. Pomiar rezystancji uzwojeń wzbudzenia i twornika | 91 |
| 3.11.1.1. Pomiary rezystancji izolacji | 91 |
| 3.11.1.2. Pomiary rezystancji uzwojeń wzbudzenia | 92 |
| 3.11.2. Wyznaczenie charakterystyki biegu jałowego prądnicy obcowzbudnej prądu stałego | 95 |
| 3.11.3. Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej prądnicy obcowzbudnej | 96 |
| 3.11.4. Wyznaczanie charakterystyki siły elektromotorycznej od prędkości obrotowej prądnicy obcowzbudnej | 97 |
| 3.11.5. Wyznaczenie charakterystyki biegu jałowego prądnicy samowzbudnej bocznikowej prądu stałego..... | 98 |
| 3.11.6. Wyznaczanie charakterystyki siły elektromotorycznej prądnicy samowzbudnej bocznikowej | 99 |
| 3.11.7. Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej prądnicy samowzbudnej bocznikowej | 100 |
| 4. Badanie prądnicy synchronicznej | 103 |
| 4.1. Budowa i zasada działania maszyn synchronicznych | 103 |
| 4.2. Oddziaływanie twornika w maszynach synchronicznych | 106 |
| 4.3. Schemat zastępczy prądnicy synchronicznej | 110 |

| | |
|---|------------|
| 4.4. Wytwarzanie prądu trójfazowego | 111 |
| 4.4.1. Praca prądnicy synchronicznej na biegu jałowym | 114 |
| 4.4.2. Praca prądnicy synchronicznej w stanie zwarcia i obciążenia | 115 |
| 4.5. Synchronizacja prądnicy synchronicznej z siecią sztywną | 119 |
| 4.6. Pytania kontrolne | 123 |
| 4.7. Ćwiczenie laboratoryjne | 123 |
| 4.7.1. Próba biegu jałowego prądnicy synchronicznej | 123 |
| 4.7.2. Próba zwarcia prądnicy synchronicznej | 124 |
| 4.7.3. Wyznaczenie charakterystyk zewnętrznych prądnicy synchronicznej | 125 |
| 4.7.4. Wyznaczenie charakterystyk regulacyjnych prądnicy synchronicznej | 126 |
| 5. Badanie alternatora | 127 |
| 5.1. Budowa i zasada działania alternatora | 127 |
| 5.2. Charakterystyki eksploatacyjne alternatorów samochodowych | 132 |
| 5.3. Schemat zastępczy alternatora | 134 |
| 5.4. Pytania kontrolne | 136 |
| 5.5. Ćwiczenie laboratoryjne | 137 |
| 5.5.1. Stanowisko laboratoryjne do badania alternatora | 137 |
| 5.5.2. Schemat stanowiska pomiarowego | 138 |
| 5.5.3. Pomiar i wykreślenie charakterystyk $U = f(n)$ i $I_{obc} = f(n)$ | 140 |
| 5.5.4. Pomiar i wykreślenie charakterystyk $U = f(I_{obc})$ oraz $I_{obc} = f(n)$ | 141 |
| 5.5.5. Pomiar i wykreślenie charakterystyki prądnicy obco- wzbudnej $I_{obc} = f(I_f)$ | 142 |
| 6. Badanie ogniwa fotowoltaicznego | 145 |
| 6.1. Budowa półprzewodników i ich własności elektryczne | 145 |
| 6.2. Struktura złącze p-n | 148 |
| 6.2.1. Własności złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia | 151 |
| 6.2.2. Własności złącza p-n spolaryzowanego w kierunku zaporowym | 151 |
| 6.3. Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne | 152 |
| 6.4. Fotodioda | 152 |
| 6.5. Fotoogniwo, budowa i zasada pracy | 153 |
| 6.6. Pytania kontrolne | 159 |

| | |
|--|-----|
| 6.7. Ćwiczenie laboratoryjne | 159 |
| 6.7.1. Pomiar charakterystyki $I = f(U)$ | 160 |
| Literatura | 163 |

Przedmowa

Powszechne wykorzystanie energii elektrycznej w życiu człowieka w znaczący sposób przekształca jego otoczenie i środowisko. Jakość funkcjonowania człowieka, w tym otoczeniu – jak ją nazwał M. McLuhan – „elektrycznej rzeczywistości” uzależniona jest od znajomości przez niego, tym bardziej przez inżyniera zjawisk związanych z powstawaniem oraz przepływem prądu elektrycznego. Ważne jest zatem zrozumienie przez człowieka zasad działania układów i urządzeń elektroenergetycznych, a także poznanie umiejętności właściwego posługiwania się nimi w praktyce. Kompetencje i umiejętności te winni osiągnąć nie tylko inżynierowie (ludzie) pracujący w dziedzinie energetyki i elektrotechniki, ale również specjaliści funkcjonujący w innych dziedzinach nauki i techniki. W szczególności wiedza i umiejętności z zakresu elektroenergetyki są niezbędne współczesnej kadry inżynierskiej zajmującej się konstruowaniem, wytwarzaniem i eksploatacją urządzeń technicznych w systemach elektroenergetycznych.

W niniejszym podręczniku przedstawiono wybrany zakres wiedzy dotyczącej wytwarzania energii elektrycznej przy wykorzystaniu w tym celu różnych zjawisk oraz maszyn elektrycznych prądu stałego i przemiennego, a także wytwarzania energii elektrycznej w systemach odnawialnych. Powyższa wiedza jest niezbędna studentom wydziałów nieelektrycznych wyższych szkół technicznych na kierunku Energetyka.

Dla lepszego zrozumienia zjawisk występujących w układach i urządzeniach elektroenergetycznych wytwarzających energię elektryczną zaprezentowano również propozycję ćwiczeń laboratoryjnych, w których przedstawiono układy pomiarowe, opisy przebiegu badań, tabele pomiarowe oraz przykładowe pytania sprawdzające poziom przygotowania teoretycznego studentów do danego ćwiczenia.

Zagadnienia przedstawione w niniejszym podręczniku mogą być przydatne również w przygotowaniu się studentów do zaliczania wykładów i ćwiczeń rachunkowych z przedmiotu „Wytwarzanie energii elektrycznej”. W skrypcie podano opis 6 ćwiczeń laboratoryjnych związanych tematycznie z programem zajęć z przedmiotu „Wytwarzanie energii elektrycznej”. Podziękowanie chciałbym złożyć Kolegom z Zakładu Zastosowań Elektroniki i Elektrotechniki za inspiracje i pomoc przy pisaniu i składaniu tego skryptu.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- u – wartość chwilowa napięcia,
- U – wartość skuteczna napięcia, napięcie stałe,
- U_m – wartość maksymalna amplitudy napięcia,
- \underline{U} – postać zespolona napięcia,
- i – wartość chwilowa prądu,
- I – wartość skuteczna prądu, prąd stały,
- I_m – wartość maksymalna amplitudy prądu,
- \underline{I} – postać zespolona prądu,
- T – okres, temperatura,
- t – czas,
- f – częstotliwość,
- ω – prędkość kątowna (pulsacja),
- φ – kąt przesunięcia fazowego, argument impedancji,
- Z – impedancja, moduł impedancji,
- \underline{Z} – impedancja zespolona,
- Y – admitancja,
- R – rezystancja,
- C – pojemność,
- L – indukcyjność,
- X – reaktancja,
- X_C – reaktancja pojemnościowa,
- X_L – reaktancja indukcyjna,
- P – moc czynna, moc średnia,
- Q – moc bierna prądu sinusoidalnego,
- S – moc pozorna prądu sinusoidalnego,
- $\cos P$ – współczynnik mocy,
- q, Q – ładunek elektryczny,
- z, n – liczba zwojów,
- k_u – współczynnik kształtu napięcia,
- k_i – współczynnik kształtu prądu,
- γ – współczynnik tętnień (pulsacji), stała przenoszenia,
- τ – stała czasowa układu,

- ξ – współczynnik tłumienia obwodu rezonansowego,
- Q_L – dobroć cewki,
- Q_C – dobroć kondensatora,
- Q – dobroć obwodu rezonansowego,
- B – indukcja magnetyczna, szerokość pasma w Hz,
- E – natężenie pola elektrycznego, amplituda SEM,
- G – konduktancja,
- r – odległość, promień,
- ρ – rezystywność,
- W – praca, energia,
- k – współczynnik sprzężenia cewek (dwóch obw. magnetycznych),
- ϕ_m – wartość maksymalna strumienia magnetycznego wirującego pola magnetycznego,

1. Obwody magnetyczne w maszynach elektrycznych

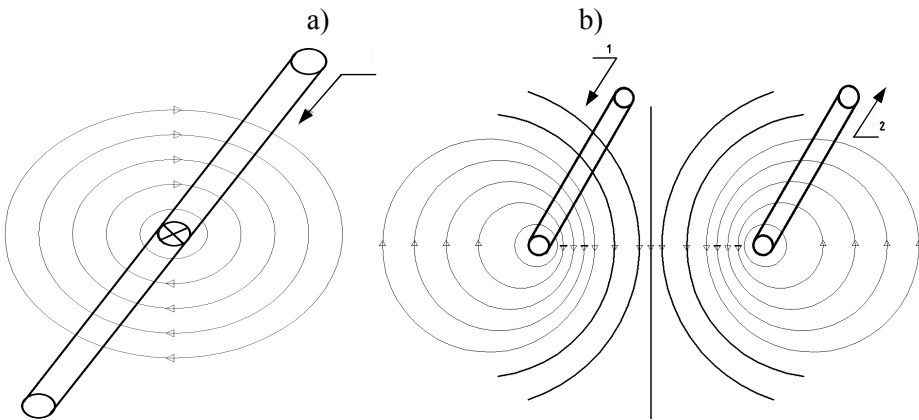
Treścią niniejszego rozdziału jest omówienie właściwości oraz opisanie budowy, funkcjonowania i analizy obwodów magnetycznych stosowanych w maszynach elektrycznych.

1.1. Zjawiska magnetyczne w obwodach maszyn elektrycznych

Z ładunkiem elektrycznym jest zawsze związane pole elektryczne, natomiast przepływowi prądu elektrycznego (ładunki elektryczne w ruchu) towarzyszy zawsze pole magnetyczne, które również jest polem wektorowym i może być przedstawione za pomocą linii sił pola (rys. 1.1). W praktyce pole magnetyczne i pole elektryczne rozpatruje się oddzielnie, chociaż są one wzajemnie związane i występują jednocześnie, tworząc tzw. pole elektromagnetyczne.

Pole magnetyczne w maszynach elektrycznych wytwarza się dwoma sposobami: za pomocą elektromagnesów, tj. cewek (zwojnic) nawiniętych na rdzenie z miękkiej stali, gdy przez cewki płynie prąd elektryczny i drugi sposób za pomocą magnesów trwałych. Obecnie powszechnie są stosowane magnesy stałe o dużej sile magnetycznej, które są nazywane *neodynami*.

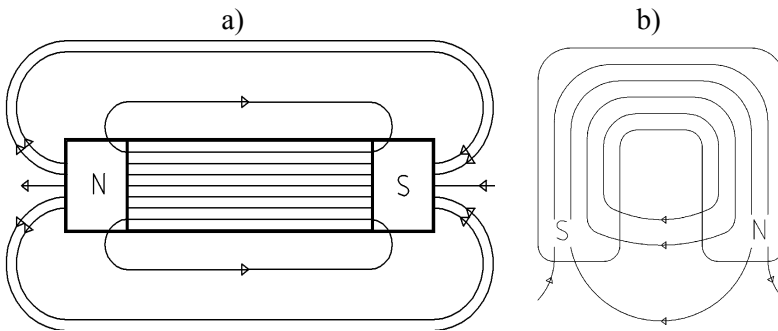
Na rys. 1.1 przedstawiono przebieg linii pola magnetycznego wytwarzanego przez przewody z prądem, zaś na rysunku 1.2 – przez magnesy trwałe. W przeciwieństwie do linii pola elektrycznego, linie pola magnetycznego tworzą obwody zamknięte [2, 17-19, 28-30, 31-32, 37].



Rys. 1.1. Pole magnetyczne utworzone przez przewody z prądem elektrycznym, gdzie: a) – pole przewodu, b) – pole wypadkowe utworzone przez pola magnetyczne dwóch przewodników

Def. 1. Reguły śruby prawoskrętnej: jeżeli śrubę prawoskrętną wkręca się zgodnie z kierunkiem prądu elektrycznego, to przez kierunek ruchu obrotowego śruby wyznaczony zostaje dodatni zwrot linii pola magnetycznego. Linie te są prostopadłe do kierunku przepływającego prądu (rys. 1.1a).

Każdy magnes ma dwa bieguny: biegun północny N oraz biegun południowy S . Umownie przyjęto, że linie pola magnetycznego wychodzą na zewnątrz z bieguna północnego (dodatniego), po czym wchodzą ponownie do bieguna południowego (ujemnego), tworząc obwód zamknięty (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Pole magnetyczne utworzone przez magnesy trwałe, gdzie: a) – magnes sztabkowy, b) – magnes podkowiasty

1.2. Wielkości opisujące pole magnetyczne

Podstawową wielkością charakteryzującą pole magnetyczne jest *strumień magnetyczny* ϕ .

Def. 2. Strumienia magnetyczny ϕ jest nośnikiem energii magnetycznej w obwodach magnetycznych. Inną definicją jest, że strumień magnetyczny jest sumą wszystkich linii sił pola przechodzącego przez określony przekrój obwodu. Dodatni zwrot strumienia jest określony dodatnim zwrotem linii pola.

Jednostką strumienia magnetycznego jest weber, gdzie: $1[\text{Wb}] = 1[\text{V} \cdot \text{s}]$,

1. **Gęstość strumienia magnetycznego** – indukcja magnetyczna B jest określona liczbą linii pola przypadającą na jednostkę powierzchni, nazywa się *indukcją magnetyczną*. Wyraża się ona związkami:

$$B = \frac{d\phi}{dS}. \quad (1.1)$$

2. **Strumień magnetyczny** można wyrazić w postaci równania:

$$\phi = \int_S B dS. \quad (1.2)$$

Gdy wektor indukcji B tworzy z normalną do powierzchni S (rys. 1.3) kąt α , to strumień określa się zależnością:

$$\phi = \int_S B \cos \alpha dS. \quad (1.3)$$

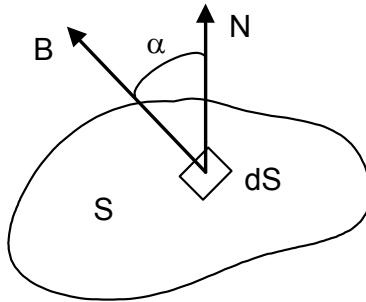
Jeżeli pole magnetyczne jest równomierne, tzn. w każdym miejscu obszaru ma tę samą wartość i zwrot, to:

indukcja magnetyczna jest kolejną ważną wielkością w opisie obwodów magnetycznych. Wielkość ta określa oddziaływanie siłowe pola magnetycznego.

Def. 3. Indukcja magnetyczna: *jest to wielkość, która określa oddziaływanie siłowe pola magnetycznego, jest ona wprost proporcjonalna do wielkości strumienia magnetycznego w obwodzie magnetycznym, a odwrotnie proporcjonalna do pola przekroju poprzecznego tego obwodu i wynosi:*

$$B = \frac{\phi}{S}. \quad (1.4)$$

Jednostką indukcji magnetycznej jest *Tesla*. [$1 \text{ T} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/m}^2 = 1 \text{ Wb/m}^2$]. Strumień magnetyczny ϕ ma znaczenie w obwodzie podobnie jak prąd elektryczny I i ma w całym obwodzie tę samą wartość (rys. 1.3). Linie strumienia pola są zamknięte i w żadnym punkcie linia nie może zniknąć ani powstać.



Rys. 1.3. Składowa normalna strumienia magnetycznego

Własność ta jest analogiczna do własności prądu elektrycznego, określonej **I prawem Kirchoffa** i przedstawionej w postaci zależności:

$$\sum_1^n \phi_V = 0. \quad (1.5)$$

Prawo to dla strumienia magnetycznego formułuje się w postaci definicji.

Def. 4. I prawo Kirchoffa dla obwodu magnetycznego: w punkcie węzłowym rozgałęzionego obwodu magnetycznego suma strumieni magnetycznych ϕ równa się zero. Trzecią charakterystyczną wielkością magnetyczną jest napięcie magnetyczne:

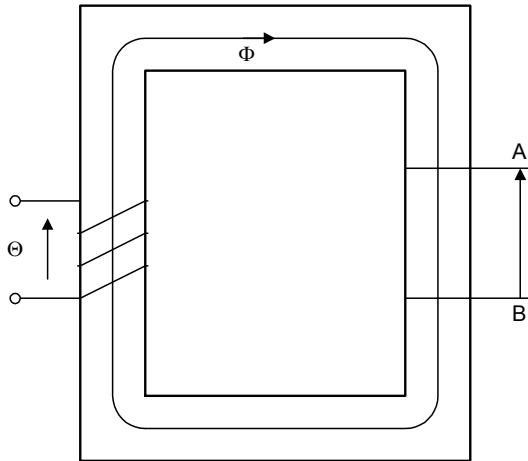
Def. 5. Napięcie magnetyczne źródłowe, zwane także siłą magnetomotoryczną SMM lub przepływem: Jeżeli w polu magnetycznym o natężeniu H obierzemy dowolną krzywą l i obliczamy całkę wzdłuż tej krzywej zamkniętej to wartość całki jest proporcjonalna do całkowitego prądu przepływającego przez powierzchnię, której brzegiem jest krzywa całkowania. Siłę magnetomotoryczną Θ przedstawiono w postaci zależności:

$$\oint_l H dl = \Theta. \quad (1.6)$$

Ponieważ o wartości strumienia magnetycznego decyduje sprzężona z tym strumieniem suma prądów, więc określoną gęstość strumienia B (indukcję magnetyczną) można uzyskać, stosując cewkę o dużej wartości prądu i małej liczbie zwojów lub cewkę o małej wartości prądu i dużej liczbie zwojów. **Jednostką SMM jest amper.** Spadek napięcia magnetycznego U_m wzdłuż odcinka obwodu magnetycznego, np. między punktami A i B na rys. 1.4 i odpowiada elektrycznemu napięciu odbiornikowemu lub spadkowi napięcia elektrycznego U . Wartość strumienia magnetycznego ϕ lub indukcji B w określonym punkcie zależy nie tylko od siły magnetomotorycznej (SMM), ale również od kształtu i rodzaju obwodu magnetycznego. Wykorzystując *prawo Ohma dla obwodu magnetycznego* można określić zależność między SMM, strumieniem, kształtem konstrukcyjnym i właściwościami materiałowymi obwodu magnetycznego prowadzi do definicji *oporu magnetycznego*, zwanego również *reluktancją*:

$$R_m = \frac{\Theta}{\phi} \Rightarrow R = \frac{U}{I}. \quad (1.7)$$

obw .mag *obw .elektr*



Rys. 1.4. Spadek napięcia na odcinku obwodu magnetycznego

Zależność ta jest znana jako *prawo Ohma dla obwodu magnetycznego*. Jednostką reluktancji jest $[1A/V \cdot s]$.

Odwrotność reluktancji nazywa się *permeancją (przewodnością magnetyczną)*:

$$\Lambda = \frac{\phi}{\Theta}. \quad (1.8)$$

Jednostką permeancji jest $[1V \cdot s/A = 1 \Omega \cdot s = 1 H]$ (*henr*). Charakterystyczną wielkością w obwodach magnetycznych jest *reluktancja elementów obwodu magnetycznego* – odpowiadająca rezystancji w obwodach prądu elektrycznego.

Def. 6. Reluktancja obwodu magnetycznego: wielkość oporu magnetycznego jest zależna od wymiarów geometrycznych oraz od właściwości środowiska, tworzącego obwód magnetyczny:

$$R_m = \frac{l}{\mu S}. \quad (1.9)$$

gdzie: l – jest długością linii pola, S – przekrojem, przez który przenika strumień magnetyczny, μ – przenikalnością magnetyczną bezwzględną środowiska (stałą materiałową), która zgodnie z równaniem powyżej ma jednostkę [1 H/m].

Wielkość μ dla danego środowiska można odnieść do przenikalności magnetycznej próżni μ_0 :

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \quad (1.10)$$

gdzie: μ_r – jest przenikalnością magnetyczną względną środowiska, wskazującą ile razy przenikalność ta jest większa od przenikalności magnetycznej bezwzględnej próżni. Dla próżni:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}. \quad (1.11)$$

Następną wielkością wektorową charakteryzującą pole jest *natężenie pola magnetycznego* H . Analogicznie do natężenia pola elektrycznego E wyraża się ono zależnością:

$$H = -\frac{dU_m}{dl}. \quad (1.12)$$

Jednostką natężenia pola magnetycznego H jest [1 A/m]. Dla pola równomiernego, wzbudzonego np. przez długą cewkę ($l \gg r$) przedstawioną na rys. 1.5, natężenie pola magnetycznego wynosi:

$$H = \frac{Iz}{l}. \quad (1.13)$$

gdzie: l – długość cewki.

Z równania (1.13) wynika, że im większa jest wartość przepływu Iz , tym większe jest natężenie pola magnetycznego wewnątrz cewki. Należy podkreślić, że natężenie pola magnetycznego nie zależy od przenikalności magnetycznej środowiska; jest to wielkość obliczeniowa, niezbędna w obliczeniach obwodów magne-

tycznych. Często wystarczy znać wartość H , z której można określić wszystkie pozostałe wielkości magnetyczne [28-30, 31-32, 37].

Z równania (1.13) można określić kolejną ważną wielkość dla obwodów magnetycznych, którą jest **napięcie magnetyczne** przedstawiane w postaci wyrażenia:

$$U_m = \int Hdl . \quad (1.14)$$

Napięcie magnetyczne wynosi:

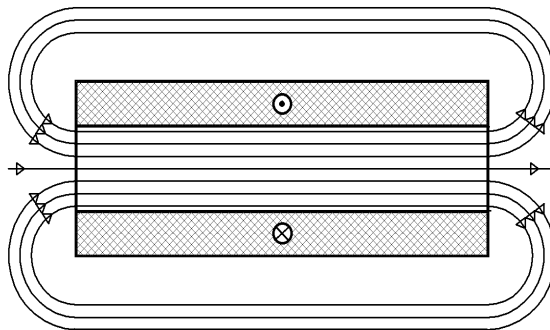
$$U_{mAB} = \int_B^A Hdl . \quad (1.15)$$

Jeżeli pole między tymi przekrojami jest równomierne, to wyrażenie upraszcza się do:

$$U_{mAB} = Hl_{AB} . \quad (1.16)$$

Z równania powyższego korzysta się przy wyznaczaniu napięcia magnetycznego obwodu magnetycznego, który dzieli się na odcinki o praktycznie równomiernym polu. Jeżeli cewka z prądem (rys. 1.5) znajduje się w powietrzu, to wewnątrz niej istnieje **natężenie pola magnetycznego H** :

$$H = \frac{B}{\mu} . \quad (1.17)$$



Rys. 1.5. Pole magnetyczne wewnątrz długiej cewki

Natężenie pola magnetycznego w obwodzie magnetycznym określa własności siłowe tego pola w konkretnym środowisku opisanym współczynnikiem μ .

1.3. Prawo przepływu – siła magnetomotoryczna

Jeżeli równania dotyczące napięcia magnetycznego U_m zostaną zastosowane do wszystkich odcinków obwodu magnetycznego, to:

$$\sum_1^k U_m = \sum_1^k Hdl. \quad (1.18)$$

Ponieważ suma wszystkich spadków napięć wzdłuż obwodu magnetycznego jest równoważona przez przepływ, więc:

$$\oint Hdl = \sum_1^l Iz = \Theta. \quad (1.19)$$

Powyższe równanie jest matematyczną *postacią prawa przepływu* przedstawione w postaci następującej definicji.

Def. 7. Prawo przepływu dla obwodu magnetycznego: *Dla zamkniętego obwodu magnetycznego suma spadków napięć magnetycznych równa się sumie sił magnetomotorycznych działających w tym obwodzie.*

Ponieważ prąd elektryczny płynie również w obwodzie zamkniętym, więc prawo przepływu wyraża jednocześnie związek prądu elektrycznego z polem magnetycznym. Jeżeli obwód magnetyczny można podzielić na n odcinków, w których istnieje równomierne pole magnetyczne, to wzór powyżej upraszcza się i *Prawo przepływu dla obwodów magnetycznych*, służącym do obliczania obwodów magnetycznych.

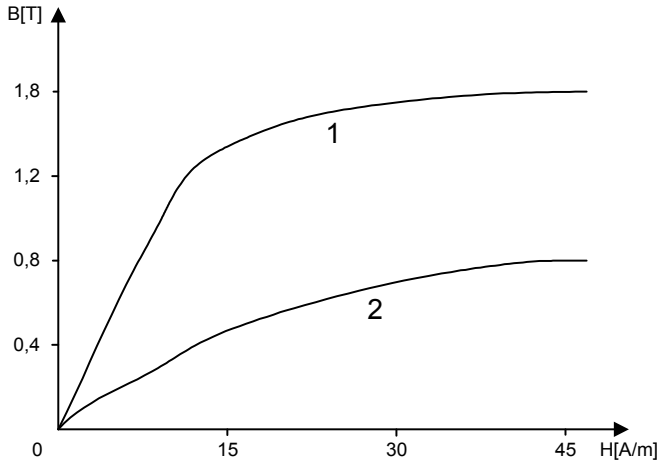
$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_n l_n = \sum \Theta = \sum_1^l Iz. \quad (1.20)$$

Własność ta jest analogiczna do ważnej zależności obwodu magnetycznego, określonej **II prawem Kirchhoffa** przedstawionej w postaci zależności:

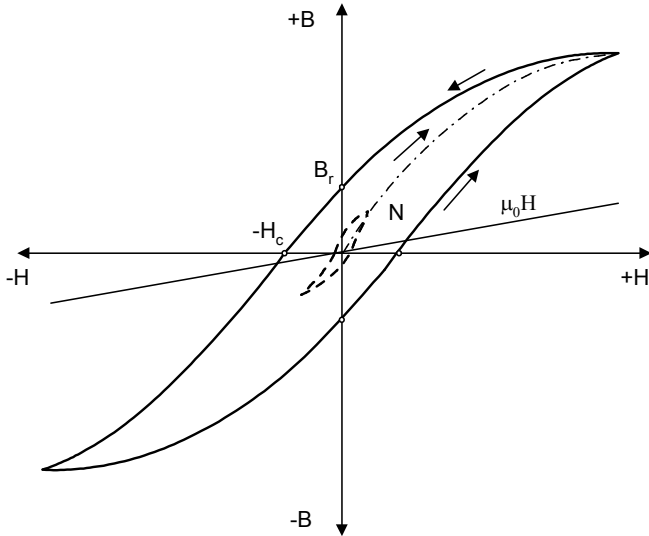
$$\sum_{s=1}^s \Theta_s = \sum_{k=1}^k U_{m,k}. \quad (1.21)$$

1.4. Pole magnetyczne w materiałach ferromagnetycznych

Ze względu na dużą wartość przenikalności magnetycznej względnej μ_r , ciała ferromagnetyczne są stosowane powszechnie jako materiały, z których buduje się obwody magnetyczne (rys. 1.6 i 1.7).



Rys. 1.6. Krzywe magnesowania, gdzie: 1 – blacha prądnicowa, 2 – żeliwo



Rys. 1.7. Pętla histerezy magnetycznej

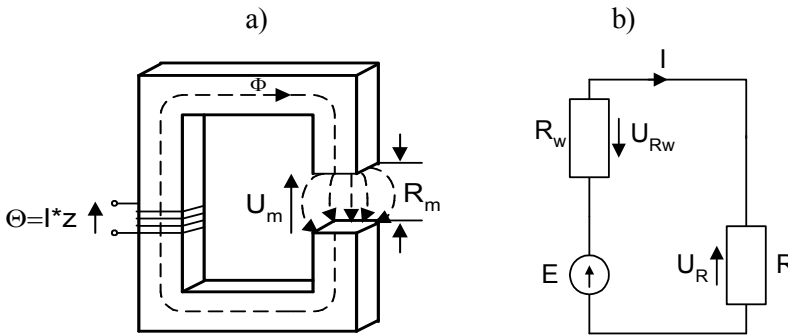
Do określenia nieliniowego zachowania się materiałów magnetycznych, np. stali, nie używa się przenikalności magnetycznej, lecz bezpośrednio zależności indukcji B od natężenia pola magnetycznego H , prądu I lub przepływu $\Theta = Iz$ (rys. 1.6 i 1.7) [31-32, 37]. Krzywa magnesowania pierwotnego N może przebiegać przy pierwszym magnesowaniu materiału lub po opisanym powyżej zupełnym jego rozmagnesowaniu. Związek między B i H jest liniowy, ponieważ dla powietrza $\mu_r = 1 = const.$ Przebieg pętli histerezy zależy od gatunku materiału magnetycznego (rys. 1.7).

Pod tym względem rozróżnia się:

- materiały magnetyczne miękkie (np. blacha prądnicowa) posiadające wąską pętlę histerezy,
- materiały magnetyczne twarde (stopy na magnesy trwałe) posiadające szeroką pętlę histerezy.

1.5. Obliczanie obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych

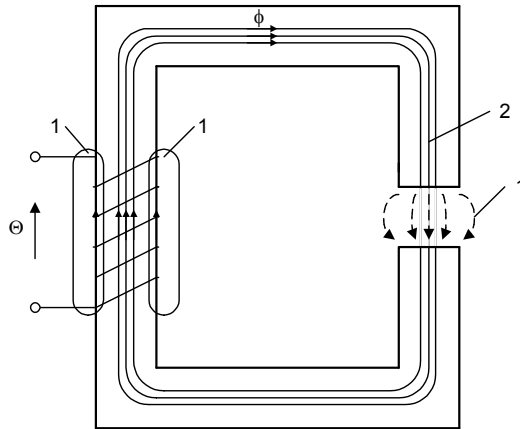
Obwodem magnetycznym nazywa się drogę, wzdłuż której zamyka się strumień magnetyczny. Zastosowanie analogii między obwodem elektrycznym a magnetycznym pozwala na łatwe zrozumienie przebiegu zjawisk w obwodach magnetycznych. Porównanie tych obwodów (rys. 1.8) daje całkowitą zgodność matematycznego zapisu obu zjawisk.



Rys. 1.8. Porównanie obwodu magnetycznego z elektrycznym, gdzie: a) – obwód magnetyczny rzeczywisty, b) – obwód elektryczny odpowiadający danemu obwodowi magnetycznemu

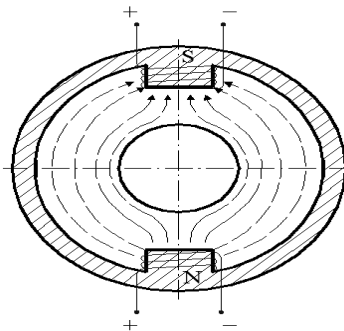
Obliczanie obwodu magnetycznego polega na wyznaczeniu siły magnetomotorycznej (przepływu Iz), niezbędnej do wytworzenia żądanego strumienia magnetycznego dla danych wymiarów geometrycznych i materiału obwodu (rys. 1.9). Jeżeli obwód magnetyczny jest nierozgałęziony i składa się z szere-

gowo połączonych odcinków o różnej przenikalności magnetycznej lub o różnym przekroju, to mając dany strumień oblicza się dla każdego odcinka indukcję B . Następnie z krzywej magnesowania $B = f(h)$ znajduje się wartość natężenia pola H dla poszczególnych gatunków materiału obwodu. Znając średnie długości l poszczególnych odcinków obwodu oblicza się przepływ Iz potrzebny do wytworzenia żądanego strumienia magnetycznego. Obwody magnetyczne bardzo często zawierają szczelinę powietrzną. Nawet, gdy jest ona bardzo mała, to potrzebny przepływ dla tego odcinka obwodu jest duży z powodu małej przenikalności magnetycznej powietrza.



Rys. 1.9. Rozproszenie pola magnetycznego, gdzie: 1 – linia pola rozproszenia, 2 – linia pola głównego

Szczelina powietrzna odpowiadająca rezystancji zewnętrznej obwodu elektrycznego (rys. 1.8, 1.9 i rys. 1.10) jest jednak często niezbędna do uzyskania określonego działania urządzeń elektrycznych zawierających obwody magnetyczne.



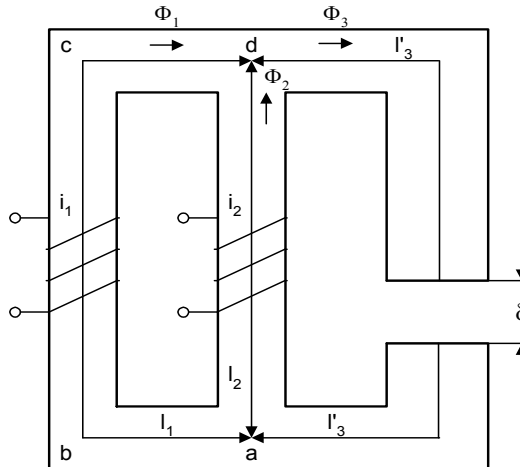
Rys. 1.10. Obwód magnetyczny maszyny elektrycznej (przykład)

Zadanie polega więc na wyznaczeniu określonej liczby zwojów uzwojenia, którego przepływ wywołuje strumień w całym obwodzie magnetycznym oraz wytwarza żądaną indukcję magnetyczną w szczelinie powietrznej (rys. 1.10). Na rys. 1.9 i 1.10 pokazano, że cały strumień wytworzony przez uzwojenie wzbudzające nie przechodzi przez szczelinę powietrzną, ponieważ zawsze występuje pewne rozproszenie magnetyczne polegające na wybraniu przez niektóre linie pola drogi łatwiejszej, tj. mniejszej reluktancji.

Strumień całkowity jest sumą strumienia użytecznego i strumienia rozproszenia. Aby strumień użyteczny, przechodzący przez szczelinę, miał określoną żądaną wartość, należy przy projektowaniu obwodu magnetycznego uwzględnić strumień rozproszenia, który wynosi zazwyczaj 10 do 20 % strumienia całkowitego.

W konstrukcji maszyn i aparatów elektrycznych często występują rozgałęzione obwody magnetyczne, gdzie strumień nie zamyka się wzdłuż jednej drogi, lecz dzieli się na kilka oddzielnych strumieni. Rozgałęzione obwody magnetyczne dzieli się na obwody symetryczne i niesymetryczne. Jeżeli rozgałęziony obwód magnetyczny (rys. 1.10) można podzielić wzdłuż osi symetrii AA na dwie niezależne części, to wystarczy dokonać obliczenia jednej z symetrycznych gałęzi obwodu. Ponieważ taka gałąź tworzy obwód nierozgałęziony, więc do obliczenia należy zastosować metodykę rozpatzoną powyżej.

I *Obliczenie rozgałęzionych niesymetrycznych obwodów magnetycznych* (rys. 1.11) dokonuje się wykorzystując prawa Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych.



Rys. 1.11. Niesymetryczny obwód magnetyczny

Prawo Kirchhoffa stosuje się do dowolnego punktu węzłowego obwodu

magnetycznego. Prawo Kirchhoffa zostanie przedstawione na podstawie prawa przepływu wykorzystując schemat obwodu przedstawiony na rys. 1.12. Dla obwodu $abcd$ (rys. 1.12), idąc zgodnie ze wskazówkami zegara, można napisać:

$$\Theta_1 - \Theta_2 = H_1 l_1 - H_2 l_2. \quad (1.22)$$

Podstawiając:

$$H_1 = \frac{\phi_1}{\mu_1 S_1}, \quad H_2 = \frac{\phi_2}{\mu_2 S_2}, \quad (1.23)$$

otrzymuje się:

$$\Theta_1 - \Theta_2 = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} \phi_1 - \frac{l_2}{\mu_2 S_2} \phi_2 = R_{m1} \phi_1 - R_{m2} \phi_2. \quad (1.24)$$

Stąd jest formułowane także II – prawo Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych:

$$\sum_{k=1}^k \Theta_k = \sum_{m=1}^m R_{mk} \phi_k, \quad (1.25)$$

gdzie: Θ_k, ϕ_k, R_{mk} – oznaczają odpowiednio przepływ, strumień reluktancję k -tego odcinka obwodu, $R_{mk} \phi_k$ – spadek napięcia magnetycznego jest wyrażeniem analogicznym do wyrażenia RI dla obwodu elektrycznego.

Def. 8. II prawo Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych przedstawione w postaci zależności (1.25): *w oczku obwodu magnetycznego suma algebraiczna spadków napięć magnetycznych na wszystkich odcinków oczka (obwodu) jest równa sumie algebraicznej sił magnetomotorycznych występujących w tym oczku.*

1.6. Obliczanie rozgałęzionego obwodu niesymetrycznego z jednym uzwojeniem wzbudającym

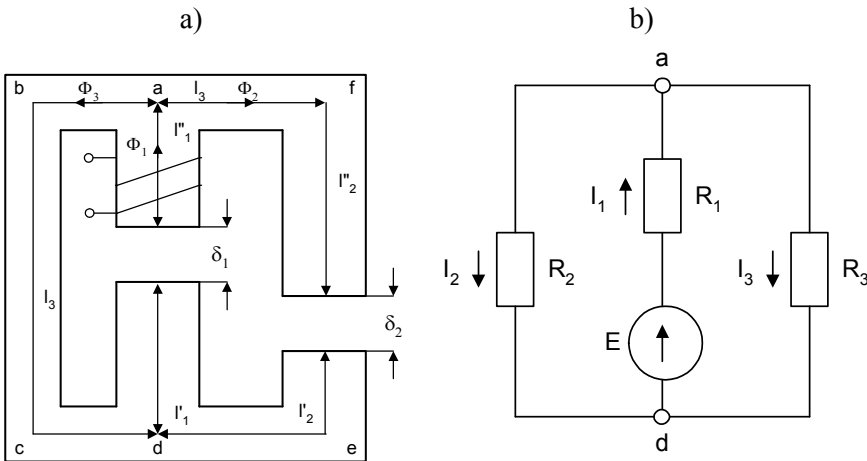
Obecnie będzie rozpatrzona metodyka obliczenia rozgałęzionego obwodu niesymetrycznego z jednym uzwojeniem wzbudającym (rys. 1.12). Przyjmuje się jako dane: wymiary geometryczne obwodu, krzywe magnesowania materiału ferromagnetycznego, przepływ uzwojenia wzbudającego. Poszukuje się

wartości strumieni magnetycznych we wszystkich gałęziach obwodu. Stosując do węzła *a* prawo Kirchhoffa, a do zamkniętych obwodów *afed* i *abcd* II prawo Kirchhoffa, otrzymuje się następujący układ równań:

$$\begin{aligned}\Theta &= R_{m1}\phi_1 + R_{m2}\phi_2, \\ \Theta &= R_{m1}\phi_1 + R_{m3}\phi_3, \\ \phi_1 &= \phi_2 + \phi_3.\end{aligned}\tag{1.26}$$

Równania zapisane w postaci zależności (1.26) odpowiadają opisowi odnośnie obwodu elektrycznego (rys. 1.12b):

$$\begin{aligned}E &= R_1 I_1 + R_2 I_2, \\ E &= R_1 I_1 + R_3 I_3, \\ I_1 &= I_2 + I_3.\end{aligned}\tag{1.27}$$

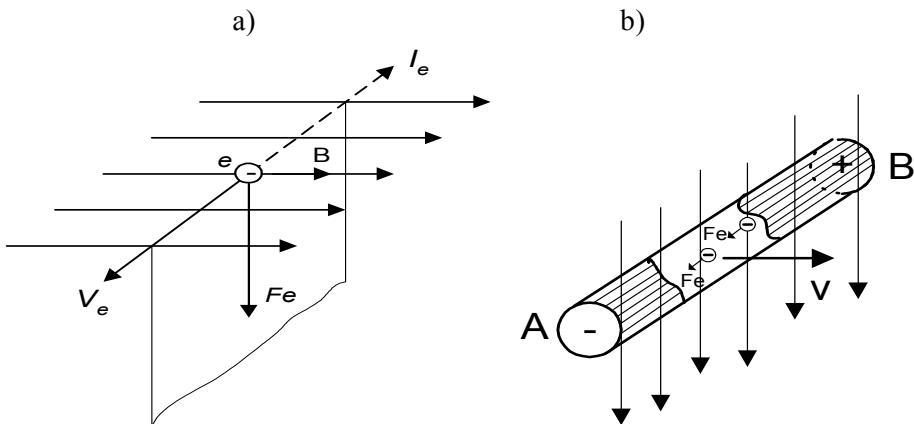


Rys. 1.12. Niesymetryczny obwód magnetyczny z jednym uzwojeniem wzbudzającym, gdzie: a) – obwód magnetyczny, b) – równoważny obwód elektryczny, (a, d) – węzły obwodu

Powyższy układ równań jest podobny do układu równań dla równoważnego obwodu elektrycznego (rys. 13b).

1.7. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

Prawo przepływu podaje zależność między prądem elektrycznym a wywołanym przez niego polem magnetycznym. Prawo indukcji elektromagnetycznej opisuje przebieg odwrotny, a mianowicie prawidłowość, przy której w pewnych warunkach pole magnetyczne wywołuje napięcie, a zatem i prąd elektryczny. Prawidłowość ta bezpośrednio po odkryciu przyczyniła się do szybkiego rozwoju elektrotechniki. Opiera się na niej zasada działania maszyn elektrycznych i transformatorów, a więc urządzeń dostarczających i przetwarzających energię elektryczną. Również cała telekomunikacja (m.in. radio i telewizja) nie mogłaby się rozwinąć do dzisiejszego stanu bez odkrycia tego prawa. Zjawisko powstawania (indukowania) w przewodach elektrycznych napięcia elektrycznego w przypadku ruchu tych przewodów w polu magnetycznym odkrył Faraday w 1831 r. Ustalono również, że zjawisko indukcji elektromagnetycznej występuje niezależnie od tego, w jakich okolicznościach i z jakich przyczyn następuje zmiana strumienia sprężonego ze zwojem. Zmiany te mogą odbywać się np. przez włączenie albo wyłączenie prądu stałego lub przez periodyczne zmiany prądu zmiennego. Możliwe jest również indukowanie napięcia przez stałe w czasie pole magnetyczne, ale przewody muszą poruszać się w tym polu, aby spowodować konieczną do przebiegu zjawiska zmianę strumienia magnetycznego [17-19, 28-30, 31-32, 37]. Istotę zjawiska indukcji elektromagnetycznej przedstawiono na rys. 1.13.



Rys. 1.13. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej, gdzie: a) – oddziaływanie pola magnetycznego na przemieszczający się w nim z prędkością v ładunek elektryczny, b) – działanie siły elektromagnetycznej indukcji na elektrycy w przewodniku będącym w polu magnetycznym

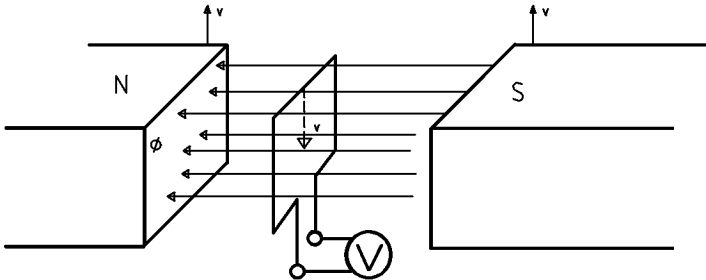
Napięcie indukowane w obwodzie elektrycznym może być wytwarzane następująco (rys. 1.13):

- w nieruchomych przewodach obwodu elektrycznego przez zmienne w czasie pole magnetyczne obwodu magnetycznego,
- w ruchomych przewodach obwodu elektrycznego przez stałe w czasie pole magnetyczne obwodu magnetycznego lub przez nałożenie się obu wymienionych form zjawiska,
- w ruchomych przewodach obwodu elektrycznego przez zmienne w czasie pole magnetyczne obwodu magnetycznego.

Wśród etapów zjawiska indukcji elektromagnetycznej można wyróżnić:

- Oddziaływanie pola magnetycznego na strukturę przewodnika (obwodu elektrycznego) – powstawanie elektronów swobodnych (rys. 1.14b).
- Oddziaływanie pola magnetycznego na przemieszczające się w nim z prędkością liniową V_e ładunki elektryczne – przesuwanie ładunku elektrycznego przez siłę F_e (rys. 1.13a).
- Powstawanie różnicy potencjałów w przewodniku.
- Powstawanie SEM indukcji elektromagnetycznej (rys. 1.14).

Na rysunku 1.14 przedstawiono zwoj obejmujący strumień ϕ w szczelinie obwodu magnetycznego.



Rys. 1.14. Powstawanie napięcia indukowanego

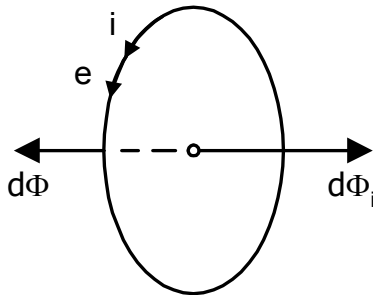
Gdy strumień $\phi = \text{const}$, to w zwoju nic się nie dzieje. Jeżeli jednak strumień zmienia się w czasie, np. dzięki ruchowi magnesów w górę lub wyłączeniu prądu magnesującego, to w zwoju będzie indukowało się napięcie (siła elektromotoryczna) według zależności:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} . \quad (1.28)$$

Zależność ta oznacza, że wartość napięcia SEM indukującego się w zwoju zależy od prędkości zmiany strumienia $d\phi/dt$, sprzężonego z tym zwojem. Wyjaśnienia wymaga znak minus umieszczony we wzorze. Pod działaniem SEM indukowanej popłynie w zamkniętym obwodzie prąd i , mający ten sam zwrot co SEM. Prąd ten wytworzy własny strumień $d\phi_i$, którego dodatni zwrot jest określony regułą śruby prawoskrętnej (rys. 1.15). Wykorzystując znane w fizyce prawo akcji i reakcji, które w elektryce przybrało nazwę *reguły Lenza*. Prawo to określa, że strumień $d\phi_i$, przeciwdziała się strumieniowi $d\phi$ będącemu przyczyną powstania SEM, Ponieważ strumień $d\phi_i$, ma zwrot dodatni, więc strumień $d\phi$ musi mieć zwrot ujemny i stąd znak minus we wzorze. Jeżeli obwód elektryczny jest uzwojeniem o wielu zwojach, to strumień skojarzony jest sumą strumieni wszystkich zwojów. W przypadku szczególnym, gdy strumień ϕ jest obejmowany przez wszystkie zwoje uzwojenia, to wzór powyższy przyjmie postać:

$$e = -z \frac{d\phi}{dt}, \quad (1.29)$$

gdzie: z – liczba zwojów.



Rys. 1.15. Zwrot napięcia indukowanego

Wzór powyższy został podany przez Faradaya jako interpretacja zjawiska indukcji elektromagnetycznej.

W praktyce jednak poszczególne zwoje sprzęgają się z różną liczbą linii pola magnetycznego, wobec czego dla prawidłowego zapisania zjawiska należy ustalić

tzw. całkowitą liczbę sprzężeń ψ czyli *strumień skojarzony*, który jest sumą strumieni sprzężonych z poszczególnymi zwojami:

$$\psi = \sum_{v=1}^n \phi_v z_v . \quad (1.30)$$

Zależność (1.30) wprowadza się często w przypadkach cewki opisanej przez zastępczy strumień ϕ_z obejmujący wszystkie zwoje cewki, przy czym:

$$\psi = z \phi_z . \quad (1.31)$$

Jeżeli na rysunku 1.15 zamiast magnesów nastąpi ruch przewodu w dół, to przy tej samej względnej prędkości ruchu powstanie ten sam przebieg zjawiska co przy ruchu magnesów w górę, ponieważ w obu przypadkach zmiana strumienia jest jednakowa. Zmiana strumienia sprzężonego ze zwojem o długości czynnej l w polu określonym indukcją B wynosi:

$$d\phi = BdS = Bldx, \quad \text{zaś} \quad \frac{d\phi}{dt} = Bl \frac{dx}{dt} = Blv , \quad (1.32)$$

wobec czego:

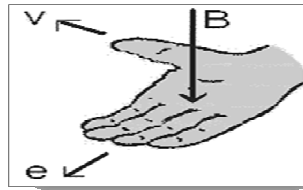
$$e = -Blv . \quad (1.33)$$

Jeżeli prędkość ruchu przewodu jest stała, to napięcie indukowane jest również stałe; dla tego szczególnego przypadku można napisać następujące wyrażenie:

$$E = -Blv . \quad (1.34)$$

Def. 9. Siły elektromotorycznej indukcji: *Wskutek przecinania linii pola magnetycznego o indukcji B (zmiana strumienia magnetycznego w czasie) przez przewód (ramkę, zwoj) poruszający się z prędkością v to wówczas, w tym zwoju (przewodzie) indukuje się siła elektromotoryczna indukcji o wartości chwilowej ($e = Blv$).*

Napięcie indukowane musi mieć taki zwrot, aby wywołany przez nie w obwodzie zamkniętym prąd przeciwdziałał przyczynie, a więc nie pozwalał na wzrost strumienia. Zwrot napięcia indukowanego określa się łatwo na zasadzie reguły prawej dłoni (rys. 1.16).

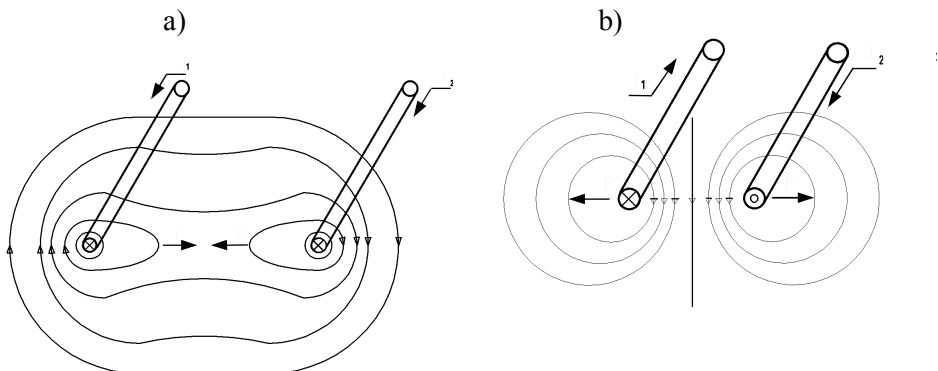


Rys. 1.16. Reguła prawej dłoni

Def. 10. Reguła prawej dłoni: jeżeli linie pola magnetycznego zwrócone są ku otwartej dłoni prawej ręki, a kciuk wskazuje ruch przewodu, to pozostałe palce wskazują zwrot indukującego się napięcia.

1.8. Wzajemne oddziaływanie dwóch przewodów z prądem

Jeżeli w dwóch przewodach równoległych płyną prądy elektryczne I_1 i I_2 , to powstają między nimi siły wzajemnego oddziaływania. Zjawisko to najlepiej rozpatrywać na podstawie obrazu pola magnetycznego dla dwóch możliwych przypadków przepływu prądu. Z rysunku 1.17a widać, że przez nałożenie pól wywołanych przez prądy o różnych zwrotach między przewodami występuje zagęszczenie linii pola. Linie te usiłują oddalić przewody do obszaru o mniejszej gęstości, przez co powstaje siła elektrodynamiczna prostopadła do kierunku pola i prądu. Przeciwne działanie dynamiczne powstaje dla prądów jednakowego zwrotu (rys. 1.17b); przewody przyciągają się.



Rys. 1.17. Pole wytworzone przez dwa równoległe przewody z prądem, gdzie: a) – zgodne zwroty prądu w przewodach, b) – przeciwne zwroty prądu w przewodach

Siłę F wzajemnego przyciągania się lub odpychania dwóch równoległych przewodów, w których płyną prądy I_1 i I_2 , oblicza się w niutonach ze wzoru:

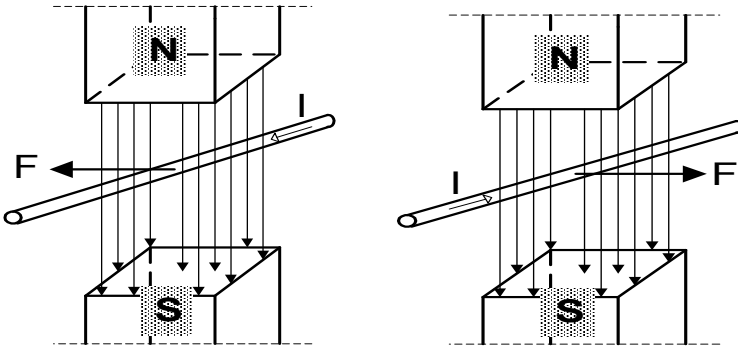
$$F = \frac{\mu_0 l}{2\pi a} I_1 I_2. \quad (1.35)$$

Podstawiając do powyższego wzoru wartość μ_0 otrzymuje się:

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{l}{a} I_1 I_2 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} I_1 I_2, \quad (1.36)$$

gdzie: a – odstęp między przewodami.

Wzajemne oddziaływanie dwóch przewodów z prądem można przedstawić jako przewód o długości l wiodący prąd I umieszczony w polu magnetycznym o gęstości B , wywołanej przez drugi przewód (rys. 1.18).



Rys. 1.18. Oddziaływanie pola magnetycznego na przewód z prądem

Ponieważ:

$$B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{I_2}{2\pi a}, \quad (1.37)$$

Więc:

$$F = B \cdot I \cdot l. \quad (1.38)$$

Zależność (1.38) wyraża podstawową zależność w elektrotechnice będącą podstawą działania silników elektrycznych, którą jest siła elektrodynamiczna F . Ogólnie rzecz biorąc I i B są wektorami. Iloczyn wektorowy ($I \times B$) daje w wyniku wektor skierowany pod kątem prostym wzajemnie do obu wektorów. Amplituda iloczynu wektorowego wynosi:

$$F = I B \sin \alpha, \quad (1.39)$$

gdzie: α – kąt zawarty między wektorem natężenia prądu I , a wektorem indukcji magnetycznej B .

W większości maszyn elektrycznych (przetworników elektromechanicznych) przewodniki są umieszczone pod kątem prostym w stosunku do wektora pola, tak że wyrażenie $F = B \cdot I \cdot l$ jest wystarczające, lecz należy pamiętać, że ogólnie prawo Laplace'a ma postać:

$$F = l(B \times I). \quad (1.40)$$

Prawo Laplace'a jest podstawowym prawem w teorii silników elektrycznych. Siła działająca na ładunek poruszający się poprzecznie do linii pola magnetycznego wynika z powyższego równania. Ponieważ:

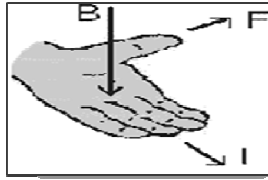
$$I = \frac{q}{t}. \quad (1.41)$$

można napisać:

$$F = q(B \times v), \quad (1.42)$$

gdzie: v – prędkość liniowa ładunku elektrycznego w polu magnetycznym w m/s.

W przestrzeni zorientowanej prawoskrętnie układy wektorów tworzą trójkę prawoskrętną. Do iloczynu wektorowego dwóch wektorów odnosi się w elektrotechnice reguła śruby prawoskrętnej (korkociągu). Nie mniej użyteczną w praktyce przy określaniu zwrotu siły jest również reguła lewej dłoni (rys. 1.19).



Rys. 1.19. Schemat przedstawiający istotę reguły lewej dłoni

Def. 11. Reguły lewej dłoni: jeżeli wektor indukcji B wchodzi do otwartej dłoni lewej ręki, a wyciągnięte cztery palce pokrywają się ze zwrotem prądu, to wyciągnięty kciuk wskazuje zwrot siły działającej na przewod.

1.9. Indukcyjność własna

Siła elektromotoryczna indukuje się niezależnie od przyczyny zmiany strumienia magnetycznego. Zmianę strumienia objętego przez obwód elektryczny może np. wywołać prąd płynący w tym samym obwodzie, jeżeli w elementarnym czasie dt nastąpi zmiana prądu o di . Zmianę prądu można wywołać jednorazowo przez proces łączeniowy lub okresowo, co ma miejsce przy prądzie przemiennym. Wartość indukowanej SEM, zwanej siłą elektromotoryczną *samoindukcji*, określa prawo indukcji elektromagnetycznej:

$$e = -z \frac{d\phi}{dt}. \quad (1.43)$$

Określając strumień ϕ z prawa Ohma dla obwodu magnetycznego uzyskano zależność:

$$\phi = \frac{\Theta}{R_m} = \frac{Iz}{R_m}. \quad (1.44)$$

Powyższych dwu zależności otrzymuje się:

$$e_L = -\frac{z^2}{R_m} \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}. \quad (1.45)$$

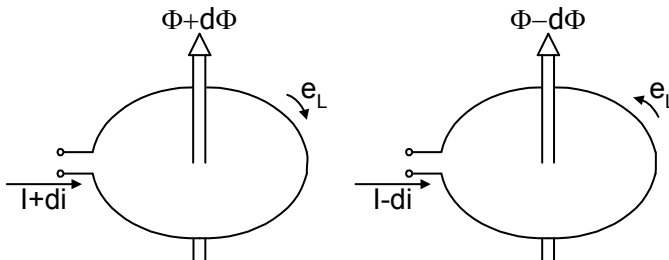
Wielkość L w zależności (1.45) nazywa się *indukcyjnością własną* (*współczynnikiem samoindukcji*) określonego układu przewodów, np. zwoju lub cewki:

$$L = \frac{z^2}{R_m} = z^2 \frac{\mu_0 \mu_r S}{l}, \quad [1 \frac{V \cdot s}{A} = 1 \Omega \cdot s = 1H]. \quad (1.46)$$

Powyższe równanie wykazuje, że indukcyjność własna zależy tylko od parametrów układu przewodów, a więc jest jego określoną własnością. Zgodnie z regułą Lenza SEM e_L przeciwdziała zmianom prądu, a więc przy wzroście prądu ($I+di$) SEM e_L ma zwrot przeciwny do prądu; przy zanikaniu prądu ($I-di$) SEM e_L ma zwrot zgodny z prądem (rys. 1.20). Jednostkę indukcyjności L określa się ze wzoru (1.46).

Def. 12. Jednostki indukcyjności 1 [H]. $1[H]$ henr jest indukcyjnością takiego obwodu, w którym przy zmianie prądu o 1 amper na sekundę indukuje się SEM równa 1 voltowi. Aby wzrastający prąd mógł przepłynąć przez odcinek obwodu elektrycznego o indukcyjności L , należy przewyciężyć przeciwdziałającą siłę elektromotoryczną samoindukcji, a więc występujące na indukcyjności L napięcie wynosi:

$$u_L = -e_L. \quad (1.47)$$

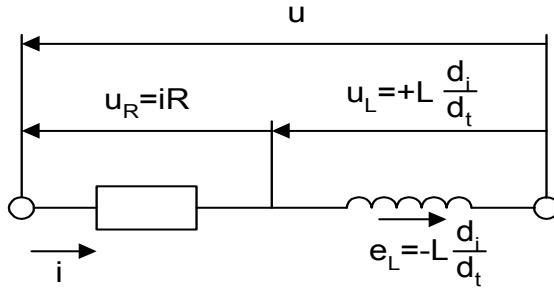


Rys. 1.20. Zwrot SEM samoindukcji

W związku z powyższym na elemencie obwodu o indukcyjności L i zawsze istniejącej w nim rezystancji R występują przy zmianie prądu ($I+di$) dwa spadki napięcia:

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} \quad \text{lub} \quad u = u_R + u_L. \quad (1.48)$$

Spadki te oznaczone są na rysunku 1.21 oddzielnie, chociaż występują na tym samym elemencie obwodu.



Rys. 1.21. Spadki napięcia w gałęziach z indukcyjnością

Z dotychczasowych zaprezentowanych rozważań wynika, że każdy przewód musi posiadać indukcyjność L o określonej wartości, ponieważ zmiana prądu jest związana ze zmianą strumienia. Indukcyjności pojedynczych przewodów są jednak małe w porównaniu z indukcyjnością cewek. Jak wynika ze wzoru szczególnie liczba zwojów i przenikalność magnetyczna mają duży wpływ na indukcyjność cewki. Na podstawie zależności opisującej indukcyjność własną można również wywnioskować, że:

- cewka nawinięta na rdzeniu magnetycznym ma znacznie większą indukcyjność niż cewka umieszczona w powietrzu,
- indukcyjność cewki nawiniętej na rdzeniu nie jest stała, lecz zależy od nasycenia obwodu magnetycznego.

Dlatego w obwodach elektrycznych, które powinny mieć dużą indukcyjność umieszcza się cewki o dużej liczbie zwojów, nawiniętych na rdzeniu stalowym. Cewki takie przeciwstawiają się wzrostowi prądu i dlatego nazywa się je dławikami. Dławiki są ważnymi elementami elektromagnetycznymi stosowanymi we wszystkich gałęziach elektrotechniki.

1.10. Indukcyjność wzajemna

Indukowanie SEM w cewce znajdującej się w polu wytworzonym przez drugą cewkę nazywa się *indukcją wzajemną*. Sprzężenie obu cewek przez strumień zwykle nie jest całkowite (rys. 1.22) i wytworzony przez cewkę 1 strumień przenika tylko częściowo cewkę 2. Obie cewki są sprzężone wzajemnie strumieniem ϕ_{12} , który nazywa się strumieniem głównym, pozostała część strumienia nazywa się strumieniem rozproszenia. Zmiana prądu w cewce 1 powoduje zmianę strumienia magnetycznego, dzięki czemu w cewce 2 indukuje się SEM:

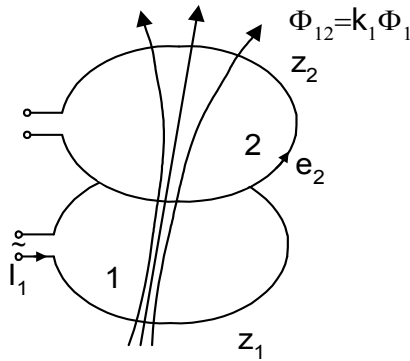
$$e_2 = -z_2 \frac{d\phi_{12}}{dt}. \quad (1.49)$$

Podstawiając:

$$\phi_{12} = k_1 \phi_1 = k_1 \frac{i_1 z_1}{R_{m1}}, \quad (1.50)$$

otrzymuje się:

$$e_2 = -\frac{k_1 z_1 z_2}{R_{m1}} \frac{di_1}{dt} = -L_{12} \frac{di_1}{dt}. \quad (1.51)$$



Rys. 1.22. Indukcyjność wzajemna w układzie pojedynczych zwojów

W podobny sposób przy zmianie zasilania cewek:

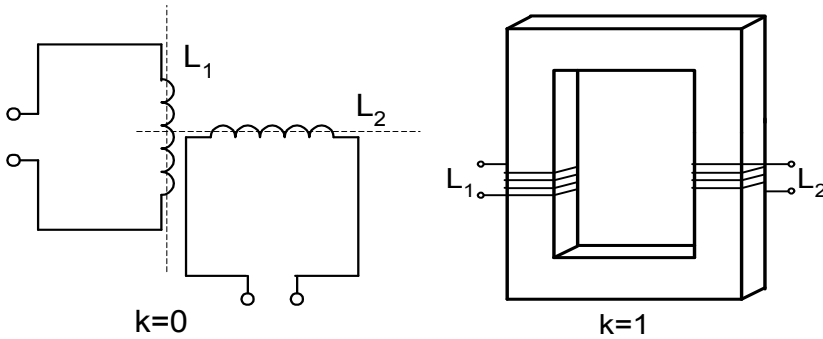
$$e_1 = -\frac{k_2 z_1 z_2}{R_{m2}} \frac{di_2}{dt} = -L_{21} \frac{di_2}{dt}. \quad (1.52)$$

Można wykazać, że $L_{12} = L_{21}$. Wielkość L_{12} lub L_{21} nazywa się *indukcyjnością wzajemną* (*współczynnikiem indukcyjności wzajemnej*) określonego układu cewek. Jednostką indukcyjności wzajemnej jest [H] (*henr*) (rys. 1.23).

W przypadku, gdy strumień rozproszony jest równy zero, sprzężenie jest całkowite:

$$L_{12} = \sqrt{L_1 L_2}, \quad (1.53)$$

gdzie: L_1 i L_2 są indukcyjnościami własnymi cewek 1 i 2.



Rys. 1.23. Układy cewek dla ekstremalnych współczynników sprzężenia

Przy sprzężeniu nie całkowitym:

$$L_{12} = k\sqrt{L_1L_2}, \quad (1.54)$$

gdzie: $k = \sqrt{k_1k_2}$ nazywa się współczynnikami sprzężenia.

Współczynniki sprzężenia k_1 określa udział zwoju I w wytwarzaniu wzajemnego strumienia magnesującego. Współczynnik sprzężenia ma wartości ekstremalne $k = 0$ i $k = 1$. Mogą być one osiągnięte przez odpowiednie układy cewek (rys. 1.23). Niesprężone magnetycznie ($k = 0$) są dwa zwoje, których powierzchnie są do siebie prostopadłe. Prawie całkowicie sprzężone ($k = 1$) są dwa uzwojenia nawinięte współosiowo na wspólnym rdzeniu z materiału magnetycznego. Głównym przedstawicielem cewek sprzężonych magnetycznie jest transformator.

2. Badanie akumulatora

Treścią niniejszego rozdziału jest omówienie zasad budowy, działania, parametrów, właściwości i charakterystyk akumulatorów samochodowych.

2.1. Wiadomości wstępne

Akumulator to źródło energii elektrycznej prądu stałego [1-9, 6, 8, 10-12]. Prądu, którego sam nie wytwarza, lecz magazynuje w postaci energii chemicznej. W samochodach akumulator służy do zasilania urządzeń elektrycznych w momencie, gdy silnik spalinowy jest wyłączony. Zużyta energię elektryczną akumulatora w czasie postoju lub rozruchu silnika spalinowego uzupełnia się dzięki prądnicy w czasie pracy silnika. Akumulator jest rodzajem ogniwa galwanicznego. Ogniwo takie składa się z dwóch elektrod zanurzonych w elektrolicie, którym może być zasada lub kwas.

Akumulatory niklowo-kadmowe charakteryzują się znacznie wyższą w porównaniu z ołowiowo-kwasowymi gęstością magazynowanej energii (do 80 Wh/kg). Przy prawidłowej eksploatacji akumulatory niklowo-wodorkowe są bardzo trwałe. Baterie trakcyjne wykonane w tej technologii osiągają przebiegi nawet 160 tys. km w ciągu 10 lat użytkowania. Wadą akumulatorów niklowo-wodorkowych jest duża skłonność do samorozładowania oraz skomplikowany cykl ładowania. Napięcie pojedynczego ogniwa wynosi 1,2 V.

Obecnie coraz większą popularnością szczególnie w pojazdach z systemem start/stop cieszą się akumulatory litowe z uwagi na bardzo dużą gęstość energii (do 200 Wh/kg). Ogniwa litowe występują w wielu odmianach różniących się materiałami elektrod, które bazują na związkach litu. Elektrolit stanowią rozpuszczone sole litu. W zastosowaniach trakcyjnych wykorzystuje się akumulatory litowo-jonowe i litowo-polimerowe. Napięcie pojedynczego ogniwa wynosi 3,6 V. Akumulatory litowe są uważane za przyszłość elektrycznej motoryzacji i na ich rozwoju koncentrują się producenci i laboratoria naukowe. Nad nowym rozwiązaniem w akumulatorach litowych pracują specjaliści IBM. Są to ogniwa litowo-powietrzne, które charakteryzują się największą zdolnością magazynowania energii elektrycznej. W takim ogniwie tlen zawarty w powietrzu jest wykorzystywany jako elektroda dodatnia.

Nowym rozwiązaniem technicznym w zakresie gromadzenia energii elektrycznej są akumulatory typu ZEBRA. Akumulator taki jest zbudowany w oparciu o ogniwa wysokotemperaturowe, w których jako elektrolitu używa się stopionych związków sodu. Gęstość energii wykonanej w tej technologii baterii trakcyjnej wynosi 120 Wh/kg. Bateria taka wymaga jednak podgrzania elektrolitu do temperatury około 270°C, co jest kłopotliwe.

2.1.1. Podział akumulatorów

Ze względu na przeznaczenie akumulatory dzielimy na:

- stacyjne, służące do zasilania odbiorników, które wymagają zasilania niezależnego od sieci elektroenergetycznej, np. układy sterowania łącznikami i automatyką sygnalizacją w stacjach elektroenergetycznych, układy zasilania central telefonicznych;
- trakcyjne, służące do zasilania silników jazdy i podnoszenia w wózkach elektrycznych;
- rozruchowe, służące do uruchamiania silników spalinowych w pojazdach.

Akumulatory można podzielić ze względu na rodzaj elektrolitu:

- akumulatory ołowiowe (elektrolitem jest roztwór kwasu);
- żelazowo-niklowe, kadmowo-niklowe, cynkowo-srebrkowe, kadmowo-srebrkowe (elektrolitem jest roztwór zasady).

Akumulatory można podzielić również ze względu na ich obsługę:

- bezobsługowe (nie wymagają żadnej obsługi ani konserwacji w okresie podanym przez instrukcję);
- obsługowe (wymagają okresowych przeglądów i uzupełniania elektrolitu).

Akumulatory można rozróżniać również pod względem ich uprzedniego stanu naładowania:

- suchy nie ładowany (zalewany elektrolitem o gęstości $1,265 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ i ładowany prądem $I = 0,05Q_{20}$ aż elektrolit zacznie jednakowo gazować we wszystkich ogniwach i osiągnie gęstość $1,285 \text{ [g/cm}^3\text{]}$; gdzie Q – pojemność akumulatora [Ah]);
- suchy ładowany (jeżeli nie jest starszy niż 6 miesięcy to wystarczy zalać go elektrolitem o gęstość $1,28 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ po czym można go w normalny sposób eksploatować; w przypadku gdy jest starszy niż 6 miesięcy wymagane jest ładowanie prądem $I = 0,05Q_{20}$ przez $4 - 10 \text{ [h]}$).

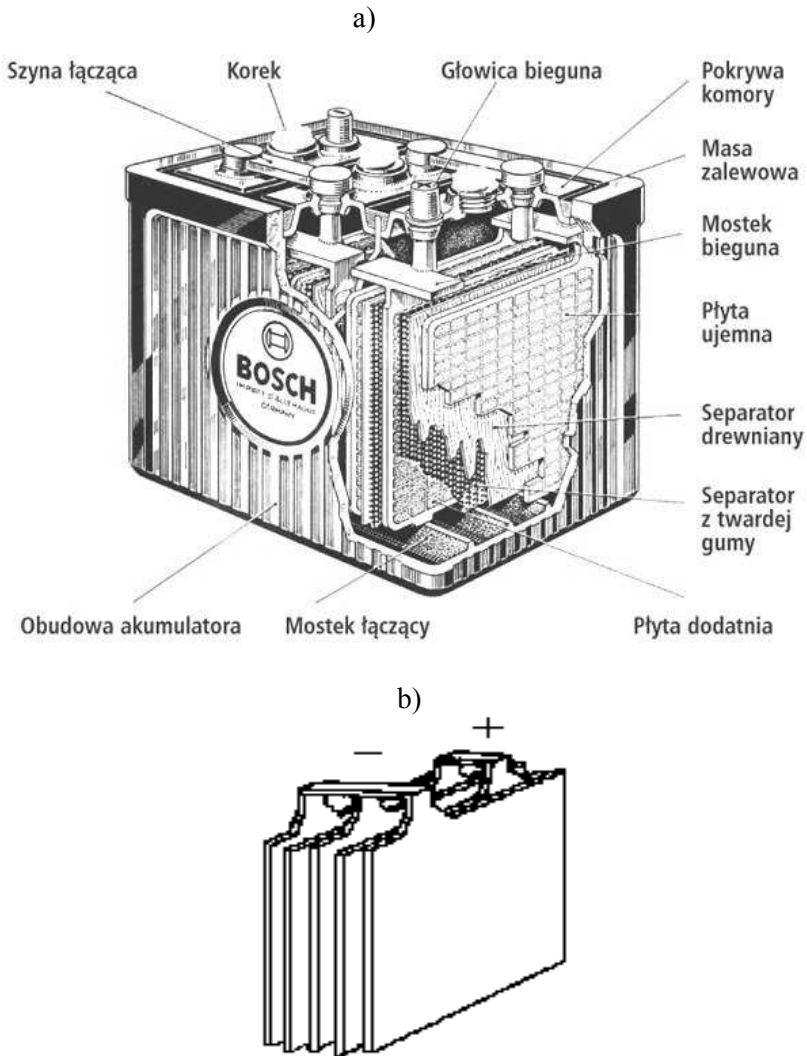
2.2. Akumulator kwasowy

2.2.1. Budowa klasycznego akumulatora ołowiowego

Akumulatory ołowiowe są w dzisiejszych czasach najbardziej rozpowszechnione w przemyśle motoryzacyjnym. Podczas badań nad ogniwami galwanicznymi stwierdzono dość świadczalnie, że jony elektrolizy metalu umieszczonego w elektrolicie mają zdolność do przejścia do elektrolitu, a jony elektrolitu przechodzą

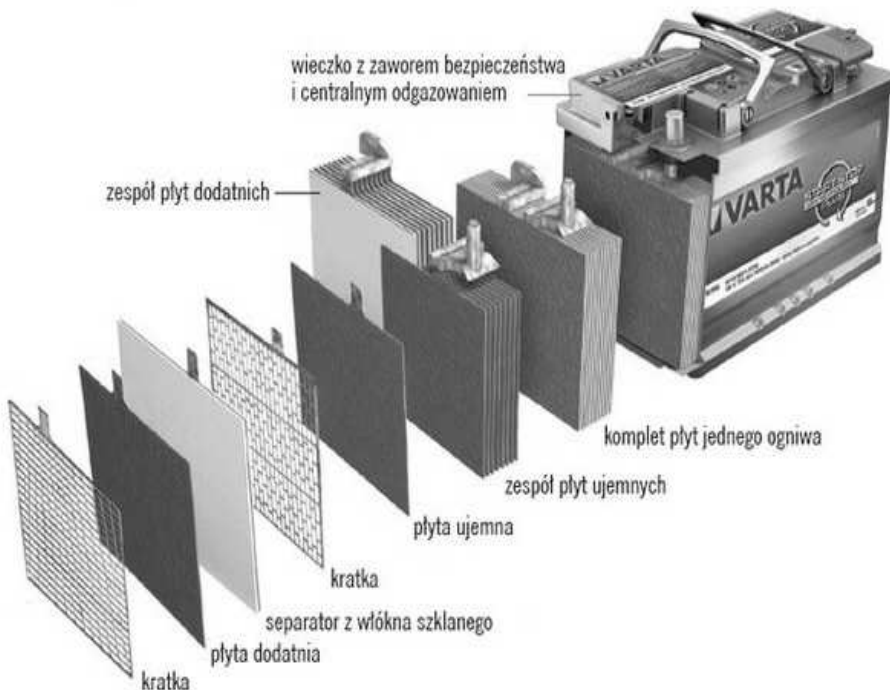
do metalu. W przypadku, gdy więcej jonów przejdzie z metalu do elektrolitu to metal ten wykaże potencjał (ładunek) ujemny, a elektrolit dodatni.

Akumulator kwasowy jest zbudowany z kilku połączonych szeregowo ogniw, umieszczonych w obudowie oraz zanurzonych w 40% roztworze kwasu siarkowego. Każde ogniwo (rys. 2.1. a i b) posiada dwie elektrody, są to anoda i katoda.



Rys. 2.1. Konstrukcja akumulatora ołowianego, gdzie: a) – budowa akumulatora ołowianego, b) – ogniwo akumulatora - zespół płyt dodatnich i ujemnych

Wszystkie ogniwa akumulatora składają się z dwóch zespołów płyt dodatnich i ujemnych. W akumulatorze ołowiowym, podczas pracy anodą (+) jest ołów gąbczasty (Pb), a katodą (-) dwutlenek ołowiu (PbO₂). W zastosowanej technologii Start/Stop potrzeba specjalnego alternatora i akumulatora odpornego na dużą ilość cykli rozruchu (rys. 2.2).



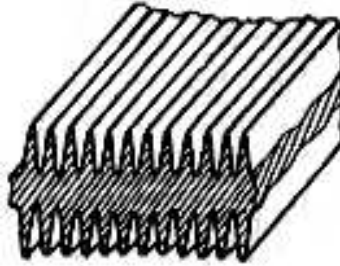
Rys. 2.2. Struktura akumulatora do zastosowań w systemach Start/Stop, akumulator typu S6 AGM [42]

Zwykły akumulator bardzo szybko traci swoją żywotność. System Start/Stop charakteryzuje się dużo większą liczbą cykli rozruchu silnika (częste wyłączenie oraz start silnika) oraz zapotrzebowaniem odbiorników prądu (radio, światła, klimatyzacja) na energię przy wyłączonym silniku. Praca silnika wyposażonego w System Start/Stop prowadzi do „większej głębokości” rozładowania akumulatora. System wymaga specjalnego akumulatora odpornego na dużą liczbę cykli rozładowania, gdyż konwencjonalne akumulatory mogą nie spełniać wymagań Systemu Start/Stop. Firma Bosch opracowała dwie nowe linie akumulatorów do zastosowań w Systemach Start/Stop S5 EFB i S6 AGM (rys. 2.2) [4-6, 38, 42]. Oferują one odpowiednie rozwiązania dla niemal każdego pojazdu i są częścią oryginalnego wyposażenia

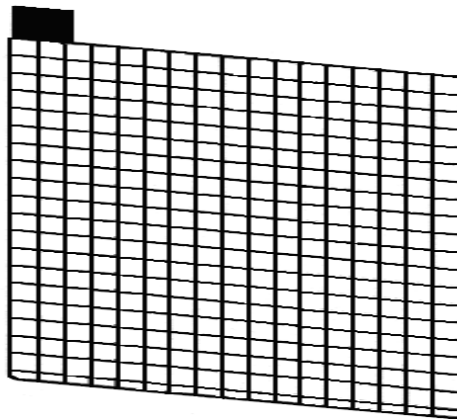
wielu nowych samochodów. W Systemach Start/Stop wyróżniamy dwa rodzaje akumulatorów:

1. Akumulatory do pojazdów z podstawową funkcją Start/Stop bez funkcji odzyskiwania energii z siły hamowania – akumulatory EFB (Enhanced Flooded Battery).
2. Akumulatory do pojazdów z funkcją odzyskiwania energii z siły hamowania (rekuperacja) – akumulatory AGM (Absorbent Glass Mat/ Technologia wiązania elektrolitu w macie szklanej).

Płyty ogniw (rys. 2.3 i 2.4) składają się z rdzenia przewodzącego, czyli tzw. Kratki i umieszczonej w niej czynnej elektrochemicznej masy, zwanej masą czynną.



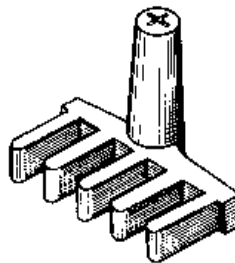
Rys. 2.3. Płyta akumulatora przekrój



Rys. 2.4. Typowa kratka będąca nośnikiem masy czynnej

Kratki przedstawione na rys. 2.4 produkowane są w głównej mierze przez wylewanie stopionego ołowiu do odpowiednich form. Wcześniej był to stop

ołowiu z antymonem jednak zaprzestano stosowania antymonu ze względu na zatrucia tym pierwiastkiem (SbH_3), jak i przyspieszanie procesu samorozładowania z wydzieleniem wodoru. Występuje to w przypadku wypłukania antymonu z kratki przez elektrolit. Następnie antymon osadza się na elektrodzie ujemnej przyspieszając proces samorozładowania. Przyczyną tego jest to, że napięcie potrzebne do wydzielenia się wodoru na elektrodzie z antymonu jest znacznie niższe od tego, które jest potrzebne by wodór wydzielił się na elektrodzie z ołowiu. Kolejnym rozwiązaniem są kratki wykonane z tworzyw. Użycie kratki plastikowych pozwala na produkcję lekkich ogniw, co obniża znacząco wagę całego akumulatora. Plastikowe kratki mają zamontowane paski ołowiu, dzięki którym zapewniony jest kontakt elektryczny. Kratki tego typu pozwalają uzyskać mniejszą oporność wewnętrzną ogniwa, oraz ograniczają rozpraszanie aktywnych materiałów. Materiał elektrod ulega bowiem kruszeniu z biegiem czasu oraz na skutek cykli ładowania – rozładowania akumulatora, skutkiem tego jest zmniejszenie się pojemności ogniwa. Kratki wypełniane są masą czynną, którą wpasowuje się między jej elementy. Pasty to mieszanina proszku ołowiu i pewnych dodatków. Proszek składa się z tlenku ołowiu o zawartości od 55 do 85 [%] i ołowiu metalicznego w ilości od 15 do 45 [%]. Masę płyty dodatniej otrzymuje się mieszając najpierw na sucho proszek ołowiowy z fibry pro-pylenową bądź dnyelową. Ma to zapewnić większą wytrzymałość masy. Mieszanka sucha masy płyty ujemnej również zawiera proszek, ale także ekspandy-ry w ilości do 3 [%]. Następnym krokiem jest dodanie wody i kwasu siarkowe-go w odpowiednich proporcjach do mieszanek suchych. Kwas przyczynia się do powstania zasadowych siarczanów ołowiu, co sprzyja utlenianiu proszku ołowiu zwiększając zawartość PbO_2 do 80 [%]. Kratki ogniwa anody jak i katody są łączone równolegle przy pomocy mostka biegunowego (rys. 2.5) (płyt ujem-nych jest o jedną więcej niżeli dodatnich).



Rys. 2.5. Mostek biegunowy skrajnego ogniwa

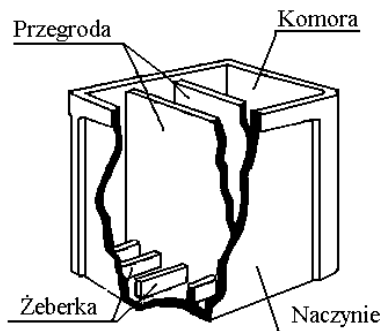
Zespół płyt ujemnych umieszcza się z zespołem płyt dodatnich tak, aby płyty dodatnie sąsiadowały z ujemnymi. Są one od nich oddzielone przekładkami o właściwościach izolacyjnych, mimo wszystko umożliwiającymi swo-

bodny ruch elektrolitu. Przekładki między płytowe zwane czasem separatorami powinny przewodzić jony jednak nie powinny przewodzić elektronów. Separatory powinny charakteryzować się dużą wytrzymałością mechaniczną oraz odpornością chemiczną na działanie elektrolitu. Przekładki mogą być wykonane ze spiekane go polichloru winylu, wytłaczanego polietylenu, papierowe impregnowane żywicą, z waty szklanej bądź lateksowe. Separatory mogą być z żebrami (rys. 2.6) lub bez a grubość całkowita przekładki może wynosić od 1,1 do 2,3 [mm].



Rys. 2.6. Przekrój przekładki uźebrowanej

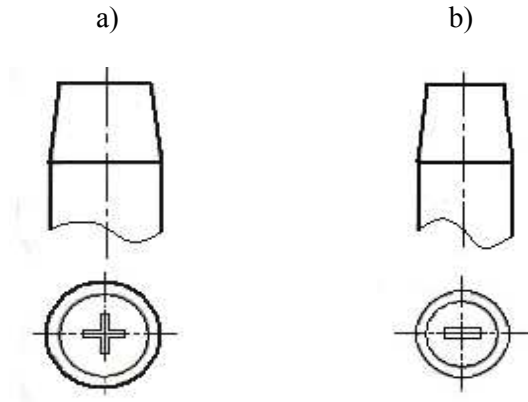
Przekładki powinny przylegać do płyty ujemnej, a od strony płyty dodatniej pozostawiać wolną przestrzeń dla wymiany elektrolitu i to bez względu na rodzaj użytych separatorów. Od strony płyty dodatniej umieszcza się żebra lub watę szklaną. Płyty wsparte są na pionowych żeberkach (rys. 2.7) obudowy akumulatora. Dzięki nim między dolnymi krawędziami płyt a dnem obudowy powstaje wolna przestrzeń, w której zbierają się wypadające z płyt cząstki masy czynnej oraz zanieczyszczenia. Zabezpiecza to akumulator przed powstawaniem zwarć wewnętrznych.



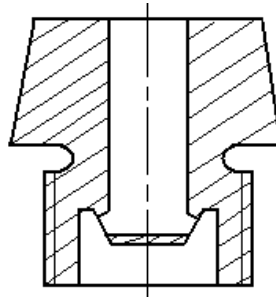
Rys. 2.7. Obudowa akumulatora

Ogniwa są umieszczone w oddzielnych komorach obudowy, zwanej blokiem. Łączy się je szeregowo za pomocą łączników międzyogniowych, a końcówki mostków skrajnych ogniów wyprowadza się na zewnątrz obudowy

w postaci tzw. zacisków biegunowych w kształcie ściętych stożków (rys. 2.8 i 2.9).



Rys. 2.8. Zaciski akumulatora; a) – dodatni, b) – ujemny



Rys. 2.9. Korek ogniwa z otworem odpowietrzającym

Na zaciskach lub obok nich są umieszczone znaki „+” i „-”. Ponadto zacisk dodatni akumulatora ma większą średnicę. Na zaciski akumulatora mocuje się końcówki przewodów akumulatorowych, wykonanych ze stali lub mosiądzu. Mogą być również pokrywane ołowiem. Dla uniknięcia pomyłki w czasie podłączania, końcówki przewodów mają różne średnice, odpowiadające średnicom zacisków akumulatora. Napięcie na zaciskach akumulatora zależy od ilości użytych ogniw i tak sześciowoltowy akumulator składa się z 3 ogniw, dwunastowoltowy z 6 ogniw, dwudziestoczworowoltowy z 12 ogniw. Komory akumulatora napełnia się elektrolitem przez otwory wlewowe (akumulator wymagający obsługi). Korki otworów wlewowych (rys. 2.9) umożliwiają wydostanie się powstałych gazów i jednocześnie uniemożliwiają wylanie się elektrolitu.

2.2.2. Elektrolit

W akumulatorach ołowiowych elektrolitem jest wodny roztwór czystego chemicznie kwasu siarkowego H_2SO_4 . Elektrolit przygotowuje się ze stężonego kwasu siarkowego i wody destylowanej. Stężony kwas, jak i woda nie mogą posiadać ewentualnych zanieczyszczeń, gdyż mogą one prowadzić do nieodwracalnego uszkodzenia płyt akumulatorowych. Dzięki zachowaniu odpowiednich proporcji kwasu siarkowego i wody destylowanej można otrzymać elektrolit o wymaganej gęstości (tabela 2.1). Z powodów bezpieczeństwa należy pamiętać, że zawsze wlewamy kwas do wody a nie odwrotnie. Kwas należy wlewać powoli, utrzymując ciekłą i ciągłą strugę. Roztwór należy zamieszać prętem wykonanym z materiału kwasoodpornego uważając, aby temperatura roztworu nie przekroczyła $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Gęstość elektrolitu jest zależna od tego, jaki rodzaj akumulatora chcemy nim napelnić. Jeżeli jest to akumulator suchy i nie ładowany w takim przypadku elektrolit powinien mieć gęstość $1,26\text{ [g/cm}^3\text{]}$ a sytuacji, gdy jest on suchy, lecz ładowany to używamy elektrolitu o gęstości $1,285\text{ [g/cm}^3\text{]}$. Gęstość elektrolitu można sprawdzić za pomocą areometru. Akumulator napelnia się do poziomu od 10 do 15 [mm] powyżej górnych krawędzi płyt. Poziom elektrolitu można sprawdzić za pomocą szklanej rurki, którą należy zanurzyć przez otwór wlewowy aż do oparcia o płyty.

Tab. 2.1. Objętościowa zawartość stężonego kwasu i wody destylowanej w elektrolicie gęstość zależności od wymaganej gęstości

| Wymagana gęstość elektrolitu | [g/cm ³] | 1,2 | 1,22 | 1,24 | 1,26 | 1,285 |
|------------------------------|----------------------|-----|------|------|------|-------|
| Stężony kwas siarkowy | [cm ³] | 180 | 200 | 220 | 240 | 260 |
| Woda destylowana | [cm ³] | 820 | 800 | 780 | 760 | 740 |

Po zatkaniu rurki palcem wyjmuje się ją i odczytuje wysokość słupa cieczy w rurce. Czasem na obudowie jest zaznaczony przez producenta poziom elektrolitu i gdy przejrzystość obudowy pozwala dostrzec stan napelnienia to możemy go kontrolować.

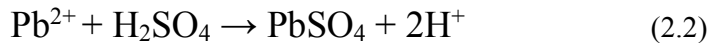
2.3. Procesy prądotwórcze zachodzące w akumulatorze

Reakcje chemiczne zachodzące podczas wytwarzania energii elektrycznej w akumulatorze są przedstawiane w sposób następujący:

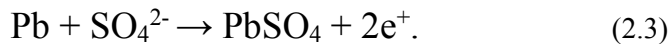
- Elektroda ujemna. Jest ona wykonana z ołowiu gąbczastego, który przechodzi do roztworu:



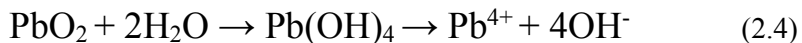
W obecności kwasu siarkowego powstaje siarczan ołowiu i wodor.



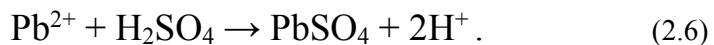
Siarczan ołowiu jest związkiem słabo rozpuszczalnym, który pozostaje na elektrodzie w postaci stałej. W sposób uproszczony reakcję można przedstawić:



- Elektroda dodatnia zawiera dwutlenek ołowiu. Tworzą się na niej czterowartościowe jony ołowiu, które następnie przechodzą w jony dwuwartościowe:



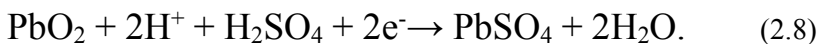
Jony Pb^{2+} reagują z kwasem siarkowym i podobny sposób jak na elektrodzie ujemnej powstaje siarczan ołowiu:



Znajdujące się w elektrolicie jony wodoru H^{+} wiążą się z jonami OH^{-}



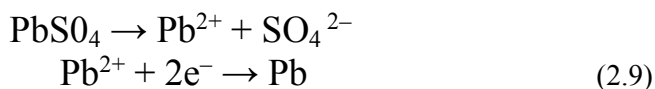
W sposób uproszczony możemy zapisać te reakcje w następujący sposób:



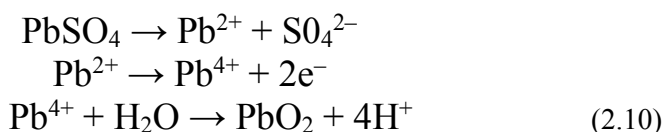
W czasie reakcji rozładowania powstaje woda, co wpływa na zmniejszenie gęstości elektrolitu. Ma to miejsce głównie w pobliżu elektrody dodatniej.

Reakcje chemiczne zachodzące podczas ładowania akumulatora są przedstawiane w sposób następujący:

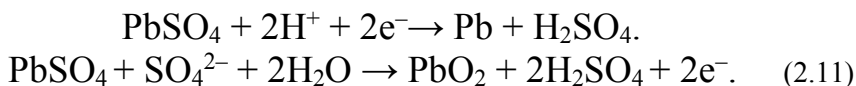
- **Elektroda ujemna:**



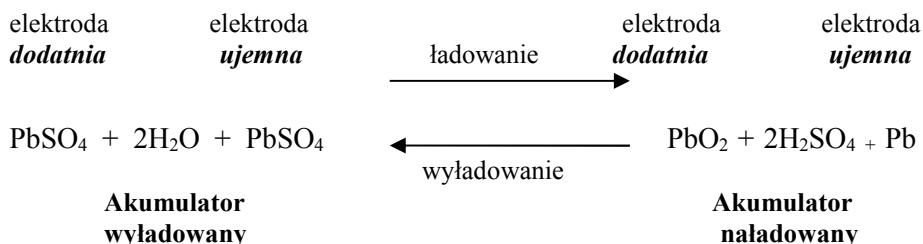
- **Elektroda dodatnia:**



Reakcje te można zapisać następująco:

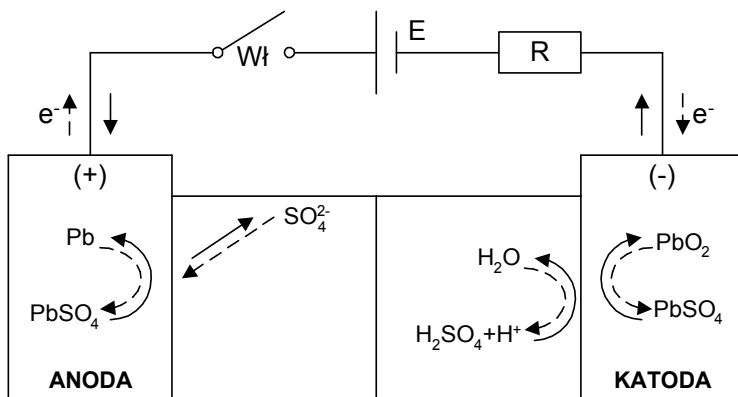


Wyzwalane podczas ładowania jony SO_4 łączą się powtórnie z jonami wodoru H_2 tworząc na nowo kwas siarkowy. Wraz ze wzrostem ilości kwasu rośnie także gęstość elektrolitu. Ponadto przez źródło ładowania przechodzą dwa ładunki ujemne z elektrody ujemnej do dodatniej, czyli ze źródła zewnętrznego jest doprowadzona energia elektryczna do układu. Po uwzględnieniu prawa Faradaya i zastosowaniu sumarycznego zapisu reakcji chemicznych zachodzących na elektrodach przebieg reakcji pod względem jakościowym i ilościowym można zapisać w następujący sposób:



Wskutek zachodzących reakcji chemicznych płyty ulegają zsiarczeniu przy wyładowaniu akumulatora zaś odsiarczają się, gdy dostarczamy do niego ener-

gię w postaci prądu stałego. Prąd dostarczamy z prądnicy bądź prostownika podłączonego do sieci zewnętrznej. Działanie akumulatora można przedstawić również graficznie (rys. 2.10).



Rys. 2.10. Schemat działania akumulatora ołowiowego

2.4. Akumulatory zasadowe

Do tego typu akumulatorów zalicza się te, do wykonania których użyto następujących pierwiastków jako elektrody: kadm, nikiel, cynk, srebro, żelazo. Następnie utworzono z nich niniejsze zestawienia: żelazowo-niklowe, kadmowo-niklowe, cynkowo-srebrowe, kadmowo-srebrowe, żelazowo-kadmowe, srebrowo-żelazowe (litowe). W wymienionych akumulatorach elektrolitem jest wodny roztwór wodorotlenku potasu KOH o gęstości $1,17 \div 1,21$ [kg/dcm^3]. Budowa takich akumulatorów nie odbiega w znacząco od konstrukcji akumulatorów kwasowych, różnią się one przede wszystkim wykonaniem kratek. Masę czynną umieszcza się w kieszonkach, połączonych w płyty. Owe kieszonki wykonuje się z perforowanej niklowej i niskowęglowej stali. Innym rozwiązaniem jest użycie płyt spiekanych. Formuje się je ze spiekanej porowatej masy niklowej, zaś masę czynną umieszcza się w porach (stosowane w akumulatorach kadmowo-niklowe). Trzecim rodzajem kratek stosowanych w ogniwach kadmowo-niklowych są mikrorurki niklowe. Powstają one przez chemiczne bądź elektrochemiczne osadzanie niklu na włóknie lub polimerze. Proces pirolizy usuwa włókna tworząc rurki, a te z kolei ułożone tworzą ażurową, trójwymiarową siatkę, którą wypełnia się masą czynną. W pozostałych rodzajach ogniwo stosuje się najczęściej kieszonki. Akumulatory zasadowe w odróżnieniu od kwasowych wykazują dłuższy czas życia, wytrzymałość na przeładowanie. Długi czas przechowywania ogniwo niklowych wpływa tylko w nieznaczny spo-

sób na pojemność. Pobieranie i ładowanie prądem o dużej gęstości nie ma ujemnego wpływu jak ma to miejsce w ogniwie kwasowym, które ulega w takich przypadkach zasiarczeniu. Ogniwa niklowo-kadmowe mają jednak wady takie jak, koszt kadmu oraz niebezpieczeństwo zatrucia się nim, a także problem z utylizacją tych ogniw.

2.5. Akumulatory bezobsługowe

2.5.1. Akumulator bezobsługowy typu MF (Maintenance Free)

Dwadzieścia lat temu wprowadzone zostały na rynek akumulatory bezobsługowe. Akumulator taki może być używany bez potrzeby uzupełniania wody destylowanej w elektrolicie przez okres 2 – 5 lat. Akumulatory te wyparły z rynku wcześniejsze rozwiązanie gdzie należało pilnować poziomu elektrolitu. Zwykle akumulatory ołowiowo-kwasowe tracą pewną ilość wody. Powodem utraty wody nie jest jej odparowanie, lecz elektroliza z wydzieleniem tlenu i wodoru. Proces ten ma miejsce w przypadku rozładowania i przeładowania. Obserwacje i badania wykazały, że występowanie nieznacznych zanieczyszczeń w postaci dodatków metali, a raczej ich soli znacznie przyspiesza proces utraty wody z elektrolitu. Dzieje się tak, ponieważ metale takie jak: mangan, nikiel, platyna, tellur, antymon, arsen, kobalt i żelazo przyczyniają się do obniżenia nad napięcia, przy którym zachodzi proces elektrolizy z wydzieleniem wodoru i tlenu. Wymienione pierwiastki nawet przy bardzo niskim ich stężeniu mają negatywny wpływ na poprawną pracę akumulatora. Funkcjonowanie akumulatora bezobsługowego oparte jest w głównej mierze o następujące trzy zasady:

- zredukowanie prędkości powstawania gazów wodoru i tlenu w okresie eksploatacji;
- rekombinacji powstałych gazów, tlenu i wodoru na powrót do wody;
- posiadaniu nadmiaru elektrolitu, który pokryje straty wody w przeciągu kilku lat działania akumulatora.

W akumulatorach tych modyfikuje się skład krutek (dodatnich), obniża się stężenie antymonu lub całkowicie go eliminuje i zastępuje innym. Jako zamiennik dla antymonu stosuje się wapń, stront, cynę lub aluminium. Kratki wykonane z dodatkiem wapnia znacznie obniżają wydzielanie się wodoru, jednak dodatek ten sprawia kłopoty podczas konstrukcji ogniwa. Występują wtedy problemy z wypełnieniem masą czynną. Czasem do stopów dodaje się srebro i wtedy takie akumulatory nazywamy (ang. silver batteries).

2.5.2. Akumulatory ołowiowe typu VRLA (ang. Valve Regulated Lead – Acid Battery)

Akumulatory typu VRLA to nowa generacja akumulatorów ołowiowych, w których ilość elektrolitu jest dokładnie określona. Zawierają one tylko ilość konieczną a nie, jak to jest w przypadku MF, które mają jego nadmiar. Rozwiązanie tego typu nosi nazwę akumulatorów żelowych, gdyż elektrolit w nich unieruchomiony jest w postaci żelu. Uformowany jest on przez dodatek krzemianów lub w mikroporowatych separatorach. Wykonuje się je najczęściej z włókien szklanych. Budowa tych baterii jest tak zaprojektowana by uniemożliwiała wszelkie wycieki, jednak pozwalała na wydostanie się nagromadzonych gazów powstałych w procesach ubocznych. Zgromadzone gazy przy pewnym ich nadciśnieniu wydostają się na zewnątrz za pomocą zaworu jednostronnego działania. Zawór ten nazywany wentylem otwiera się przy krytycznej wartości ciśnienia, które zależy od rodzaju obudowy i jej wytrzymałości. Zakres ciśnienia, przy którym gazy są uwalniane na zewnątrz akumulatora waha się od 0,0069 do 0,275 [MPa]. Aby w tak szczelnie zamkniętym akumulatorze mógł zajść proces rekombinacji tlenu i wodoru do wody, wymagane jest użycie wewnątrz urządzenia, które umożliwiłoby powstanie tego procesu. W klasycznych akumulatorach funkcję tę spełnia katalizator umieszczony w korkach. Katalizatorem jest platyna z palladem, gdzie utlenia się wodór reagując tworzy wodę, która kierowana jest na powrót do środka akumulatora. W akumulatorach typu VLRA rekombinacja tlenu i wodoru odbywa się na elektrodzie ujemnej (Pb), gdzie tlen reaguje z powstającym tam wodorem, po czym ulegają redukcji do wody. Aby mógł powstać ten proces musi zajść dyfuzja gazów do elektrod, umożliwia to specjalna budowa separatorów. Ograniczono również wymiary elektrody dodatniej (PbO₂) wymuszając w ten sposób, aby wytworzony tlen w czasie ładowania reagował z wodorem na płycie ujemnej. Dla polepszenia tego procesu ogranicza się objętość elektrolitu, ma to działanie usprawniające transportu tlenu. Kolejną cechą budowy ułatwiającą transport gazu jest zmniejszenie odległości między płytami. Zaletą szczelnych akumulatorów VLRA jest uniemożliwienie wydzielania się na zewnątrz oparów kwasu, które mają działanie korodujące.

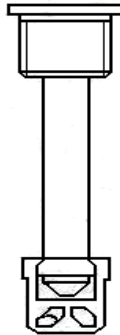
2.6. Badanie diagnostyczne akumulatora

Żywotność akumulatorów zależna jest od ich obsługi i stanu naładowania, wynosi średnio od 3 do 5 lat. Przestrzeganie wskazówek podanych w instrukcji obsługi pojazdu oraz prawidłowa reakcja na pojawienie się pierwszych niedomagań mogą wydłużyć czas jego eksploatacji. Za pomocą wykonania kilku czynności można określić stan techniczny. Pierwszą czynnością są oględziny

obudowy i zacisków a także sprawdzenie poziomu elektrolitu. Następnie mierzymy gęstość elektrolitu, napięcie na zaciskach akumulatora w stanie obciążonym jak i nieobciążonym. Pomiarowi podlega również napięcie w czasie rozruchu silnika.

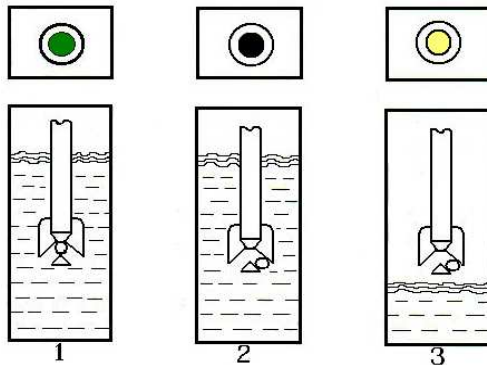
2.6.1. Określenie przydatności akumulatora bezobsługowego

Popularne obecnie akumulatory bezobsługowe posiadają wbudowany areometr (rys. 2.11), co umożliwia nam szybkie oszacowanie stanu naładowania.



Rys. 2.11. Wskaźnik stanu naładowania akumulatora (areometr)

Ocena stanu naładowania odbywa się na podstawie tego, jaki kolor widzimy w środku wziernika (rys. 2.12).

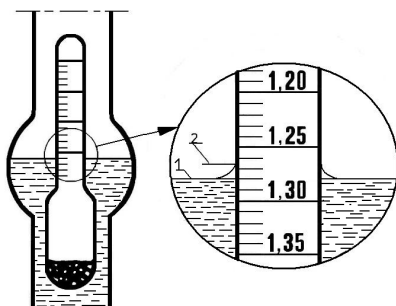


Rys. 2.12. Wskazania aerometru akumulatora bezobsługowego [5, 6, 38], gdzie: 1 – akumulator naładowany powyżej 65%, 2 – akumulator naładowany poniżej 65% zaleca się doładować, 3 – akumulator rozładowany konieczna wymiana

Jeżeli zauważymy kolor zielony (1) będzie to oznaczało, że akumulator jest naładowany powyżej 65 [%] i można go uznać za sprawny. W przypadku koloru ciemnego bądź czarnego (2) otrzymujemy informacje, że poziom naładowania obniżył się poniżej 65 [%], w takim przypadku należy doładować akumulator. Kolor jasny lub jasnożółty (3) świadczy o tym, że areometr nie ma kontaktu z elektrolitem, którego poziom obniżył się. Taka sytuacja oznacza, że akumulator należy wymienić, jeżeli jego moc nie pozwala na uruchomienie silnika.

2.6.2. Pomiar gęstości elektrolitu

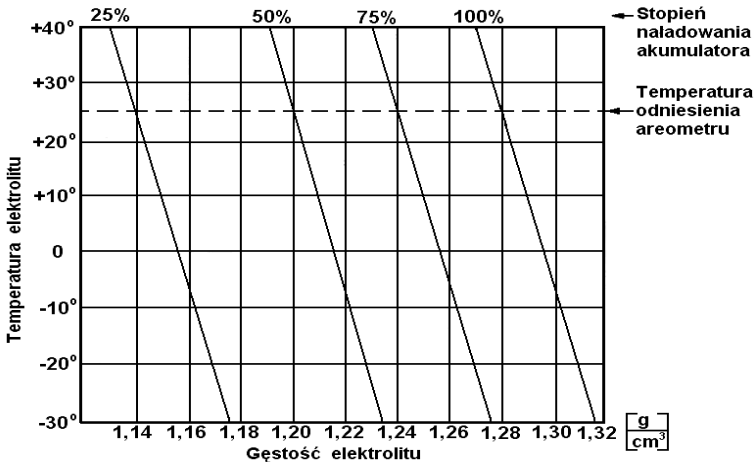
Przez pomiar gęstości elektrolitu można określić stopień naładowania akumulatora w ten sposób ocenimy jego przydatność. Takiego pomiaru dokonać możemy po upływie 30 minut od zakończenia jego pracy lub zakończenia ładowania. W przypadku uzupełnienia elektrolitu musimy odczekać dwie godziny. Do wykonania badania potrzebne są areometr (kwasomierz) o odpowiednim zakresie pomiarowym od 1,10 do 1,30 [kg/dcm³] i termometr. Areometr z podziałką umieszczony jest wewnątrz szklanej pipety zakończonej gruszką, która służy do zasysania odpowiedniej ilości elektrolitu z cel poszczególnych ogniw. Odczytu dokonuje się trzymając pionowo pipetę tak, aby zanurzony areometr nie opierał się o jej ścianki. Z podziałki (rys. 2.13) odczytujemy wartość, która odpowiada gęstości. Zassany elektrolit wlewamy z powrotem do celi, z której go pobraliśmy.



Rys. 2.13. Przykładowy odczyt z areometru [7, 9], gdzie: 1 – prawidłowy, 2 – nieprawidłowy

Jeżeli temperatura otoczenia mieści się w granicy 15 ÷ 30 [°C] to nie ma konieczności mierzenia temperatury elektrolitu (rys. 2.14). Temperatura skalowania aerometru wynosi 25 [°C], jeżeli pomiaru dokonujemy w temperaturze znacznie odbiegającej od tej wartości to odczytaną wartość gęstości elektrolitu należy przeliczyć do temperatury odniesienia. Wygodne jest korzystanie z zasa-

dy, że gęstość maleje o wartość $0,0007 \text{ [kg/dcm}^3\text{]}$ przy wzroście temperatury o $1 \text{ [}^\circ\text{C]}$ i odwrotnie, jest to zadowalająca dokładność pomiaru. Innym sposobem jest korzystanie z wykresu, pozwala to na uniknięcie niezbędnych przeliczeń, jak łatwo zauważyć na wykresie (rys. 2.14).



Rys. 2.14. Wykres do określania stopnia naładowania akumulatora w zależności od gęstości elektrolitu i jego temperatury [4-5]

Akumulator w pełni naładowany w temperaturze $25 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ma elektrolit o gęstości $1,28 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ zaś w temperaturze $-30 \text{ [}^\circ\text{C]}$ wzrasta do $1,318 \text{ [kg/dcm}^3\text{]}$. Na podstawie gęstości elektrolitu wyznaczono według [2] także stopień naładowania akumulatorów podany również w tabeli 2.2.

Tab. 2.2. Wartości gęstości elektrolitu akumulatorów mierzone po kolejnych cyklach rozładowania

| Akumulator 50 Ah | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------------------------|
| Gęstość elektrolitu | Nr cyklu | Nr celi | | | | | | Średnia | Stopień naładowania k [%] |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| ρ [g/cm ³] | 0 | 1,220 | 1,230 | 1,230 | 1,225 | 1,230 | 1,220 | 1,226 | 67,5 |
| | 1 | 1,200 | 1,210 | 1,210 | 1,200 | 1,210 | 1,210 | 1,207 | 58,3 |
| | 2 | 1,180 | 1,190 | 1,180 | 1,190 | 1,190 | 1,180 | 1,185 | 47,5 |
| | 3 (42') | 1,175 | 1,180 | 1,180 | 1,175 | 1,180 | 1,170 | 1,177 | 43,3 |

Gęstość elektrolitu zmniejszała się w czasie trwania kolejnych cykli rozładowania. Szybkość zmian gęstości elektrolitu akumulatora w dużym stopniu uzależniona jest od jego stanu technicznego. Gęstość elektrolitu akumulatorów w początkowej fazie rozładowania zmienia się w sposób liniowy, w końcowym okresie nieznacznie odchyła się od linii prostej. W zależności od liczby przeprowadzonych cykli rozładowania, gęstość elektrolitu po ostatnim cyklu zawierała się w przedziale $1,155 \div 1,215 \text{ g/cm}^3$. Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmian gęstości elektrolitu w zależności od liczby cykli rozładowania.

2.6.3. Pomiar napięcia podczas rozruchu

Dokonyjemy pomiaru napięcia w czasie rozruchu, ponieważ to rozrusznik ze wszystkich odbiorników w samochodzie potrzebuje najwięcej energii elektrycznej. Pobieranie tak dużej energii w czasie uruchamiania silnika powoduje spadek napięcia na zaciskach akumulatora, to też wykorzystuje się ten fakt do oceny jego stanu. Badania tego możemy dokonać na dwa sposoby: przez pomiar napięcia rozruchu lub przez chwilowe dynamiczne obciążenie akumulatora. W obu przypadkach potrzebny będzie woltomierz lub tester akumulatorów samochodowych. Aby przeprowadzić badanie pierwszą metodą należy w tym celu odłączyć przewody tak by silnik nie został uruchomiony podczas obracania rozrusznikiem. Następnie podłącza się woltomierz do zacisków akumulatora. Kolejną czynnością jest ustawienie drążka zmiany biegów w neutralnym położeniu i włączenie zapłonu. Potem należy uruchomić rozrusznik tak by obrócił kilkakrotnie wałem korbowym w tym samym czasie należy odczytać wskazanie woltomierza. W drugiej metodzie (tylko dla samochodów z manualną skrzynią biegów) postępujemy podobnie odłączamy przewody i podłączamy woltomierz. W tej metodzie skrzynię biegów należy zablokować na trzecim lub czwartym biegu. Dodatkowo zaciągamy i wciskamy hamulce dla pewności można umieścić kliny pod kołami pojazdu. Gdy bezpieczeństwo zostało zapewnione uruchamiamy rozrusznik na około 3 sekundy w tym czasie odczytujemy wskazanie woltomierza. Odczytane wartości napięć stanowią o stanie naładowania i sprawności akumulatora. Akumulator można uznać za sprawny, gdy uzyskane wartości napięć będą wyższe od: w przypadku pierwszej metody 4,5 [V] i 9,0 [V] odpowiednio dla akumulatora 6 [V] i 12 [V]. Dla drugiego sposobu są to wartości 3,5 [V] i 7,0 [V] dla 6 [V] oraz 12 [V] akumulatora. Podczas każdego pomiaru należy pamiętać, jaki wpływ ma temperatura na gęstość elektrolitu a tym samym na napięcie. Podsumowując, niezależnie od rodzaju użytego akumulatora niezbędne jest zastosowanie prądnicy. Prądnice mogą być różne, prądu stałego lub przemiennego. Ponieważ generatory prądu stałego w samochodach nie spełniały swojej funkcji dostatecznie dobrze zostały zastąpione prądnicami prądu przemiennego.

2.6.4. Pomiar napięcia pod obciążeniem

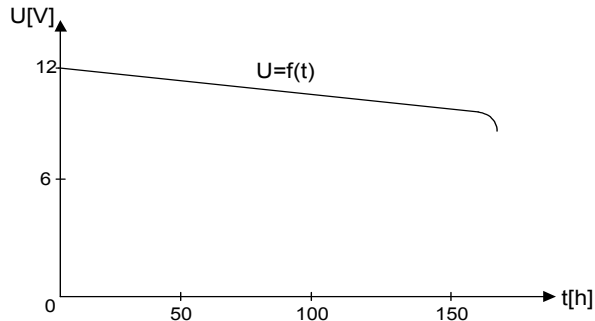
Pomiar napięcia pod obciążeniem to inna metoda oceny stopnia naładowania akumulatora, jest ona dokładniejsza od poprzednio omówionej. Polega na badaniu napięcia każdego z ogniw pod ustalonym obciążeniem prądowym. Jednak jest to możliwe do zrealizowania tylko dla akumulatorów starego typu, których łączniki ogniw znajdują się na zewnątrz obudowy. W nowych, łączniki te znajdują się wewnątrz obudowy i są niedostępne, dlatego też pomiaru dokonuje się pomiędzy zaciskami. Rezultat takiego badania jest podawany w wartościach umownych, co wpływa negatywnie na jego dokładność. Pomiar napięcia jest podstawową metodą badań bezobsługowych akumulatorów, gdyż nie posiadają one z zewnątrz dostępu do elektrolitu.

W celu wykonania badania musimy posiadać przyrząd zwany testerem akumulatorów np. typu UWA – 25, PAS. Pierwszym krokiem jest ustawienie na mierniku odpowiedniego rezystora obciążającego. Następną czynnością jest podłączenie urządzenia do zacisków akumulatora zwracając uwagę na biegunowość testera i akumulatora. Po podłączeniu miernika czas trwania pomiaru powinien wynieść do 5 sekund.

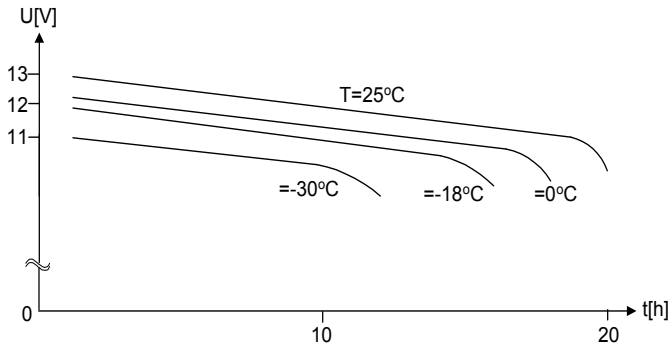
Jeżeli przyrząd posiada trójbarwną skalę to możemy określić jeden z trzech stanów naładowania. Część zielona skali oznacza, że akumulator jest dobry a jego stan naładowania mieści się w granicy od 75 do 100 [%], część żółta oznacza stan słaby naładowania od 50 do 75 [%], skala czerwona oznacza, że poziom naładowania spadł poniżej 50 [%]. Podczas pomiaru należy zwrócić uwagę na temperaturę elektrolitu i otoczenia, jeżeli nie mieści się ona w przedziale od 15 do 30 [°C] to należy uwzględnić jej wpływ na pojemność akumulatora.

2.7. Pomiary napięcia akumulatora

Wśród napięć charakteryzujących stan akumulatora wyróżnia się napięcie znamionowe, napięcie wyładowania oraz napięcie ładowania (rys. 2.15). Za napięcie znamionowe przyjęto uważać wartość średnią, jaką posiada akumulator kwasowy w stanie jałowym. Istnienie rezystancji wewnętrznej źródła zasilania powoduje, że na tej rezystancji powstaje spadek napięcia. Wielkość napięcia przedstawiona zależnością (1.12) nazwana jest napięciem wyładowania (rys. 2.15). Jeżeli pomiary będą wykonywane w dłuższym czasie, to wówczas możliwe jest wykreślenie charakterystyki $U_w = f(t)$ [1, 7-9, 12, 19, 28-32]. Na rysunku 2.15 charakterystyki napięcia wyładowania akumulatora prądem znamionowym w czasie 20-godzinny przy temperaturze 25 [°C]. Wpływ temperatury na wielkość napięcia wyładowania akumulatora przedstawiono na (rys. 2.16).

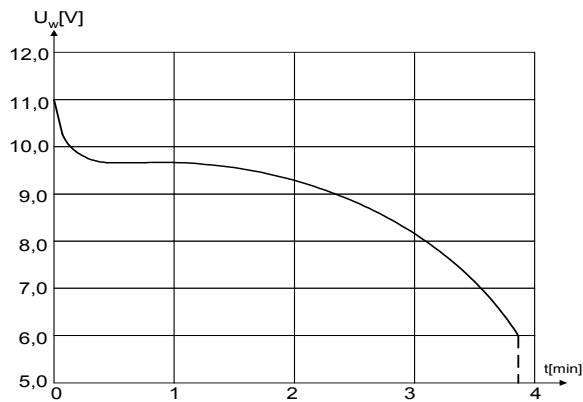


Rys. 2.15. Charakterystyka napięcia wyładowania akumulatora



Rys. 2.16. Charakterystyka napięcia wyładowania akumulatora w czasie 20-godzinnego badania przy różnych temperaturach elektrolitu

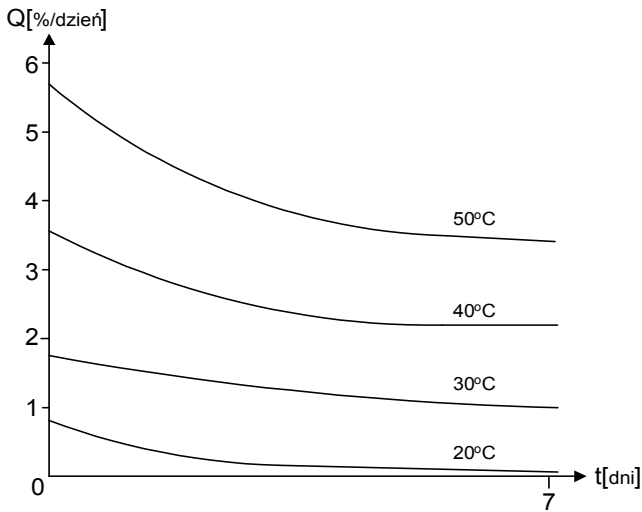
Wzrost wartości prądu władowania bezpośrednio wpływa na wartość czasu wyładowania akumulatora (rys. 2.17 i 2.18).



Rys. 2.17. Charakterystyka napięcia wyładowania akumulatora dużym prądem wyładowania dla temperatury elektrolitu równej -20 [°C]

Wartość prądu wyładowania przyjmuje się oznaczać czasem trwania procesu wyładowania akumulatora. Charakterystycznym prądem wyładowania jest prąd 20-godzinny. Prąd ten określa taką wartość prądu wyładowania, przy której akumulator będzie dostarczać energię elektryczną przez czas badania równy 20 godzinom.

Akumulator nie użytkowany w dłuższym czasie traci swoje własności użytkowe. Proces ten nazywa się samowyladowaniem akumulatora (rys. 2.18).



Rys. 2.18. Charakterystyka zdolności samowyladowania akumulatora w czasie przy różnych temperaturach elektrolitu

Praktyczne znaczenie posiada zdolność rozruchowa akumulatora.

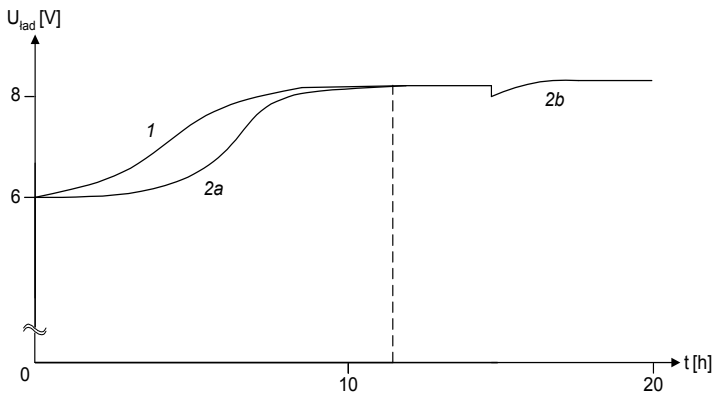
Definicja: *Zdolność rozruchowa akumulatora jest to czas jego nieprzerwanego zasilania obwodu pod obciążeniem, aż do chwili obniżenia się średniego napięcia przypadającego na jedno ogniwo do wartości 1,0 [V] [36-38].*

Jedną z przyczyn samowyladowania się akumulatora w czasie jest upływność jego pojemności. Na rysunku 2.19 przedstawiono charakterystykę zmiany pojemności akumulatora w funkcji czasu w wyniku jego samowyladowania się. Każdorazowe obniżenie się napięcia znamionowego akumulatora powinno być uzupełniane w procesie jego ładowania (rys. 2.20). Proces ładowania akumulatora jest procesem odtwarzania (uzupełniania ładunku elektrycznego). Wielkość napięcia ładowania mierzona na zaciskach akumulatora nazwana jest napięciem ładowania i określana jest w postaci zależności:

$$U_{lad} = E + R_w \cdot I_{lad} . \quad (2.12)$$



Rys. 2.19. Charakterystyka zmian pojemności akumulatora w czasie dla płyt antymonowo-ołowiowych [7]

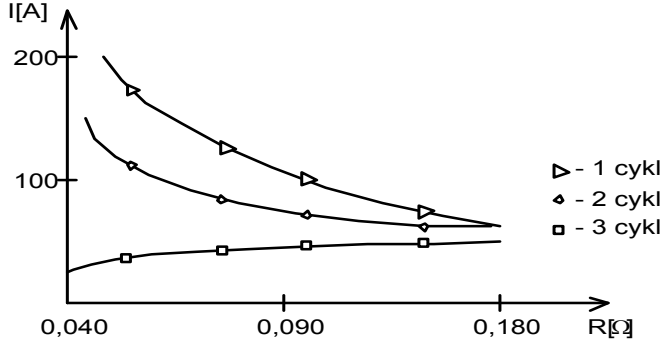


Rys. 2.20. Charakterystyka napięcia ładowania akumulatora [7, 9], gdzie: 1 – metoda jednostopniowa, 2 – metoda dwustopniowa, 2a – dużym prądem (np. $(3 \text{ do } 10) \cdot I_{nZnO}$), 2b – małym prądem

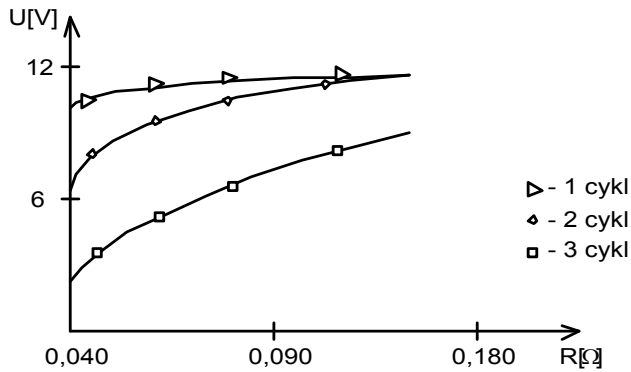
Wraz ze wzrostem obciążenia spadek napięcia mierzony na zaciskach akumulatorów staje się bardziej istotny. Gwałtowny spadek napięcia jest obserwowany szczególnie po ostatnim cyklu rozładowania akumulatorów (z wyjątkiem akumulatora 170 Ah, dla którego nie realizowano badań po ostatnim niepełnym cyklu rozładowania wskutek nadmiernego spadku napięcia) (rys. 2.21). Stan techniczny poszczególnych akumulatorów determinuje wartość końcowego napięcia mierzonego na zaciskach akumulatora. Wyraźnie najmniejsze wartości napięcia występują na zaciskach akumulatora o najmniejszej pojemności – 50 Ah, a zarazem najmniejszej zmierzonej gęstości elektrolitu. Różnica wartości

napięcia na zaciskach akumulatorów zwiększa się wraz ze wzrostem obciążenia proporcjonalnie do przyrostu natężenia prądu (rys. 2.21).

a)



b)



Rys. 2.21. Wykresy napięcia i natężenia prądu akumulatora dla trzech cykli rozładowania, gdzie: a) – wykres natężenia prądu akumulatora o pojemności 50 [Ah] w zależności od rezystancji obciążenia, b) – wykres napięcia akumulatora o pojemności 50 [Ah] w zależności od rezystancji obciążenia

Kolejnym istotnym typem charakterystyki dla akumulatorów o różnym stopniu naładowania jest zależność napięcia na zaciskach oraz pobieranego prądu od rezystancji obciążenia zewnętrznego. Na rysunku 2.21 przedstawiono przebiegi napięcia oraz natężenia prądu dla akumulatora o pojemności 50 Ah. Jego stan techniczny umożliwił wykonanie trzech pełnych cykli rozładowania. Zmiany wartości napięcia po pierwszym i drugim cyklu rozładowania są nie-

znaczne, a jego wartość maleje tym bardziej i intensywniej im mniejsza jest wartość rezystancji, a więc większa wartość natężenia pobieranego prądu (rys. 2.21b). Wartości napięcia mierzone podczas badania po trzecim cyklu rozładowania są znacznie mniejsze niż w poprzednich cyklach. Ponadto widoczny jest gwałtowny spadek wartości napięcia wraz ze zmniejszaniem rezystancji – wzrostem obciążenia.

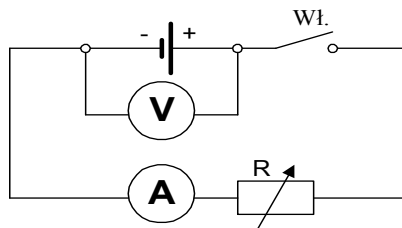
2.8. Pytania kontrolne

1. Omówić podział akumulatorów.
2. Przedstawić budowę klasycznego akumulatora ołowianego.
3. Przedstawić strukturę budowy akumulatora do zastosowań w systemach start/stop.
4. Przedstawić wymagania dla akumulatora do zastosowań w systemach start/stop.
5. Omówić procesy prądotwórcze zachodzące w akumulatorze.
6. Opisać badanie diagnostyczne akumulatorów.
7. Narysować i opisać charakterystykę napięcia wyładowania akumulatora.
8. Narysować i opisać charakterystykę zmian pojemności akumulatora.
9. Narysować i omówić schemat obwodu zasilania z akumulatorem do pomiaru SEM.

2.9. Ćwiczenia laboratoryjne

2.9.1. Pomiar siły elektromotorycznej i napięć w obwodzie zasilania pojazdu-akumulatora

- a) Dokonać konfiguracji układu pomiarowego (rys. 2.22) według zaleceń prowadzącego,



Rys. 2.22. Schemat obwodu zasilania z akumulatorem do pomiaru siły elektromotorycznej

b) dla wybranego pomiaru danego układu należy wykonać następujące czynności:

- **wyłączyć włącznik(!)** napięcia zasilania,
- w wybranej gałęzi badanego układu włączyć amperomierz (A) i podłączyć woltomierz (V) do pomiaru spadku napięcia zasilaniu i na rezystancji R ,

Uwaga: Przy podłączaniu mierników należy zachować odpowiednią polaryzację i dobór zakresów pomiarowych mierników.

- ustawić wymaganą wartość (jedną z trzech) rezystancji obciążenia obwodu.
- włączyć zasilanie układu,
- odczytać wskazania mierników (dla danej rezystancji) i zapisać w odpowiedniej tabeli 2.3,
- wyłączyć napięcie zasilania i przywrócić wyjściowy stan połączeń

Tab. 2.3. Tabela do pomiarów źródła zasilania-akumulatora

| Mierzona wielkość | Napięcie elektryczne | jednostki | Wartości wyznaczone Z punktów | Wartości obliczane |
|-------------------------------|----------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|
| Napięcie źródła zasilania | U_z | V | | |
| Siła elektromotoryczna źródła | E | V | | |
| Spadek napięcia na źródle | U_s | V | | |

Opracowanie wyników badań

- z pomierzonych wyżej wielkości elektrycznych wyznaczyć wartości oporności rezystora oraz spadki napięć (U_w , U_s) w obwodzie.
- obliczyć wartość siły elektromotorycznej i prąd w obwodzie.
- porównać wartości napięć i prądów uzyskanych z przeprowadzonych pomiarów z wartościami obliczonymi na podstawie danych pomiarowych.

2.9.2. Pomiar charakterystyki rozruchowej układu zasilania pojazdu-akumulatora

a) dokonać konfiguracji układu pomiarowego (rys. 1.21) według zaleceń prowadzącego:

b) dla wybranego pomiaru danego układu należy wykonać następujące czynności:

- **wyłączyć włącznik(!)** napięcia zasilania,

- w wybranej gałęzi badanego układu włączyć amperomierz (A) i podłączyć woltomierz (V) do pomiaru spadku napięcia zasilaniu i na rezystancji R ,

Uwaga: *Przy podłączaniu mierników należy zachować odpowiednią polaryzację i dobór zakresów pomiarowych mierników.*

- ustawić wymaganą wartość (jedną z trzech) rezystancji obciążenia obwodu.
- włączyć zasilanie układu,
- odczytać wskazania mierników i zapisać w odpowiedniej tabeli 2.4.,
- wyłączyć napięcie zasilania i przywrócić wyjściowy stan połączeń

Tab. 2.4. Tabela pomiarowa charakterystyk rozruchowych akumulatora

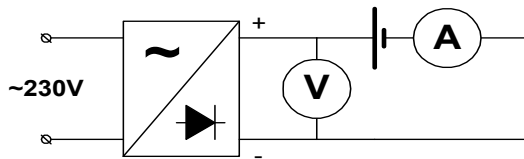
| I_{roz} [A] | Czas pomiaru [godz.] | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |
| $R = \dots [\Omega]$ | | | | | | | | | | | | |
| $R = \dots [\Omega]$ | | | | | | | | | | | | |
| $R = \dots [\Omega]$ | | | | | | | | | | | | |

Opracowanie wyników badań

- z pomierzonych wyżej wielkości elektrycznych wyznaczyć wartości oporności rezystora oraz spadki napięć (U_1, U_2) w obwodzie.
- obliczyć wartość siły elektromotorycznej i prąd w obwodzie.
- porównać wartości napięć i prądów uzyskanych z przeprowadzonych pomiarów z wartościami obliczonymi na podstawie danych pomiarowych.
- wykreślić charakterystyki $I_{roz} = f(t)$ przy $R = \text{const}$. wyładowania układu zasilania pojazdu-akumulatora dla trzech badanych rezystancji.
- opracować wnioski i spostrzeżenia.

2.9.3. Pomiar charakterystyki wyładowania układu zasilania pojazdu-akumulatora

- a) dokonać konfiguracji układu pomiarowego (rys. 2.23) według zaleceń prowadzącego:



Rys. 2.23. Schemat ideowy układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyki ładowania akumulatora

b) dla wybranego pomiaru danego układu należy wykonać następujące czynności:

- **wyłączyć włącznik(!)** napięcia zasilania,
- w wybranej gałęzi badanego układu włączyć amperomierz (A) i podłączyć woltomierz (V) do pomiaru spadku napięcia zasilaniu i na rezystancji R ,

Uwaga: Przy podłączaniu mierników należy zachować odpowiednią polaryzację i dobór zakresów pomiarowych mierników.

- ustawić wymaganą temperaturę otoczenia $T = \dots\dots\dots[^\circ\text{C}]$
- włączyć zasilanie układu,
- odczytać wskazania mierników i zapisać w odpowiedniej tabeli 2.5,
- pomiary powtórzyć dla trzech różnych temperatur otoczenia,
- wyłączyć napięcie zasilania i przywrócić wyjściowy stan połączeń

Tab. 2.5. Tabela pomiarowa charakterystyk ładowania akumulatora

| $I_{\text{ład}}$ [A] | Czas pomiaru [godz.] | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------------|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 |
| $T = \dots[^\circ\text{C}]$ | | | | | | | | | | | | |
| $T = \dots[^\circ\text{C}]$ | | | | | | | | | | | | |
| $T = \dots[^\circ\text{C}]$ | | | | | | | | | | | | |

Opracowanie wyników badań

- z pomierzonych wyżej wielkości elektrycznych wyznaczyć wartości oporności rezystora oraz spadki napięć (U_1 , U_2) w obwodzie.
- obliczyć wartość siły elektromotorycznej i prąd w obwodzie.
- porównać wartości napięć i prądów uzyskanych z przeprowadzonych pomiarów z wartościami obliczonymi na podstawie danych pomiarowych.
- wykreślić charakterystyki $I_{\text{ład}} = f(t)$ ładowania układu zasilania pojazdu-akumulatora.
- opracować wnioski i spostrzeżenia.

2.10. Opracowanie wyników pomiarów i wnioski

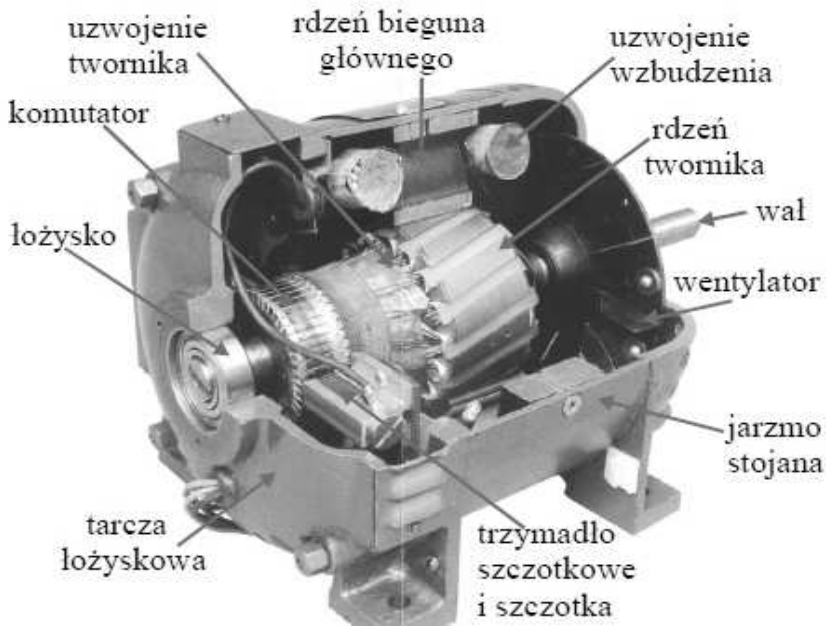
1. Wykreślić charakterystyki rozrusznika: mocy P_c , P_t , momentu M_r , prędkości obrotowej n , napięcia U_r w funkcji prądu rozrusznika I .
3. Podać przykłady obliczeń.
4. Wykreślić charakterystykę sprawności rozrusznika w zależności od natężenia prądu.
5. Podać zmierzone parametry rozrusznika dla próby biegu jałowego i próby rozruchu.
6. Podać zmierzone wartości rezystancji uzwojeń i rezystancji izolacji.
7. Porównać zmierzone charakterystyki z charakterystykami fabrycznymi.
8. Porównać zmierzone parametry dla próby biegu jałowego i próby rozruchu z odpowiednimi parametrami podawanymi przez producenta.
9. Ocenić poprawność działania wyłącznika elektromagnetycznego.

3. Badanie prądnic prądu stałego

Treścią niniejszego rozdziału jest omówienie: budowy, zasad działania, parametrów, właściwości i charakterystyk prądnic prądu stałego.

3.1. Budowa i zasada działania maszyny prądu stałego

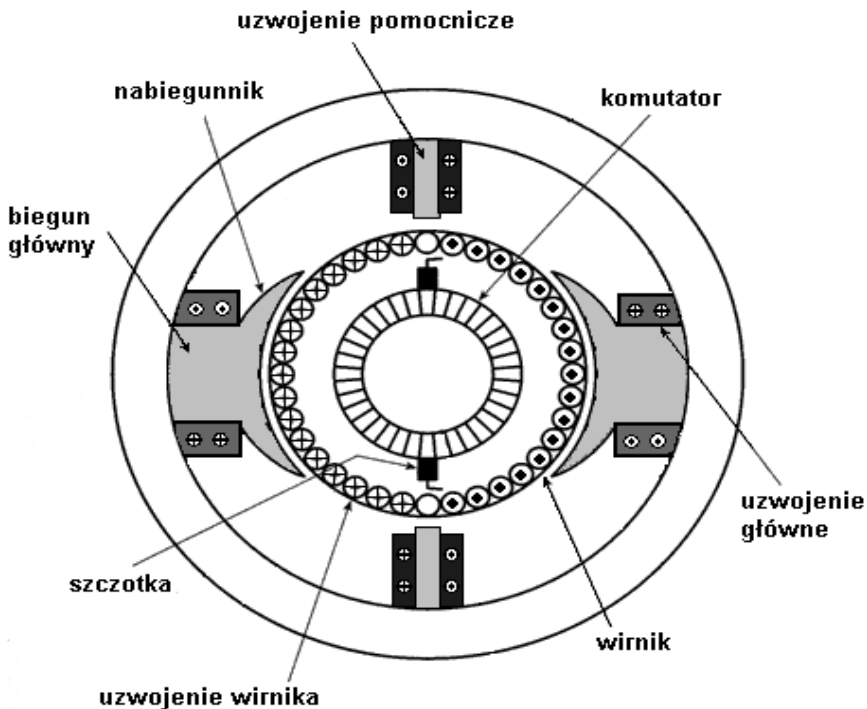
Maszyna prądu stałego, tak jak każda maszyna elektryczna wirująca, ma część nieruchomą – **stojan** i część ruchomą – **wirnik** (rys. 3.1). Wirnik jest osadzony w łożyskach tak, by mógł swobodnie wirować wewnątrz stojana. Na wewnętrznej powierzchni stojana zawsze znajdują się wyraźnie ukształtowane bieguny magnesów lub elektromagnesów nazywane głównymi, a niekiedy również bieguny pomocnicze (komutacyjne). Na biegunach głównych są umieszczone uzwojenia nazywane uzwojeniami wzbudzenia. Prąd przepływający przez te uzwojenia jest prądem wzbudzenia.



Rys. 3.1. Schemat prądnicy prądu stałego [39]

W maszynach prądu stałego może być jedna para biegunów ($p = 1$) lub więcej par biegunów ($p > 1$). Wszystkie bieguny muszą być symetrycznie rozłożone na obwodzie stojana. Odległość między osiami sąsiednich biegunów

nazywa się podziałką biegunową t . Rozszerzone zakończenia biegunów są nazywane nabiegunnikami. Poprawiają one rozkład indukcji magnetycznej B w szczelinie powietrznej, to jest w przestrzeni między nabiegunnikami a zewnętrzną powierzchnią wirnika. Linie pola magnetycznego wytworzonego przez magnesy trwałe lub elektromagnesy zamykają się w obwodzie, nazywanym obwodem magnetycznym utworzonym przez bieguny, nabiegunniki, szczelinę powietrzną, wirnik oraz stojan (rys. 3.2). W klasycznych konstrukcjach maszyn prądu stałego korpus, a więc stojan, jest wykonywany jako odlew żeliwny lub staliwny. Do stojana są przykręcane rdzenie biegunów wykonywane podobnie jak stojan z jednolitej bryły metalu. Taki sposób wykonania tej części obwodu magnetycznego jest właściwy, ponieważ w starym polu magnetycznym nie występują straty mocy i rdzeń się nie nagrzewa. Tylko wirnik, który obraca się w polu magnetycznym, musi być wykonany z blach w celu zmniejszenia powstających w nim strat mocy na histerezę i prądy wirowe. Nabiegunniki, w celu zmniejszenia występujących w nich strat mocy, wykonuje się również z blach [4-6, 21-32].



Rys. 3.2. Schemat funkcjonalny prądnicy prądu stałego [39]

W nowoczesnych konstrukcjach maszyn prądu stałego (rys. 3.2), przewidywanych do współpracy z układami przekształtników statycznych (prostowników, tyrystorów), cały obwód magnetyczny, a więc również bieguny i stojan, wykonuje się z blach. Taki sposób wykonania magnetowodu ma na celu zmniejszenie strat mocy, jakie powstają w obwodzie magnetycznym, w którym prądy – a więc również prąd wzbudzenia – zawierają oprócz składowej o stałym zawierają także składowe przemienne. Blachy tworzące rdzeń wirnika są osadzone na wale (wałku) przechodzącym przez środek wirnika. Wymiary wału zależą od powstających w maszynie sił mechanicznych, w tym również od długości wirnika. Żądane wymiary blach wirnika oraz rowki na ich obwodzie uzyskuje się w procesie wytlaczania blach.

Po nałożeniu wszystkich blach na wał otrzymuje się gotowy wirnik, o kształcie walca lub bębna. Rowki wycięte w poszczególnych blachach tworzą wzdłuż osi wirnika tzw. żłobki, w których umieszcza się uzwojenie wirnika. Na jednym z końców wału umieszcza się komutator, który jest charakterystycznym elementem maszyn prądu stałego (rys. 3.2).

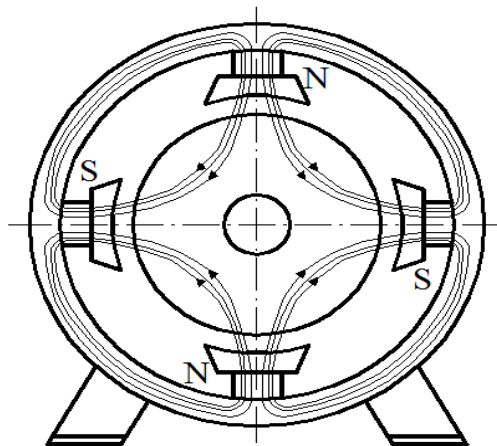
Z komutatorem łączy się uzwojenie znajdujące się w żłobkach wirnika. Szczotki ślizgające się po komutatorze umożliwiają połączenie uzwojenia wirnika z nieruchomymi obwodami maszyny, np. uzwojeniem wzbudzenia oraz obwodem zewnętrznym znajdującym się poza maszyną. Szczotki są osadzone w obwodach szczotkowych, zapewniających stałe położenie szczotek oraz równomierny ich docisk do powierzchni komutatora.

Niektóre rodzaje odbiorników wymagają jednak zasilania prądem stałym, a przynajmniej mającym ciągle ten sam zwrot. Takie źródło napięcia można otrzymać dodając do prądnicy urządzenie zwane komutatorem. W tym przypadku zamiast dwóch oddzielonych pierścieni należy zastosować jeden pierścień rozcięty na dwie połowy odizolowane od siebie, przy czym jeden koniec wirującej ramki (zwoju) należy połączyć z jedną połową pierścienia, a drugi z drugą. Szczotki służące do połączenia prądnicy z odbiornikiem energii elektrycznej powinny być umieszczone naprzeciw siebie, w takim położeniu, że zwierają obie połowy pierścienia w chwili, gdy płaszczyzna zwoju jest prostopadła do linii pola magnetycznego magnesu.

Na rysunku 3.2 przedstawiono schematycznie trzy położenia zwoju prądnicy. Z rysunku wynika, że mimo iż w zwoju nadal płynie prąd przemienne, to w odbiorniku zwrot prądu jest ciągle taki sam; przez szczotkę oznaczoną symbolem (+) prąd zawsze wypływa, przez szczotkę oznaczoną symbolem (-) prąd zawsze wpływa. Nie zmieniająca się biegunowość każdej ze szczotek została osiągnięta przez przemieszczanie się wycinków komutatora wraz ze zwojem. Przebieg czasowy indukowanej siły elektromotorycznej wykazuje wahania wartości chwilowej napięcia w granicach od zera do amplitudy. Aby zwiększyć tę amplitudę należy zamiast pojedynczego zwoju zastosować cewkę. Natomiast

chcąc otrzymać wyrównany przebieg czasowy siły elektromotorycznej (zmniejszyć pulsację siły elektromotorycznej) należy wykonać większą liczbę zwojów (lub cewek) połączonych ze sobą szeregowo. Każdy ze zwojów (lub każda z cewek) powinien być połączony jedną końcówką z jednym wycinkiem komutatora, którego liczba wycinków jest odpowiednio powiększona. Zatem liczba wycinków komutatora zależy od liczby zwojów (cewek); komutatory współczesnych maszyn prądu stałego mają dużą liczbę wycinków.

We współczesnej maszynie prądu stałego, tak jak w modelu przedstawionym na rysunku 3.2, magnesnicą jest stojan, a twornikiem wirnik. Do wewnętrznej części cylindrycznego stojana przykręcone są bieguny główne z cewkami, nazywanymi uzwojeniami wzbudzenia (poła magnetycznego). Prąd płynący w tych uzwojeniach jest prądem wzbudzenia. Tylko w małych maszynach prądu stałego biegunami głównymi są magnesy trwałe. Linie pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie wzbudzenia (lub przez magnesy trwałe) zamykają się w obwodzie magnetycznym utworzonym przez biegun, nabiegunnik, szczelinę powietrzną, wirnik, szczelinę powietrzną, nabiegunnik, biegun oraz stojan. Wirnik maszyny osadzony jest na łożyskach umożliwiających mu swobodne wirowanie wewnątrz stojana. Wykonany jest w kształcie walca, z pakietu blach magnetycznych odizolowanych od siebie, osadzonego na wale. Magnesnice maszyn prądu stałego zasilane są prądem stałym (rys. 3.3). Obwód zasilania magnesnicy nazywa się obwodem wzbudzenia. Ze względu na zasilanie uzwojenia wzbudzenia (uzwojenia biegunów głównych) rozróżnia się następujące rodzaje maszyn: obcowzbudne i samowzbudne. Maszyny samowzbudne można z kolei podzielić na maszyny bocznikowe, szeregowo- i szeregowo-bocznikowe.



Rys. 3.3. Obwód magnetyczny w maszynie prądu stałego [5]

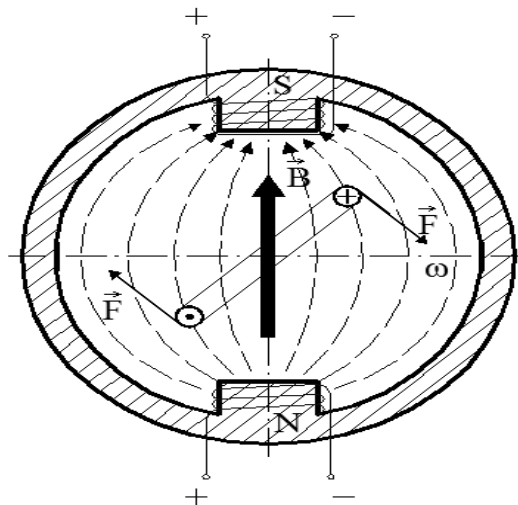
W maszynie prądu stałego magnesnicą jest stojan, a twornikiem – wirnik. Do wewnętrznej części cylindrycznego stojana przykręcone są bieguny główne z cewkami, nazywanymi uzwojeniami wzbudzenia, przez które przepływa prąd wzbudzenia. Prąd płynący w tych uzwojeniach jest prądem wzbudzenia. W małych maszynach prądu stałego biegunami głównymi są magnesy trwałe. Linie pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie wzbudzenia (lub przez magnesy trwałe) zamykają się w obwodzie magnetycznym utworzonym przez tor: biegun, nabiegunnik, szczelinę powietrzną, wirnik, szczelinę powietrzną, nabiegunnik, biegun oraz stojan (rys. 3.3). Wirnik maszyny osadzony jest na łożyskach umożliwiającym mu swobodne wirowanie wewnątrz stojana. Wirnik wykonany jest w kształcie walca z pakietu blach magnetycznych odizolowanych od siebie, osadzonego na wale.

3.2. Podstawowe zależności opisujące pracę maszyn prądu stałego

Na rysunku 3.3 przedstawiono model maszyny prądu stałego, której uzwojenie twornika wykonane jest w postaci jednego zwoju. W jednozwojowym uzwojeniu twornika indukuje się siła elektromotoryczna, której wartość wynosi:

$$e = 2 \cdot B \cdot l \cdot v, \quad (3.1)$$

gdzie: B – indukcja magnetyczna, l – długość ramki-zwoju (uzwojenia) znajdującego się w polu magnetycznym, v – prędkość ruchu uzwojenia.



Rys. 3.3. Model maszyny prądu stałego [37]

Przy stałej prędkości ($v = \text{const.}$) przebieg siły elektromotorycznej SEM jest taki sam, jak rozkład indukcji magnetycznej B w szczelinie między wirnikiem, a biegunami głównymi, z tą różnicą, że rozkład indukcji magnetycznej jest przemienny, a indukowana siła elektromotoryczna ma przebieg pulsujący, wskutek przełączania uzwojenia twornika przez komutator w chwili, gdy ($e = 0$). Jak już wspomniano, dla zwiększenia amplitudy siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu twornika zamiast pojedynczego zwoju w tworniku montuje się cewkę. Natomiast dla otrzymania wyrównanego przebiegu czasowego tej siły elektromotorycznej (dla zmniejszenia pulsacji siły elektromotorycznej) wykonuje się większą liczbę tych cewek połączonych ze sobą szeregowo, przy czym każda z końcówek cewki połączona jest z jednym wycinkiem komutatora. Ponieważ prędkość v uzwojenia twornika danej maszyny jest wprost proporcjonalna do prędkości obrotowej n twornika, a indukcja magnetyczna B (gęstość strumienia magnetycznego Φ , więc zgodnie z wzorem (3.2) wartość średnia siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu twornika wynosi:

$$E = c\Phi n, \quad (3.2)$$

gdzie: E – siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika, c – stała zależna od konstrukcji maszyny, n – prędkość obrotowa wirnika, Φ – strumień magnetyczny.

Jeżeli do zacisków uzwojenia twornika maszyny zostanie podłączony odbiornik o rezystancji R , to w obwodzie tym popłynie prąd I_t . Prąd ten wywoła na całkowitej rezystancji obwodu twornika R_t spadek napięcia mający wartość $R_t I_t$, całkowita rezystancja obwodu twornika składa się z rezystancji uzwojenia twornika, rezystancji połączeń ślizgowych szczotka – komutator i komutator – druga szczotka oraz rezystancji uzwojenia biegunów komutacyjnych (lub uzwojenia kompensacyjnego).

Napięcie na zaciskach twornika prądnicy (rys. 3.3) będzie więc mniejsze od siły elektromotorycznej E o spadek napięcia na całkowitej rezystancji obwodu twornika i wyniesie:

$$U = E - R_t \cdot I_t, \quad (3.3)$$

gdzie: U – napięcie na zaciskach twornika, E – siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu twornika, $(R_t \cdot I_t)$ – spadek napięcia na całkowitej rezystancji obwodu twornika.

W uzwojeniu twornika płynie wówczas prąd I_t (rys. 3.3). Wg prawa Ampere'a na prostoliniowy przewód o długości l , przez który płynie prąd elektryczny, umieszczony w polu magnetycznym o indukcji magnetycznej B (w przypadku, gdy oś przewodu jest prostopadła do linii pola magnetycznego) działa siła elektrodynamiczna:

$$F = BI_t l, \quad (3.4)$$

gdzie: B – indukcja magnetyczna, l – długość zwoju (uzwojenia) znajdującego się w polu magnetycznym, I_t – natężenie prądu płynącego w zwoju (uzwojeniu) twornika znajdującego się w polu magnetycznym.

W każdej maszynie prądu stałego (rys. 3.3) niezależnie od rodzaju pracy (silnik, prądnica) boki zwojów uzwojenia wirnika wiodące prąd znajdują się zawsze w głównym polu magnetycznym maszyny (rys. 3.3) i zgodnie z prawem Ampere'a (3.4) działa siła F . Siły działające na boki uzwojenia twornika zasilanego prądem wytwarzają na jego obwodzie moment elektromagnetyczny:

$$M = k\phi I_t, \quad (3.5)$$

gdzie: M – moment elektromagnetyczny, k – stała zależna od konstrukcji maszyny, ϕ – strumień magnetyczny, I_t – natężenie prądu płynącego w zwoju (uzwojeniu) twornika znajdującego się w polu magnetycznym.

W przypadku prądnicy moment (3.5) jest momentem hamującym, który musi być pokonywany przez silnik napędzający maszynę. Przy pracy silnikowej twornik maszyny prądu stałego (rys. 3.3) zasilany jest ze źródła napięcia stałego U stąd powstały w obwodzie silnika moment elektromagnetyczny jest momentem napędowym. Jeśli moment ten jest większy od momentu hamującego, wirnik silnika zaczyna się obracać. Ruch obrotowy wirnika powoduje indukowanie się w uzwojeniu twornika silnika siły elektromotorycznej E , której wartość podaje wzór: ($E = c \Phi n$).

Przy pracy silnikowej napięcie zasilające U jest większe od siły elektromotorycznej, indukowanej w uzwojeniu twornika, o spadek napięcia na rezystancji uzwojenia twornika i wynosi:

$$U = E + R_t I_t. \quad (3.6)$$

Jeśli do tego równania wprowadzi się zależność ($E = c \Phi n$) i dokona przekształceń, to otrzyma się wzór na prędkość obrotową silnika prądu stałego:

$$n = \frac{U - R_t I_t}{c \Phi}, \quad (3.7)$$

gdzie: c – stała zależna od konstrukcji maszyny, n – prędkość obrotowa wirnika, Φ – strumień magnetyczny, $(R_t I_t)$ – spadek napięcia na tworniku znajdującym się w polu magnetycznym, R_t – rezystancja uzwojeniu twornika.

Ważną częścią silników i prądnic prądu stałego jest obwód wzbudzenia. W cewkach wzbudzających obwodu wzbudzenia prądnicy, umieszczonych na biegunach głównych, płynie prąd magnesujący I_m , wytwarzający strumień magnetyczny Φ_m . Ze względu na sposób zasilania uzwojenia wzbudzenia prądnicy prądu stałego dzieli się na obcowzbudne i samowzbudne.

W prądnicach **obcowzbudnych** uzwojenie wzbudzenia (biegunów głównych), którego zaciski oznacza się np. literami I-K, zasilane jest z obcego źródła, np. z baterii akumulatorów, prostownika, sieci prądu stałego itp. Obwód wzbudzenia jest, więc niezależny od obwodu twornika.

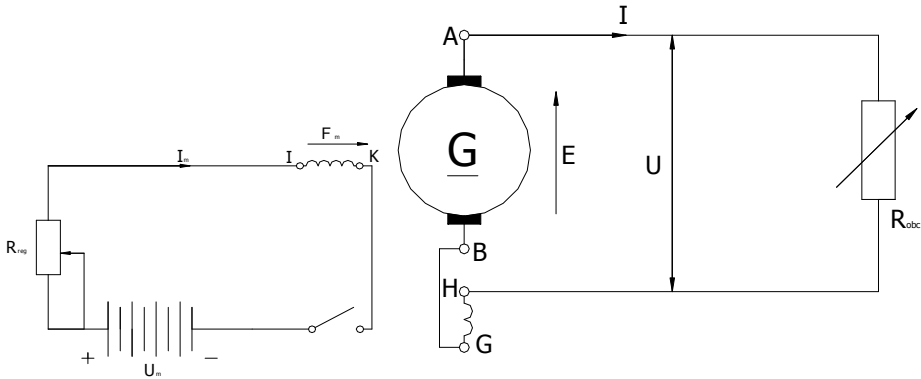
W prądnicach **samowzbudnych** uzwojenie wzbudzenia zasilane jest prądem magnesującym I_m z twornika tej samej maszyny. Część prądu wytworzonego przez prądnice idzie więc na wytworzenie strumienia magnetycznego. Aby prądnica sama się wzbudziła muszą być spełnione pewne warunki, zwane *warunkami samowzbudzenia*. Prądnica samowzbudna może mieć uzwojenie wzbudzenia przyłączone do twornika równolegle do obwodu obciążenia (uzwojenie to ma zaciski oznaczone literami (C-D)) lub połączone szeregowo z obciążeniem (o zaciskach oznaczonych np. literami (E-F)).

W zależności od tego odróżnia się prądnice samowzbudne bocznikowe i szeregowo. Są też prądnice samowzbudne, które mają na biegunach głównych dwa uzwojenia wzbudzające bocznikowe (C-D) i szeregowo (E-F). Są to prądnice szeregowo-bocznikowe.

3.3. Prądnica obcowzbudna prądu stałego

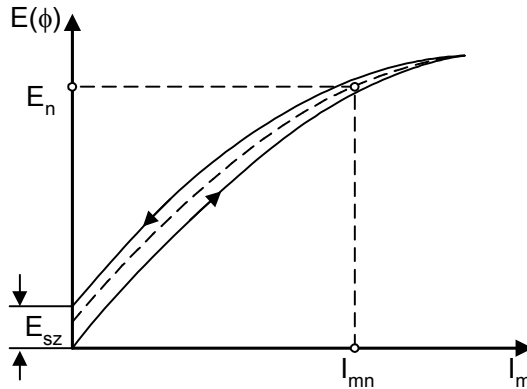
Schematy połączeń maszyn elektrycznych rysuje się w sposób uproszczony, stosując umowne symbole graficzne. Schemat połączeń prądnicy obcowzbudnej pokazano na rys. 3.4. Twornik oznaczony jest kółkiem z zaznaczonymi szczotkami i zaciskami (A-B). Szeregowo z twornikiem połączone jest uzwojenie biegunów komutacyjnych zaciski (G-H), które rysuje się w osi

szczotek. Obwód twornika prądnicą obciążony jest oporem R_{obc} . Uzwojenie wzbudzenia (zaciski /-K) przedstawiono w osi prostopadłej do osi szczotek. Jest ono zasilane z obcego źródła prądu (na rysunku przedstawiono je w postaci baterii ogniów galwanicznych) przez opornik regulacyjny R_{reg} i wyłącznik. Siła elektromotoryczna E zależy od prądu magnesującego I_m . Można ją regulować opornikiem R_{reg} .



Rys. 3.4. Schemat połączeń prądnicy obcowzbudnej [33]

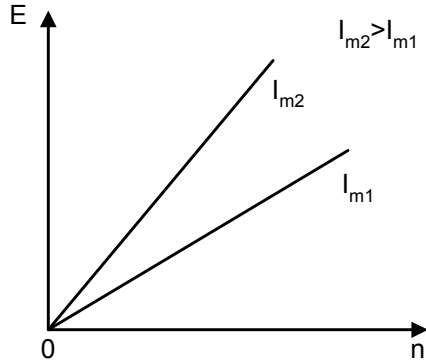
Zależność ($E_0 = f(I_m)$) przedstawia charakterystyka biegu jałowego dla prądnicy nieobciążonej ($I=0$) (rys. 3.5).



Rys. 3.5. Charakterystyka biegu jałowego $E = f(I_m)$ prądnicy obcowzbudnej [29]

Natomiast na rys. 3.6 przedstawiono charakterystykę siły elektromotorycznej w zależności od prędkości obrotowej prądnicy obcowzbudnej. Przy obciążeniu SEM zmniejsza się skutek oddziaływania twornika ($E < E_0$). Napięcie U na zaciskach maszyny zaciski (A-H), do których przyłączony

jest obwód zewnętrzny charakteryzowany oporem R_{obc} , jest mniejsze od siły elektromotorycznej E o spadek napięcia na oporze wewnętrznym, jakim jest całkowity opór obwodu twornika R_{tc} (3.3).



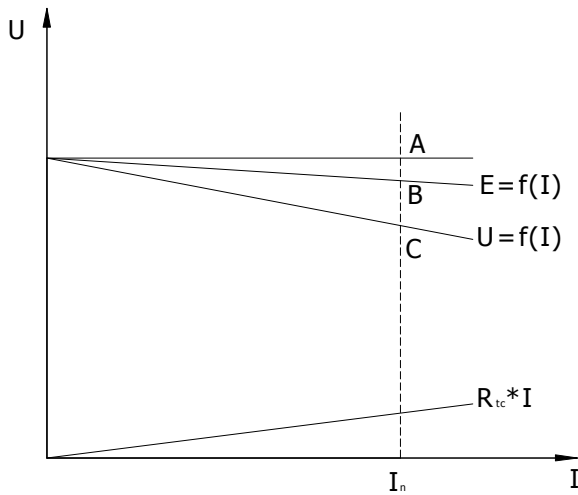
Rys. 3.6. Charakterystyka siły elektromotorycznej w zależności od prędkości obrotowej prądnicy obcowzbudnej [29]

Rezystancja R_{tc} składa się z rezystancji uzwojenia twornika R_t oraz rezystancji przejścia między szczotkami a komutatorem R_p oraz oporu uzwojenia biegunów komutacyjnych R_k :

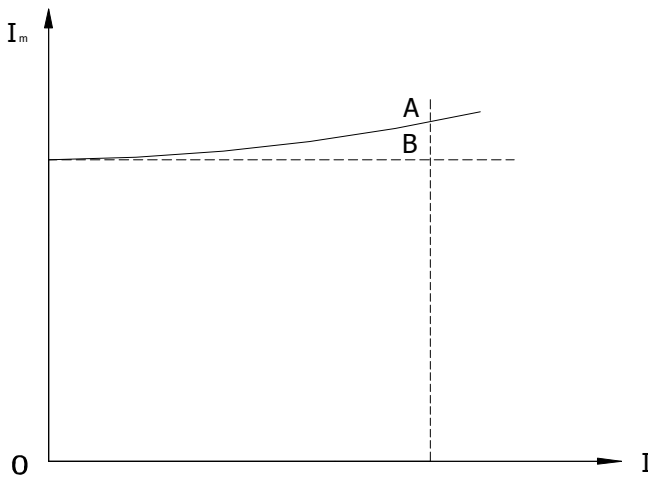
$$R_{tc} + R_t + R_p + R_k \quad (3.8)$$

Występująca w zależności (3.8) rezystancja przejścia na szczotkach R_p jest wielkością zmienną, zależną od prądu, gdyż stałą wielkością jest spadek napięcia na przejściu między szczotkami a komutatorem ok. 2 V. Przy wzroście natężenia prądu I pobieranego z twornika prądnicy, co jest równoznaczne ze zmniejszeniem rezystancji obciążenia R_{obc} , napięcie U na zaciskach twornika prądnicy maleje. Zależność napięcia U od prądu obciążenia I przedstawiona w postaci wykresu ($U = f(I)$) przy ($I_m = \text{const}$) (stałe wzbudzenie) i ($n = \text{const}$) (stała prędkość obrotowa twornika) nosi nazwę charakterystyki zewnętrznej prądnicy (rys. 3.7 i 3.8). Całkowity spadek napięcia w prądnicie przy prądzie znamionowym I_n przedstawia odcinek AC . Składa się on z dwóch części:

- AB – zmniejszenie się SEM E wskutek oddziaływania twornika; zależność $E = f(I)$ nosi nazwę charakterystyki wewnętrznej,
- BC – spadek napięcia na oporze wewnętrznym prądnicy ($R_{tc} \times I$), po odjęciu tego spadku napięcia od SEM E otrzymuje się krzywą ($U = f(I)$) – nazwaną charakterystyką zewnętrzną.

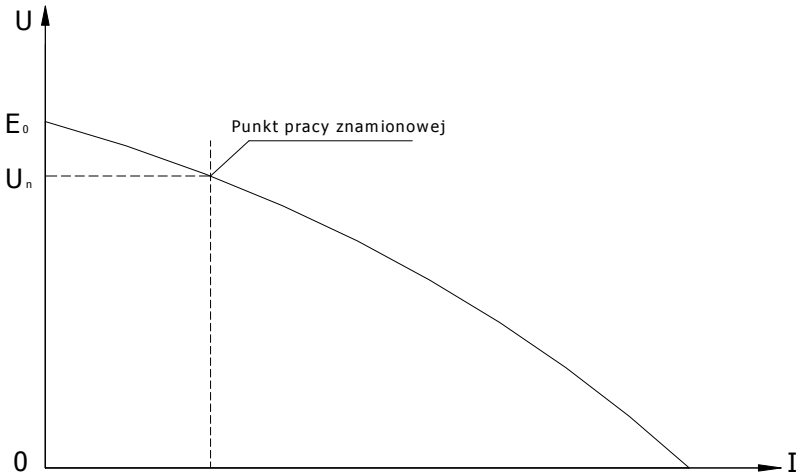


Rys. 3.7. Charakterystyka zewnętrzna prądnicą obcowzbudnej [33], gdzie: AB – zmniejszenie się SEM prądnicą na skutek oddziaływania twornika, BC – spadek napięcia na rezystancji twornika. Napięcie na zaciskach prądnicą maleje ze wzrostem obciążenia, gdyż rośnie spadek napięcia na rezystancji twornika ($U = E - IR_{tc}$) i maleje strumień magnetyczny na skutek oddziaływania twornika



Rys. 3.8. Charakterystyka regulacyjna prądnicą obcowzbudnej [33]

Całkowity spadek napięcia prądnicy obcowzbudnej jest stosunkowo niewielki – rzędu kilku procent napięcia znamionowego np. 5%. Przy wahaniach obciążenia w granicach od biegu jałowego ($I = 0$) do obciążenia znamionowego ($I = I_n$) napięcie prądnicy zmienia się więc w granicach kilku procent. Odcinek AB przedstawia wzrost prądu magnesującego niezbędny dla skompensowania całkowitego spadku napięcia w prądnicie przy obciążeniu znamionowym. W celu utrzymania stałego napięcia przy obciążaniu prądnicy należy powiększać prąd magnesujący I_m w miarę wzrostu prądu obciążenia I . Krzywa ($I_m = f(I)$) przy ($U = \text{const}$) nazywa się charakterystyką regulacyjną (rys. 3.8). Zwarcie prądnicy następuje wówczas, gdy rezystancja obciążenia R_{obc} zmaleje do zera, (np. wskutek awarii). Prąd zwarcia I_z przekracza wówczas wielokrotnie wartość znamionową, a napięcie na zaciskach prądnicy spada do zera (rys. 3.9).



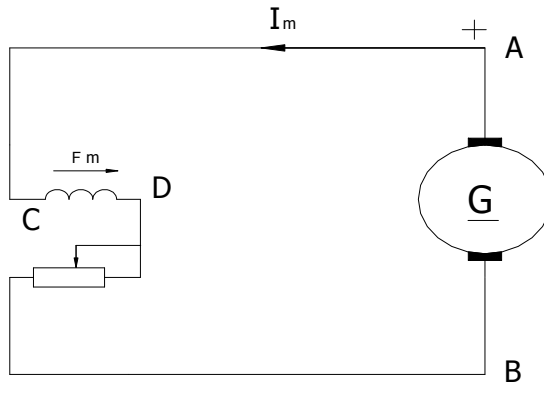
Rys. 3.9. Zwarcie prądnicy obcowzbudnej [33]

Duży prąd zwarcia jest niebezpieczny dla uzwojenia twornika i komutatora prądnicy. W praktyce prądnice obcowzbudne bywają stosunkowo rzadko stosowane, gdyż wymagają oddzielnego źródła zasilania wzbudzenia.

3.4. Prądnica samowzbudna prądu stałego

W prądnicach samowzbudnych, których zastosowanie jest znacznie szersze niż prądnic obcowzbudnych, obwód magnesujący jest przyłączony do obwodu twornika (rys. 3.10). Prąd magnesujący I_m płynie pod wpływem siły

elektromotorycznej E wytwarzanej w tworniku. Siła elektromotoryczna E jest proporcjonalna do strumienia magnetycznego i prędkości obrotowej. W rdzeniu biegunów prądnicy niepracującej istnieje zazwyczaj strumień szczątkowy Φ_{sz} po poprzednich stanach magnesowania, indukujący w uzwojeniu twornika wirującego z prędkością n niewielką szczątkową siłę elektromotoryczną E_{sz} .



Rys. 3.10. Zasilanie obwodu magnesującego prądnicy samowzbudnej [29]

Wzbudzenie się prądnicy samowzbudne polega na tym, że ta niewielka siła elektromotoryczna E_{sz} wytwarza początkowo niewielki prąd magnesujący I_m , który płynąc przez uzwojenie wzbudzenia (C-D) powiększa strumień magnetyczny. Zwiększony strumień magnetyczny indukuje większą siłę elektromotoryczną, a ta z kolei powiększa prąd magnesujący itd.

3.4.1. Warunki samowzbudzenia prądnicy

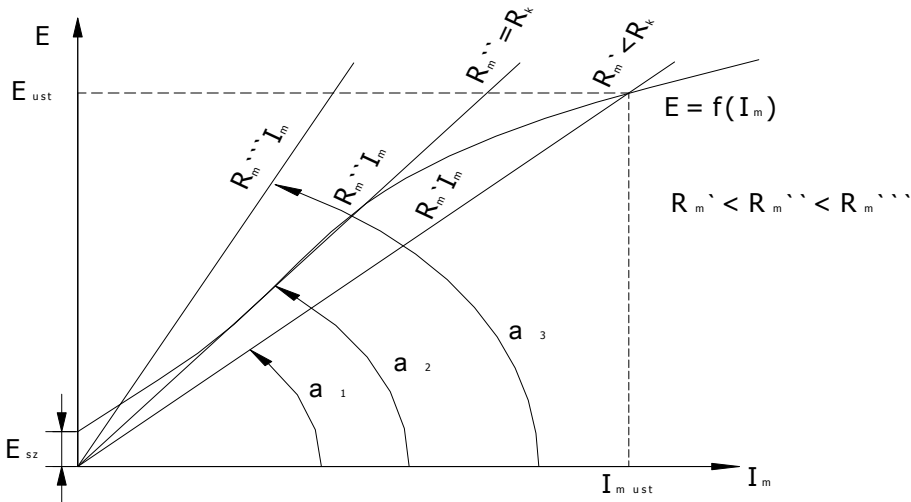
Prądnicą może się wzbudzić wówczas gdy będą spełnione następujące warunki, zwane warunkami samowzbudzenia:

1. W obwodzie magnetycznym maszyny musi istnieć magnetyzm szczątkowy. Nowo wyprodukowaną maszynę trzeba wstępnie namagnesować, zasilając jej wzbudzenie z obcego źródła, aby wytworzyć strumień szczątkowy. Jeżeli maszyna, która poprzednio wzbudzała się i pracowała, nie wytwarza obecnie szczątkowej siły elektromotorycznej oznacza to, że jej obwód magnetyczny został rozmagnesowany. Należy go wówczas ponownie namagnesować, zasilając wzbudzenie na chwilę z obcego źródła.

2. Uzwojenie wzbudzenia musi być połączone z twornikiem maszyny w ten sposób, aby prąd magnesujący I_m , płynący pod działaniem siły elektromotorycznej E , wytwarzał strumień magnetyczny o kierunku zgodnym

z **kierunkiem strumienia szczątkowego**. Jeżeli po przyłączeniu uzwojenia wzbudzenia do twornika siła elektromotoryczna szczątkowa maleje, oznacza, to, że strumień wytworzony przez prąd magnesujący ma kierunek przeciwny do strumienia szczątkowego. Należy wówczas zmienić kierunek prądu w uzwojeniu wzbudzenia, łącząc je odwrotnie z twornikiem.

Przy stałej prędkości wirowania twornika ($n = \text{const}$) zależność ($E = f(I_m)$) przedstawia krzywa magnesowania (charakterystyka biegu jałowego), tworząca pętlę histerezy, przedstawioną na rys. 3.11 w postaci jednej wypośrodkowanej linii. Prąd I_m , płynący przez obwód magnesujący o oporze R_m (rezystancji uzwojenia wzbudzenia rezystora regulacyjnego), powoduje spadek napięcia $R_m I_m$, proporcjonalny do prądu I_m .



Rys. 3.11. Charakterystyka przebiegu samowzbudzenia [33]

Na rys. 3.11 ten spadek napięcia przedstawia linia prosta o nachyleniu pod kątem α_1 zależnym od wartości rezystancji R_m . Dla wartości rezystancji R_m prosta $R_m^l I_m$ leży poniżej krzywej ($E = f(I_m)$) i przecina się z nią w punkcie A . Dopóki ($E > R_m^l I_m$) prąd wzbudzenia rośnie i ustala się w punkcie A , dla którego ($E = R_m^l I_m$). Narastanie prądu w stanie nieustalonym opisane jest równaniem:

$$E - R_m i_m = L_m \frac{di_m}{dt} \quad (3.9)$$

Punktowi A odpowiada ustalona wartość siły elektromotorycznej E_{ust} i prądu magnesującego I_{must} . Jeżeli będziemy zwiększali wartość R_m , to nachylenie prostej $R_m I_m$ określone kątem α będzie rosło i punkt A będzie przesuwał się w dół po krzywej ($E = f(I_m)$), tzn. stan równowagi ($E = R_m I_m$) będzie występował przy coraz mniejszej wartości ustalonej siły elektromotorycznej E_{ust} .

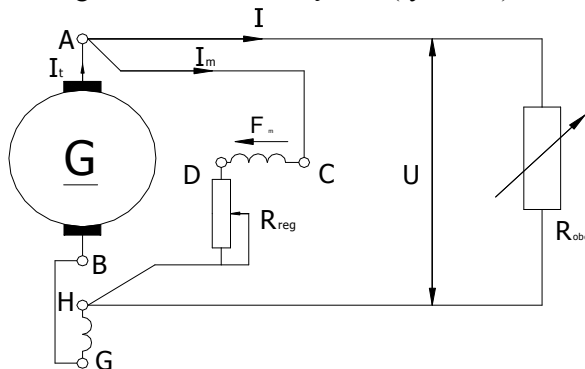
Istnieje pewna wartość oporu obwodu wzbudzenia, równa R''_m , dla której prosta $R''_m I_m$ jest styczna do charakterystyki biegu jałowego dla danej prędkości obrotowej. Wartość tę nazywamy wartością krytyczną R_k . Dla wartości ($R_m > R_k$) prosta ($R_m I_m$) nie ma punktu przecięcia z krzywą ($E = f(I_m)$), a więc prądnicą nie wzbudza się.

3. Trzeci warunek samowzbudzenia jest następujący, aby prądnicą mogła się wzbudzić opór obwodu magnetycznego w prądnicą musi mieć wartość mniejszą od wartości krytycznej.

Wszystkie trzy wymienione wyżej warunki samowzbudzenia: *istnienie magnetyzmu szczątkowego, odpowiednie połączenie uzwojenia wzbudzającego z twornikiem i opór obwodu magnesującego mniejszy od oporu krytycznego* muszą być spełnione jednocześnie, aby prądnicą samowzbudna się wzbudziła. Brak spełnienia choćby jednego z tych warunków uniemożliwia wzbudzenie się prądnicą.

3.5. Prądnicą samowzbudna bocznikowa

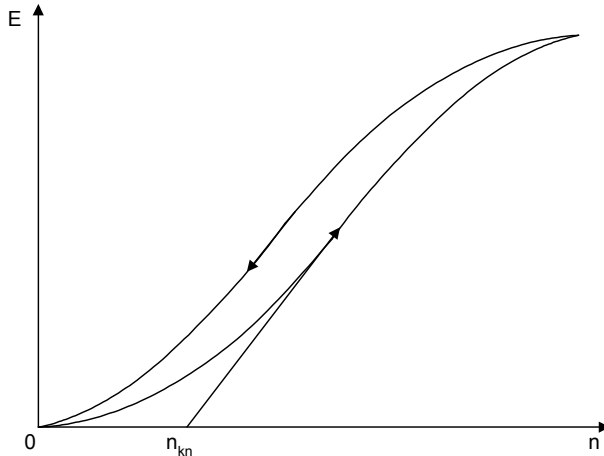
Samowzbudna prądnicą bocznikowa jest najczęściej stosowanym rodzajem prądnicą prądu stałego. Uzwojenie wzbudzenia tej prądnicą jest przyłączone do twornika, równoległe do obwodu obciążenia (rys. 3.12).



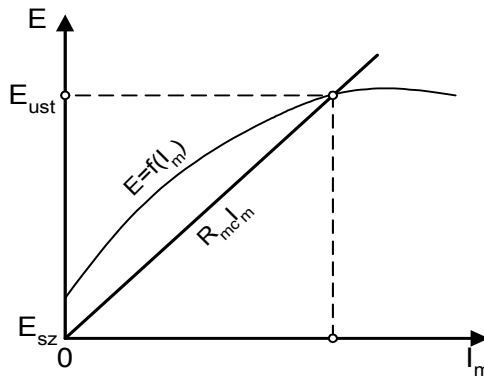
Rys. 3.12. Schemat połączeń prądnicą bocznikowej [29]

Wytworzony w tworniku prąd I_t rozdziela się na zaciskach prądnicą A-H na dwa prądy: prąd wzbudzenia I_m i prąd obciążenia I , a zatem ($I_t = I + I_m$).

Napięcie na zaciskach prądnicy równa się sile elektromotorycznej E zmniejszonej o spadek napięcia na oporze wewnętrznym (3.3). Podstawową charakterystykę prądnicy bocznikowej, charakterystykę biegu jałowego ($E = f(n)$) prądnicy samowzbudnej bocznikowej przedstawiono na rys. 3.13 i 3.14.



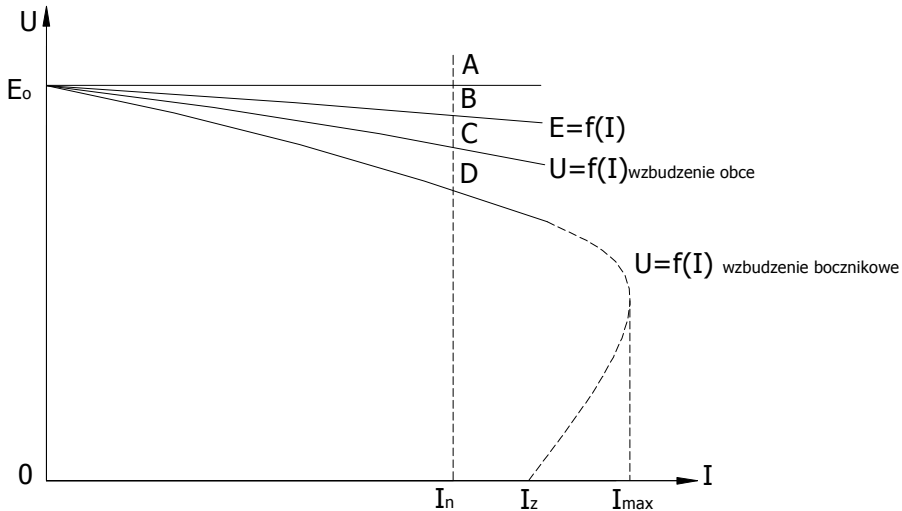
Rys. 3.13. Charakterystyka biegu jałowego $E = f(n)$ prądnicy samowzbudnej bocznikowej [29]



Rys. 3.14. Charakterystyka siły elektromotorycznej prądnicy samowzbudnej bocznikowej [29], gdzie: R_{mc} – rezystancja obwodu wzbudzenia

Natomiast na rys. 3.14 przedstawiono charakterystykę siły elektromotorycznej prądnicy samowzbudnej bocznikowej. Charakterystykę zewnętrzną ($U = f(I)$) prądnicy bocznikowej (rys. 3.15) wyznacza się przy stałej wartości rezystora regulacyjnego ($R_{reg} = \text{const}$) w obwodzie wzbudzenia i przy stałej

prędkości obrotowej prądnicy ($n = \text{const}$). Przy ($R_{\text{reg}} = \text{const}$) rezystancja obwodu magnesującego jest stała. Ponieważ przy wzroście obciążenia prądnicy napięcie na jej zaciskach maleje, przy stałym oporze obwodu magnesującego maleje prąd magnesujący I_m .



Rys. 3.15. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy bocznikowej [29]

Pociąga to za sobą zmniejszenie się strumienia magnetycznego, a zatem i siły elektromotorycznej, SEM maleje, więc wskutek dwóch czynników: oddziaływania twornika i zmniejszania się prądu magnesującego. Od SEM odejmuje się spadek napięcia $R_{\text{ic}}I_t$ (rys. 3.15) dając w rezultacie napięcie U na zaciskach prądnicy. Całkowity spadek napięcia w prądnicie bocznikowej przy obciążeniu prądem znamionowym przedstawia odcinek AD, który można podzielić na trzy części:

- AB – zmniejszenie się SEM wskutek oddziaływania twornika,
- BC – spadek napięcia na oporze całkowitym obwodu twornika ($R_{\text{ic}} \times I_t$),
- odjęcie od E_0 dwóch powyższych czynników daje charakterystykę zewnętrzną ($U = f(I)$) prądnicy przy wzбудzeniu obcym,
- CD – zmniejszenie się napięcia przy wzbudzeniu bocznikowym spowodowane zmniejszeniem się prądu magnesującego I_m ; uwzględniając je otrzymuje się charakterystykę zewnętrzną ($U = f(I)$) prądnicy bocznikowej, która jest bardziej opadająca niż przy wzbudzeniu obcym.

Zmniejszenie się prądu magnesującego w miarę wzrostu obciążenia prądnicy, tzn. zmniejszania oporu obwodu zewnętrznego zasilanego z prądnicy, powoduje stopniowe odwzbudzenie prądnicy, wskutek którego prąd osiąga wartość maksymalną I_{max} , a następnie zaczyna maleć do stosunkowo niewielkiego prądu zwarcia I_z .

W stanie zwarcia, gdy rezystancja ($R_{obc} = 0$), napięcie na zaciskach prądnicy wynosi ($U = 0$). Prąd magnesujący ma wartość ($I_m = 0$), gdyż obwód magnesujący przyłączony jest do zacisków prądnicy, między którymi napięcie wynosi ($U = 0$).

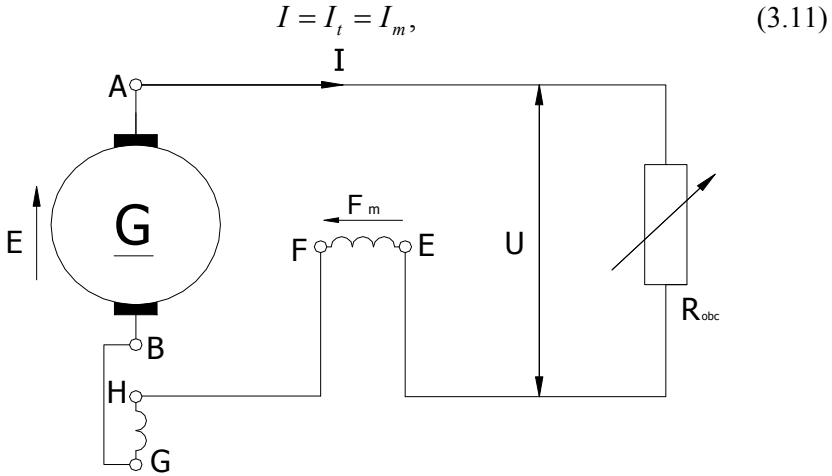
A więc przy zwarcu prądnica bocznikowa nie jest wzbudzona. Prąd zwarcia płynie jedynie pod wpływem szczątkowej siły elektromotorycznej, a jego wartość wynosi:

$$I_z = \frac{E_{sz}}{R_{tc}}. \quad (3.10)$$

Przy zwarcu ustalonym prąd zwarcia I_z jest, więc niewielki i nie jest niebezpieczny dla prądnicy. W chwili wystąpienia zwarcia (np. wskutek uszkodzenia izolacji) pojawia się udar prądowy o wartości I_{max} a następnie prąd maleje do wartości ustalonego prądu zwarcia I_z . W zakresie od biegu jałowego ($I = 0$) do obciążenia znamionowego ($I = I_n$) napięcie prądnicy bocznikowej spada bardziej niż prądnicy obcowzbudnej (spadek napięcia wynosi do ok. 10 %). Stałość napięcia można uzyskać przez odpowiednie zwiększenie prądu magnesującego, zmniejszając wartość rezystancji R_{reg} w obwodzie wzbudzenia. Potrzebny dla uzyskania ($U = \text{const}$). przyrost prądu magnesującego pokazuje *charakterystyka regulacyjna* ($I_m = f(I)$) o przebiegu podobnym jak dla prądnicy obcowzbudnej. Wskutek większego spadku napięcia odcinek AB na tej charakterystyce, przedstawiający odpowiedni wzrost prądu magnesującego, jest dla prądnicy bocznikowej większy niż dla prądnicy obcowzbudnej. Prądnice bocznikowe prądu stałego są stosowane do zasilania urządzeń elektrycznych na statkach, w samochodach itp., wszędzie tam gdzie jest stosowany prąd stały, a kilkuprocentowe wahania napięcia są dopuszczalne.

3.6. Prądnica samowzbudna szeregową

W prądnicy szeregowej uzwojenie jest przyłączone do twornika szeregowo z obwodem obciążenia (rys. 3.16). W prądnicy tej istnieje tylko jeden obwód, który jest jednocześnie obwodem twornika, wzbudzenia i obciążenia. Prąd obciążenia I jest jednocześnie prądem twornika i prądem wzbudzenia:



Rys. 3.16. Schemat połączeń prądnicy szeregowej [29]

Prąd ten wzbudza strumień magnetyczny Φ_m , który indukuje w uzwojeniu twornika siłę elektromotoryczną E_0 . Zależność ($E_0 = f(I)$), czyli *charakterystyką biegu jałowego* można zdjąć zasilając uzwojenie wzbudzenia E-F z obcego źródła. Przy obciążeniu siła elektromotoryczna E indukowana w tworniku jest mniejsza od E_0 wskutek oddziaływania twornika.

Napięcie na zaciskach prądnicy A-E otrzymuje się odejmując od SEM E spadek napięcia na rezystancji wewnętrznej:

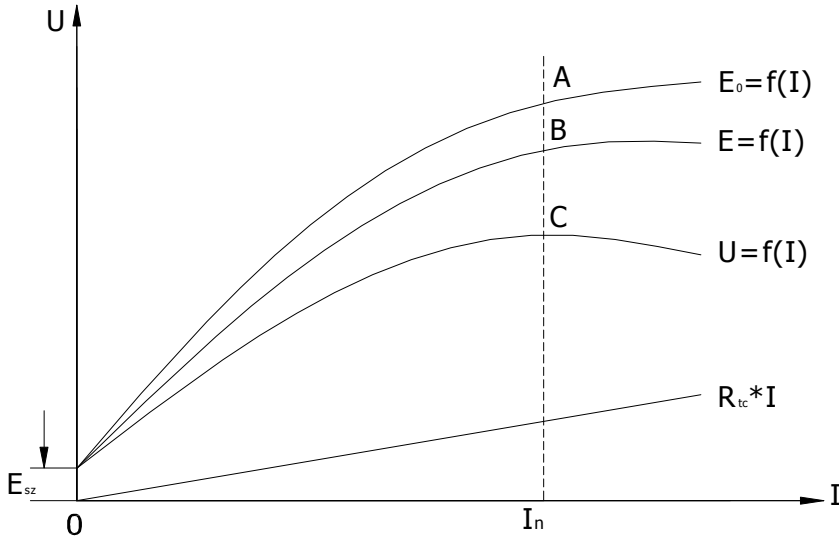
$$U = E - R_{tc} \cdot I, \quad (3.12)$$

gdzie rezystancja R_{tc} wyrażana jest zależnością:

$$R_{tc} = R_t + R_p + R_k + R_{sz}. \quad (3.13)$$

W ostatnim wzorze R_{sz} jest to rezystancja uzwojenia szeregowego. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy szeregowej ($U = f(I)$) przy ($n = \text{const}$) ma przebieg pokazany na rys. 3.17. Ponieważ prąd obciążenia I jest jednocześnie prądem magnesującym, więc przy zwiększaniu obciążenia, polegającym na zmniejszaniu rezystancji obciążenia R_{obc} , wzrost prądu powoduje zwiększenie strumienia Φ_m , który indukuje SEM E_0 o wartości określonej charakterystyką biegu jałowego ($E_0 = f(I)$), którą przedstawiono na rys. 3.17. Na rys. 3.17 wykreślono jedną gałąź tej charakterystyki, dla rosnącego prądu w obwodzie prądnicy. Przy obciąż-

zeniu SEM E jest mniejsza od E_0 wskutek oddziaływania twornika. Napięcie U jest mniejsze od E o wartość spadku napięcia ($R_{tc} \cdot I$).



Rys. 3.17. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy [29]

Całkowity spadek napięcia przy prądzie znamionowym przedstawia odcinek AC, przy czym:

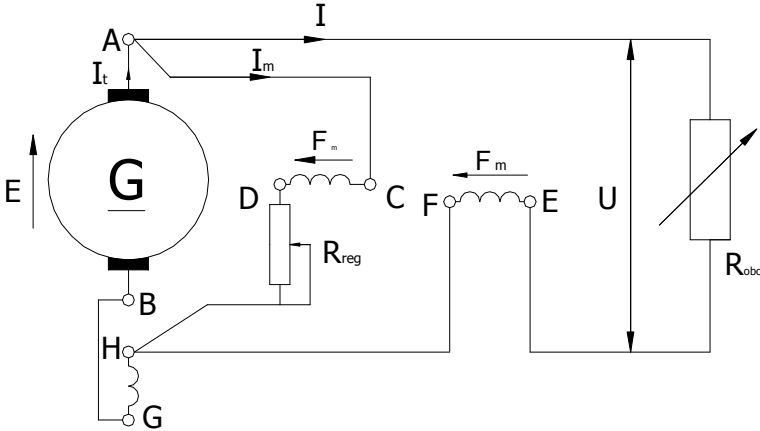
- AB – jest to zmniejszenie SEM wskutek oddziaływania twornika,
- BC – spadek napięcia $R_{tc} \cdot I$.

Napięcie dawane przez prądnicę szeregową rośnie, więc przy wzroście prądu do wartości znamionowej, a po przekroczeniu tego prądu maleje. Przy biegu jałowym ($I = 0$) gdy opór obciążenia ($R_{obc} = \infty$) prądnica nie jest wzbudzona, w tworniku indukuje się więc tylko niewielka szczytkowa siła elektromotoryczna E_{sz} , o wartości zależnej od strumienia szczytkowego. Przy zwarcie ($R_{obc} = 0$) prądnica jest wzbudzona prądem zwarcia, który wobec tego jest większy od prądu zwarcia prądnicy bocznikowej. Wskutek dużej zmienności napięcia prądnica szeregową nie nadaje się do zasilania odbiorników wymagających stałości napięcia. Jest ona używana jedynie do celów specjalnych.

3.7. Prądnica samowzbudna szeregowo-bocznikowa

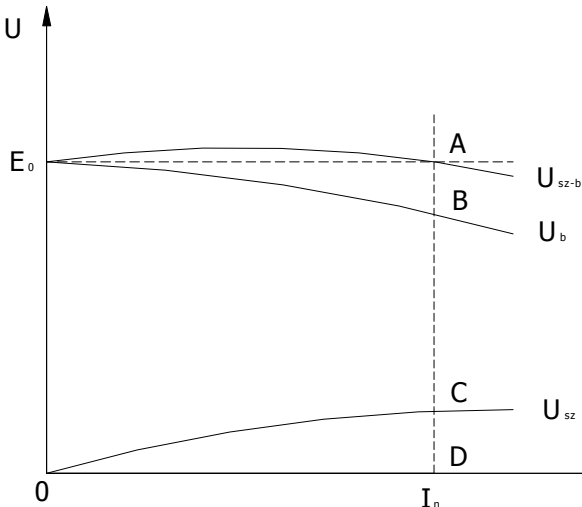
W prądnicę szeregowo-bocznikowej na biegunach głównych znajdują się dwa uzwojenia wzbudzające: szeregowo (E-F), włączone w szereg z obciążeniem i bocznikowe (C-D), włączone równolegle (rys. 3.18). Przebieg charakterystyki

zewnętrznej prądnicy szeregowo-bocznikowej można określić metodą superpozycji. Jeśli zewrzymy zaciski E-F strumień ($\Phi_{sz} = 0$) i pozostaje tylko strumień Φ_b , który daje napięcie ($U_b = f(I)$) jak w prądniccy bocznikowej (rys. 3.19).



Rys. 3.18. Schemat połączeń prądnicy szeregowo-bocznikowej [29]

Przebieg charakterystyki zewnętrznej prądnicy szeregowo-bocznikowej można określić metodą superpozycji. Jeśli zewrzymy zaciski E-F strumień ($\Phi_{sz} = 0$) i pozostaje tylko strumień Φ_b , który daje napięcie ($U_b = f(I)$) jak w prądniccy bocznikowej (rys. 3.19).



Rys. 3.19. Charakterystyka zewnętrzna prądnicy szeregowo-bocznikowej [33]

Rozwarcie zacisków $E-F$ i przerwa w obwodzie wzbudzenia bocznikowego ($I_m = 0$) powoduje powstanie w prądniccy napięcia U_{sz} zależnego od prądu obciążenia tak, jak w prądniccy szeregowej (rys. 3.19). Przy jednoczesnym wzbudzeniu bocznikowym i szeregowym prądnicca daje napięcie U_{sz-b} , przy czym:

$$U_{sz-b} = U_b + U_{sz}. \quad (3.14)$$

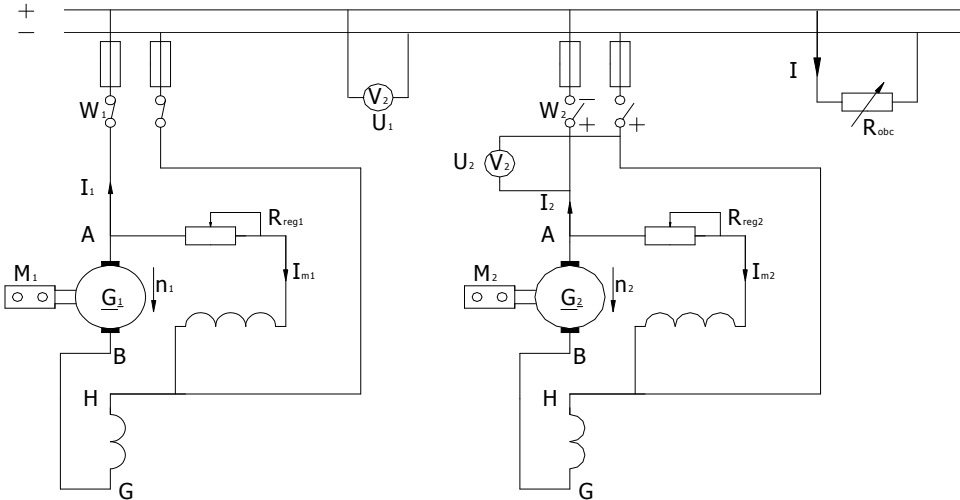
Przepływ uzwojenia szeregowego jest zazwyczaj tak dobrany, aby kompensowało ono całkowity spadek napięcia występujący przy wzbudzeniu bocznikowym, który dla prądu znamionowego równa się odcinkowi AB , a zatem odcinek AB równa się odcinkowi CD . Dzięki temu napięcie prądniccy szeregowo-bocznikowej jest prawie dokładnie stałe, niezależne od obciążenia. Przy zmianach obciążenia zbędna staje się regulacja wzbudzenia bocznikowego dla uzyskania stałości napięcia. Prądnicce szeregowo-bocznikowe o takiej charakterystyce stosuje się do zasilania odbiorników wymagających stałości napięcia (np. obwody oświetleniowe na statkach). Można też zastosować uzwojenie szeregowe o większej liczbie zwojów, tak, aby ($CD > AB$). Otrzymuje się wówczas napięcie rosnące przy obciążeniu. Tego rodzaju prądnicce stosuje się wtedy, gdy odbiorniki wymagające stałości napięcia połączone są z prądnicą za pośrednictwem przewodów o znacznej długości, w których występuje znaczny spadek napięcia. Uzwojenie szeregowe kompensuje w tym przypadku nie tylko spadek napięcia wewnątrz prądniccy, lecz także w linii zasilającej odbiorniki.

3.8. Praca równoległa prądnic prądu stałego

Praca równoległa prądnic występuje wówczas, gdy dwie lub większa liczba prądnic połączonych równolegle oddaje energię elektryczną do wspólnej sieci, z której zasilane są odbiorniki (rys. 3.20). Spotyka się ją np. na statkach, gdzie zamiast jednej dużej prądniccy, zasilającej sieć okrętową, stosuje się zazwyczaj dwie mniejsze prądnicce. Ma to na celu zwiększenie pewności ruchu, uzyskanie możliwości remontu jednej z prądnic przy zasilaniu sieci z drugiej, oraz ekonomiczniejszą pracę przy niepełnym obciążeniu. Obie współpracujące prądnicce, najczęściej bocznikowe, przyłączone są do sieci przy pomocy wyłączników W_1 i W_2 (rys. 3.20). Tworniki prądnic napędzane są za pomocą silników napędowych (np. spalinowych) M_1 i M_2 ze stałymi prędkościami obrotowymi $n_1, n_2 = \text{const}$. Prądy magnesujące prądnic I_{m1}, I_{m2} , można regulować za pomocą oporników regulacyjnych R_{reg1}, R_{reg2} .

Prądnica G_1 przyłączona jest do sieci za pomocą wyłącznika W_1 . Aby można było zamknąć wyłącznik W_2 , przyłączając do sieci prądnicę G_2 , muszą być spełnione następujące warunki:

- biegunowość obu prądnic na zaciskach wyłącznika W_2 musi być zgodna,
- napięcia obu prądnic muszą być równe sobie ($U_1 = U_2$).



Rys. 3.20. Układ połączeń do pracy równoległej dwóch prądnic bocznikowych prądu stałego [37]

Spełnienie tych warunków sprawdza się za pomocą woltomierzy magnetoelektrycznych V_1 i V_2 . Warunek a) jest spełniony wówczas, gdy kierunki wychyleń wskazówek obu woltomierzy są zgodne, warunek b) gdy wartości wychyleń wskazówek są jednakowe. Jeśli napięcia są nierówne ($U_1 \neq U_2$) wówczas uzyskuje się spełnienie warunku c) przez regulację prądu wzbudzenia I_{m2} , który zmienia się tak długo, aż osiągnie się równość napięć.

Po przyłączeniu prądnicy G_2 do pracy równoległej z prądnicą G_1 przez zamknięcie wyłącznika W_2 obie prądnice oddają do sieci prądy I_1 i I_2 , których suma równa się prądowi pobieranemu przez odbiorniki:

$$I = I_1 + I_2. \quad (3.15)$$

Przy połączeniu równoległym na zaciskach obu prądnic panuje jednakowe napięcie U , wyrażone wzorami:

$$U = E_1 - R_{tc1} \cdot I_1, \quad (3.16)$$

oraz:

$$U = E_2 - R_{tc2} \cdot I_2, \quad (3.17)$$

gdzie: E_1, E_2 – siły elektromotoryczne prądnic, R_{tc1}, R_{tc2} – rezystancje twornika maszyny pierwszej i drugiej.

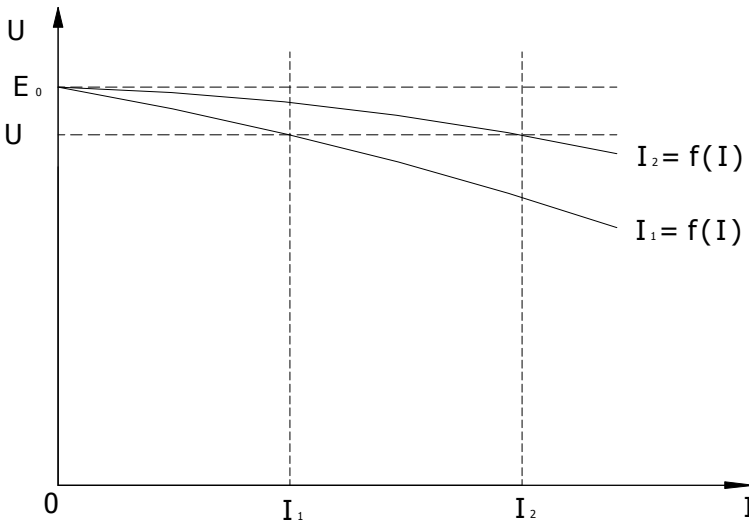
Stąd prądy oddawane przez obie prądnice:

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_{tc1}}, \quad (3.18)$$

oraz:

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{R_{tc2}}. \quad (3.19)$$

Przy stałych wartościach napięcia U i oporów R_{tc1} i R_{tc2} wartości prądów I_1 i I_2 , oddawanych przez prądnice, zależą więc od wartości SEM E_1 i E_2 , które można regulować przez zmianę wzbudzenia za pomocą oporników R_{reg1} i R_{reg2} (rys. 3.21).



Rys. 3.21. Charakterystyki zewnętrzne dwóch prądnic przy pracy równoległej [33]

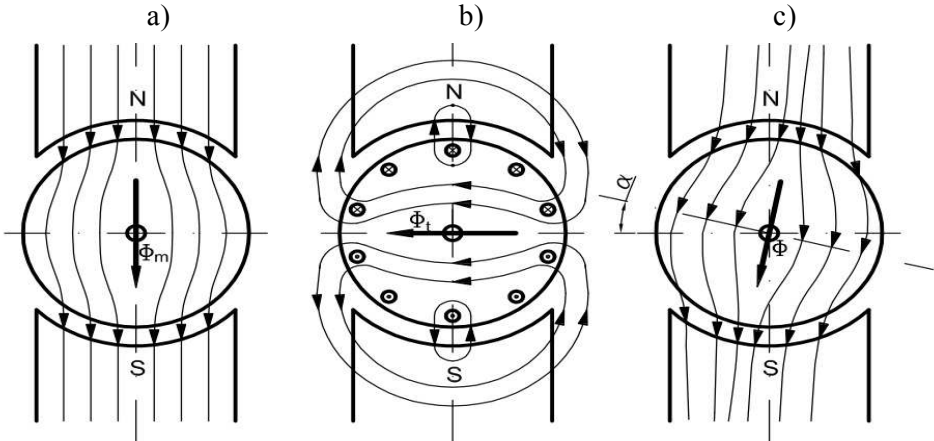
Chcąc zmniejszyć obciążenie jednej prądnicy, np. G_1 przy jednoczesnym zwiększeniu obciążenia drugiej prądnicy, np. G_2 , tzn. chcąc przenieść obciążenie z prądnicy G_1 na prądnicę G_2 należy zmniejszyć wzbudzenie prądnicy G_1 przy jednoczesnym zwiększeniu wzbudzenia prądnicy G_2 . Przenoszenie obciążenia z jednej prądnicy na drugą odbywa się więc przez regulację wzbudzenia. Rozdział obciążenia pomiędzy współpracujące prądnice zależy nie tylko od ich wzbudzenia, lecz także od ich charakterystyk zewnętrznych (rys. 3.21). Jeżeli przy biegu jałowym ($I = 0$) ustawimy wzbudzenie obu prądnic tak, aby dawały one napięcie równe sile elektromotorycznej E_0 , to przy obciążeniu, gdy napięcie obniży się do wartości U , będą one oddawały prądy I_1 i I_2 o wartości zależnej od nachylenia charakterystyk zewnętrznych. Prądnica G_1 o charakterystyce zewnętrznej ($U_1 = f(I)$) będzie oddawała prąd o wartości mniejszej od prądu I_2 oddawanego przez prądnicę G_2 , której charakterystyka ($U_2 = f(I)$) ma mniejsze nachylenie.

Jeżeli chcemy, aby przy zmianach obciążenia rozdzielało się ono równomiernie na współpracujące prądnice bez konieczności regulacji wzbudzenia, to charakterystyki zewnętrzne tych prądnic powinny mieć jednakowe nachylenie, tzn. powinny się pokrywać. Przy niejednakowych mocach prądnic, tzn. nierównych prądach znamionowych, spadek napięcia przy obciążeniu znamionowym powinien być jednakowy dla wszystkich współpracujących prądnic.

3.9. Oddziaływanie twornika w prądnicach prądu stałego

W nieobciążonej maszynie prądu stałego istnieje tylko pole magnetyczne główne B_m wytworzone przez cewki wzbudzające biegunów magnetycznych (rys. 3.22a). Oś strefy obojętnej jest prostopadła do osi magnesów. Jeżeli maszyna zostanie obciążona, to prąd obciążenia płynący przez twornik wytworzy wokół twornika pole magnetyczne B_t . Na rys. 3.22b przedstawiono przebieg linii sił pola twornika przy przepływie prądu przez uzwojenie twornika dla maszyny niewzbudzonej. Oba te pola, czyli B_m i B_t wytwarzają wypadkowe pole magnetyczne (rys. 3.22c). Na rysunku tym widać, że po stronie lewej od osi biegunów magnetycznych w górnej części nastąpiło osłabienie pola (zmniejszenie indukcji – rozrzedzenie linii sił pola magnetycznego), po stronie zaś prawej wzmocnienie (zwiększenie indukcji – zagęszczenie linii sił pola magnetycznego)), w części dolnej odwrotnie: po stronie lewej wzmocnienie, po stronie prawej osłabienie pola. W rezultacie oddziaływania twornika rozkład indukcji magnetycznej pod biegunem staje się nierównomierny, wskutek czego oś wypadkowego strumienia magnetycznego Φ przebiega ukośnie w stosunku do osi geometrycznej biegunów stojana. Strefa obojętna, leżąca w płaszczyźnie prostopadłej do osi strumie-

nia wypadkowego Φ przekręca się o kąt α_0 w stosunku do swego położenia przy biegu jałowym.



Rys. 3.22. Schemat oddziaływania twornika w prądnicach prądu stałego [29], gdzie: a) – rozkład indukcji magnetycznej B pod biegunami maszyny, b) – linii sił pola twornika przy przepływie prądu przez uzwojenie twornika dla maszyny niewzbudzonej, c) – wypadkowe pole magnetyczne w maszynie elektrycznej

Rozkład indukcji magnetycznej B pod biegunami maszyny jest dokładnie taki sam jak rozkład strumieni magnetycznych Φ . Krzywa ($B = f(\alpha)$) jest wypadkową indukcji B_m wywołanej przepływem prądu I_m i indukcji B_t wywołanej prądem twornika. Linie sił pola magnetycznego ulegają zmniejszeniu na skutek nasycenia magnetycznego w żelazie nabiegunków. Zmniejszenie indukcji magnetycznej B powoduje obniżenie indukowanej siły elektromotorycznej SEM podczas pracy prądnicy obciążonej. Reasumując, oddziaływanie twornika jest niekorzystne, gdyż powoduje zmniejszenie siły elektromotorycznej i iskrzenia szczotek wywołane przesunięciem strefy obojętnej o kąt α_0 .

Niekorzystne skutki oddziaływania twornika można ograniczyć, stosując w prądnicach bieguny komutacyjne (zaciski G-H) oraz dodatkowe uzwojenia kompensacyjne na nabiegunkach biegunów głównych maszyny. Wytwarzają one w maszynie dodatkowe pole magnetyczne skierowane przeciwnie do pola twornika, które kompensuje niekorzystne oddziaływanie twornika.

3.10. Pytania kontrolne

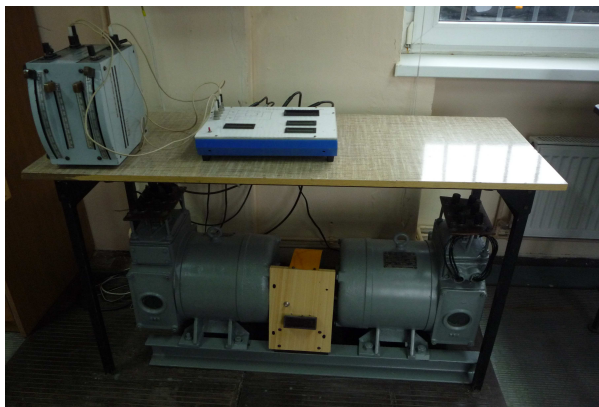
1. Opisać budowę prądnicy maszyny prądu stałego.
2. Podać zasadę działania prądnicy szeregowej i bocznikowej prądu stałego.
3. Podać warunki i wyjaśnić zasadę samowzbudzenia prądnicy.
4. Wyjaśnić zjawisko oddziaływania twornika.
5. Podać przykłady zastosowania prądnic prądu stałego.
6. Narysować charakterystykę biegu jałowego prądnicy samowzbudnej i objaśnić jej przebieg.
7. Narysować charakterystykę zewnętrzną prądnicy samowzbudnej i przedyskutować ją.
8. Narysować zależność $E = f(n)$ prądnicy samowzbudnej i objaśnić jej przebieg.

3.11. Ćwiczenie laboratoryjne

3.11.1. Pomiar rezystancji uzwojeń wzbudzenia i twornika

3.11.1.1. Pomiary rezystancji izolacji

Pomiary rezystancji izolacji maszyn komutatorowych wykonuje się uwzględniając pewne osobliwości w budowie tych maszyn, związane z istnieniem węzła szczotkowo-komutatorowego (rys. 3.23).



Rys. 3.23. Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego do badania prądnic prądu stałego

Przed rozpoczęciem tych pomiarów należy rozłączyć wszystkie połączenia na tabliczce zaciskowej i rozłączyć węzeł szczotkowo-komutatorowy, wyjmując szczotki ze szczotko trzymaczy. W maszynach komutatorowych (rys. 3.23) mierzy się wartości izolacji między uzwojeniami i korpusem maszyny oraz między uzwojeniami, które poprzez izolację stykają się ze sobą, np. uzwojenia F1F2, D1D2. Pomiarami rezystancji izolacji głównej objęte są układy: uzwojenie twornika – korpus, uzwojenie bocznikowe – korpus, szeregowo – korpus, komutacyjne – korpus, uzwojenie bocznikowe – uzwojenie szeregowe.

Przy pomiarze rezystancji izolacji uzwojeń do korpusu maszyny, jeden z przewodów induktora należy połączyć lub przyłożyć do korpusu w miejscu oczyszczonym od farby, a drugi przewód do jednego z końców badanego uzwojenia. W przypadku pomiaru rezystancji izolacji uzwojenia twornika jeden z przewodów induktora przykładają się do dowolnego wycinka komutatora.

Wyniki pomiarów należy zamieścić w tablicy 3.1.

Tab. 3.1. Wyniki pomiaru rezystancji izolacji uzwojeń

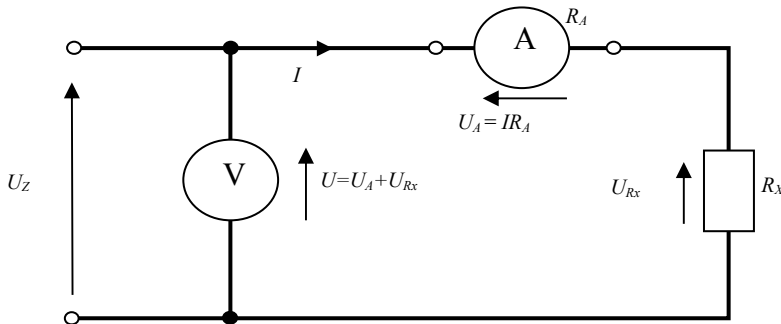
| Rodzaje pomiaru rezystancji izolacji głównej silnika | Rezystancja [$M\Omega$] |
|--|---------------------------|
| Twornik – korpus | |
| Uzwojenie bocznikowe – korpus | |
| Uzwojenie szeregowe – korpus | |
| Uzwojenie komutacyjne – korpus | |
| Uzwojenie bocznikowe – uzwojenie szeregowe | |

3.11.1.2. Pomiary rezystancji uzwojeń wzbudzenia

Pomiar rezystancji uzwojeń wzbudzenia przeprowadza się metodą techniczną przy warunku ograniczenia prądu do wartości $0,2 I_{FN}$ (I_{FN} prąd znamionowy badanego obwodu wzbudzenia) (rys. 3.24). Podczas pomiarów rezystancji należy odnotować temperaturę otoczenia t_t w odległości nie przekraczającej 1m od maszyny i wartość średnią z (3 ÷ 5) wyników pomiarów należy przeliczyć na temperaturę normatywną (75° ; 100°) i wpisać do tablicy 3.2.

Tab. 3.2. Wyniki pomiarowe rezystancji uzwojeń wzbudzenia

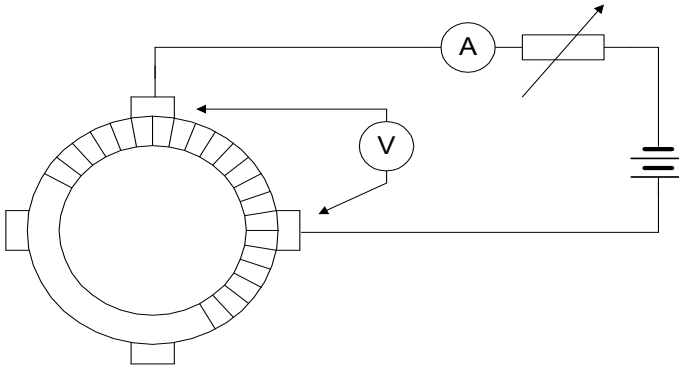
| I | U | R_{fp} | R_{fs} | R_{fp75} | R_{fs75} |
|---|---|----------|----------|------------|------------|
| A | V | Ω | Ω | Ω | Ω |
| | | | | | |



Rys. 3.24. Układ pomiaru rezystancji uzwojeń prądnicy metodą techniczną z poprawnie mierzonym prądem

Pewną osobiwością w pomiarach rezystancji w maszynach komutatorowych prądu stałego jest pomiar rezystancji przejścia, która dotyczy styku szczotki z komutatorem. Rezystancja ta jest składnikiem sumy rezystancji: uzwojenia twornika R_a , biegunów komutacyjnych R_k , uzwojenia szeregowego R_s . Wymienione uzwojenia połączone w szereg zasila się ze źródła prądu stałego, regulując prąd z przedziału wartości $(0 \div 1,2) I_N$. Mierzy się spadek napięcia na poszczególnych uzwojeniach i na szczotkach: U_a – spadek napięcia na uzwojeniu twornika, U_s – spadek napięcia na uzwojeniu szeregowym (D1, D2), U_k – spadek napięcia na uzwojeniu biegunów komutacyjnych (jeżeli jest dostęp do przewodów tego uzwojenia), U_{at} – spadek napięcia na całym układzie utworzonym z połączonych szeregowo obwodów uzwojeń i szczotek (A1 - D2).

Spadek napięcia na uzwojeniu twornika mierzy się na wycinkach komutatora odległych na obwodzie o podziałkę biegunową t (rys. 3.25). Ponieważ szczotka pokrywa kilka wycinków komutatora, to należy przeprowadzić pomiar dla wszystkich par, na których spadki napięcia są względnie największe i w wyniku końcowym określić wartość średnią. Spadek napięcia na uzwojeniu komutacyjnym mierzy się na zacisku B2 i szczotko trzymaczu połączonym z zaciskiem A2. Wartości rezystancji poszczególnych obwodów uzwojeń wyznacza się z równania Ohma, przy czym dla rezystancji R_a , R_s , R_k oblicza się wartości średnie na podstawie ciągu pomiarów, natomiast rezystancja R_{at} ma różne wartości w każdym pomiarze, więc nie należy jej uśredniać.



Rys. 3.25. Schemat połączeń do pomiaru rezystancji uzwojenia twornika

Rezystancję przejścia oblicza się ze wzoru:

$$R_p = \frac{U_p}{I_a} \quad (3.20)$$

przyjmując na jedną szczotkę $U_p = 1 \text{ V}$ dla szczotki węglowej i $U_p = 0,3 \text{ V}$ dla szczotki miedziowo-węglowej. Wyniki pomiarów i obliczeń wpisać do tablicy 3.3.

Tab. 3.3. Pomiar rezystancji uzwojenia twornika

| I_a | U_a | U_s | U_k | U_{at} | R_a | $R_{a\text{śr}}$ | R_s | $R_{s\text{śr}}$ | R_{s75} | R_k | $R_{k\text{śr}}$ | R_{k75} | R_p | R_{at75} |
|-------|-------|-------|-------|----------|----------|------------------|----------|------------------|-----------|----------|------------------|-----------|----------|------------|
| A | V | V | V | V | Ω | Ω | Ω | Ω | Ω | Ω | Ω | Ω | Ω | Ω |
| | | | | | | | | | | | | | | |

Wyniki pomiarów rezystancji przeliczone na temperaturę normatywną należy przedstawić na wykresie w funkcji prądu twornika. Wartości rezystancji R_a , R_s , R_k są stałe w zależności od prądu I_a natomiast R_{at} jest funkcją monofoniczną, a więc rezystancja R_p będzie miała przebieg funkcyjny analogiczny do R_{at} (rys. 3.25).

Pomiary rezystancji uzwojeń wzbudzenia i wirnika dla silników prądu stałego i alternatorów należy wykonać zgodnie z opisem przedstawionym wcześniej. Do pomiaru rezystancji zastosować mostki techniczne Thomsona i Wheatstone'a. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli 3.4. Dla silnika prądu stałego wykonać pomiary rezystancji uzwojenia wirnika dla pięciu różnych położenia wirnika. Uzyskane wyniki pomiarowe wpisać do tablic 3.4 i 3.5.

Tab. 3.4. Pomiar rezystancji izolacji

| Lp. | Pomiar izolacji | Rezystancja [MΩ] |
|-----|---|------------------|
| 1. | Między uzwojeniem stojana i korpusem alternatora | |
| 2 | Między uzwojeniem wirnika a wałkiem wirnika alternatora | |
| 3. | Między uzwojeniem stojana a korpusem silnika prądu stałego | |
| 4. | Między uzwojeniem wirnika a wałkiem wirnika silnika prądu stałego | |

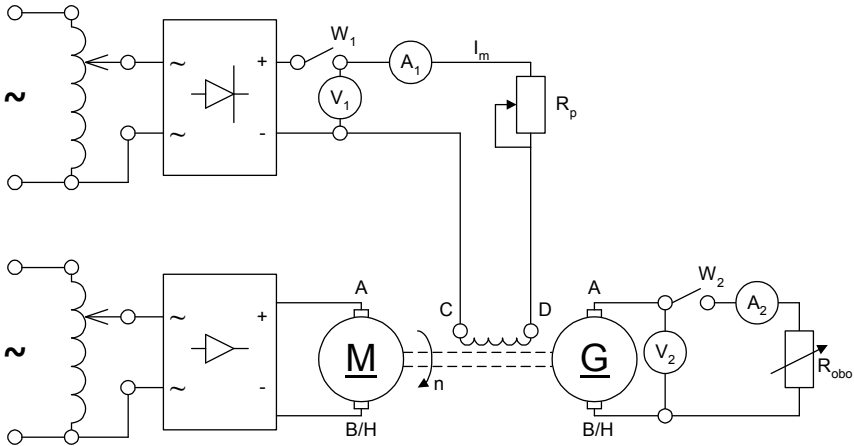
Tab. 3.5. Pomiar rezystancji uzwojenia wirnika

| Lp. | Pomiary rezystancji | Rezystancja uzwojeń [Ω] | |
|-----|---|-------------------------|-------------------|
| | | dane techniczne | wartości mierzone |
| 1. | Uzwojenie stojana alternatora | | |
| | Faza A | | |
| | Faza B | | |
| | Faza C | | |
| | Uzwojenie wirnika alternatora | | |
| 2. | Uzwojenie stojana silnika prądu stałego | | |
| | Uzwojenie wirnika silnika prądu stałego | | |

3.11.2. Wyznaczenie charakterystyki biegu jałowego prądnicy obcowzbudnej prądu stałego

Do pomiarów wykorzystuje się stanowisko laboratoryjne prądnicy obcowzbudnej prądu stałego, którego schemat przedstawiono na rys. 3.26.

1. Pomiary wykonuje się w następującej kolejności. Po dokonanych rozruchu silnika bocznikowego i ustaleniu się prędkości obrotowej znamionowej ($n_n = 1000$ obr/min), przy otwartym wyłączniku W_2 zdejmujemy charakterystykę biegu jałowego $E = f(I_m)$.
2. Prąd magnesujący zmieniamy kolejno od zera do wartości $I_m = \max$, przy której $E = 1,1 U$, wyniki zapisujemy w tab. 3.6.
3. Następnie zmniejszamy prąd magnesujący od wartości $I_m = \max$ z powrotem do zera, wyniki zapisujemy w tab. 3.6.
4. Przy prądzie $I_m = 0$ należy odczytać wartość siły elektromotorycznej szczytkowej E_{sz} .
5. Wyniki pomiarów zapisuje się w tab. 3.6.



Rys. 3.26. Układ połączeń pomiarowych do badania prądnicy obcowzbudnej

Tab. 3.6. Wyniki pomiarowe do wykreślenia $E = f(I_m)$

| Warunki pracy prądnicy: $E = 1,1 U_n = \dots\dots\dots$, $n_n = \dots\dots\dots$, $E_n = \dots\dots\dots$, $E_{sz} = \dots\dots\dots$, | | | | |
|---|-----------|-----|--------------|-----|
| Lp. | $I_m = 0$ | E | $I_m = \max$ | E |
| - | A | V | A | V |
| | | | | |

6. Na podstawie pomiarów wykreślić należy charakterystykę biegu jałowego $E = f(I_m)$ (rys. 3.6).

3.11.3. Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej prądnicy obcowzbudnej

Charakterystyka zewnętrzna prądnicy $U = f(I)$ jest to zależność napięcia U na zaciskach od prądu obciążenia I_{obc} przy stałej rezystancji obwodu wzbudzenia prądnicy i przy stałej prędkości obrotowej ($n_n = \text{const}$). Wykonanie pomiarów odbywa się w następującej kolejności.

1. Ustawić pracę prądnicy na biegu jałowym.
2. Przez zmianę rezystancji w obwodzie wzbudzenia ustawić napięcie znamionowe.
3. Następnie zmieniając wartość oporności R_{obc} w obwodzie obciążenia (tab. 3.7) prądnicy dokonywać zmiany prądu obciążenia prądnicy I od zera do wartości znamionowej I_n .

Tab. 3.7. Wartości rezystancji obciążenia prądnicy

| | | | | | |
|------------------------|---|----|----|----|----|
| Rezystancje obciążenia | Numery załączonych sekcji rezystancji obciążenia [Ω] | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | 100 | 50 | 33 | 25 | 20 |

4. Wyniki pomiarów zapisujemy w tab. 3.8.

Tab. 3.8. Wyniki pomiarowe do wykreślenia $U = f(I)$; $E = f(I)$

| | | | | | |
|--|-------|---|---|-------|----|
| Warunki pracy prądnicy: $E_o = \dots\dots\dots$, $U_n = \dots\dots\dots$, $R_t = \dots\dots\dots$, $c = \dots\dots\dots$ | | | | | |
| Lp. | I_n | U | I | U_t | M |
| - | A | V | A | V | Nm |
| | | | | | |

5. Moment elektromagnetyczny M obliczyć na podstawie zależności ($M = c \Phi I$).
6. Na podstawie pomiarów wykreślić należy charakterystyki: zewnętrzną prądnicy $E = f(I)$, $U = f(I)$ oraz $M = f(I)$ przy $n_n = \text{const}$ i $I_m = \text{const}$ (rys. 3.7).

3.11.4. Wyznaczanie charakterystyki siły elektromotorycznej od prędkości obrotowej prądnicy obcowzbudnej

Pomiary wykonuje się w następującej kolejności.

1. Pomiar przeprowadzamy ustawiając pracę prądnicy na biegu jałowym.
2. Pomiary przeprowadza się poprzez zmianę prędkość obrotową i odczytując wartość siły elektromotorycznej E na zaciskach twornika maszyny dla dwóch różnych wartości prądu wzbudzającego.
3. Wyniki zapisywać w tabelicy 3.9.

Tab. 3.9. Wyniki pomiarowe do wykreślenia $E = f(n)$; $\Phi = f(n)$

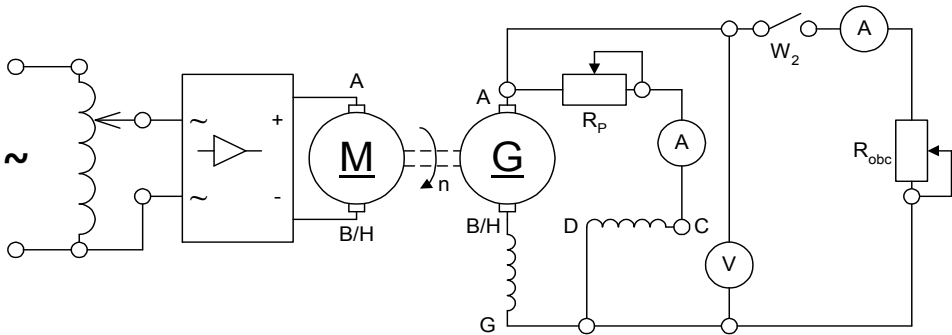
| | | | | | | | | |
|--|----------|--------------|---|--------|----------|----------------|---|--------|
| Warunki pracy prądnicy: $E_o = \dots\dots\dots$, $U_n = \dots\dots\dots$, $R_t = \dots\dots\dots$, $c = \dots\dots\dots$ | | | | | | | | |
| Lp. | I_{m1} | $n \uparrow$ | E | Φ | I_{m2} | $n \downarrow$ | E | Φ |
| - | A | obr/min | V | Wb | A | obr/min | V | Wb |

4. Wartość Φ należy obliczyć na podstawie zależności ($E = c \Phi n$).

5. Na podstawie pomiarów wykreślamy charakterystykę $E = f(n)$ oraz $\Phi = f(n)$ odpowiednio dla (I_{m1} oraz I_{m2}) przy $I_m = \text{const}$ (rys. 3.6).

3.11.5. Wyznaczenie charakterystyki biegu jałowego prądnicy samowzbudnej bocznikowej prądu stałego

Do pomiarów wykorzystuje się stanowisko laboratoryjne prądnicy samowzbudnej prądu stałego, którego schemat przedstawiono na rys. 3.27.



Rys. 3.27. Układ połączeń pomiarowych do badania prądnicy samowzbudnej bocznikowej

Pomiary wykonuje się w następującej kolejności.

1. Procedurę uruchamiania prądnicy dokonuje prowadzący poprzez ustawienie rezystancji obwodu wzbudzenia regulowanym rezystorem o wartości $R_{reg} = 100 \Omega$ oraz zwiększając prędkość obrotową prądnicy aż do wartości wzbudzenia się prądnicy.
2. Po dokonanych rozruchu silnika bocznikowego i ustaleniu się prędkości obrotowej prądnicy znamionowej, przy otwartym wyłączniku W_2 ustawić należy rezystor R_p tak, aby napięcie znamionowe na tworniku prądnicy było równe znamionowemu.
3. Zatrzymujemy prędkość obrotową prądnicy nie zmieniamy wartości na rezystorze R_p przeprowadzamy pomiar regulując prędkość obrotową prądnicy.
4. pomiary wykonuje się zwiększając prędkość obrotową prądnicy aż do prędkości znamionowej (pomiar 1) uzyskane wartości E zapisujemy do tab. 3.10.
5. Następnie należy zmniejszać prędkość obrotową prądnicy (pomiar 2) uzyskane wartości E zapisuje się do tab. 3.10.

6. Na podstawie pomiarów wykreślić należy charakterystykę biegu jałowego prądnicy $E = f(n)$ (rys. 3.13).
7. Na podstawie wykresu $E = f(n)$ prądnicy samowzbudnej bocznikowej określić wartość n_{kn} dla $E_{max} = \frac{1}{2}E$.

Tab. 3.10. Wyniki pomiarowe do wykreślenia $E = f(n)$

| | | | | | | | | | | | |
|----------|--------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Lp. | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Pomiar 1 | $n \uparrow$ [obr/min] | | | | | | | | | | |
| | E [V] | | | | | | | | | | |
| Pomiar 2 | $n \downarrow$ [obr/min] | | | | | | | | | | |
| | E [V] | | | | | | | | | | |

3.11.6. Wyznaczanie charakterystyki siły elektromotorycznej prądnicy samowzbudnej bocznikowej

Pomiary wykonuje się w następującej kolejności.

1. Pomiar przeprowadza się ustawiając pracę prądnicy na biegu jałowym.
2. Pomiary przeprowadza się poprzez zmianę prądu magnesującego prądnicę I_m ustawiając kolejno wartości na rezystorze R_p (rys. 3.27).
3. Wyniki zapisywać w tablicy 3.11.

Tab. 3.11. Wyniki pomiarowe do wykreślenia $E = f(n)$ oraz $\Phi = f(n)$

| | | | | | | |
|--|-------|----------|---|--------|----------|----------------------|
| Warunki pomiaru: $E_{sz} = \dots\dots\dots$, $n_n = \dots\dots\dots$, $R_m = \dots\dots\dots$, $R_{tc} = \dots\dots\dots$, $R_p = (\text{od } 0 \text{ do } 100\Omega)$ | | | | | | |
| Lp. | I_m | R_p | E | Φ | R_{mc} | $(R_{mc} \cdot I_m)$ |
| - | A | Ω | V | Wb | Ω | V |
| | | | | | | |

4. Wartości prądu wzbudzenia I_m zmieniać rezystorem regulacyjnym R_p z przedziału (od 1 do 2,2 A).
5. Wartość Φ należy obliczyć na podstawie zależności ($E = c \Phi n$).
6. Na podstawie pomiarów wykreślamy charakterystykę $E = f(I_m)$, $\Phi = f(I_m)$ oraz $(R_{mc} I_m) = f(I_m)$ przy $n_n = \text{const}$ (rys. 3.18).
7. Obliczyć rezystancję obwodu wzbudzenia R_{mc} ze wzoru:
 $R_{mc} = R_m + R_p + R_{tc}$, gdzie: R_{mc} – rezystancja obwodu wzbudzenia, R_m – rezystancja uzwojenia wzbudzenia, R_p – rezystancja rezystora regulacyjnego wzbudzenia, R_{tc} – rezystancja całkowita obwodu twornika.
8. Na podstawie wykresu (rys. 3.14) wyznaczyć wartość E_{ust} .

9. Na podstawie pomiarów wykreślić należy charakterystykę $E = f(n)$ oraz $\Phi = f(n)$.
10. Opracować wnioski.

3.11.7. Wyznaczenie charakterystyki zewnętrznej prądnicy samowzbudnej bocznikowej

Charakterystyka zewnętrzna prądnicy $U = f(I)$ jest to zależność napięcia U na zaciskach prądnicy od prądu obciążenia I przy stałej rezystancji obwodu wzbudzenia prądnicy i przy stałej prędkości obrotowej $n_n = \text{const}$. Wykonanie pomiarów odbywa się w następującej kolejności.

1. Ustawić pracę prądnicy na biegu jałowym.
2. Przez zmianę rezystancji w obwodzie wzbudzenia ustawić napięcie znamionowe prądnicy U_n .
3. Następnie zmieniając wartość rezystancji R_{obc} w obwodzie obciążenia prądnicy zmieniamy prąd I w obwodzie obciążenia prądnicy od zera do wartości znamionowej I_n .
7. Wartości rezystancji obciążenia podane są w tab. 3.12.

Tab. 3.12. Wartości rezystancji obciążenia prądnicy

| | | | | | |
|------------------------|---|----|----|----|----|
| Rezystancje obciążenia | Numery załączonych sekcji rezystancji obciążenia [Ω] | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | 100 | 50 | 33 | 25 | 20 |

8. Dla każdej z wartości rezystancji obciążenia dokonać pomiarów badanych wielkości.
9. Wyniki pomiarów zapisuje się w tablicy 3.13.

Tab. 3.13. Wyniki pomiarowe do wykreślenia $U = f(I)$; $E = f(I)$

| | | | | | |
|---|-----------|-----|-----|-------|-----|
| Warunki pracy prądnicy: $E_o = \dots\dots\dots$, $U_n = \dots\dots\dots$, $R_t = \dots\dots\dots$, $n_n = \dots\dots\dots$, $I_n = \dots\dots\dots$, $c = \dots\dots\dots$ | | | | | |
| R_{obc} | I_{wzb} | U | I | U_t | M |
| | A | V | A | V | Nm |
| | | | | | |

-
10. Moment elektromagnetyczny M obliczyć na podstawie zależności ($M = c \Phi I$).
 11. Na podstawie pomiarów wykreślić należy charakterystykę zewnętrzną prądnicy $E = f(I)$, $M = f(I)$ i $U = f(I)$ przy $n = \text{const}$ (rys. 3.15).
 12. Opracować wnioski.

4. Badanie prądnicy synchronicznej

Treścią niniejszego rozdziału jest omówienie budowy, zasad działania, parametrów, właściwości i charakterystyk prądnic synchronicznych.

4.1. Budowa i zasada działania maszyn synchronicznych

Maszyna synchroniczna jest to taka maszyna prądu przemiennego, w której strumień pola magnetycznego wirnika (twornika) wiruje synchronicznie (współczasowo) ze strumieniem stojana (magnesów). Zjawisku temu odpowiada ścisła zależność między prędkością obrotową maszyny synchronicznej n , liczbą par biegunów p i częstotliwością f :

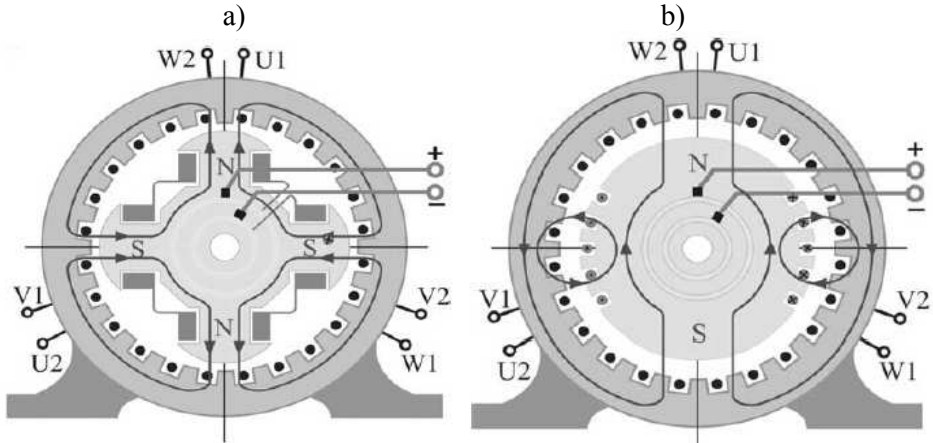
$$f = \frac{p \cdot n}{60} , \quad (4.1)$$

gdzie: p – liczba par biegunów w obwodzie magnetycznym wzbudzenia prądnicy, n – prędkość obrotowa pola magnetycznego, f – częstotliwość napięcia zasilającego obwód wzbudzenia generatora.

Praca maszyny synchronicznej jest odwracalna, przy tej samej budowie może ona pracować jak prądnica lub jako silnik. W praktyce maszyny tego typu są wykorzystywane jako generatory w elektrowniach stacjonarnych i mobilnych do wytwarzania energii prądu przemiennego jedno- lub trójfazowego.

Maszyna synchroniczna składa się z zewnętrznej nieruchomej części, zwanej stojanem lub twornikiem oraz wewnętrznej ruchomej (obrotowej) części, zwanej wirnikiem (rys. 4.1). Stojan, wirnik i szczelina powietrzna między tymi częściami stanowią obwód magnetyczny maszyny. Na obwodzie stojana i wirnika znajdują się żłobki, wewnątrz których umieszczone są uzwojenia. W żłobkach stojana umieszczone są cewki trójfazowego uzwojenia maszyny. W generatorach trójfazowych w stojanie są umieszczone trzy obwody uzwojeń przesuniętych względem siebie w przestrzeni maszyny o kąt 120° . Takie przesunięcie fazowe uzwojeń po obwodzie stojana zapewnia przesunięcie fazowe kąt 120° między indukowanymi napięciami w poszczególnych fazach. Cewki (obwody) uzwojeń stojana mogą być połączone w gwiazdę lub trójkąt. Schemat funkcjonalny prądnicy trójfazowej przedstawiono na rys. 4.1. W prądnicy (rys. 4.1) w żłobkach wirnika umieszczone jest uzwojenie magneśnicy (wzbudnicy) wytwarzające pole magnetyczne. Początki tego uzwojenia dołączone są do dwóch pierścieni ślizgowych osadzonych na wale prądnicy. Do pierścieni śli-

zgowych za pośrednictwem szczotek przyłącza się obwód zewnętrzny prądu stałego zasilający wzbudnicę.



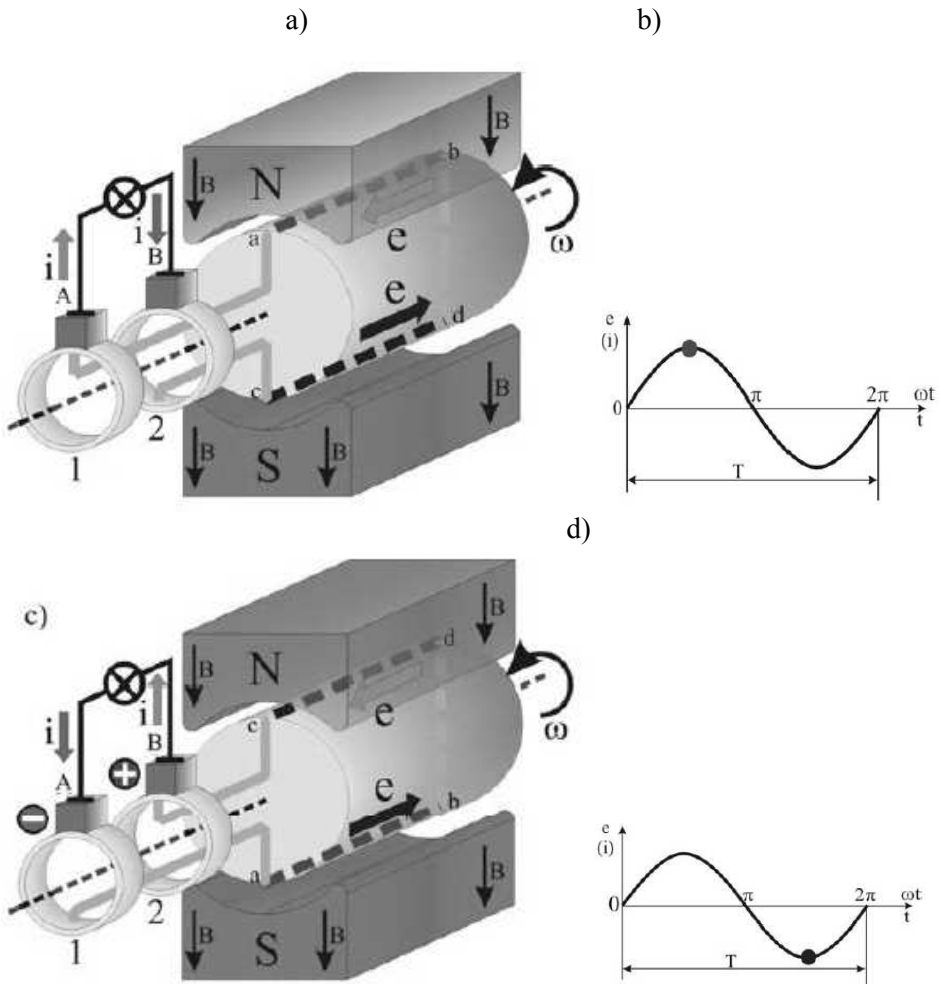
Rys. 4.1. Schemat prądnicy synchronicznej z biegunami wydatnymi i utajonymi [39], gdzie: a) – schemat prądnicy synchronicznej z biegunami wydatnymi na wirniku i utajonymi na stojanie, b) – schemat prądnicy synchronicznej z biegunami utajonymi na wirniku i utajonymi na stojanie

Uzwojenie wzbudzenia prądnicy umieszczone na stojanie jest uzwojeniem trójfazowym. Końce tego uzwojenia są wyprowadzone do zewnętrznej tablicy zaciskowej prądnicy, a stąd jest już połączenie prądnicy z siecią elektryczną. Prąd płynący w zamkniętym uzwojeniu wzbudzenia jest wynikiem zaindukowanej w nim siły elektromotorycznej.

Obwody magnetyczne stojana i wirnika o określonym kształcie w zależności od typu i mocy maszyny wykonuje się z izolowanych cienkich blach ze stali elektrotechnicznej. Blachy są izolowane i łączone ze sobą tworzą kształt walca. Taki obwód minimalizuje straty mocy spowodowane prądami wirowymi i powoduje niewielkie zmiany napięć magnetycznych obwodzie magnetycznym maszyny. Natomiast obwody elektryczne zarówno twornika jak i wzbudzenia (magneśnicy) wykonuje się drutem miedzianym pokrytym lakierem izolacyjnym. W generatorach dużej mocy uzwojenia tworników są wykonywane przewodem miedzianym o przekroju zależnym (dopasowanym) do kształtu żłobków tworników. Uzwojenia te są odizolowane elektrycznie od obwodu magnetycznego.

W prądnicach synchronicznych stosuje się tak na wirniku jak i na stojanie bieguny wydatne lub bieguny utajone (rys. 4.1). Bieguny wydatne na wirniku są zwykle stosowane w generatorach wolnoobrotowych do 1500 [obr/min] oraz o dużej liczbie par biegunów, w których dopuszcza się nierównomiernie rozło-

zoną masę po obwodzie wirnika. Liczba par biegunów i prędkość obrotowa muszą być tak dobrane, aby częstotliwość indukowanego napięcia była równa 50 [Hz]. Bieguny utajone stosowane są w generatorach szybkoobrotowych do 3000 [obr/min]. Istota zasady działania prądnicy synchronicznej jednofazowej zostanie omówiona w oparciu o model przedstawiony na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Model prądnicy jednofazowej prądu przemiennego [39], gdzie: a) – wytwarzanie dodatniej półwłki napięcia przemiennego, b) – przebieg dodatniej półwłki napięcia przemiennego, c) – wytwarzanie ujemnej półwłki napięcia przemiennego, d) – przebieg ujemnej półwłki napięcia przemiennego

W maszynie tej występują dwa obwody: jeden to obwód elektryczny maszyny, który tworzy zwój (ramka) wirnika, drugi to obwód magnetyczny, który tworzy źródło energii magnetycznej – magnes stały o biegunach N - S . W polu magnetycznym jest umieszczona ramka przewodząca prąd elektryczny (obwód zamknięty), której końce połączone z pierścieniami ślizgowymi i obwodem zewnętrznym. Ramką (zwój) jest umieszczona na walcu pierścieniowym ferromagnetycznym w celu zamknięcia drogi dla strumienia magnetycznego źródła energii magnetycznej. Jeżeli ramka na walcu (wirniku) zacznie się obracać, to w jej bokach (ramkach) czynnych a - b i c - d będzie indukowało się napięcie (patrz pkt. 1.7), którego przebieg pokazano na rys. 4.2. Zwrot (kierunek) tego napięcia określa reguła prawej dłoni (patrz pkt. 1.8). Największa wartość napięcia (amplituda) indukuje się w chwili, gdy boki zwoju wirnika przemieszczają się pod osią biegunów magnesów, gdzie jest największa wartość indukcji magnetycznej (gęstość strumienia magnetycznego pola). Obracając ramkę co 90° przeciwnie do ruchu wskazówek zegara sytuacja przedstawiona na rys. znajdzie się ona w przestrzeni międzybiegu nowej i jej boki czynne będą sprzężone z zerowym strumieniem magnetycznym. Napięcie indukowane w zwoju będzie równe zeru. Przy dalszym obrocie ramki jej boki zmieniają się miejscami i przejdą pod przeciwne bieguny magnesu. W związku z tym zmieni się zwrot indukowanego napięcia w bokach czynnych ramki. Z analizy rys. 4.2 wynika, że obrotowi wirnika (ramki) prądnicy o kąt 180° towarzyszy zmiana zwrotu indukowanego napięcia w uzwojeniu wirnika (ramki). Przy jednej parze biegunów magnetycznych układu stojana jednemu obrotowi wirnika odpowiada jeden okres indukowanego napięcia. Natomiast chwilowa wartość napięcia indukowanego e w wirującej ze stałą prędkością v ramki jest proporcjonalna do wartości indukcji magnetycznej B i prędkości wirowania ramki n , a częstotliwości f tego napięcia zależy od prędkości wirowania ramki n . Jeżeli zapewniony będzie sinusoidalny rozkład indukcji magnetycznej w obwodzie magnetycznym maszyny (prądnicy): w szczelinie powietrznej między wirnikiem i biegunami magnesu oraz stała będzie prędkość wirowania wirnika (ramki) to na nieruchomych szczotkach prądnicy (rys. 4.2) pojawi się napięcie sinusoidalnie zmienne o stałej amplitudzie. Wtedy przez odbiornik przyłączony do szczotek prądnicy popłynie prąd przemienny.

4.2. Oddziaływanie twornika w maszynach synchronicznych

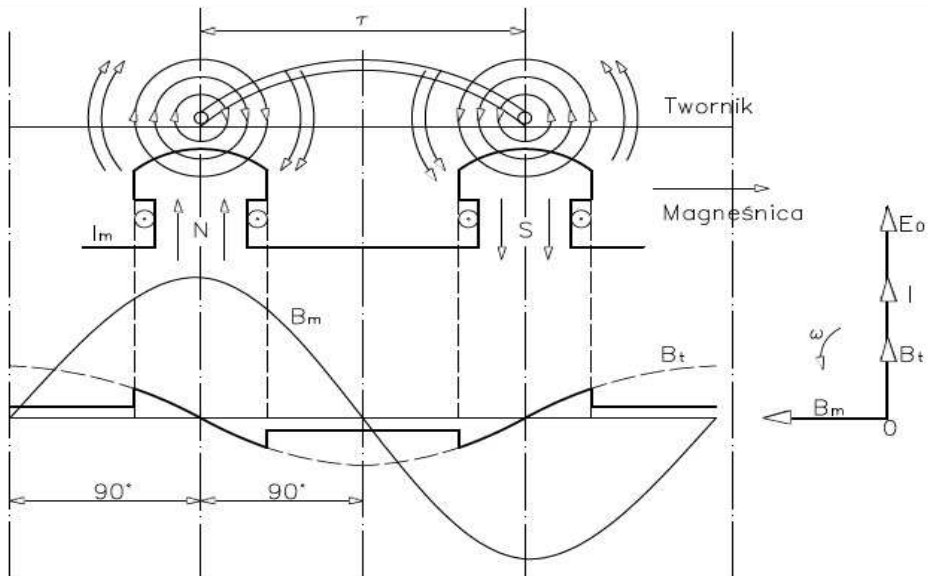
W wyniku zasilenia uzwojenia wirnika (magneśnicy) prądem stałym, zostanie wytworzony strumień magnetyczny Φ_m . Strumień magnetyczny, wirujący wraz z napędzaną magneśnicą, przecina pręty uzwojenia stojana (twornika) indukując w poszczególnych fazach sinusoidalne siły elektromotoryczne, (przesunięte względem siebie o kąt 120° . Sinusoidalny kształt siły elektromo-

torycznej uzyskuje się przez sinusoidalny rozkład indukcji magnetycznej β w szczelinie powietrznej. Taki rozkład indukcji uzyskuje się przez odpowiednie ukształtowanie nabiegunków biegunów wystających. Jeżeli wzbudzoną prądnicę synchroniczną obciążymy odbiornikiem, to prąd obciążenia płynący przez uzwojenie twornika wytworzy wokół tego uzwojenia strumień magnetyczny twornika Φ_t , wirujący z prędkością synchroniczną (rys. 4.4). Tak więc strumienie magnetyczne Φ_m i Φ_t są względem siebie nieruchome. Suma geometryczna, obu strumieni równa się strumieniowi wypadkowemu:

$$\phi = \phi_m + \phi_t. \quad (4.2)$$

Prąd płynący przez uzwojenie twornika prądnicy synchronicznej w zależności od rodzaju odbiornika może wyprzedzać w czasie indukowaną siłę elektromotoryczną, może być z nią w fazie, lub może się względem niej opóźniać. W każdym z tych trzech przypadków oddziaływanie strumienia twornika na strumień magnesów będzie inne, gdyż w każdym z tych przypadków strumień twornika będzie przesunięty o inny kąt względem strumienia magnesów.

1. Obciążenie prądnicy o charakterze rezystancyjnym (czynnym). Maksimum siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu twornika przypada na chwilę, gdy boki zezwoju znajdują się pod osiami sąsiednich biegunów (rys. 4.3). Prąd płynący przez uzwojenie twornika jest w fazie z siłą elektromotoryczną. Oś strumienia twornika Φ_t pokrywa się z osią cewki, gdyż w tej cewce siła elektromotoryczna i prąd osiągnęły wartość maksymalną. Indukcja wywołana przepływem (siłą magnetomotoryczną) magnesów ma przebieg krzywej B_m . Sinusoida indukcji wywołanej przepływem twornika B_t jest opóźniona względem sinusoidy indukcji magnesów B_m o kąt 90° . Pole magnetyczne oddziaływania obwodu twornika jest ustawione jako poprzeczne w stosunku do pola magnetycznego głównego. Dlatego takie oddziaływanie twornika nazywane jest oddziaływaniem poprzecznym. Z analizy rys. 4.3 widać, że na jednym krańcu nabiegunka następuje osłabienie pola, na krańcu przeciwnym następuje wzmocnienie pola magnetycznego. Ponieważ przenikalność magnetyczna żelaza maleje ze wzrostem nasycenia, to zmniejszenie indukcji pod jednym krańcem nabiegunka nie jest równe zwiększeniu indukcji pod drugim nabiegunkiem. Zagęszczenie linii sił będzie mniejsze niż rozrzedzenie linii sił. Wskutek tego wypadkowy strumień magnetyczny będzie mniejszy, niż strumień wywołany przepływem magnesów. Pociągnie to za sobą zmniejszenie siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu twornika, a w wyniku tego zmniejszenie napięcia na zaciskach maszyny.

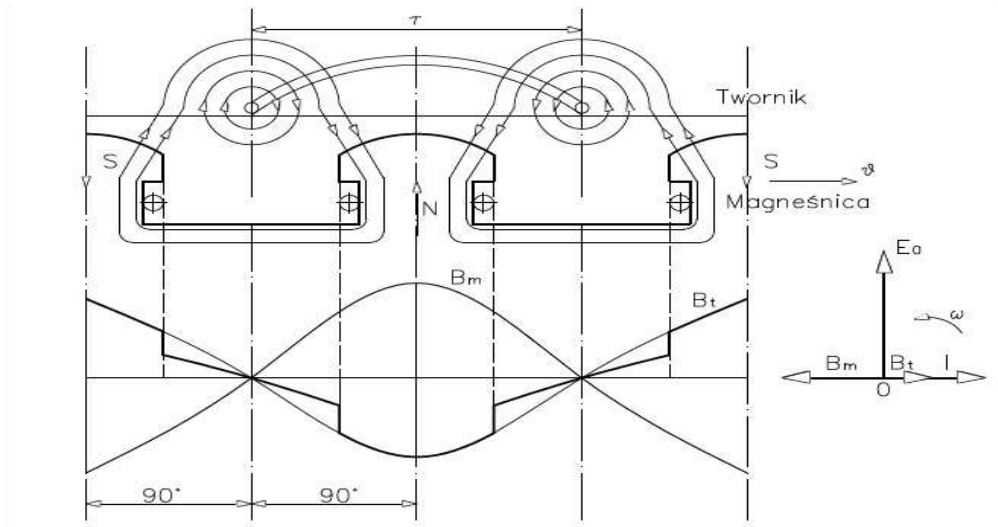


Rys. 4.3. Oddziaływanie twornika przy obciążeniu czynnym [29]

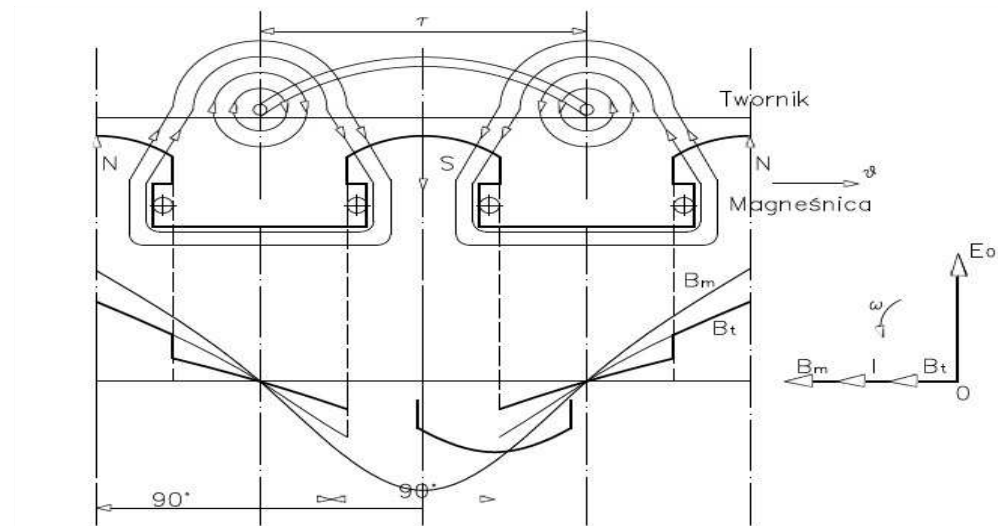
W maszynie z biegunami utajonymi indukcja wywołana przepływem twornika ma przebieg sinusoidalny, natomiast w maszynie z biegunami wystającymi w przestrzeni między nabiegownikami istnieje duża szczelina powietrzna i duży opór magnetyczny. W przestrzeni tej wartość indukcji będzie bardzo mała (rys. 4.3). Wpływ pola twornika jest więc w prądnicy z biegunami wystającymi znacznie mniejszy niż w prądnicy z biegunami utajonymi.

2. Obciążenie prądnicy o charakterze indukcyjnym. Dla tego typu obciążenia prądnicy prąd twornika prądnicy jest opóźniony względem siły elektromotorycznej o kąt 90° i pod wpływem magnesznicy wyprzedza o czas odpowiadający obrotowi twornika o pół podziałki biegunowej stan z rys. 4.4. Oś magnesów pokrywa się z osią uzwojenia. Oddziaływanie nazywa się oddziaływaniem podłużnym. Indukcja B_t wywołana przepływem twornika jest skierowana przeciwnie do indukcji B_m wywołanej przepływem magnesznicy. Przy obciążeniu czysto indukcyjnym oddziaływanie twornika ma charakter podłużny rozmagnesowujący. Zatem wypadkowe pole magnetyczne maszyny jest osłabiane, a zatem zmniejszona jest także wartość SEM indukowanej w prądnicy.

3. Obciążenie prądnicy o charakterze pojemnościowym. Przy tym typie obciążenia prądnicy prąd twornika wyprzedza o kąt 90° indukowaną siłę elektromotoryczną, przepływ magnesznicy opóźnia się o pół podziałki biegunowej w stosunku do obciążenia czynnego (rys. 4.5).



Rys. 4.4. Oddziaływanie twornika przy obciążeniu indukcyjnym [29]

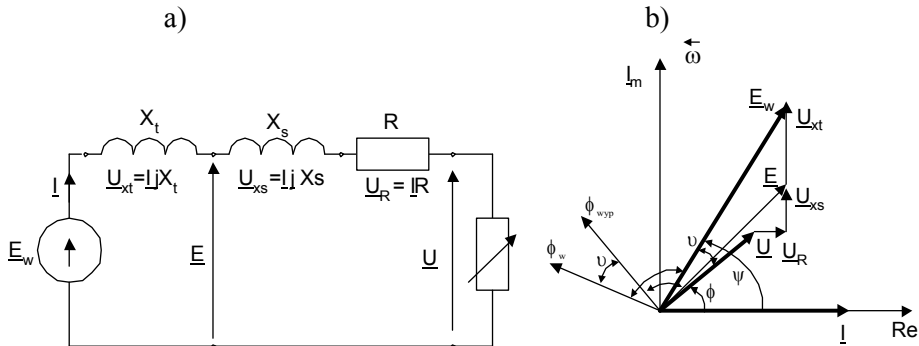


Rys. 4.5. Oddziaływanie twornika przy obciążeniu pojemnościowym [29]

Indukcja magnetyczna wywołana przepływem prądu twornika jest w fazie z indukcją magnetyczną wywołaną przepływem strumienia magnetycznego magnesów. Obie te indukcje są zgodne w fazie i dodają się tworząc zwiększoną indukcję magnetyczną wypadkową. Przy obciążeniu czysto pojemnościowym oddziaływanie twornika ma charakter podłużny domagnesowujący.

4.3. Schemat zastępczy prądnicy synchronicznej

Na rys. 4.3 przedstawiono schemat zastępczy prądnicy synchronicznej obciążonej rezystorem (obciążeniem czynnym). W prowadzonej poniżej analizie pominięto wpływ reaktancji twornika.



Rys. 4.6. Schemat zastępczy prądnicy synchronicznej, gdzie: a) – schemat zastępczy prądnicy synchronicznej, b) – wykres wektorowy prądu i napięć w prądnicie synchronicznej, gdzie: E_w – napięcie indukowane w uzwojeniu twornika przez strumień wzbudzenia prądnicy ϕ_w , X_t – reaktancja indukcyjna oddziaływania twornika, odpowiadająca strumieniowi ϕ_t , który indukuje w uzwojeniu twornika napięcie E_t , X_s – reaktancja rozproszenia twornika, odpowiadająca strumieniowi ϕ_s , który indukuje w uzwojeniu twornika napięcie E_s , R – rezystancja uzwojeń twornika maszyny

Reaktancja rozproszenia obwodu twornika X_s maszyny ma praktycznie stałą wartość (przy stałej częstotliwości napięcia), gdyż strumień magnetyczny zamyka się w maszynie przez powietrze. Reaktancja indukcyjna oddziaływania obwodu twornika X_t można uznać w maszynie cylindrycznej nienasyconej również jako stałą. Sumę tych reaktancji nazywana jest reaktancją synchroniczną X , którą opisuje zależność:

$$X = X_t + X_s. \quad (4.3)$$

Schematowi zastępczemu cylindrycznej nienasyconej maszyny synchronicznej (rys. 4.6a) odpowiada wykres wskazowy prądów i napięć prądnicy przedstawiony na rys. 4.6b. Wykres wykonano dla prądnicowej pracy maszyny przy obciążeniu o charakterze indukcyjnym. Dla takiego typu obciążenia prąd odbiornika opóźnia się względem wektora napięcia prądnicy o kąt φ . Przy

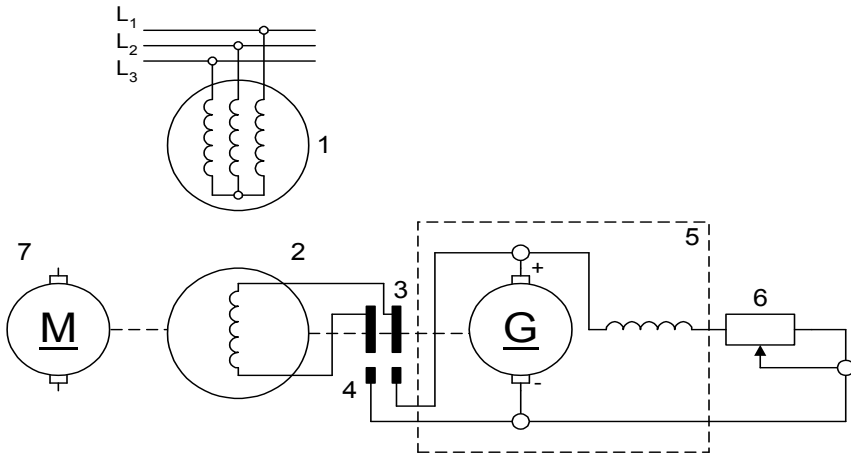
obciążeniu symetrycznym schemat zastępczy prądnicy oraz właściwy wykres wskazowy można wykonać tylko dla obwodu jednej fazy. Wykonując wykres wskazowy wykorzystano zasadę, że czynny spadek napięcia jest w fazie z prądem, a napięcie na reaktancji indukcyjnej wyprzedza wektor natężenia prądu o kąt $\pi/2$. Dodatkowo uwzględniono także związek zachodzący między wartościami symbolicznymi napięć prądnicy w postaci zależności:

$$\underline{U} = \underline{E}_w - \underline{E}_t - \underline{E}_s - \underline{U}_R. \quad (4.4)$$

Ze względu na charakter stanu obwodu obciążenia możliwe są następujące stany pracy prądnicy: dla stanu rozwarcia obwodu, praca na biegu jałowym prądnicy, stan zwarcia oraz stan normalnej pracy prądnicy.

4.4. Wytwarzanie prądu trójfazowego

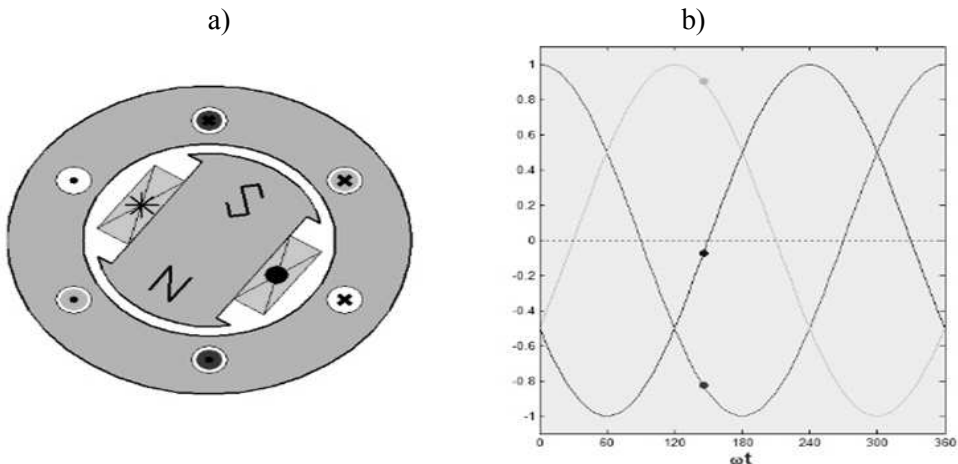
Maszyny synchroniczne budowane są jako urządzenia trójfazowe (rys. 4.7).



Rys. 4.7. Schemat maszyny synchronicznej trójfazowej z obwodem wzbudzenia zasilanym przez wzbudnicę-prądnicę prądu stałego, gdzie: 1 – twornik (stojan), 2 – obwód wzbudzenia (wirnik), 3 – pierścienie ślizgowe, 4 – szczotki, 5 – wzbudnica, 6 – regulator napięcia wzbudnicy, 7 – silnik napędowy prądnicy

Uzwojenie twornika umieszczone jest z reguły w stojanie, a uzwojenie wzbudzenia, zasilane prądem stałym przez pierścienie ślizgowe, w wirniku. Niekiedy spotyka się małe maszyny synchroniczne, w których role stojana i wirnika są zamienione, w tym przypadku uzwojenie wzbudzenia umieszcza się

w stojanie, a uzwojenie 3-fazowe w wirniku (rys. 4.7). Zamiana ról stojana i wirnika w niczym nie zmienia zasady działania maszyny, powodując jedynie różnice konstrukcyjne w sposobie wykonania. Większość prądnic pracujących dla potrzeb energetyki wysokich mocy napędzana jest turbinami parowymi z obrotami 3000 obr/min odpowiadającymi częstotliwości $f = 50$ Hz i liczbie par biegunów ($p = 1$). Z powodu dużych obrotów i związanych z tym dużych sił odśrodkowych średnice wirników turbogeneratorów są niewielkie (zwykle około 1 m). Wirnik taki ma kształt wydłużonego cylindra, w którego żłóbkach umieszczone jest odpowiednio ukształtowane uzwojenie. Oprócz turbin parowych, do napędu prądnic używa się również turbin wodnych pracujących przy znacznie mniejszych obrotach ($60 \div 600$ obr/min). Tak niskie obroty wymagają dla częstotliwości $f = 50$ Hz znacznej liczby par biegunów w konstrukcji prądnicy. Dlatego wirniki hydrogeneratorów (turbogeneratorów) posiadają bieguny wystające i średnicę do kilku metrów w zależności od mocy wytwarzanej energii. Uzwojenie wzbudzenia maszyn synchronicznych zasila się zwykle z prądnicy prądu stałego, zwanej wzbudnicą (rys. 4.8).



Rys. 4.8. Model prądnicy trójfazowej [39], gdzie: a) – schemat funkcjonalny prądnicy trójfazowej, b) – wykres prądów fazowych wytworzonych w prądnicy trójfazowej

Ta część maszyny synchronicznej, w której mieści się uzwojenie wzbudzenia nazywa się magneśnicą. Istota powstawania prądu trójfazowego jest zgodna z powstawaniem prądu jednofazowego, który przedstawiono w pracach [1, 3] (rys. 4.8b). W generatorach tych wykorzystuje się wirujące pole utworzone przez magnes stały (rys. 4.8a) lub urządzenia ze wzbudzeniem elektromagnetycznym nawiniętym na wirniku maszyny (magneśnicę). Stałe pole magnetycz-

ne wytworzone w wirniku maszyny przez uzwojenie zasilane prądem stałym wiruje z prędkością obrotową n wraz z wirnikiem indukując napięcie przemienne w nieruchomych uzwojeniach twornika (stojana) znajdujących się w żłobkach stojana. W prądnicach trójfazowych występują trzy skojarzone obwody jednofazowe będące uzwojeniami stojana, który jest twornikiem maszyny.

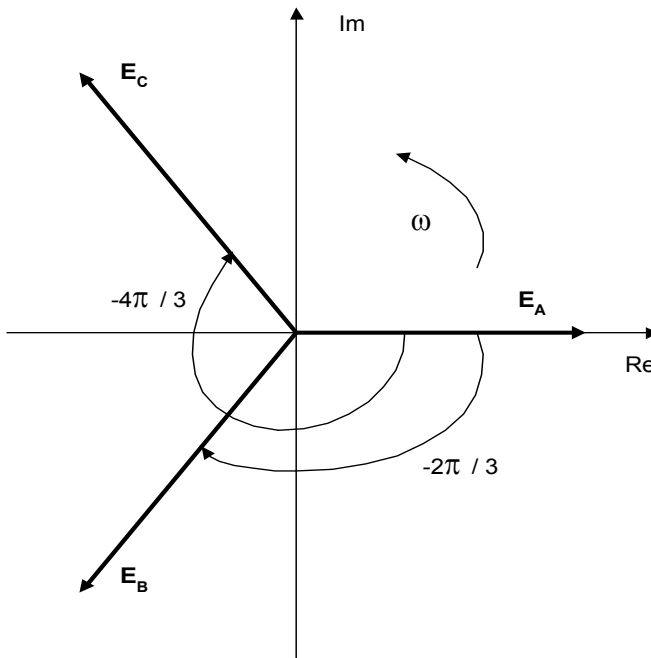
Twornik prądnicy w odróżnieniu od twornika prądnicy prądu stałego nie wiruje, lecz jest częścią nieruchomą – korpusu maszyny (rys. 4.8a). Doprowadzony prąd stały do cewki magnesu powoduje powstanie w niej pola magnetycznego (patrz rozdz. 1). Wiązka strumienia magnetycznego zamyka się w obwodzie: wałek wirnika, rdzenie biegunowe, szczelina powietrzna. Ponadto ulega on rozdzieleniu na strumień główny Φ i strumienie rozproszenia Φ_r (rys. 4.8a). Bieguny wirnika zmieniają promieniowy kierunek głównego strumienia magnetycznego Φ na osiowy. Oznacza to, że linie pola magnetycznego przebiegają wzdłuż osi wirnika. Maszyny synchroniczne o tego typu biegunach są nazywane osiowymi. Obracający się wirnik powoduje, że powstałe pole magnetyczne również wiruje, które z kolei indukuje się elektromotoryczną SEM w trójfazowym uzwojeniu twornika (rys. 4.9). Przebieg powstałego napięcia jest zbliżony kształtem do sinusoidy (rys. 4.8b). W praktyce kształt wypracowanego napięcia jest kształtowany w przekształtnikach falownikowych, urządzenia te są powszechnie stosowane w elektrowniach wiatrowych.

Zgodnie z zasadą powstawania prądu sinusoidalnego jednofazowego SEM indukowana w ramce wirującej (rys. 4.9) jest opisana zależnością:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = \omega\phi_m \sin \omega t = E_m \sin(\omega t + \varphi_0) = \underline{E} = Ee^{j\varphi_0}. \quad (4.5)$$

Jeżeli za wektor odniesienia przyjęty będzie wektor amplitudy SEM_A fazy A , to indukowane w poszczególnych fazach generatora (rys. 4.9) można przedstawić wzorami:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\omega t + \psi), & \underline{E}_A &= Ee^{j\psi}, \\ e_B &= E_m \sin\left(\omega t + \psi - \frac{2\pi}{3}\right), & \underline{E}_B &= Ee^{j\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right)}, \\ e_C &= E_m \sin\left(\omega t + \psi + \frac{2\pi}{3}\right), & \underline{E}_C &= Ee^{j\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right)}. \end{aligned} \quad (4.6)$$



Rys. 4.9. Wykres wektorowy napięć fazowych generatora prądu trójfazowego

Wartość skuteczna siły elektromotorycznej (rys. 4.9) w każdej fazie stojana wynosi:

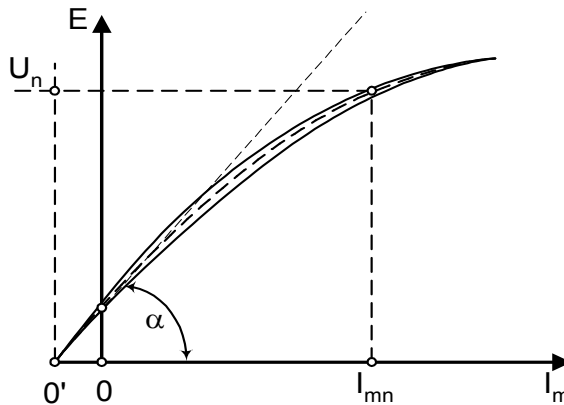
$$E = 4,44k_z f z_f \phi_m, \quad (4.7)$$

gdzie: k_z – współczynnik charakteryzujący własności konstrukcyjne maszyny, z_f – liczba zwojów jednej fazy twornika, f – częstotliwość, ϕ_m – wartość maksymalna strumienia w woltosekundach

4.4.1. Praca prądnicy synchronicznej na biegu jałowym

Podstawową charakterystyką prądnicy synchronicznej jako źródła energii elektrycznej prądu przemiennego dla stanu rozwarcia (bez obciążenia) prądnicy jest charakterystyka biegu jałowego. Jest to charakterystyka siły elektromotorycznej E indukowanej w prądnicę w funkcji prądu magnesującego I_m dla stałej prędkości obrotowej prądnicy, charakterystykę tę przedstawiono na rys. 4.10. Napięcie U na zaciskach prądnicy przy biegu jałowym jest równe napięciu E indukowanemu w uzwojeniu twornika prądnicy. Charakte-

rystyka biegu jałowego jest odzwierciedleniem przebiegu ($\Phi = f(I_m)$), gdyż zgodnie ze wzorem (4.4) przy stałej prędkości obrotowej indukowane napięcie jest proporcjonalne do zmian strumienia Φ . Dla ($I_m = 0$) w obwodzie magnetycznym prądnicy istnieje pewna wartość strumienia szczątkowego Φ_r , który indukuje w uzwojeniach twornika prądnicy napięcie szczątkowe E_r . Przy nienasyconym obwodzie magnetycznym ze wzrostem prądu wzbudzenia rośnie proporcjonalnie wartość indukowanego napięcia w uzwojeniach prądnicy. W miarę jak obwód magnetyczny prądnicy zaczyna się nasycać dalszy wzrost prądu wzbudzenia powoduje coraz to wolniejszy przyrost napięcia i przebieg charakterystyki ($E = f(I_m)$) ma kształt zbliżony do krzywej magnesowania.



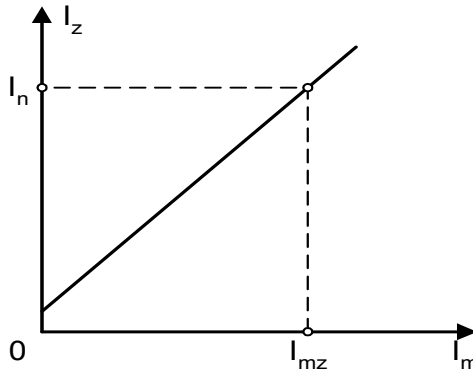
Rys. 4.10. Charakterystyka biegu jałowego prądnicy synchronicznej

4.4.2. Praca prądnicy synchronicznej w stanie zwarcia i obciążenia

Stan zwarcia prądnicy synchronicznej jest często stanem pracy wymuszonym. Najczęściej taki stan pracy ma miejsce w czasie dokonywania pomiarów i sprawdzeń. Zwarcie pomiarowym prądnicy nazywamy taki stan pracy maszyny synchronicznej, kiedy zaciski twornika są zwarte (bez obciążenia), a w uzwojeniu twornika płynie prąd znamionowy. Podczas zwarcia indukowana siła elektromotoryczna E równoważy tylko spadki napięć w uzwojeniu twornika a napięcie na zaciskach twornika jest równe zero. Rezystancja uzwojenia twornika jest mała w porównaniu z reaktancją i może być pomijana. Prądnica pracuje tylko na czysto indukcyjny opór wewnętrzny. Zachodzi tu więc rozmagnesowujące podłużne oddziaływanie twornika. Charakterystykę prądnicy opisującą stan zwarcia prądnicy przedstawiono na rys. 4.11. Charakterystyka ($I_z = f(I_m)$) przedstawiona na rys. 4.11 jest linią prostą, gdyż

siła elektromotoryczna E indukowana przy zwarciu pomiarowym jest niewielka. Mały jest również prąd magnesujący I_m ją wywołujący stąd praca maszyny odbywa się na prostoliniowej części charakterystyki magnesowania.

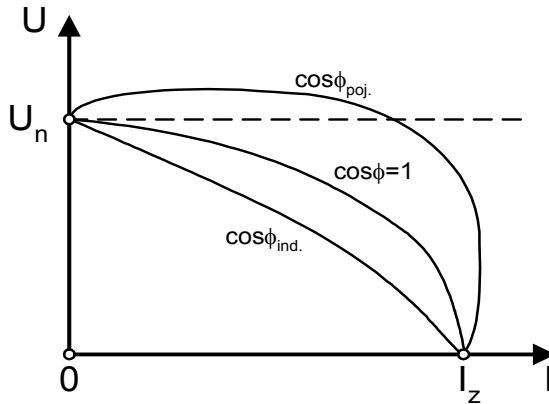
Podstawową charakterystyką prądnicy synchronicznej jako źródła energii elektrycznej prądu przemiennego jest charakterystyka zewnętrzna prądnicy przedstawiona zależnością ($U = f(I_m)$). Zależność ta przedstawia wielkość napięcia wyjściowego w funkcji prądu pobieranego przez odbiorniki przy stałej prędkości obrotowej n oraz przy stałym prądzie wzbudzenia I_w i stałym współczynniku mocy ($\cos\varphi$).



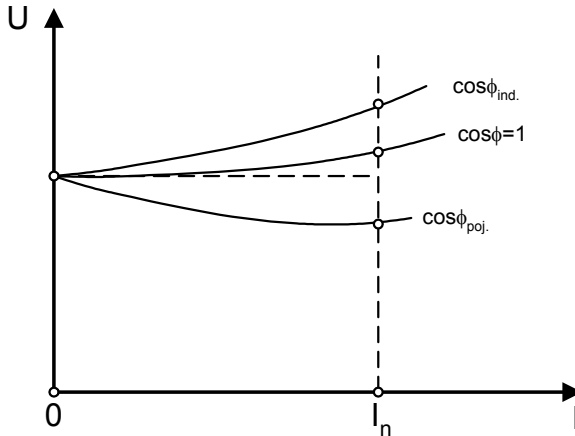
Rys. 4.11. Charakterystyka zwarcia prądnicy synchronicznej

Przebieg napięcia wyjściowego generatora zależy nie tylko od wartości prądu obciążenia, ale także i od charakteru impedancji odbiornika, a dokładniej od wartości współczynnika mocy ($\cos\varphi$). Przykładowe przebiegi charakterystyk zewnętrznych prądnicy synchronicznej dla obciążenia rezystancyjnego ($\cos\varphi = 1$), indukcyjnym ($\cos\varphi < 1_{ind.}$) oraz o charakterze pojemnościowym ($\cos\varphi > 1_{poj.}$) przy stałym prądzie wzbudzenia i stałej prędkości obrotowej prądnicy przedstawiono na rys. 4.12 i 4.13. Przy braku obciążenia (stan rozwarcia) oraz przy stałej prędkości obrotowej prądnicy wartość napięcia indukowanego w prądnicie zależy od prądu wzbudzenia. Wartość tego prądu ustala się dla wybranego (ustalonego) punktu pracy prądnicy. Znamionowy punkt pracy prądnicy określa się regulując prąd wzbudzenia (przy stałej prędkości obrotowej prądnicy) w taki sposób, aby przy znamionowym prądzie obciążenia na zaciskach prądnicy było znamionowe napięcie. Napięcie prądnicy przy obciążeniu czynnym przedstawiane jest w postaci symbolicznej jako zależność:

$$\underline{U} = \underline{E} - \underline{I} \cdot \underline{Z} . \quad (4.8)$$



Rys. 4.12. Charakterystyki zewnętrzne prądnicy synchronicznej



Rys. 4.13. Charakterystyki regulacyjne prądnicy synchronicznej

Przy obciążeniu czynnym prąd jest w fazie z napięciem ($\cos\phi = 1$) i wraz ze wzrostem prądu obciążenia przy stałym napięciu indukowanym E , napięcie U na zaciskach prądnicy maleje (rys. 4.12). Sytuacja powyższa spowodowana jest spadkiem napięcia na impedancji \underline{Z} uzwojenia twornika.

Dla obciążenia o charakterze indukcyjnym napięcie na zaciskach prądnicy przy tym samym prądzie co dla obciążenia rezystancyjnego ma mniejszą wartość. Jest to spowodowane oddziaływaniem twornika. Dla tego charakteru obciążenia jakim jest charakter indukcyjny wektor natężenia prądu opóźnia się w fazie względem wektora napięcia i jego składowa bierna wynosi ($I\sin\psi$) w efekcie tego powstaje przepływ rozmagnesowujący pokazany na rys. 4.9b, gdzie: ψ – jest kątem między wskazem napięcia \underline{E}_w i wskazem prądu \underline{I} . Po-

woduje to zmniejszenie wypadkowego strumienia magnetycznego w prądnicy i zgodnie ze wzorem (4.5 i 4.6) występuje także zmniejszenie wartości napięcia indukowanego, od którego zależy napięcie na zaciskach prądnicy. Na skutek reakcji (oddziaływania) twornika, chcąc utworzyć na zaciskach prądnicy stałe napięcie przy wzroście obciążenia, musimy przy obciążeniu indukcyjnym i czynnym zwiększać prąd magnesujący, a przy obciążeniu pojemnościowym zmniejszać.

Przy obciążeniu o charakterze pojemnościowym wartość napięcia wyjściowego prądnicy jest większa od wartości napięcia przy obciążeniu rezystancyjnym przy tym samym prądzie, gdyż składowa bierna prądu ($I \sin \psi$) daje przepływ zwiększający strumień wypadkowy w obwodzie magnetycznym prądnicy (rys. 4.9b). Wzrost strumienia powoduje wzrost napięcia indukowanego przy tej samej prędkości obrotowej, a także wzrost napięcia wyjściowego na zaciskach prądnicy.

Wykorzystując wartości skuteczne moc elektryczna trójfazowej prądnicy jest przedstawiana zależnością:

$$P = 3UI \cos \varphi. \quad (4.9)$$

Jeżeli wykorzystana będzie wielkość SEM prądnicy przedstawiona w postaci zależność (4.9) to zależność opisująca współczynnik mocy będzie mieć postać:

$$\cos \varphi = \frac{E \sin \beta}{IX}, \quad (4.10)$$

gdzie: E – wielkość SEM indukowanej w prądnicy, β – kąt zawarty między osią biegunów magnesnicy, a osią wirującego pola magnetycznego wytworzonego przez prąd oddawany przez prądnicę do odbiorników, I – natężenie prądu w obwodzie obciążenia prądnicy, X – reaktancja obwodu twornika prądnicy.

Podstawiając wzór (4.9) do zależności (4.10) otrzymana będzie przybliżona zależność na moc elektryczną prądnicy synchronicznej trójfazowej:

$$P = 3U \frac{E \sin \beta}{X}. \quad (4.11)$$

Zależność między mocą elektryczną i momentem w ruchu obrotowym prądnicy synchronicznej określa zależność:

$$P = M\omega , \quad (4.12)$$

gdzie: $\omega = 2\pi n/60$ – jest prędkością kątową wirującej maszyny, n – prędkość obrotowa magnesu.

Wykorzystując zależności (4.11 i 4.12) oraz uwzględniając, że $f = pn/60$ stąd wzór na moment obrotowy maszyny przyjmie postać:

$$M = \frac{3pUE}{2\pi fX} \sin \beta . \quad (4.13)$$

Przy stałym natężeniu prądu wzbudzenia i stałym napięciu sieci moment obrotowy jest funkcją tylko jednej zmiennej:

$$M = M_m \sin \beta , \quad (4.14)$$

gdzie: M_m – jest maksymalną wartością momentu.

Moment maszyny wyrażany zależnością (4.14) w przypadku pracy prądnicowej jest momentem hamującym, a w przypadku pracy silnikowej maszyny jest momentem napędowym.

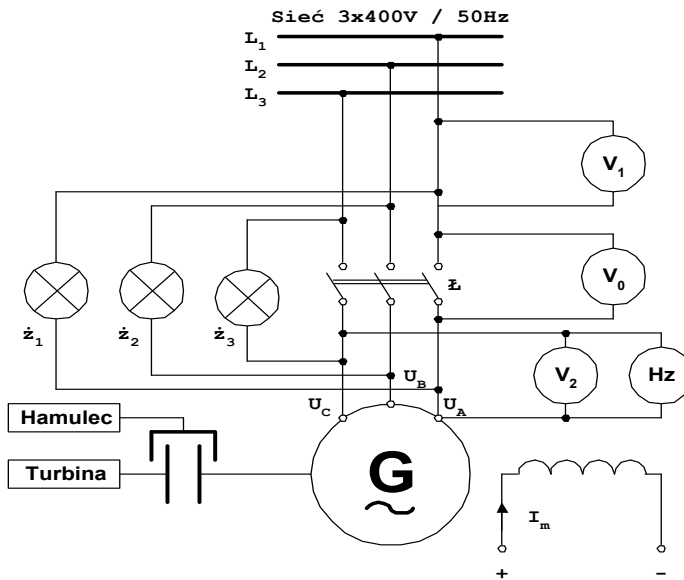
4.5. Synchronizacja prądnicy synchronicznej z siecią sztywną

Prądnice synchroniczne rzadko pracują indywidualnie bez połączenia z siecią energetyczną. W większości przypadków prądnice synchroniczne współpracują z system energetycznym kraju. Proces uruchamiania zespołów prądowców (generatorów synchronicznych) i ich włączania (synchronizacji) z siecią systemu energetycznego państwa należy do trudnych przedsięwzięć energetycznych. Bezpieczne przyłączenie prądnicy synchronicznej do pracy równoległej z siecią, na której pracują inne generatory, polega na zrównaniu parametrów wytwarzanej energii do parametrów sieci transmisyjnej (rys. 4.14). Będzie to miało miejsce wtedy, gdy chwilowe wartości napięć między zaciskami prądnicy i odpowiednimi zaciskami sieci będą takie same (przy tych samych częstotliwościach napięć). W chwili przyłączania między prądnicą a siecią na popłyną prądy wyrównawcze. Duże prądy wyrównawcze są szkodliwe zarówno dla prądnicy jak i dla sieci. W przypadku nadmiernych prądów towarzyszą im oddziaływania elektrodynamiczne, które prowadzą do deformacji uzwojeń i powstawa-

nia dodatkowych momentów obrotowych zakłócających ustaloną równomierną pracę maszyny. Duże prądy wyrównawcze są szkodliwe również dla sieci ze względu na nagłe zmiany napięcia.

Wszystkie stosowane w praktyce sposoby przyłączania prądnicy do synchronizacji w układzie równoległym podzielić można na dwie grupy:

- synchronizację,
- samosynchronizację.



Rys. 4.14. Układ do synchronizacji prądnicy z siecią z wykorzystaniem sposobu żarówek

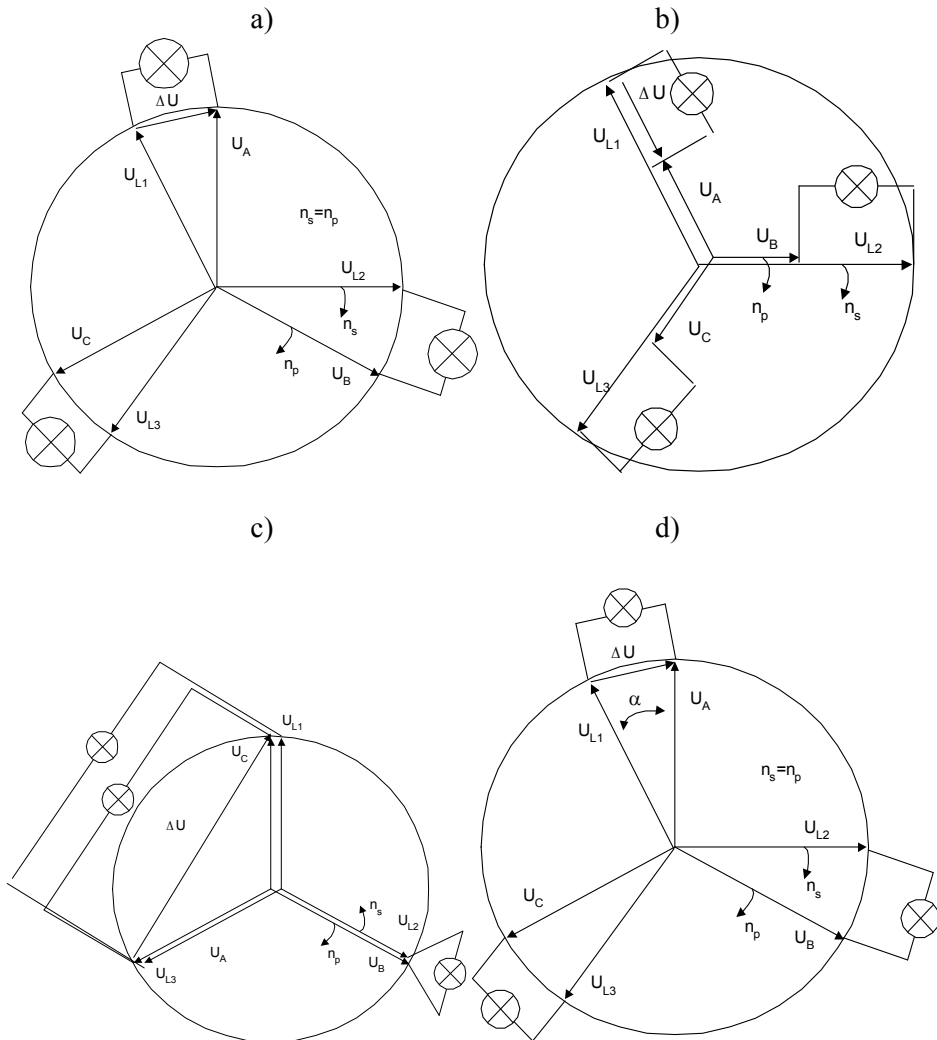
Synchronizacja prądnicy polega na przyłączeniu do sieci maszyny wzbudzonej doprowadzonej do stanu bliskiemu synchronizmowi (rys. 4.14). Przy samosynchronizacji przyłączenie twornika maszyny do sieci następuje w stanie niewzbudzonym i przy prędkości wirnika zbliżonej jedynie do prędkości synchronicznej. Generator wzbudza się niezwłocznie po przyłączeniu twornika do sieci. W praktyce najczęściej mamy do czynienia synchronizacją prądnicy z siecią sztywną. Pomija się przy tym parametry sieci (sieci się nie synchronizuje) zakłada się, że sieć jest sztywna tzn., że ma parametry nominalne. Schematy przedstawiające synchronizację prądnicy z siecią sztywną zaprezentowano na rys. 4.14 i 4.15. Bezpieczne przyłączenie prądnicy do pracy równoległej z siecią będzie miało miejsce wtedy, gdy spełnione będą następujące warunki:

1. Równość częstotliwości napięć prądnicy i sieci.
2. Równość wartości skutecznych napięć prądnicy i napięć sieci.
3. Jednakowe następstwo faz (zgodne kierunki wirowania gwiazdy napięć prądnicy i napięć sieci).
4. Zgodność faz napięć prądnicy i sieci.
5. Jednakowy kształt krzywej napięcia prądnicy.

Nie spełnienie któregokolwiek z tych pięciu warunków powoduje powstanie różnicy napięć między prądnicą a siecią prowadzi do wystąpienia dużych prądów wyrównawczych niebezpiecznych zarówno dla prądnicy oraz sieci (rys. 4.15). W przypadku generatorów małej mocy oraz urządzeń służących dla celów poznawczych (laboratoryjnych) synchronizację można przeprowadzać sposobem klasycznym z wykorzystaniem układu żarówek. Natomiast praktycznie w warunkach dużych elektrowni do tego celu wykorzystywane są specjalne układy ułatwiające synchronizację generatora z siecią. Synchronizację rozpoczyna się od rozpędzenia prądnicy do prędkości bliskiej prędkości znamionowej – synchronicznej. W tym celu jest wykorzystywany silnik lub układ napędowy prądnicy tak, aby częstotliwość napięcia generowanego w prądnicie była w przybliżeniu równa częstotliwości sieci. W ten sposób zrealizowany jest pierwszy punkt synchronizacji. Przy różnych częstotliwościach gwiazdy napięć prądnicy i sieci, które wirują z różnymi prędkościami ($n_s = n_p$) dając zmieniającą się w czasie różnicę napięć między odpowiadającymi sobie wzajemnie fazami prądnicy i sieci. Sytuacja powyższa jest przedstawiona na rys. 4.15a.

Wartość skuteczna napięcia przy stałej prędkości obrotowej zależność (4.4) zależy od strumienia magnetycznego. Dlatego zmieniając natężenie prądu stałego w układzie wzbudzenia magneśnicy reguluje się tym samym wartość strumienia magnetycznego tak, aby wartość skuteczna napięcia prądnicy zrównać z wartością skuteczną napięcia sieci spełniając w ten sposób drugi warunek synchronizacji prądnicy. Niezrealizowanie tego warunku skutkuje powstaniem różnicy napięć AU między prądnicą a siecią. Sytuację powyższą przedstawiono na rys. 4.15b.

Ważnym warunkiem synchronizacji prądnicy z siecią jest sprawdzenie jednakowego następstwa faz prądnicy i sieci. Warunek ten może być sprawdzany (rys. 4.15c) przy pomocy żarówek połączonych w układzie na ciemno. Jednoczesne zapalenie się i gaśnięcie żarówek świadczy o właściwym następstwie faz (spełnienie warunku trzeciego synchronizacji prądnicy). W przypadku, jeżeli żarówki będą zapalały się i gasły wywołując wrażenie wirowania światła oznacza to, że następstwo faz jest nieprawidłowe i powstaje wówczas różnica napięć między prądnicą a siecią. Przy niewłaściwym następstwie faz gwiazdy napięć prądnicy i sieci wirują w przeciwnych kierunkach. Różnica napięć między prądnicą a siecią będzie więc zmieniała się osiągając największą wartość w sytuacji przedstawionej na rys. 4.15c.



Rys. 4.15. Schemat przedstawiający synchronizację prądnicy z siecią sztywną, gdzie: a) – sprawdzenie różnicy napięć między odpowiadającymi sobie wzajemnie fazami prądnicy i siecią, b) – sprawdzenie różnicy napięć ΔU między prądnicą i siecią, c) – sprawdzenie jednakowego następowania faz prądnicy i siecią, d) – sprawdzenie różnica zależna od kąta α między gwiazdami napięć prądnicy i siecią

Właściwe następowanie faz można wtedy uzyskać poprzez zamianę między sobą dwóch dowolnych przewodów (faz) na zaciskach prądnicy.

Przy niezgodności faz (warunek czwarty synchronizacji prądnicy) wystąpi również różnica zależna od kąta α między gwiazdami napięć prądnicy i sieci. Zjawisko powstawania tej różnicy jest przedstawione na rys. 4.15d. Zrealizowanie w pełni warunku zgodności faz jest w praktyce bardzo trudne do wykonania. Po spełnieniu warunków synchronizacji (1 – 3) należy w dalszym etapie regulować prędkość obrotową prądnicy tak, aby doprowadzić do sytuacji, w której dochodzi do bardzo wolnego zapalania się i gaszenia żarówek. W czasie regulacji prędkości obrotowej prądnicy, gdy żarówki zgasną a wskazówka woltomierza zerowego V_o zbliży się do zera jest to warunkiem uzyskania zgodności faz napięcia prądnicy i sieci. Spełnienie wszystkich warunków synchronizacji prądnicy jest warunkiem jej bezpiecznego przyłączenia do sieci.

4.6. Pytania kontrolne

1. Podać zasadę działania prądnicy synchronicznej.
2. Opisać budowę prądnic synchronicznych.
3. Wyjaśnić zjawisko oddziaływania twornika.
4. Narysować i omówić charakterystykę biegu jałowego prądnicy synchronicznej.
5. Narysować i omówić charakterystykę zwarcia prądnicy synchronicznej.
6. Narysować i omówić charakterystyki zewnętrzne prądnicy synchronicznej.
7. Narysować i omówić charakterystyki regulacyjne prądnicy synchronicznej.

4.7. Ćwiczenie laboratoryjne

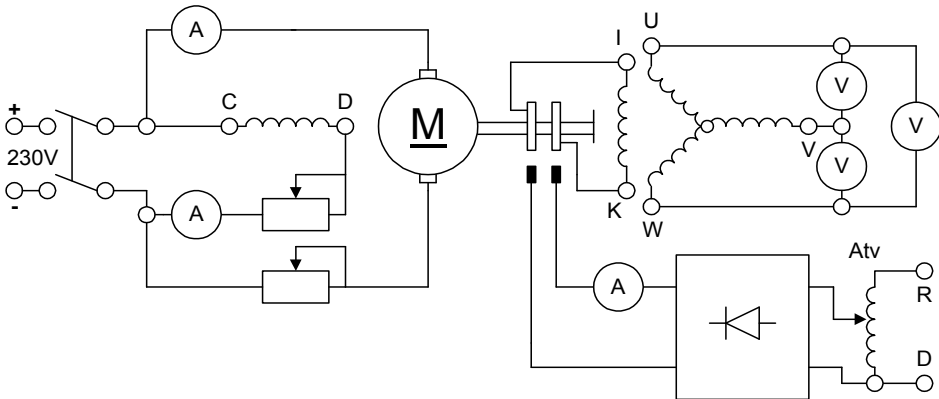
4.7.1. Próba biegu jałowego prądnicy synchronicznej

Podczas biegu jałowego wyznaczamy charakterystykę ($E = f(I_m)$) dla ($I = \max$ i $n = n_n = \text{const}$). Pomiary wykonuje się przy wykorzystaniu zespołu maszyn elektrycznych połączonych wg schemat przedstawionego na rys. 4.16.

1. Prąd wzbudzenia prądnicy regulujemy od zera do wartości przy której napięcie na zaciskach $U = 1,1U_n$ oraz z powrotem do zera.
2. Wyniki pomiarów zapisujemy w tabelicy 4.2.
3. Na podstawie wyników pomiarowych zawartych w tabelicy 4.2 wykreślić należy charakterystykę biegu jałowego.

Tab. 4.2. Wyniki pomiarowe

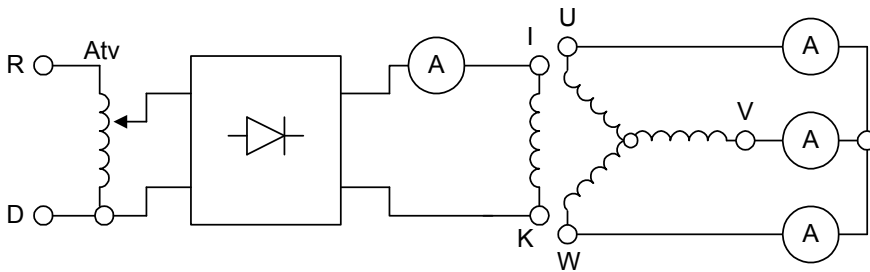
| Lp. | n | I_m | E_{12} | E_{23} | E_{31} | E_0 |
|-----|---------|-------|----------|----------|----------|-------|
| | obr/min | A | V | V | V | V |
| | | | | | | |



Rys. 4.16. Układ pomiarowy maszyn do badania próby biegu, gdzie: K-I – uzwojenie magnetyczny, U-W – trójfazowe uzwojenie twornika (stojana)

4.7.2. Próba zwarcia prądnicy synchronicznej

Schemat pomiarowy prądnicy synchronicznej do badania próby zwarcia przedstawiono na rys. 4.17.



Rys. 4.17. Układ pomiarowy maszyn do badania próby zwarcia, gdzie: K-I – uzwojenie wzbudzenia magnetyczny, U-W – trójfazowe uzwojenie twornika (stojana)

Badanie prądnicy należy wykonać w następujący sposób:

1. Do przeprowadzenia pomiarów należy układ pomiarowy połączyć tak jak na schemacie (rys. 4.17).
2. Do pomiarów wybiera się (ustawia się) taką wartość prądu magne-

sującego w uzwojeniu wzbudzenia prądnicy, przy którym uzyskuje się napięcie znamionowe prądnicy.

3. Pomiary wykonuje poprzez zmianę prędkości obrotowej prądnicy.
4. Uzyskane wyniki pomiarowe wpisuje się do tablicy 4.3.

Tab. 4.3. Wyniki pomiarowe

| Lp. | n | I_m | I_1 | I_2 | I_3 | I_z |
|-----|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | obr/min | A | A | A | A | A |
| | | | | | | |

gdzie: $I_z = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$ – średnia wartość prądu zwarcia wyznaczona w trzech fazach generatora.

5. Obliczyć średnią wartość prądu zwarcia w trzech fazach generatora wyniki wpisać do tablicy 4.3.
6. Na podstawie wyników pomiarowych należy wykreślić charakterystykę zwarcia ($I_z = f(I_m)$) dla $n = n_n = \text{const.}$

4.7.3. Wyznaczenie charakterystyk zewnętrznych prądnicy synchronicznej

Charakterystyka zewnętrzna jest to zależność napięcia prądnicy od obciążenia $U = f(I)$ dla $I_m = \text{const.}$, $f = \text{const.}$, $\cos\varphi = \text{const.}$

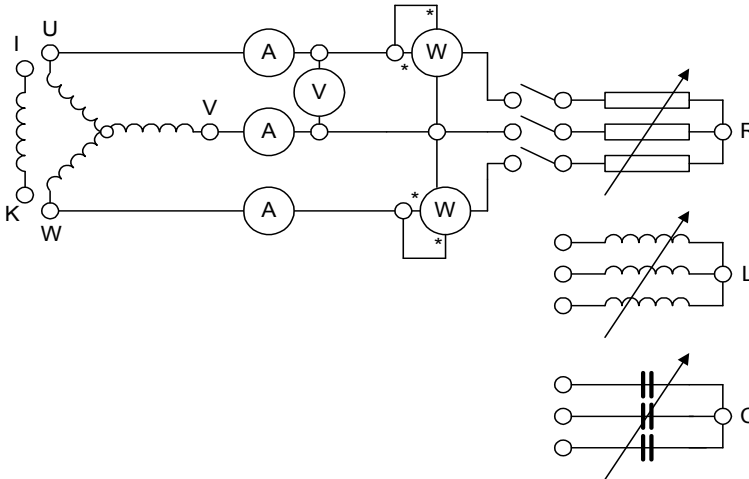
1. Pomiary wykonuje się w układzie pomiarowym połączonym jak na rys. 4.18.
2. Pomiary przeprowadzać kolejno dla obciążania czynnego, indukcyjnego i pojemnościowego.
3. Pomiary wykonuje się poprzez zmianę kilku wartości impedancji obciążenia odpowiednio dla obciążania czynnego, indukcyjnego i pojemnościowego.
4. Uzyskane wartości mocy, napięć oraz prądów w jednej fazie odbiornika wpisuje się do tablicy 4.4.

Tab. 4.4. Wyniki pomiarowe

| obc. czynne | | | obc. indukcyjne | | | obc. pojemnościowe | | |
|-------------|---|---------------|-----------------|---|---------------|--------------------|---|---------------|
| U | I | $\cos\varphi$ | U | I | $\cos\varphi$ | U | I | $\cos\varphi$ |
| V | A | - | V | A | - | V | A | - |

5. Współczynnik mocy $\cos\varphi$ obliczamy na podstawie wychyleń watomierzy w układzie Arona (tablicy 4.1).
6. Dla obciążenia indukcyjnego i pojemnościowego widać wyraźnie rozmagnesowujące i domagnesowujące oddziaływanie twornika.

7. Na podstawie pomiarów wykreślamy charakterystyki zewnętrzne ($U = f(I)$) prądnicy.



Rys. 4.18. Układ pomiarowy maszyn do badania charakterystyk zewnętrznych, gdzie: K-L – uzwojenie wzbudzenia magnesnicy, U-W-V – trójfazowe uzwojenie twornika (stojana)

4.7.4. Wyznaczenie charakterystyk regulacyjnych prądnicy synchronicznej

Charakterystyka regulacyjna jest to zależność ($I_m = f(I)$) dla ($U = \text{const}$, $f = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$).

1. Do pomiarów układ pomiarowy łączymy wg schematu przedstawionego na rys. 4.18.
2. Pomiary przeprowadzamy dla obciążenia czynnego, indukcyjnego i pojemnościowego.
3. Podczas zmian obciążenia regulujemy prąd magnesujący prądnicy, tak aby napięcie było zawsze równe znamionowemu ($U = U_n$).
4. Wyniki pomiarów zapisujemy w tablicy 4.5

Tab. 4.5. Wyniki pomiarowe

| obc. czynne | | | obc. indukcyjne | | | obc. pojemnościowe | | |
|-------------|-------|---------------|-----------------|-------|---------------|--------------------|-------|---------------|
| I | I_m | $\cos\varphi$ | I | I_m | $\cos\varphi$ | I | I_m | $\cos\varphi$ |
| A | A | - | A | A | - | A | A | - |

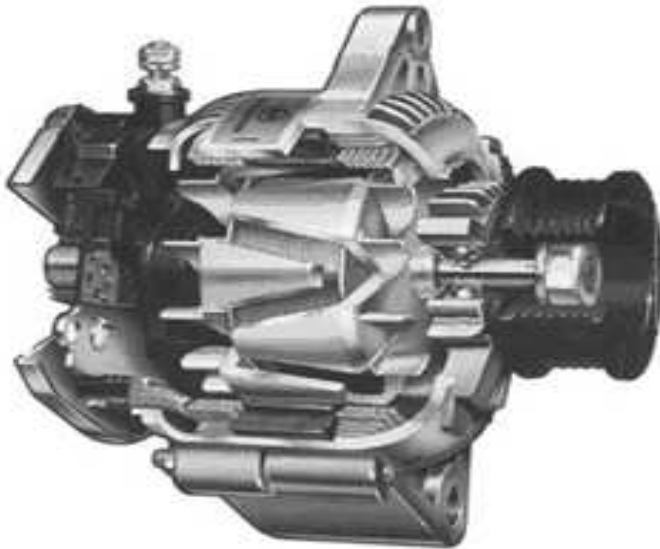
5. Na podstawie wyników pomiarowych wykreślić charakterystyki regulacyjne prądnicy ($I_m = f(I)$).
6. Opracować wnioski.

5. Badanie alternatora

Treścią niniejszego rozdziału jest omówienie zasad działania, parametrów, właściwości i charakterystyk alternatorów samochodowych.

5.1. Budowa i zasada działania alternatora

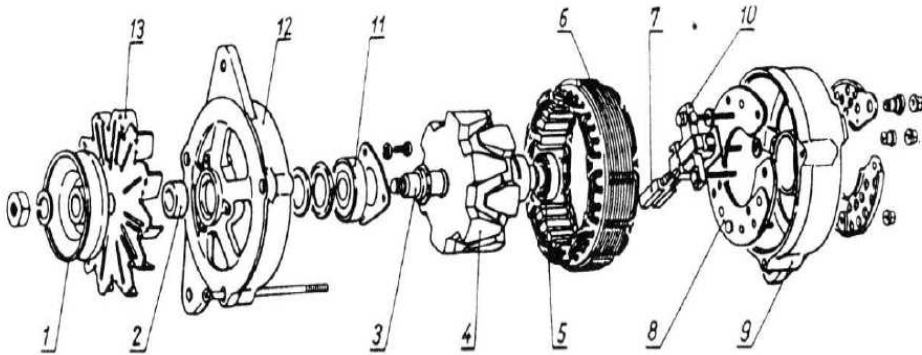
Prądnice prądu przemiennego stosowane w pojazdach samochodowych, różnią się od trójfazowych prądnic synchronicznych budową wirnika. Na rys. 5.1 pokazano budowę samochodowej prądnicy prądu przemiennego. W większości prądnic samochodowych mocy stosuje się wzbudzenie elektromagnetyczne, które jest nawinięte na wirniku o biegunach pazurowych. Wirnik składa się z dwóch tarcz biegunowych z zagiętymi ramionami. Tarcze te są osadzone na wale, a ich ramiona zachodzą między siebie. Uzwojenie wzbudzenia jest wykonane w postaci cylindrycznej cewki umieszczonej pomiędzy dwoma tarczami. Zasilanie uzwojenia wzbudzenia jest doprowadzone przez szczotki umieszczone w stojanie oraz wirujące pierścienie ślizgowe. Strumień magnetyczny wytworzony przez to uzwojenie zamyka się w obwodzie: rdzeń wirnika, tarcze z wygiętymi ramionami (bieguny pazurowe), szczelina powietrzna (rys. 5.2) [4-6, 11, 28-32, 38].



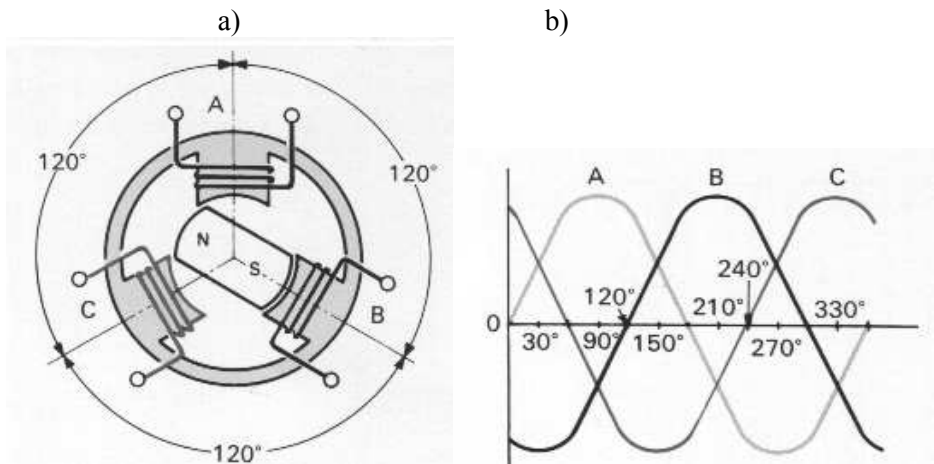
Rys. 5.1. Przekrój samochodowej prądnicy prądu przemiennego [39]

Na rys. 5.2 pokazano budowę alternatora, w którym wykorzystano wirnika z biegunami pazurowymi (kłowymi). Stojan samochodowej prądnicy prądu

przemienneego jest zbudowany tak samo jak stojan trójfazowych maszyn indukcyjnych. Zasadę pracy alternatora zaprezentowano na rys. 5.3.



Rys. 5.2. Budowa alternatora [14], gdzie: 1 – koło pasowe, 2,3 – tuleje dystansowe, 4 – wirnik, 5 – łożysko, 6 – stojan, 7 – szczotka, 8 – płytki prostownicza, 9 – obudowa tylna, 10 – szczotkotrzymacz, 11 – łożysko, 12 – obudowa przednia, 13 – wentylator

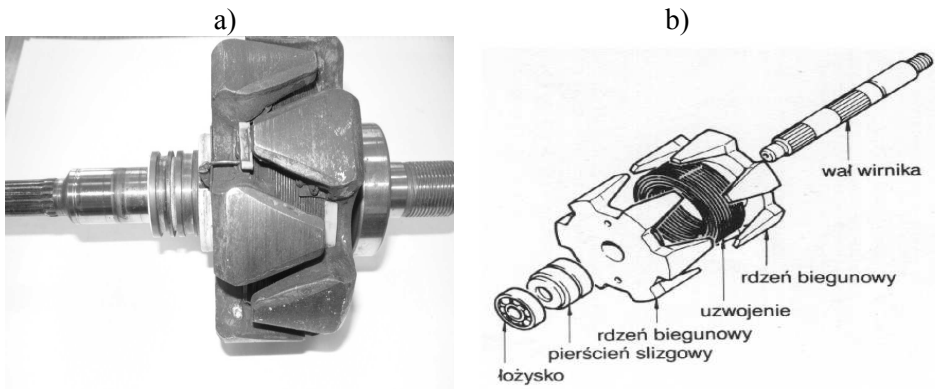


Rys. 5.3. Model prądnicy prądu przemiennego [5], gdzie: a) – schemat funkcjonalny prądnicy prądu przemiennego, b) – wytworzony prąd trójfazowy przez alternator (prądnicę prądu przemiennego)

Wytwarzana siła elektromotoryczna *SEM* w uzwojeniu stojana nie musi być dokładnie sinusoidalna, ponieważ napięcie wyjściowe jest prostowane w układzie prostownika upraszcza to konstrukcję prądnicy. Trójfazowe uzwojenie twornika jest połączone w mniejszych maszynach często w gwiazdę, a w więk-

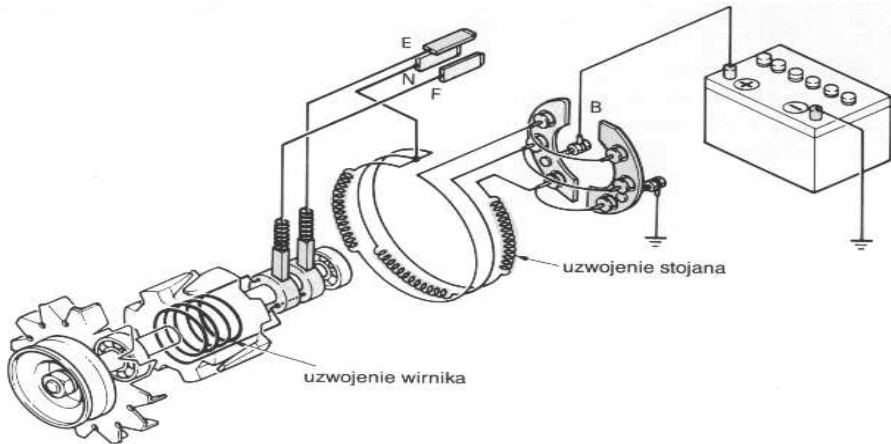
szych w trójkąt. Podstawowy układ prostownikowy składa się sześciu diod w układzie mostka, przy czym trzy diody jednej połówki mostka są połączone ze wspólnym radiatorem i zaciskiem dodatnim, a trzy diody drugiej połówki mostka z drugim radiatorem i zaciskiem ujemnym (rys. 5.2). Zwykle jeden z radiatorów połączony jest z obudową i masą prądnicy. Diody prostownicze oraz uzwojenia chłodzone są przepływającym przez prądnicę strumieniem powietrza, wytworzonym przez wentylator umieszczony na wale i napędzany kołem pasowym. Samochodowa prądnica prądu przemiennego (alternator) jest trójfazową prądnicą synchroniczną (rys. 5.2), w której wirnik jest magneśnicą, a stojan twornikiem.

W alternatorach stosuje się wzbudzenie elektromagnetyczne, przy czym uzwojenie magnesujące jest nawinięte na wirniku. Wirnik ma od kilku do kilkunastu biegunów, wykonanych w układzie pazurowym (rys. 5.4).



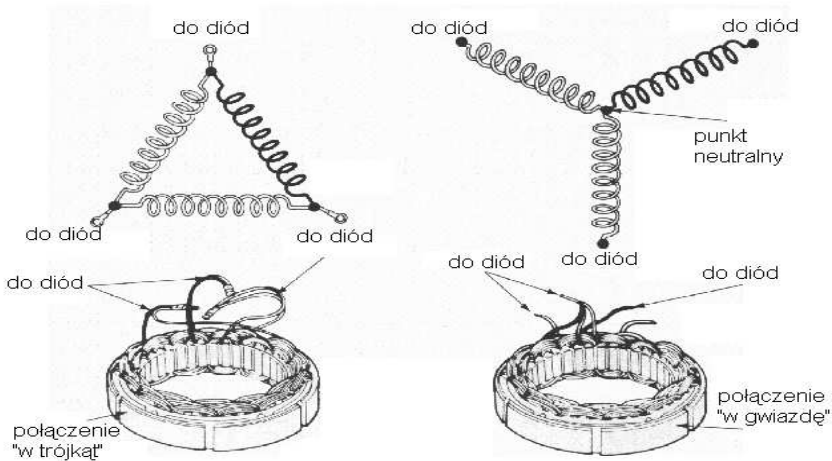
Rys. 5.4. Budowa wirnika alternatora [5], gdzie: a) – zdjęcie wirnika alternatora, b) – budowa wirnika alternatora

Pazury na obwodzie wirnika mają biegunowość przemienną. Uzwojenie wzbudzenia jest pojedynczą cewką o kształcie cylindrycznym, zajmującą położenie koncentryczne względem wału i umieszczoną pomiędzy systemami biegunowymi. Uzwojenie wirnika jest zasilane prądem stałym poprzez dwa pierścienie, po których ślizgają się szczotki. Strumień magnetyczny wytworzony przez cewkę, dzieli się na strumień główny i strumień rozproszenia. Bieguny pazurowe zmieniają promieniowy kierunek głównego strumienia magnetycznego na osiowy, to jest wzdłuż osi wirnika (rys. 5.5), dlatego maszyny synchroniczne o tych biegunach są nazywane osiowymi w odróżnieniu od maszyn promieniowych, w których strumień nie ma składowych skierowanych wzdłuż osi wirnika.



Rys. 5.5. Schemat połączeń alternatora w układzie zasilania pojazdu [5]

Twornik alternatora w odróżnieniu od twornika prądnicy prądu stałego nie wiruje, lecz jest częścią korpusu maszyny (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Schemat trójfazowego połączenia uzwojenia wzbudzenia alternatora [5]

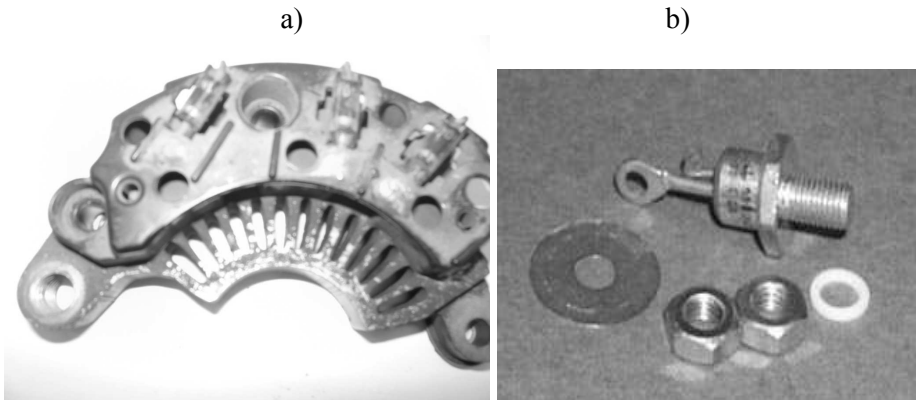
Twornik maszyny składa się z pakietu blach prądnicowych wzajemnie izolowanych, osadzonych w aluminiowym korpusie, do którego są przymocowane obie tarcze łożyskowe. Prąd stojana jest prostowany przez diody krzemowe, umieszczone w tarczy łożyskowej prądnicy. Wirnik ma ponadto łopatki spełniające rolę wentylatora, który jest niezbędny do chłodzenia alternatora oraz pro-

stowników krzemowych, w których wydziela się również znaczna ilość ciepła.

Trójfazowe uzwojenie stojana alternatora (rys. 5.6) jest zazwyczaj połączone w gwiazdę. Wprowadzenie prądnic prądu przemiennego do pojazdów samochodowych nie zmieniło podstawowych funkcji urządzenia, tj. dostarczenia prądu stałego oraz napięcia.

Zasada działania i konstrukcja alternatorów eliminują konieczność stosowania układu komutator–szczotki (czyli prostownika mechanicznego), zastępując go elementem elektronicznym – półprzewodnikową diodą prostowniczą. Stosowane w alternatorach samochodowych diody półprzewodnikowe są wyłącznie elementami krzemowymi.

Do każdej fazy uzwojenia stojana są przyłączone w kierunkach przeciwnych (przewodzenia i zaporowym) dwa elementy prostownicze (rys. 5.8).



Rys. 5.8. Widok układu prostowniczego w alternatorze, gdzie: a) – mostek prostowniczy, b) – widok diody prostowniczej

Sześć elementów prostowniczych, stanowiących trójfazowy układ mostkowy, jest podzielonych na dwie grupy. W mostku prostowniczym trzy diody są połączone z biegunem dodatnim, a trzy z biegunem ujemnym, stąd nazwa; diody dodatnie i ujemne (rys. 5.8). Diody dodatnie i ujemne są umieszczone w takich samych obudowach, różnią się natomiast kierunkiem przewodzenia prądu. W alternatorach samochodów osobowych produkowanych w Polsce stosuje się diody prostownicze ładowania o różnych wartościach prądów znamionowych: np. 25 A, 20 A i 15 A. Natomiast diody wzbudzenia mają wartość prądu znamionowego równą 1A lub 2A.

Między połączone anody jednej grupy (diody ujemne) i połączone katody drugiej grupy (diody dodatnie) jest włączone obciążenie. Diody stosowane w alternatorach samochodowych charakteryzują się niewielkim spadkiem napięcia

w kierunku przewodzenia (od 0,5 do 1,2 V). Od rodzaju układu wzbudzenia alternatora zależnie od różnej liczby diod prostowniczych. W alternatorze tzw. obcowzbudnym stosuje się układ z sześcioma diodami prostowniczymi, natomiast w alternatorze tzw. samowzbudnym – układ z dziewięcioma diodami.

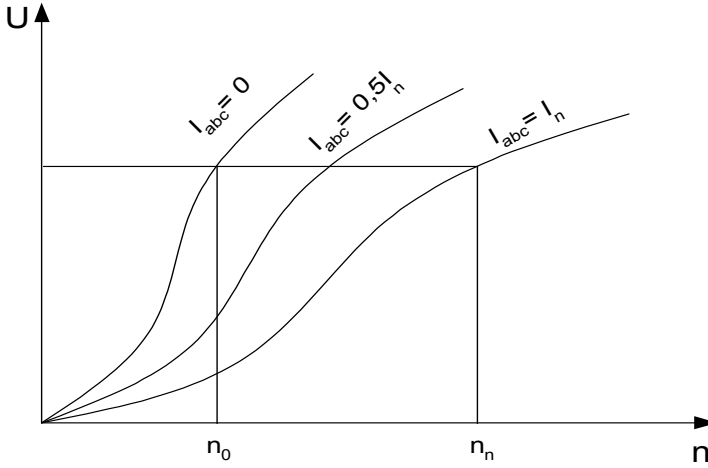
W układzie alternatora samowzbudnego trzy dodatkowe diody, zwane diodami wzbudzenia, wspólnie z trzema diodami ujemnymi tworzą trójfazowy mostkowy układ prostowniczy, zasilający uzwojenie wzbudzenia. Prąd w obwodzie wzbudzenia może popłynąć wówczas, gdy napięcie indukowane w uzwojeniu stojana będzie miało większą wartość od spadku napięcia (przy prądzie znamionowym przewodzenia) dwóch szeregowo połączonych diod – ujemnej i wzbudzenia. Z uwagi na fakt, że wartość prądu znamionowego przewodzenia diody wzbudzenia jest znacznie mniejsza od połączonej z nią szeregowo diody ujemnej, odpowiadający temu prądowi spadek napięcia jest również mniejszy od spadku napięcia na diodzie ujemnej. Dlatego też w sumie, na diodach układu samowzbudnego obserwuje się mniejszy spadek napięcia przy prądzie znamionowym przewodzenia, niż na diodach układu tzw. obcowzbudnego. Przepływ prądu przez uzwojenie wzbudzenia alternatora tzw. samowzbudnego następuje przy stosunkowo niskich prędkościach obrotowych alternatora.

Alternator, którego uzwojenia twornika są połączone w gwiazdę, ma zazwyczaj wyprowadzony na zewnątrz zacisk ze środka uzwojenia. Alternatory charakteryzują się specyficznym rozwiązaniem konstrukcyjnym wirnika, w którym powstaje pole magnetyczne. Wirujące pole magnetyczne indukuje w nieruchomym tworniku siłę elektromotoryczną, zmieniającą się okresowo. W celu doprowadzenia prądu do wirującego uzwojenia wirnika stosuje się styki ślizgowe typu szczotka-pierścień. Iskrzenie na nich jest minimalne, nie występuje tu bowiem zjawisko komutacji. Prąd wzbudzenia jest niewielki, ok. 10% znamionowego prądu obciążenia. Dzięki temu prędkość obrotowa alternatora może być znacznie większa niż prędkość obrotowa prądnicy prądu stałego. Jest ona ograniczona jedynie wytrzymałością łożysk i pasków napędowych.

5.2. Charakterystyki eksploatacyjne alternatorów samochodowych

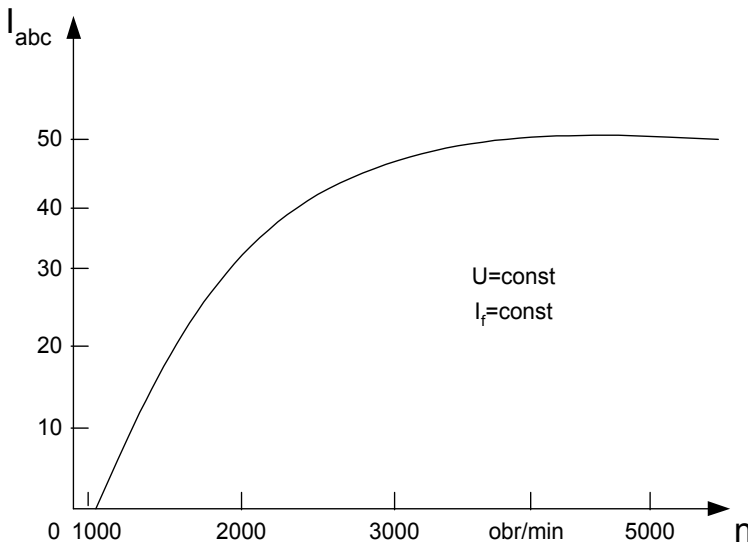
Do podstawowych charakterystyk eksploatacyjnych alternatorów należą:

- Charakterystyka elektromechaniczna (zwana również charakterystyką samowzbudzenia) przedstawiająca zależność $U = f(n)$, przy $I_{obc} = \text{const.}$, $R_f = \text{const.}$ (R_f – rezystancja wzbudzenia) (rys. 5.9).



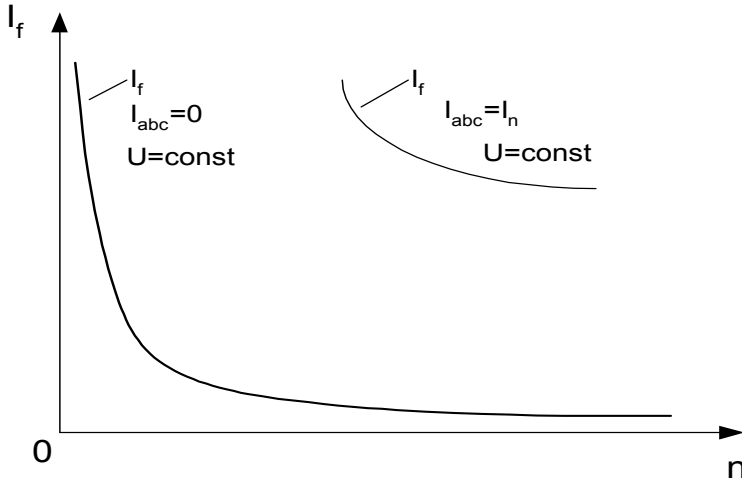
Rys. 5.9. Charakterystyka elektromechaniczna alternatora dla różnych wartości obciążeń

- Charakterystyka obciążenia (prądowo-prędkościowa) przedstawiająca zależność $I_{obc} = f(n)$ dla $U = \text{const}$ oraz $I_f = \text{const}$ (rys. 5.10).



Rys. 5.10. Charakterystyka prądu obciążenia alternatora w funkcji prędkości obrotowej

- Charakterystyka regulacyjna przedstawiająca zależność $I_f = f(n)$ dla $U = U_n = \text{const}$ oraz $I_{obc} = \text{const}$ (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Charakterystyki regulacyjne alternatora

Przy analizowaniu charakterystyki obciążenia alternatora (rys. 5.10) przyjmuje się za punkt wyjścia zależność opisującą siłę elektromotoryczną, która jest równa napięciu maszyny w stanie jałowym. Wartość siły elektromotorycznej wytwarzanej w alternatorze określa zależność

$$E = U_o = c \phi n , \quad (5.8)$$

gdzie: U_o – napięcie fazowe alternatora przy pracy w stanie jałowym, c – stała zależna od konstrukcji maszyny, n – prędkość obrotowa wirnika, Φ – strumień magnetyczny.

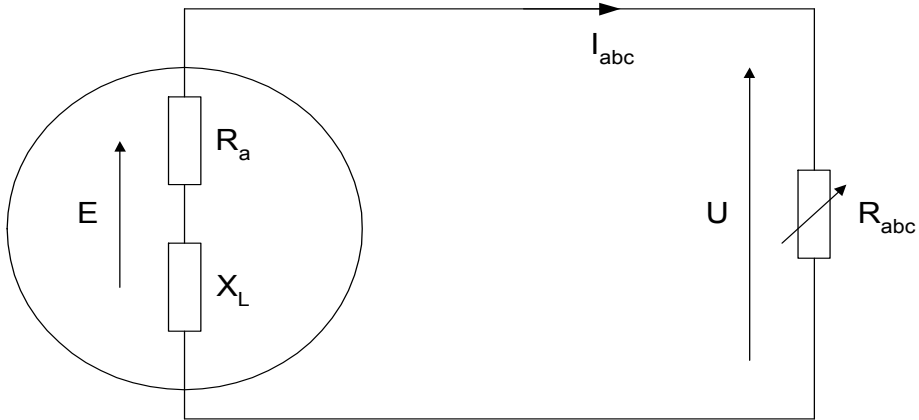
5.3. Schemat zastępczy alternatora

Na rys. 5.12 przedstawiono schemat zastępczy prądnicy synchronicznej małej mocy – alternatora obciążonej rezystorem. W prowadzonej poniżej analizie pominięto wpływ reaktancji twornika. Na podstawie schematu zastępczego prądnicy (rys. 5.12) wartość prądu obciążenia podaje zależność:

$$I_{obc} = \frac{U_o}{\sqrt{(R_a + R_{obc})^2 + X_L^2}} , \quad (5.9)$$

gdzie: I_{obc} – wartość prądu obciążenia, U_o – napięcie fazowe prądnicy przy

pracy w stanie jałowym, R_a – rezystancja uzwojeń stojana prądnicy, R_{obc} – rezystancja odbiornika, X_L – reaktancja indukcyjna uzwojeń stojana prądnicy.



Rys. 5.12. Schemat zastępczy prądnicy synchronicznej

Reaktancja indukcyjna uzwojeń stojana prądnicy synchronicznej jest zależna od częstotliwości stąd:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \frac{pn}{60} L = c_1 n \quad , \quad (5.10)$$

gdzie: f – częstotliwość, c_1 – stała konstrukcyjna obwodu stojana, p – liczba par biegunów uzwojeń stojana, L – indukcyjność uzwojeń o reaktancji indukcyjnej X_L .

Zatem:

$$I_{obc} = \frac{c\phi n}{\sqrt{(R_a + R_{obc})^2 + (c_1 n)^2}} \quad , \quad (5.11)$$

gdzie: I_{obc} – wartość prądu obciążenia, R_a – rezystancja uzwojeń stojana prądnicy, R_{obc} – rezystancja odbiornika, c – stała zależna od konstrukcji maszyny-

ny, n – prędkość obrotowa wirnika, Φ – strumień magnetyczny.

Ponieważ przy małej prędkości obrotowej wirnika maszyny słuszna jest zależność:

$$c_1 n \ll R_a + R_{obc} . \quad (5.12)$$

Stąd wyrażenie (5.11) można uprościć do postaci:

$$I_{obc} = \frac{c\phi n}{\sqrt{(R_a + R_{obc})^2}} = c_1 n . \quad (5.13)$$

Zależność (5.13) określa m.in., że do rozważań przyjęto wartość strumienia magnetycznego maszyny za stały. Wynika stąd, że w początkowej części charakterystyki prąd obciążenia jest proporcjonalny do prędkości obrotowej wirnika maszyny. Ze zwiększaniem prędkości obrotowej wirnika maszyny zwiększa się też reaktancja indukcyjna X_L i począwszy od pewnej wartości n zachodzi nierówność:

$$R_a + R_{obc} \ll c_1 n . \quad (5.14)$$

Uwzględniając zależność (5.13), otrzymuje się wzór:

$$I_{obc} = \frac{c\phi n}{\sqrt{(c_1 n)^2}} = \frac{c}{c_1} \phi . \quad (5.14)$$

5.4. Pytania kontrolne

1. Opisać budowę samochodowej prądnicy prądu przemiennego.
2. Opisać zasadę działania alternatora.
3. Wymienić właściwości alternatora.
4. Wyjaśnić, dlaczego przy małych prędkościach obrotowych prądnica prądu przemiennego musi pracować jako obcowzbudna.
5. Wymienić zalety alternatora w stosunku do prądnicy prądu stałego i uzasadnić je.

6. Narysować zewnętrzną charakterystykę prądową alternatora.
7. Podać podstawowe parametry charakterystyczne dla prądnic samochodowych.
8. Omówić sposób wykonania pomiarów charakterystyki magnesowania i charakterystyk zewnętrznych oraz narysować przebieg tych charakterystyk.
9. Uzasadnić przebieg charakterystyk zewnętrznych alternatora pracującego jako prądnica samowzbudna i jako prądnica obcowzbudna.
10. Wymienić systemy chłodzenia prądnic samochodowych.
11. Wyjaśnić różnicę w układach kontroli obwodu zasilania z alternatorem obcowzbudnym i samowzbudnym.
12. Omówić sposób badania uzwojenia wzbudzenia i twornika alternatora.
13. Wymienić metody badania diod prostowniczych.
14. Omówić sposób przeprowadzania badania rezystancji izolacji.
15. Wyjaśnić, dlaczego prądnice prądu stałego nie odpowiadają potrzebom eksploatacji samochodów.
16. Wymienić i przedstawić podstawowe charakterystyki eksploatacyjne alternatorów.

5.5. Ćwiczenia laboratoryjne

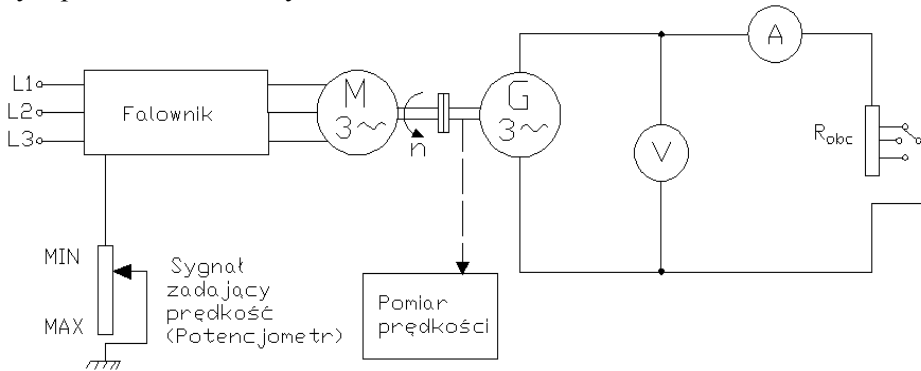
5.5.1. Stanowisko laboratoryjne do badania alternatora

W stanowisku laboratoryjnym do napędu alternatora użyto silnika elektrycznego trójfazowego i przekładni pasowej pokazanej na rysunkach 5.13 i 5.14 oraz falownika np. firmy OMRON seria CIMR – J7 (3G3JV).

Parametry badanego alternatora:

- producent – Magneti Marelli,
- napięcie znamionowe – 14 [V],
- prąd maksymalny – 55 [A],
- moc maksymalna – 800 [W],
- prędkość maksymalna trwała 14 000 [obr/min],
- prędkość maksymalna chwilowa 15 000 [obr/min],
- prędkość, przy której alternator osiąga napięcie 13,5 [V] (w temperaturze otoczenia 25 [°C]) – 1300 [obr/min],
- rezystancja uzwojenia wzbudzenia mierzona między pierścieniami ślizgowymi – $4^{+0.4}$ [Ω],
- wbudowany elektroniczny regulator napięcia RTT119AC.

Schemat stanowiska laboratoryjnego alternatora wraz z układem napędowym przedstawiono na rys. 5.13.



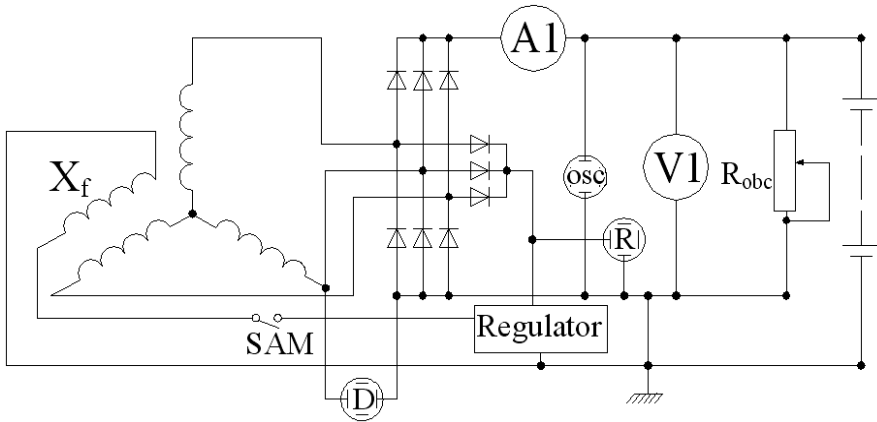
Rys. 5.13. Schemat blokowy stanowiska z układem napędowym



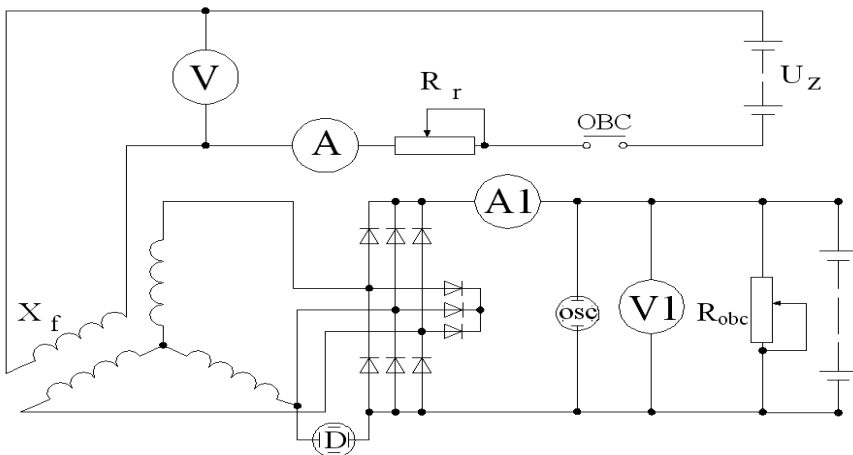
Rys. 5.14. Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego do badania alternatora

5.5.2. Schemat stanowiska pomiarowego

Na rysunkach 5.15 i 5.16 przedstawiono schematy połączeń alternatora.



Rys. 5.15. Schemat pomiarowy do badania alternatora-prądnicy samowzbudnej (ozn. SAM na panelu sterowania stanowiska), gdzie: A2 – amperomierz, V1 – woltomierz, R_{obc} – rezystancja obciążenia (obciążenie), X_f – reakcja cewki wzbudzenia, 1, 2, 3 – złącza oscyloskopu, SAM – włącznik obwodu samowzbudnego



Rys. 5.16. Schemat pomiarowy do badania alternatora-prądnicy obcowzbudnej (ozn. OBC na panelu sterowania stanowiska), gdzie: U_z – napięcie zasilające uzwojenie wzbudzenia, OBC – włącznik w obwodzie wzbudzenia, R_r – rezystor regulujący prąd wzbudzenia, A, V, A1, V1 – amperomierze i woltomierze obwodu wzbudzenia i układu obciążenia alternatora

5.5.3. Pomiar i wykreślenie charakterystyk $U = f(n)$ i $I_{obc} = f(n)$

1. Zaciski stanowiska podpisane R, S, T i 0 podłączyć do zacisków napięcia trójfazowego 3×380 [V]/50 [Hz], umieszczonych na tablicy zasilającej.

UWAGA! Zwrócić uwagę na zgodność łączonych zacisków.

2. Połączyć zaciski obciążenia rezystancyjnego na odpowiedni zakres pracy wskazany przez prowadzącego ćwiczenie (rys. 6.16). Zaciski łączymy według schematów pamiętając o szeregowym podłączeniu zacisków bezpiecznika.

3. Podłączyć wybrane obciążenie rezystancyjne pod zaciski stanowiska laboratoryjnego, opisane „+” i „-”.

4. Do zacisków stanowiska „+” i „-” podłączyć odpowiednio akumulator.

5. Przełącznik obwodów pomiarowych ustawić w pozycji SAM.

6. Sprawdzić połączenia w układzie zasilania stanowiska.

7. Na tablicy zasilającej 3×380 [V]/50 [Hz] włączyć zasilanie.

8. Włącznik główny (WŁ. GŁ.) na panelu przednim przełączyć do pozycji „1”. **UWAGA! Zapala się czerwona kontrolka.**

9. Odczekać 5 sekund do momentu wyświetlenia się trzech zer na obrotomierzu, umieszczonym poniżej mierników A1 i V1.

UWAGA! Nie uruchamiać silnika bez podłączonego obciążenia rezystancyjnego.

10. Zielonym przyciskiem START uruchomić silnik.

11. Pokrętkiem potencjometru obracając kierunku MIN lub MAX zmieniać prędkość obrotową od biegu jałowego ok. 800 [obr/min] do wskazanych przez prowadzącego.

12. Odczytać parametry na przyrządach kontrolnych stanowiska: prędkości obrotowej, wartość napięcia na woltomierzu oraz prądu na amperomierzu.

13. Czynności opisane w pkt. 11 i 12 wykonać dla całego przedziału pracy alternatora (według wskazań prowadzącego).

14. Odczytać parametry dla nowej wartości prędkości obrotowej. Wszystkie odczytane parametry zapisać tabeli pomiarowej 5.1.

15. Zwiększać prędkość obrotową, aż do stabilizacji napięcia i prądu.

16. Po odczytaniu wszystkich parametrów dla różnych ustawień prędkości obrotowej należy: potencjometrem zmniejszyć prędkość obrotową do ok. 100 [obr/min], przyciskiem STOP zatrzymać silnik, przełączyć WŁ.GŁ. do pozycji „0”, wyłączyć zasilanie na tablicy zasilającej.

17. Pomiary można powtórzyć dla różnych zakresów pracy obciążenia, według punktów od 2 do 16.

18. Wyniki pomiarowe wpisać do tabeli 5.1.

Tab. 5.1. Tabela do pomiaru charakterystyki $U = f(n)$, $I_{obc} = f(n)$

| Lp. | U_{wyj} [V] | n [obr/min] | I_{obc} [A] |
|-----|---------------|---------------|---------------|
| 1 | | | |

19. Wykreślić charakterystykę obciążenia prądnicy samowzbudnej $I_{obc} = f(n)$ przy $n = \text{const.}$ dla $n = 1200$ [obr/min] i $n = 2000$ [obr/min].
20. Wykreślić charakterystykę elektromechaniczną prądnicy samowzbudnej $U = f(n)$ przy $n = \text{const.}$ dla $n = 1200$ [obr/min] i $n = 2000$ [obr/min].
21. Na wykreślonych charakterystykach alternatora (wykorzystując wykresy teoretyczne) narysować ich przebieg zmian do prędkości maksymalnych.
22. Opracować wnioski.

5.5.4. Pomiar i wykreślenie charakterystyk $U = f(I_{obc})$ oraz $I_{obc} = f(n)$

1. Wykonać czynności z punktów od 1 do 10 zamieszczonych w podrozdziale 5.5.1.

UWAGA! Nie uruchamiać silnika bez podłączonego obciążenia rezystancyjnego.

2. Potencjometrem ustawić prędkość obrotową o wartości 1200 [obr/min].
3. Odczytać wartość wskazań mierników A1 i V1, zapisać parametry w tabeli 5.2.
4. Zwiększyć prędkość obrotową do 2000 [obr/min], ponownie odczytać i zapisać parametry w tabeli.
5. Zmniejszyć prędkość obrotową do ok. 100 [obr/min], zatrzymać silnik (przycisk STOP), WŁ.GŁ. przełączyć do pozycji „0”, wyłączyć napięcie na tablicy zasilającej „0”.
6. Połączyć obciążenie rezystancyjne na kolejny zakres pracy.
7. Podłączyć obciążenie do stanowiska laboratoryjnego.
8. Włączyć zasilanie na tablicy zasilającej.
9. WŁ.GŁ. na panelu przednim przełączyć do pozycji „1”.
10. Zielonym przyciskiem START uruchomić silnik.
11. Powtórzyć czynności od pkt. 2 do 5 dla kolejnej wartości obciążenia rezystancyjnego.
12. Ćwiczenie należy wykonać dla czterech różnych zakresów pracy obciążenia rezystancyjnego, kierując się punktami od 2 do 10.
13. Wyniki pomiarowe wpisać do tabeli 5.2.

14. Wykreślić charakterystykę obciążenia prądnicy samowzbudnej $I_{obc} = f(n)$ przy $n = \text{const.}$ dla $n = \dots\dots\dots$ [obr/min] i $n = \dots\dots\dots$ [obr/min].
15. Wykreślić charakterystykę elektromechaniczną prądnicy samowzbudnej $U = f(I_{obc})$ przy $n = \text{const.}$ dla $n = \dots\dots\dots$ [obr/min] i $n = \dots\dots\dots$ [obr/min].

Tab. 5.2. Tabela do pomiaru charakterystyki $U = f(I_{obc})$ $n = \dots\dots\dots$ [obr/min],
 $n = \dots\dots\dots$ [obr/min]

| Lp. | $n = \dots\dots\dots$ [obr/min] | | $n = \dots\dots\dots$ [obr/min] | |
|-----|---------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|
| | U_{wyj} [V] | I_{obc} [A] | U_{wyj} [V] | I_{obc} [A] |
| 1 | | | | |

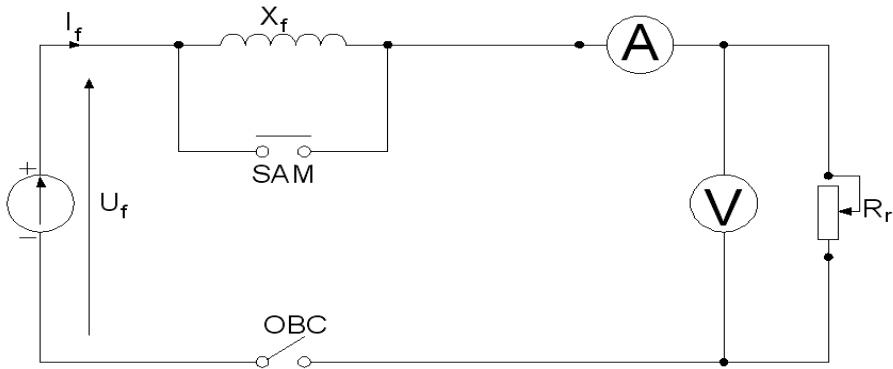
16. Na wykreślonych charakterystykach alternatora (wykorzystując wykresy teoretyczne) narysować ich przebieg zmian do prędkości maksymalnych.
17. Opracować wnioski.

5.5.5. Pomiar i wykreślenie charakterystyki prądnicy obcowzbudnej $I_{obc} = f(I_r)$

1. Zaciski stanowiska oznaczone R, S, T i 0 podłączyć do zacisków napięcia trójfazowego 3×380 [V]/50 [Hz], umieszczonych na tablicy zasilającej.

UWAGA! Sprawdzić zgodność połączonych faz napięcia zasilania „tablica zasilająca – stanowisko”.

2. Połączyć zaciski obciążenia rezystancyjnego na odpowiedni zakres pracy wskazany przez prowadzącego ćwiczenie. Zaciski łączymy według schematów pamiętając o szeregowym podłączeniu zacisków bezpiecznika.
3. Obciążenie rezystancyjne podłączyć pod zaciski stanowiska laboratoryjnego, opisane „+” i „-”.
4. Do zacisków „+” i „-” podłączyć akumulator.
5. Przełącznik obwodów pomiarowych ustawić w pozycji OBC.
6. Podłączyć dodatkowe mierniki i rezystancję regulującą (R_r) prąd wzbudzenia pod zaciski według schematu, umieszczonego na stanowisku (rys. 5.17). Ustawiamy R_r na wartość maksymalną.



Rys. 5.17. Schemat obwodu do pomiaru i regulacji prądu wzbudzenia alternatora

7. Włączyć zasilanie na tablicy zasilającej (I).
8. Włącznik główny (WŁ. GŁ.) na panelu przednim przełączyć do pozycji 1.

UWAGA! Zapala się czerwona kontrolka.

9. Odczekać 5 sekund do momentu wyświetlenia się trzech zer na obrotomierzu, umieszczonym poniżej mierników A1 i V1.
10. Zielonym przyciskiem START uruchomić silnik.

UWAGA! Nie należy uruchamiać silnika bez podłączonego obciążenia rezystancyjnego.

Obracając w kierunku MIN lub MAX pokrętką potencjometru ustawić, prędkość obrotową wskazaną przez prowadzącego ćwiczenie np. 1200 [obr/min] i 2000 [obr/min].

11. Regulując rezystancją R_r zmieniać wartość prądu wzbudzenia od kilku [mA] do 3 [A], według polecenia prowadzącego.
12. Wskazania amperomierzy A1 i A zapisujemy w tab. 5.3.

Tab. 5.3. Tabela do pomiaru charakterystyki $I_{obc} = f(I_f)$ przy $n = \text{const.}$ np. $n = \dots\dots\dots$ [obr/min], $n = \dots\dots\dots$ [obr/min]

| Lp. | n = [obr/min] | | n = [obr/min] | |
|-----|---------------------|-----------|---------------------|-----------|
| | I_{obc} [A] | I_f [A] | I_{obc} [A] | I_f [A] |
| 1 | | | | |

13. Ustawić kolejną wartość prędkości obrotowej [obr/min] i ponownie regulować rezystancją R_r w zakresie 0 [A] do 3 [A] prądu wzbudzenia I_f .
14. Po zakończeniu zmniejszyć prędkość obrotową, przyciskiem STOP zatrzymać silnik, WŁ.GŁ. przełączyć do pozycji „0”, wyłączyć zasilanie na tablicy zasilającej.
15. Pomiary można powtórzyć dla różnych zakresów pracy obciążenia rezystancyjnego R_{obc} .
16. Wyniki pomiarowe wpisać do tab. 5.3.
17. Wykreślić charakterystykę obciążenia prądnicy obcowzbudnej $I_{obc} = f(I_f)$ przy $n = \text{const.}$ dla $n = \dots\dots\dots$ [obr/min] i $n = \dots\dots\dots$ [obr/min].
18. Wykreślić charakterystykę regulacyjną prądnicy obcowzbudnej $I_{obc} = f(I_f)$ przy $n = \text{const.}$ dla $n = \dots\dots\dots$ [obr/min] i $n = \dots\dots\dots$ [obr/min].
19. Na wykreślonych charakterystykach alternatora (wykorzystując wykresy teoretyczne) narysować ich przebieg zmian do prędkości maksymalnych.
20. Opracować wnioski.

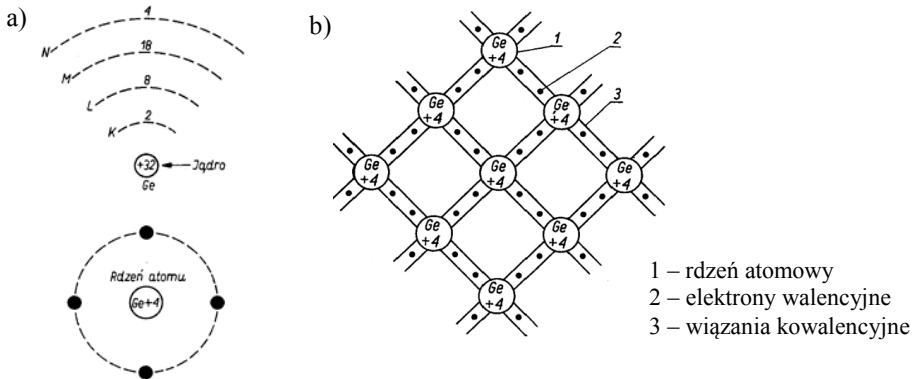
6. Badanie ogniwa fotowoltaicznego

Treścią niniejszego rozdziału jest omówienie zasad działania, parametrów, właściwości i charakterystyk ogniw fotowoltaicznych.

6.1. Budowa półprzewodników i ich własności elektryczne

Materiały, których przewodność zależy od doprowadzonej z zewnątrz energii (źródło energii prądu stałego (bateria), pole elektryczne, energia słoneczna itp.) oraz od celowo wprowadzonych w ich strukturę innych substancji (domieszek) nazywamy *półprzewodnikami*. Jeżeli wykazują one właściwości półprzewodnikowe w stanie chemicznie czystym, to nazywane są półprzewodnikami samoistnymi. Są to najczęściej pierwiastki z czwartej grupy układu okresowego w ich krystalicznej postaci. W półprzewodnikach tego typu, przewodzenie odbywa się za pomocą dziur i elektronów, przy czym liczba dziur i elektronów są sobie równe. Przewodność półprzewodników samoistnych w temperaturze normalnej (20°C) jest niewielka, i w związku z tym tego rodzaju półprzewodniki nie mają praktycznego zastosowania. Energię potrzebną do zwiększenia przewodności możemy obniżyć stosując domieszki pierwiastków z trzeciej lub piątej grupy układu okresowego. Powstają w ten sposób półprzewodniki niesamoistne, które w temperaturze normalnej, a nawet w temperaturach niższych od normalnej wykazują zadawalającą nas przewodność. Jeżeli do czterowartościowego półprzewodnika dodamy domieszkę pierwiastka pięciowartościowego (domieszka donorowa), to otrzymamy półprzewodnik typu *n*. Wprowadzenie domieszki zawierającej pierwiastek trójwartościowy (domieszka akceptorowa) daje nam półprzewodnik typu *p*.

Najczęściej półprzewodnikami są pierwiastki z czwartej grupy układu okresowego (german, krzem) w ich krystalicznej postaci (rys. 6.1). Przewodność półprzewodników samoistnych w temperaturze pokojowej (20°C) jest niewielka, i w związku z tym tego rodzaju półprzewodniki nie mają praktycznego zastosowania. W celu poprawy konduktywności półprzewodników celowo wprowadza się w ich strukturę *domieszki* w postaci trój- lub pięciowartościowych pierwiastków. W ten sposób uzyskuje się *półprzewodniki niesamoistne*. Jeżeli do czterowartościowego półprzewodnika dodamy domieszkę pierwiastka pięciowartościowego np. arsenu, antymonu (domieszka donorowa), to otrzymamy *półprzewodnik typu n* „nadmiarowy” piąty elektron nie uczestniczy w wiązaniu kowalencyjnym stając się swobodnym elektronem, który łatwo przechodzi do pasma przewodnictwa. W tym przypadku elektrony są *nośnikami większościowymi* ($n \gg p$).



Rys. 6.1. German przykładowym półprzewodnikiem samoistnym, gdzie: a) – struktura budowy atomu germanu, b) – siatka krystaliczna wiązania atomów germanu.

Wprowadzenie domieszki zawierającej pierwiastek trójwartościowy np. ind, gal (domieszka akceptorowa) daje nam *półprzewodnik typu p*, w którym jedno z wiązań kowalencyjnych jest niepełne. Powstałą dziurę zapełnia elektron z sąsiedniego wiązania, powodując pojawienie się w nim nowej dziury. W tym przypadku dominuje ruch ładunków dodatnich. W półprzewodniku typu *p* jest dużo więcej dziur niż elektronów ($p \gg n$) i dziury są w nim nośnikami większościowymi ładunku elektrycznego [15-32].

Same półprzewodniki samoistne jak i półprzewodniki domieszkowane mają wąski zakres praktycznego zastosowania. Natomiast rozmaite kombinacje ich połączeń pozwalają tworzyć wielorakie elementy i przyrządy półprzewodnikowe.

W półprzewodniku typu n jest dużo więcej elektronów niż dziur, elektrony są nośnikami większościowymi, natomiast dziury są nośnikami mniejszościowymi.

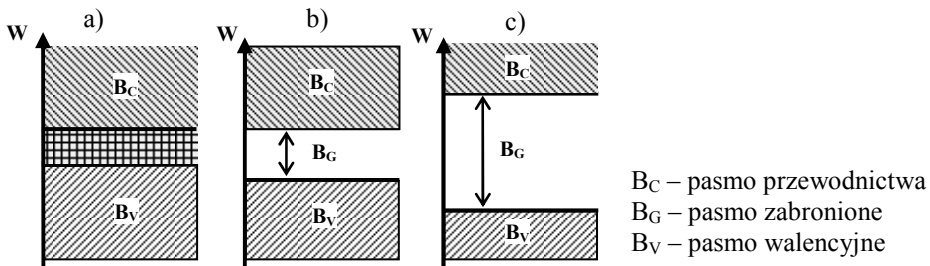
W półprzewodniku typu p jest dużo więcej dziur niż elektronów, dziury są nośnikami większościowymi, a elektrony są nośnikami mniejszościowymi.

Zarówno półprzewodnik typu *n*, jak i półprzewodnik typu *p* nie mają same praktycznego zastosowania, natomiast rozmaite kombinacje ich połączeń tworzą przyrządy półprzewodnikowe, które znalazły liczne zastosowania. Niektóre z tych przyrządów przedstawione są poniżej.

Własności półprzewodników oraz mechanizm przewodzenia przez nie prądu elektrycznego można wyjaśnić w oparciu *pasmową teorię przewodnictwa*, która zakłada, że w atomie poszczególne elektrony mogą posiadać ściśle określone, skwantowane stany energetyczne. Bliskość atomów w strukturze krystal-

licznej sprawia, że powstają tzw. pasma grupujące wspólne poziomy energetyczne. Elektrony, które posiadają w atomach najwyższą energię, ale nadal z nimi są związane znajdują się w tzw. *paśmie walencyjnym*. Natomiast elektrony, których energia uwolniła z wiązań atomowych przechodzą do *pasma przewodnictwa* stając się swobodnymi nośnikami ładunków w ciele stałym. Pomiedzy tymi dwoma pasmami znajduje się *pasmo zabronione* (rys. 6.2).

Szerokość pasma zabronionego odzwierciedla energię potrzebną do zerwania wiązania elektronu walencyjnego i przeniesienia go do pasma przewodnictwa.



Rys. 6.2. Schemat struktury pasmowej ciał stałych, gdzie: a) – w metalu, b) – w półprzewodniku, c) – w izolatorze

W półprzewodnikach elektrony, które uzyskały energię pozwalającą pokonać przerwę energetyczną przechodzą z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa, gdzie stają się *swobodnymi nośnikami* prądu. Jednocześnie w paśmie walencyjnym powstają *dziury*, czyli nośniki nieskompensowanego dodatniego ładunku elementarnego. Dlatego w półprzewodnikach występują dwa rodzaje nośników: elektrony (*n* – negative) i dziury (*p* – positive). Stąd, przewodnictwo półprzewodników określa się mianem *przewodnictwa elektro-nowo-dziurowego*.

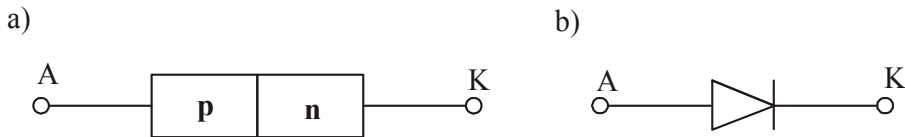
Chemicznie czysty i bez defektów strukturalnych materiał półprzewodnikowy nazywamy *półprzewodnikiem samoistnym*. W półprzewodnikach samoistnych, w warunkach równowagi termodynamicznej, elektrony nie pojawiają się w paśmie przewodnictwa. Zatem koncentracje elektronów i dziur są w nim jednakowe ($n = p$).

W niespolaryzowanym złączu *p-n* będącym pod wpływem energii świetlnej generowane pary elektron – dziura powodują powstanie *siły elektromotorycznej* (SEM) na rozwartych końcówkach tego oświetlonego złącza. Zjawisko to nazywamy *zjawiskiem fotowoltaicznym*. Wartość siły elektromotorycznej zależy od natężenia światła oraz od rodzaju półprzewodnika. Element półprzewodnikowy, w którym następuje konwersja energii świetlnej na energię elektryczną wskutek zjawiska fotowoltaicznego nazywamy *fotodiodą*.

Fotoogniwa wykorzystywane są jako źródła energii elektrycznej. Dziedzinę, która zajmuje się bezpośrednim przetwarzaniem energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną nazywa się **fotowoltaiką**.

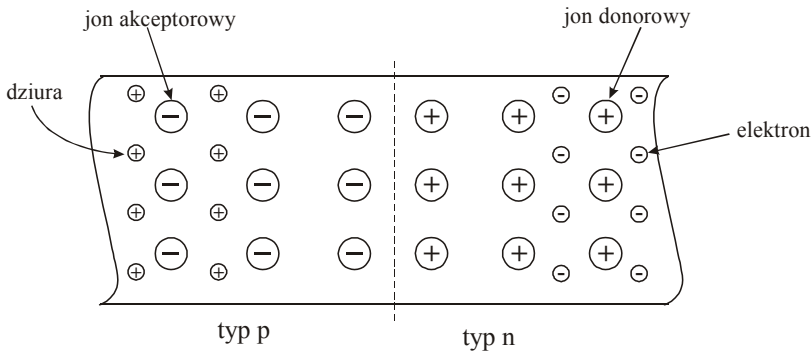
6.2. Struktura złącza p-n

Połączenie dwóch materiałów półprzewodnikowych **p** i **n** nazywamy złączem półprzewodnikowym p-n. Dioda półprzewodnikowa ma duże znaczenie ze względu na swoje właściwości elektryczne. Charakteryzuje się ona bowiem niejednakową zdolnością przewodzenia prądu w obu kierunkach. Schemat budowy i symbol graficzny diody przedstawiony jest na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Złącze p-n, gdzie: a) – schemat budowy, b) – symbol graficzny, A-anoda, K-katoda

Domieszka akceptorowa w obszarze typu **p** sprawia, że koncentracja dziur w tym obszarze jest większa od koncentracji elektronów, natomiast domieszka donorowa w obszarze **n** prowadzi do przewagi elektronów w tym obszarze (rys. 6.3). Sytuacja ta przedstawiona jest na rys. 6.4.



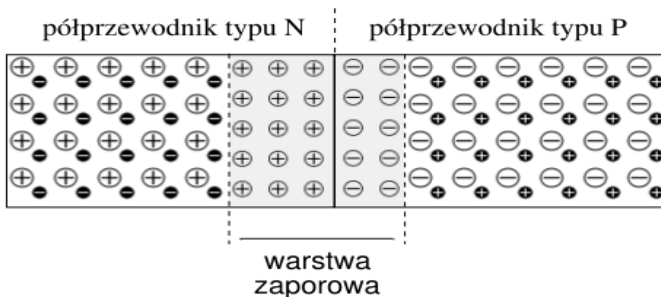
Rys. 6.4. Obszar warstwy zaporowej

Duża zmiana koncentracji nośników większościowych i mniejszościowych występująca w warstwie przejściowej powoduje silną dyfuzję nośników w obu kierunkach. W wyniku dyfuzji dziury przedostają się przez złącze z obszaru **p** do obszaru o dużej koncentracji elektronów (obszar **n**). Dziury te znikają

wskutek rekombinacji, pozostawiając w obszarze p jony akceptorowe o ujemnym ładunku przy liczbie dziur niewystarczającej do neutralizacji pola. W analogiczny sposób dyfuzja elektronów przez złącze z obszaru n do obszaru p powoduje pojawienie się elektronów w obszarze dużej koncentracji dziur. Elektrony te znikają szybko wskutek rekombinacji, pozostawiając w obszarze n dodatnio naładowane jony donorowe, przy czym liczba elektronów jest niewystarczająca do zneutralizowania powstałego pola. Obszar w pobliżu złącza, w którym występują niezneutralizowane jony tworzące dipolową warstwę ładunku przestrzennego, nosi nazwę warstwy zaporowej.

Dipolowa warstwa ładunku przestrzennego jest powodem istnienia pola elektrycznego skierowanego w poprzek złącza i tworzy tak zwaną barierę potencjału (rys. 6.5). Różnica potencjałów odpowiadająca różnicy energii potencjalnej dla obu obszarów nosi nazwę napięcia bariery potencjału. Oprócz nośników większościowych, pochodzących od domieszki, istnieją nośniki mniejszościowe, które powstają w wyniku przewodnictwa samoistnego. Ze względu na kierunek pola elektrycznego, nośniki mniejszościowe, które znajdują się w pobliżu warstwy zaporowej, zostają porwane i uniesione w poprzek warstwy zaporowej. Przy braku polaryzacji zewnętrznej wypadkowy prąd płynący przez złącze musi wynosić zero, ponieważ dyfuzja nośników większościowych jest równoważona unoszeniem w przeciwnym kierunku nośników mniejszościowych.

Działanie elementów i układów elektronicznych opiera się na współdziałaniu wielorakich kontaktów tzw. *złącz*. Najczęściej wykorzystywanym w tworzeniu elementów elektronicznych są złącza utworzone przez półprzewodniki tego samego rodzaju o odmiennym typie przewodnictwa (typ n i p). Na granicy zetknięcia półprzewodnika typu p z półprzewodnikiem typu n tworzy obszar o specyficznych właściwościach nazywany *złączem p-n*.



Rys. 6.5. Schemat budowy złącza p-n

Gradient koncentracji ruchomych nośników ładunku powoduje dyfuzję elektronów z warstwy n do warstwy p , oraz dziur z warstwy p do warstwy n . Po przejściu przez złącze te większościowe różnoimienne ładunki łączą się, czyli ulegają tzw. *rekombinacji*. Wskutek tych zjawisk:

- warstwa półprzewodnika n zyskuje ładunek dodatni, natomiast warstwa p ładunek ujemny;
- w obszarze granicznym powstaje dipolowa warstwa ładunku przestrzennego tzw. *warstwa zaporowa*, która przeciwdziała przepływowi ładunków większościowych;
- w obszarze granicznym złącza tworzy się napięcie, tzw. *bariera potencjału*.

W warunkach równowagi termicznej i przy braku polaryzacji prąd płynący przez złącze równy jest zeru. Własności złącza znacząco determinuje sposób jego polaryzacji.

Jeżeli dioda zostanie spolaryzowana w kierunku przewodzenia, czyli napięcie na anodzie jest większe niż na katodzie, to prąd w obwodzie powoduje wprowadzanie dziur jako nośników większościowych do obszaru p i elektronów jako nośników większościowych do obszaru n . Powoduje to wzrost nośników większościowych w okolicy złącza i zneutralizowanie ładunków nieruchomych jonów w obszarze warstwy zaporowej. Wraz ze wzrostem napięcia polaryzującego, zmniejsza się szerokość i ładunek warstwy zaporowej, maleje natężenie pola elektrycznego w obszarze warstwy zaporowej oraz zmniejsza się napięcie bariery potencjału występującej na złączu. Zwiększa się liczba nośników większościowych przechodzących do obszarów o przeciwnym typie przewodnictwa. Prąd rośnie i jego wartość w znacznym stopniu zależy od wartości doprowadzonego napięcia polaryzującego. Przy przepływie prądu w kierunku przewodzenia na diodzie występuje niewielki spadek napięcia, którego wartość zależy od rodzaju półprzewodnika. Jest on rzędu $0,25 \div 0,30$ V dla diod germanowych i $0,65 \div 0,75$ V dla diod krzemowych.

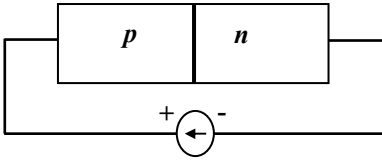
W podobny sposób rozważa się sytuację, kiedy złącze jest spolaryzowane zaporowo, napięcie na anodzie jest mniejsze niż na katodzie. W takiej sytuacji dziury są wyciągane z obszaru p , a elektrony z obszaru n . Szerokość warstwy zaporowej rośnie, pojawia się więcej ładunków związanych z nieruchomymi atomami domieszek i wysokość bariery potencjału elektrycznego rośnie. Prąd, który płynie przez złącze jest bardzo mały, ponieważ jest to prąd wynikający z przemieszczania się nośników mniejszościowych. Ponieważ liczba tych nośników jest w danej temperaturze stała, prąd ten praktycznie nie zależy od napięcia polaryzującego.

Dla bardzo dużych napięć polaryzujących diodę w kierunku zaporowym, natężenie pola elektrycznego w złączu o stosunkowo niewielkich rozmiarach może osiągnąć bardzo duże wartości. Powoduje to rozrywanie wiązań atomo-

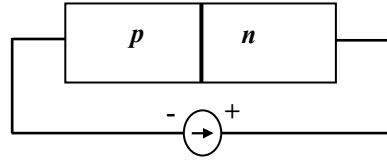
wych, uwalnianie dużej ilości nośników i gwałtowny wzrost prądu. Jeżeli prąd ten nie zostanie ograniczony, to dojdzie do zniszczenia diody. Maksymalne napięcie wsteczne jakie można przyłożyć do diody w kierunku zaporowym zależy od sposobu wykonania diody i może dochodzić do kilku tysięcy woltów.

6.2.1. Własności złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia

Schemat złącza $p-n$ spolaryzowanego napięciem zewnętrznym w kierunku przewodzenia przedstawiają rys. 6.6. i 6.7.



Rys. 6.6. Złącza $p-n$ spolaryzowane w kierunku przewodzenia



Rys. 6.7. Złącza $p-n$ spolaryzowane w kierunku zaporowym

Polaryzacja złącza $p-n$ z rys. 6.6. powoduje:

- zmniejszenie grubości warstwy zaporowej;
- zwiększenie ruchu nośników większościowych;
- prąd dyfuzyjny – będący sumą prądów nośników większościowych może osiągać duże wartości.

W efekcie tych zjawisk złącze $p-n$ spolaryzowane w kierunku przewodzenia zyskuje małą rezystancję i dzięki temu cechuje je dobre przewodnictwo. Wartość prądu płynącego przez złącze $p-n$ znacząco zależy od napięcia polaryzacji.

6.2.2. Własności złącza p-n spolaryzowanego w kierunku zaporowym

W polaryzacji złącza $p-n$ w kierunku zaporowym do obszaru półprzewodnika n jest dołączony wyższy potencjał niż do półprzewodnika typu p (rys. 6.7).

Zewnętrzne napięcie polaryzujące złącze $p-n$ powoduje odprowadzenie nośników większościowych ze sfery granicznej obszarów p i n . W efekcie następuje poszerzenie warstwy zaporowej złącza oraz podwyższenie bariery potencjału. Makroskopową konsekwencją tych zjawisk jest wzrost rezystancji wewnętrznej złącza $p-n$.

Wartość prądu płynącego przez złącze $p-n$ jest sumą prądów nośników mniejszościowych (tzw. prądów unoszenia). Prąd ten w dużym zakresie nie zależy od wartości napięcia polaryzującego.

6.3. Zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne

Jak wspomniano powyżej, żeby oderwać elektron walencyjny od atomu półprzewodnika, należy dostarczyć mu pewnej energii E_g . Energię tę mogą dostarczyć drgania termiczne, ale również na przykład promieniowanie świetlne (rys. 6.8). Jeżeli w wyniku promieniowania świetlnego wewnątrz półprzewodnika powstają pary dziura-elektron to takie zjawisko nazywamy zjawiskiem fotoelektrycznym wewnętrznym. Zjawisko to ukazuje nam cząsteczkową naturę światła. Żeby doszło do uwolnienia elektronu walencyjnego kwant promieniowania świetlnego (foton) musi mieć energię co najmniej równą E_g .

Energia kwantu E_f zależna jest od częstotliwości fali świetlnej ν w następujący sposób:

$$E_f = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} , \quad (6.1)$$

gdzie: $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js jest stałą Plancka, ν – częstotliwość fali świetlnej, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s jest prędkością światła w próżni, λ – jest długością fali świetlnej.

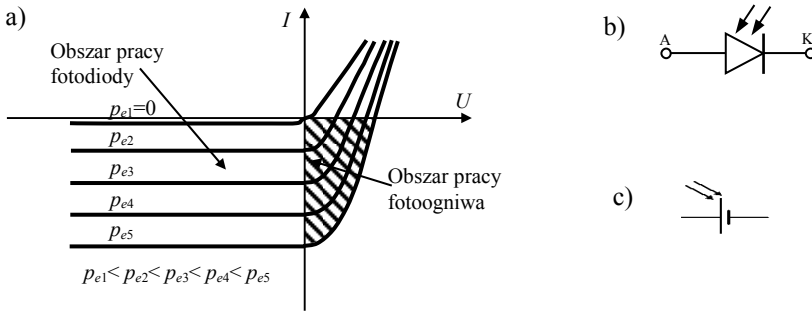
Tym samym możemy zapisać warunek na zaistnienie zjawiska fotoelektrycznego wewnętrznego

$$h \cdot \nu \geq E_g . \quad (6.2)$$

Wśród stosowanych elementów półprzewodnikowych funkcjonujących przy wykorzystaniu energii słonecznej wyróżnia się fotodiody i fotoogniwo.

6.4. Fotodiody

Soczewka zamontowana w obudowie diody kieruje strumień światła zewnętrznego na złącze p - n . Ta energia świetlna powoduje generację par elektron – dziura w obszarze półprzewodnikowego złącza. Ilość tych nośników zależy od natężenia padającego światła. Zatem przy zaporowym kierunku polaryzacji takiego złącza wartość prądu wstecznego będzie rosła wraz ze wzrostem strumienia padającego światła P_e (rys. 6.8).



Rys. 6.8. Charakterystyka napięciowo-prądowa fotodiody – fotoogniwa [37], gdzie: a) – charakterystyka napięciowo-prądowa, b) – symbol fotodiody, c) – symbol fotoogniwa

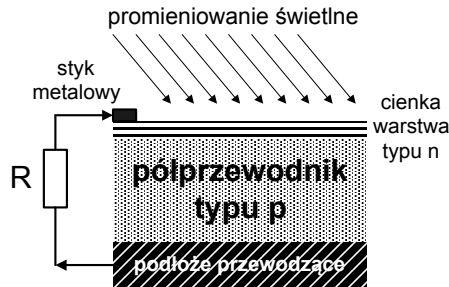
Fotodiody stosowane są przede wszystkim jako detektory światła, które stanowią podstawowy element układów automatyki, urządzeń komutacji światłowodowej, przetworników analogowo-cyfrowych, itp.

6.5. Fotoogniwo, budowa i zasada pracy

Baterie słoneczne zbudowane są z ogniw fotowoltaicznych. Ogniwo takim nazywamy urządzenie (materiał), w którym zachodzi zjawisko fotoelektryczne polegające na konwersji energii świetlnej na elektryczną (rys. 6.9). Fotony padając na półprzewodnikowe złącze p-n powodują wygenerowanie prądu stałego o napięciu zależnym od materiału ogniwa (dla krzemu około 0,5 V) i natężeniu zależnym od powierzchni ogniwa (rys. 6.9). Powszechnie stosowane są fotoogniwa krzemowe monokrystaliczne (sprawność 12-19%), polikrystaliczne (sprawność 10-18%) oraz amorficzne (sprawność 5-10%). Sprawnością nazywamy zdolność materiału do przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną. Im wyższa, tym większy procent dostarczanej przez Słońce energii jest „odzyskiwany” i zamieniany na prąd elektryczny. Baterie słoneczne występują również pod innymi nazwami, m.in.: panel słoneczny, moduł fotowoltaiczny, fotoogniwo lub służą do ładowania akumulatorów lub do bezpośredniego zasilania urządzeń elektrycznych [15-16, 41].

Ilość produkowanej energii zależy od natężenia promieniowania świetlnego. W słoneczny dzień napromieniowanie wynosi około 1000 W/m^2 , przy zachmurzonym niebie lub w półcieniu spada do $100\text{-}200 \text{ W/m}^2$. Panel fotowoltaiczny jest szczególnie wrażliwy na częściowe zacinienie. Produkuje tyle prądu ile najsłabsze z ogniw, więc zacinienie jednego z nich obniża sprawność całej baterii. Ogniwa fotowoltaiczne (PV), będące – dzięki absorpcji i konwersji promieniowania słonecznego – źródłem energii elek-

trycznej, używane są w trzech podstawowych obszarach: elektronice powszechnego użytku, systemach wolnostojących i systemach dołączonych do sieci elektroenergetycznej. Małe ogniwa fotowoltaiczne, generujące od kilku [MW] do kilku [W] mocy, zasilają zegarki, kalkulatory, zabawki, radia, przenośne telewizory i wiele innych dóbr konsumpcyjnych. Zasadę konwersji fotowoltaicznej ilustruje rys. 6.9.



Rys. 6.9. Struktura ogniwa fotowoltaicznego [41]

Aby zbudować ogniwo fotowoltaiczne należy na obydwu warstwach półprzewodników umieścić metaliczne elektrody zdolne do zbierania ładunku z ich powierzchni. Ze względu na to, że do złącza p - n musi docierać światło, jedna z elektrod powinna mieć małą powierzchnię, aby światło mogło swobodnie docierać w głąb złącza (rys. 6.10). Druga z elektrod (nieoświetlona) przylega całkowicie do powierzchni dolnej ścianki fotoogniwa (rys. 6.9). Jeżeli na fotoogniwo pada światło o dostatecznie dużej energii to wówczas w jego wnętrzu zachodzi zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne. Powstałe pary dziura-elektron (tzw. fotoelektron i fotodziura) w wyniku dyfuzji docierają do złącza [37].

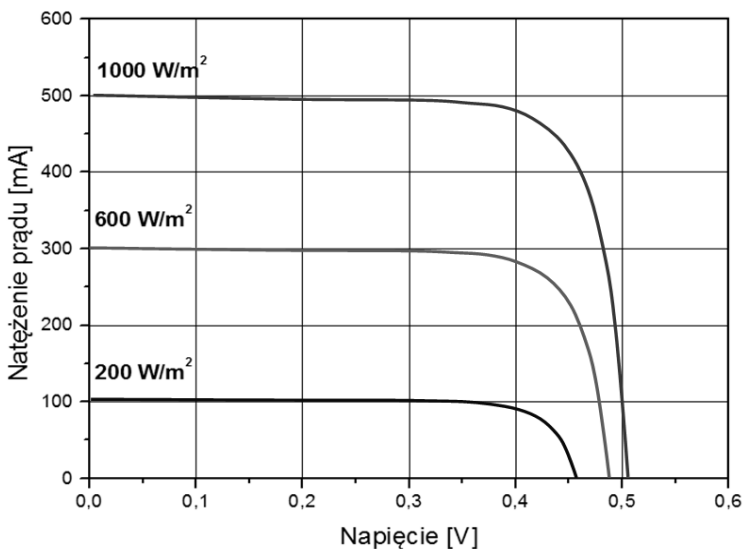
Jeżeli nośniki prądu docierają do złącza od strony półprzewodnika typu n , dziury, dla których nie istnieje bariera potencjału, zostaną przeniesione do półprzewodnika typu p , natomiast dla elektronów bariera potencjału jest granicą nie do pokonania. Sytuacja ma się odwrotnie od strony półprzewodnika typu p . Tym samym przy oświetleniu fotoogniwa w części n zbiera się ładunek ujemny, natomiast w części p ładunek dodatni. Pomiędzy elektrodami (oświetloną i nieoświetloną) występuje więc różnica potencjałów. Jeżeli elektrody podłączymy do odbiornika, w zamkniętym obwodzie elektrycznym popłynie prąd elektryczny. Natężenie tego prądu będzie w przybliżeniu proporcjonalne do natężenia oświetlenia fotoogniwa. Należy dodać, że sprawność fotoogniw obniża m.in. proces rekombinacji nośników czyli ponownego łączenia się dziury i elektronu. Negatywnie wpływa rów-

niez zjawisko odbicia światła od powierzchni fotoogniwa (minimalizuje się je poprzez pokrycie fotoogniwa warstwą przeciwo odbiciową).

Absorpcja światła w półprzewodnikach zachodzi przez uwalnianie elektronów z wiązań chemicznych międzyatomowych. W celu wytworzenia swobodnego elektronu w danym materiale półprzewodnikowym należy dostarczyć pewną ilość energii, co najmniej równą energii przerwy energetycznej, która wynosi na przykład w temperaturze 300 [K] w krzemie $E_g = 1,12$ [eV]. Uwolniony elektron pozostawia za sobą dziurę, która, mając ładunek dodatni, może poruszać się (przez dyfuzję lub pod wpływem pola elektrycznego). Jeżeli z obszarów półprzewodnika typu p i typu n utworzy się złącze $p-n$, na granicy obu obszarów w momencie ich połączenia będzie istniał bardzo duży gradient koncentracji elektronów i dziur. Ten gradient powoduje dyfuzję elektronów z obszaru n do p oraz dziur z obszaru p do n . W rezultacie tej dyfuzji w pobliżu linii złącza po stronie obszaru n ładunek jest dodatni. Z tego obszaru elektrony odpłynęły, a pozostały nieskompensowane są dodatnie ładunki nieruchomych jonów donorowych oraz przybyłych do tego obszaru dodatnie dziury z obszaru p . Natomiast po stronie obszaru p ładunek jest ujemny, gdyż w podobny sposób przez dyfuzję nośników utworzony tu został obszar ujemnego ładunku nieruchomych jonów akceptorowych oraz przybyłych do tego obszaru ujemnych elektronów z obszaru n . W ten sposób w obszarze złącza $p-n$ powstaje warstwa ładunku objętościowego (dipolowa warstwa ładunku przestrzennego). W warstwie tej powstaje bariera potencjału i pole elektryczne skierowane od obszaru n do obszaru p , które przeciwdziała dalszemu procesowi dyfuzji i ogranicza prąd dyfuzyjny do pewnej wartości. Oprócz nośników większościowych istnieją w obydwu obszarach złącza nośniki mniejszościowe, powstające w rezultacie generacji termicznej par elektron-dziura. Wytworzona w wyniku dyfuzji nośników większościowych bariera potencjału sprzyja odpływowi nośników mniejszościowych z obydwu obszarów. Ruch tych nośników stanowi prąd ciemny, przeciwnie skierowany do prądu dyfuzyjnego. Jeżeli złącze $p-n$ zostanie oświetlone fotonami o energii równej lub większej od szerokości przerwy energetycznej $E_g (h\nu > E_g)$, to powstaną po obydwu stronach złącza pary elektron-dziura, podobnie jak przy generacji termicznej.

Nośniki powstające w odległości nie większej od bariery potencjału niż droga dyfuzji nośników mniejszościowych, będą dochodzić do bariery potencjału ruchem dyfuzyjnym i zostaną rozdzielone przez pole elektryczne, związane z obecnością złącza. Pole to przesuwają każdy z nośników w przeciwnym kierunku – elektrony do obszaru n , a dziury do obszaru p . Takie rozdzielanie ładunku powoduje powstanie różnicy potencjałów V w poprzek złącza. Dzięki temu, dla obszaru zamkniętego powstanie prąd fotoelektryczny I_j o tym samym kierunku co prąd I_{v0} , i podobnie jak I_{s0} niezależny od

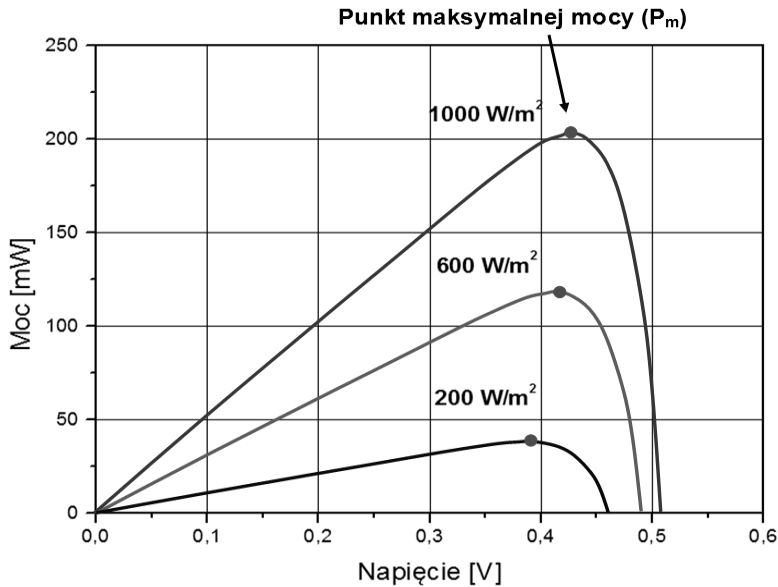
wysokości bariery potencjału. Energia słoneczna odgrywa znaczącą rolę w elektryfikacji obszarów oddalonych od zasilania sieciowego w krajach rozwijających się. W okresie ostatniego dziesięciolecia ponad milion solar-nych instalacji domowych zainstalowano na świecie. Zaopatrują one w energię elektryczną gospodarstwa domowe i urządzenia komunalne. Z punktu widzenia konstruktora urządzeń odbierających energię z ogniw fotowoltaicznych i przekazujących ją do odbiorników lub systemu elektroenergetycznego jest charakterystyka ogniw fotowoltaicznych (rys. 6.10). Istotną ze względu na zastosowanie praktyczne jest charakterystyka mocy produkowanej przez moduł *PV* w zależności od nasłonecznienia (rys. 6.11).



Rys. 6.10. Charakterystyki ogniwa fotowoltaicznego dla różnych nasłonecznień [41]

Konwencjonalne układy zasilania z wykorzystaniem energii słonecznej (rys. 6.12) zwykle pracują w połączeniu z magazynem energii elektrycznej w postaci baterii akumulatorów i posiadają następujące elementy składowe:

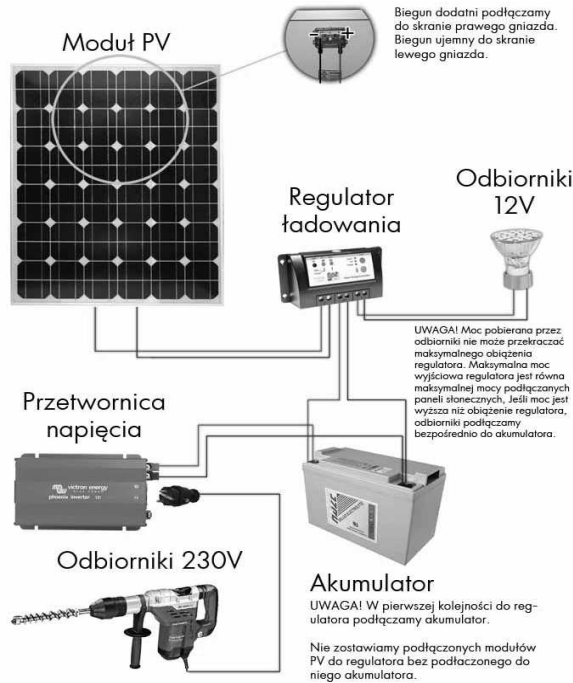
- generator *PV* (moduły fotowoltaiczne),
- baterie akumulatorów,
- sterownik stanu naładowania akumulatorów,
- obciążenie stałoprądowe (DC) lub/oraz
- falownik i obciążenie zmiennoprądowe (AC).



Rys. 6.11. Charakterystyka mocy produkowanej przez ogniwo w zależności od nasłonecznienia [41]

Regulator ładowania (sterownik) zapewnia dostarczanie odpowiedniego ładunku elektrycznego do akumulatora i jest odpowiedzialny za ładowanie (z generatora *PV*) i rozładowanie akumulatora przy poborze mocy na obciążeniu *DC* lub *AC*. Porównuje stan naładowania z wymaganym napięciem i może włączyć generator *PV* poprzez przekaźnik w celu doładowania akumulatorów dodatkowym ładunkiem z modułów *PV*. Do obliczenia stanu naładowania baterii wykorzystuje się algorytm, oparty na różnicy amperogodzin strat i pełnego naładowania. W słoneczny dzień moduł *PV* jest źródłem energii elektrycznej zgodnie ze swoją charakterystyką prądowo-napięciową. W zależności od dołączonego odbiornika (rezystancji obciążenia) mogą zachodzić trzy różne sytuacje.

W sytuacji, gdy podłączone jest obciążenie *B*, natężenie prądu, dostarczanego przez moduł jest wystarczające (charakterystyka obciążenia przecina charakterystyki prądowo-napięciowe modułu i akumulatora w punkcie ich przecięcia).



Rys. 6.12. System zasilania z wykorzystaniem energii słonecznej [41]

W przypadku obciążenia A wymagane jest większe natężenie prądu i wówczas moduł pokrywa tylko część zapotrzebowania na energię elektryczną, a reszta czerpana jest z akumulatora, który jest w tym procesie rozładowywany. Gdy podłączone jest obciążenie C (optymalne), wówczas prąd dostarczany przez moduł PV jest większy od wymaganego i ta nadwyżka doładowuje akumulator. Elektroniczny kontroler ładowania akumulatorów zapobiega przeładowaniu i zbyt głębokiemu rozładowaniu akumulatora (baterii akumulatorów). Dodatkowo układ śledzenia punktu maksymalnej mocy optymalizuje proces eksploatacji systemu fotowoltaicznego.

Pierwszym krokiem w projektowaniu instalacji fotowoltaicznej jest oszacowanie dziennego zużycia energii elektrycznej. Sezon letni (od maja do sierpnia) przyjmuje się jako okres większego nasłonecznienia.

6.6. Pytania kontrolne

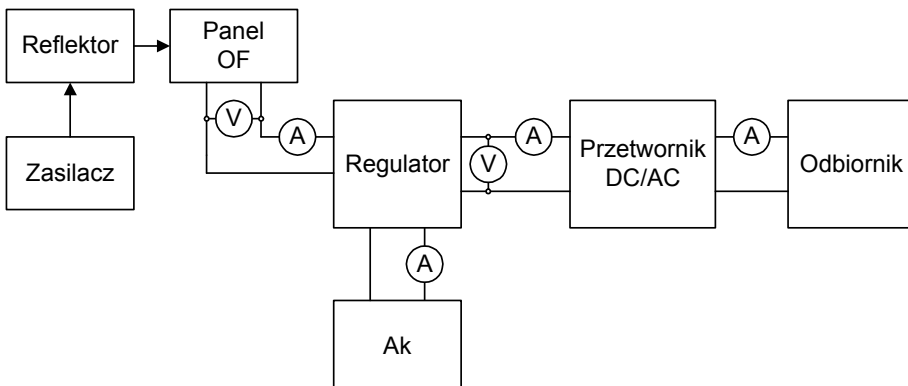
1. Przedstaw podstawowe własności półprzewodników samoistnych.
2. Jak otrzymuje się półprzewodniki niesamoistne? Omów ich własności.
3. Omów budowę złącza $p-n$.
4. Narysuj schemat złącza spolaryzowanego w kierunku przewodzenia/zaporowo i przedstaw jego własności.
5. Wymień rodzaje diod, przedstaw ich charakterystyki napięciowo-prądowe i wyjaśnij mechanizm ich działania oraz podaj przykłady zastosowania.
6. Wyjaśnij na czym polega zjawisko fotowoltaiczne. Podaj przykłady jego praktycznego wykorzystania.

6.7. Ćwiczenie laboratoryjne

Celem ćwiczenia jest zbadanie własności krzemowej baterii słonecznej, zbudowanej z czterech krzemowych złączy $p-n$ i wyznaczenie jej sprawności. Dokonujemy tego badając:

- zależność prądu zwarcia I od napięcia rozwarcia U przy różnych natężeniach L światła padającego na baterię,
- zależność prądu zwarcia I i napięcia rozwarcia U od natężenia światła L .

Schemat obwodu elektrycznego, w oparciu o który dokonuje się w/w pomiarów przedstawiono na rys. 6.13.



Rys. 6.13. Schemat układu pomiarowego do charakterystyki ogniwa fotowoltaicznego, gdzie: OF – ogniwo fotowoltaiczne, Ak – akumulator

Rys. 6.13 przedstawia aparaturę pomiarową stosowaną w tym ćwiczeniu. Obwód baterii słonecznej B zamyka rezystor R , o zmiennej oporności. Prąd zwarcia I mierzy amperomierz A , a napięcie rozwarcia U woltomierz V . Bateria oświetlana jest lampą żarową L . Jeżeli układ pomiarowy jest rozłączony, to łączyć można jego elementy zgodnie z rys. 6.13. Po uzyskaniu zezwolenia od opiekuna dydaktycznego przystępuje się do przeprowadzania wskazanych przez niego pomiarów.

6.7.1. Pomiar charakterystyki $I = f(U)$

- ustawić baterię w odległości $x = 45$ cm, lub $x = 50$ cm od lampy.
- suwak rezystora R (opornicy suwakowej) ustawić w jednym z krańcowych położenia. Oświetlamy baterię i zapisujemy wskazania amperomierza i woltomierza. W trakcie pomiaru bateria może być chłodzona dmuchawą.
- przesuwając powoli suwak rezystora zmieniać oporność R . Zapisać wartości U i I , które wskazują woltomierz i amperomierz. Pomiar przeprowadzać dla całego zakresu zmienności oporu rezystora. Wyniki zapisać w odpowiedniej tabeli.

Uwaga! Położenie suwaka powinno być tak dobierane, aby można było dokonywać zmian napięcia U np. co $0,05$ V w zakresie od $1,7$ V do $2,1$ V, a w zakresie od 0 do $1,7$ V krok pomiarowy można zwiększyć do np. $0,1$ lub $0,15$ V.

- czynności wymienione w punkcie b) i c) powtarzać dla kilku większych odległości baterii od lampy np. $60, 70, 80, 90$ cm. Pomiar przeprowadzone przy tych odległościach nie wymagają chłodzenia baterii dmuchawą. Wyniki zanotować w tabeli 6.1.

Tab. 6.1. Wyniki pomiarowe

| Lp. | x = | | | x = | | | x = | | | x = | | | x = | | |
|-----|-----------|---|---|-----------|---|---|-----------|---|---|-----------|---|---|-----------|---|---|
| | U | I | P | U | I | P | U | I | P | U | I | P | U | I | P |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

- czynności wymienione w punkcie: b) i c) powtarzać dla kilku kątów nachylenia modułu PV w stosunku do powierzchni urządzenia oświetlającego.

Tab. 6.2. Wyniki pomiarowe

| Lp. | $\alpha = \dots\dots\dots$ | | | $\alpha = \dots\dots\dots$ | | | $\alpha = \dots\dots\dots$ | | | $\alpha = \dots\dots\dots$ | | | $\alpha = \dots\dots\dots$ | | |
|-----|----------------------------|---|---|----------------------------|---|---|----------------------------|---|---|----------------------------|---|---|----------------------------|---|---|
| | U | I | P | U | I | P | U | I | P | U | I | P | U | I | P |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

f) wyniki pomiarowe zanotować w tabeli 6.2.

g) na podstawie wyników pomiarowych obliczyć $P = U \cdot I$ oraz wykreślić charakterystykę $P = f(\alpha)$

h) na podstawie pomiarów wykreślić należy charakterystykę $I = f(U)$ dla różnych wartości α .

Opracować wnioski.

Literatura

1. Badźmirowski K., Kołodziejski J., Spiralski L., Stolarski E.: *Miernictwo elementów półprzewodnikowych i układów scalonych*. WKiŁ, Warszawa 1984.
2. Bolkowski S.: *Teoria obwodów elektrycznych*, WNT, Warszawa 2003.
3. Cichoński D.: *Sterownik bipolarnych silników krokowych*. Praktyczny Elektronik 9/97.
4. Duer S.: *Laboratorium Elektrotechniki Samochodowej, Tom 1*. Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009.
5. Duer S., Zajkowski K.: *Laboratorium Elektrotechniki Samochodowej, Tom 2*. Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2010.
6. Duer S.: *Laboratorium mechatroniki samochodowej*, Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2014.
7. German-Gałkin S., Gnat K.: *Ćwiczenia z elektrotechniki w Matlabie i Simulinku. Cz.1. Obwody prądu zmiennego*. WSM, Szczecin 2002.
8. Głocki W.: *Układy cyfrowe*, WSiP, Warszawa 2005.
9. Golde W., Śliwa L.: *Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowania*. WNT, Warszawa 1982.
10. Hempowicz P. (i inni): *Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków*, WNT, Warszawa 2004.
11. *Informatory techniczne Bosch*, WKiŁ, Warszawa 2005.
12. Kalisz J.: *Podstawy elektroniki cyfrowej*, WKŁ, Warszawa 1991.
13. Kamiński G., Kosk J., Przyborowski W.: *Laboratorium maszyn elektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
14. Kosmol J.: *Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie*. WNT, Warszawa 1998.

15. Klugmann-Radziemska E.: *Fotowoltaika w teorii i praktyce*. Wyd. btc, Legionowo 2010.
16. Klugmann-Radziemska E.: *Odnawialne źródła energii, przykłady obliczeniowe*. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
17. Koziej E., Sochoń B.: *Elektrotechnika i elektronika*. PWN, Warszawa 1996.
18. Kowalowski H.: *Maszyny i napęd elektryczny*, PWN, Warszawa 1979.
19. Krakowski M.: *Elektrotechnika teoretyczna*. PWN, Warszawa 1999.
20. Kulka Z., Nadachowski M.: *Zastosowania wzmacniaczy operacyjnych*. WNT, Warszawa 1986.
21. Kurdziel R.: *Podstawy elektrotechniki*. WNT, Warszawa 1972.
22. Kurzawa S.: *Liniowe obwody elektryczne*. PWN, Warszawa 1972.
23. Lenart B., Sieradzan R.: *Prostowanie i stabilizacja prądów i napięć*. Wyd. MON, Warszawa 1960.
24. Łobos T., Markiewicz H.: *Urządzenia elektroenergetyczne*. Wyd. SiP, Warszawa 2004.
25. Masewicz T.: *Radioelektronika dla praktyków*. WKiŁ, Warszawa 1986.
26. Miedziński B.: *Elektrotechnika Podstawy i instalacje elektryczne*, PWN Warszawa 2000.
27. Nosal Z., Baranowski J.: *Układy elektroniczne cz. 1. Układy analogowe liniowe*. WNT, Warszawa 1998.
28. Nowicz R.: *Laboratorium Elektrotechniki*. Politechnika Łódzka, Łódź 1993.
29. Pawlina W.: *Laboratorium elektrotechniki i elektroniki*, WSI, Koszalin 1994.
30. Przeździecki F.: *Elektrotechnika ogólna dla nieelektryków*, PWN, Warszawa 1975.
31. Smyczek J. i inni: *Podstawy elektrotechniki i elektroniki dla nieelektryków. Laboratorium Tom 1*, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2007.
32. Smyczek J. i inni: *Podstawy elektrotechniki i elektroniki dla nieelektryków. Laboratorium Tom 2*, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009.

-
33. Stein Z.: *Maszyny elektryczne*. Wyd. WSIP, Warszawa 1999.
 34. Strojny J.: *Vademecum Elektryka*. Biblioteka Nosiw SEP, Warszawa 2004.
 35. Strojny J. i inni: *Podręcznik INPE dla elektryków, Zeszyt 1, Instalacje Elektryczne*. Miesięcznik SEP. Informacje o normach i przepisach elektrycznych. INPE, Warszawa 2004.
 36. Tietze U., Schenk W.: *Układy półprzewodnikowe*. WNT, Warszawa 1999.
 37. Zajkowski K., Duer S., Sokołowski S.: *Laboratorium Elektrotechniki i Elektroniki*. Wyd. Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2013.
 38. Żółtowski W.: *Osprzęt elektryczny pojazdów mechanicznych*. Wyd. WATR, Bydgoszcz 1999.
 39. [www:pradniceelektryczne.pl](http://www.pradniceelektryczne.pl)
 40. [www:maszynyelektryczne.pl](http://www.maszynyelektryczne.pl)
 41. [www:focus.pl](http://www.focus.pl)
 42. [www:systemstartstop.pl](http://www.systemstartstop.pl)