

PODSTAWY ELEKTROTECHNIKI
zagadnienia wybrane

Biblioteka elektryka wiejskiego

Stanisław Krakowiak

**PODSTAWY
ELEKTROTECHNIKI
zagadnienia
wybrane**

Warszawa 2006

Opiniodawca *prof. dr hab. inż. Zdzisław Trzaska*

Redaktor *mgr inż. Barbara Chojnowska-Ślisz*

ISBN 978-83-903048-1-6

© Wszelkie prawa zastrzeżone

Ośrodek Rzeczoznawstwa w Warszawie
Izby Rzeczoznawców Stowarzyszenia Elektryków Polskich
00-020 Warszawa, ul. Chmielna 6, lok. 6
tel. (022) 826-61-07
e-mail: irsep@neostrada.pl

Spis treści

Przedmowa	7
1. Zjawisko prądu elektrycznego	9
2. Podstawowe wielkości elektryczne	11
3. Rodzaje prądu elektrycznego	13
4. Pole elektryczne	16
5. Pole magnetyczne	19
6. Działanie cieplne prądu elektrycznego	24
7. Pole elektromagnetyczne	27
8. Procesy elektrochemiczne	31
9. Promieniowanie elektromagnetyczne	34
10. Obwody elektryczne	36
11. Obwody prądu stałego	41
12. Podstawowe przebiegi w obwodzie prądu przemiennego	47
13. Właściwości obwodu prądu przemiennego	51
14. Obwody <i>RLC</i>	57
15. Moc w obwodzie prądu przemiennego	62
16. Przebiegi odkształcone	65
17. Obwody trójfazowe	67
Indeks podstawowych pojęć	75

Przedmowa

Pragnąc być użytecznym członkiem społeczeństwa, należy na jego rzecz pracować umysłowo lub fizycznie, wytwarzać lub świadczyć usługi, twórczo lub naśladowczo, wykonując odpowiednie zadania. Zawsze jednak powinno się to odbywać rozumnie i rzetelnie. Jeśli ma to być praca w dziedzinie techniki, rzetelność wymaga posiadania pełnego zasobu wiedzy nie tylko praktycznej, lecz również poznawczej.

Wiedza poznawcza umożliwi bowiem zrozumienie wykonywanych zadań i czynności, a to jest warunkiem odpowiedzialnej pracy. Tymczasem współczesny rozwój techniki opiera się na coraz szerszej i głębszej wiedzy poznawczej, zwłaszcza w takiej dziedzinie, jaką jest elektrotechnika. Nie można więc podejmować jakiegokolwiek działalności w tym zakresie bez przyswojenia sobie odpowiednich wiadomości podstawowych, wymaganych na danym poziomie działalności zawodowej.

Niniejszy podręcznik oraz oparte na nim wykłady i pokazy mają służyć temu celowi. Wskazane jest wcześniejsze zapoznanie się z materiałem wykładowym zawartym w podręczniku. Wykłady są bowiem najlepszą szansą wyjaśnienia wszystkich nasuwających się niejasności czy wątpliwości. Należy tę możliwość wykorzystać na bieżąco, gdyż tylko systematyczne przyswajanie sobie materiału wykładowego zapewni jego opanowanie i zapamiętanie. A to jest najważniejszy cel szkolenia.

Autor

1. Zjawisko prądu elektrycznego

Współczesna cywilizacja, nazywana często techniczną, wytwarza coraz większą liczbę różnych urządzeń wykorzystujących energię elektryczną, związaną z przepływem prądu elektrycznego. Prąd elektryczny może bowiem wywoływać takie zjawiska, jak ciepło, jarzenie gazów, powstawanie pola magnetycznego i inne.

Zjawisko **prądu elektrycznego** powstaje w wyniku przepływu ładunków elektrycznych, a więc niezmiernie małych cząstek materii – elektronów lub jonów – które mają elementarny ładunek elektryczności.

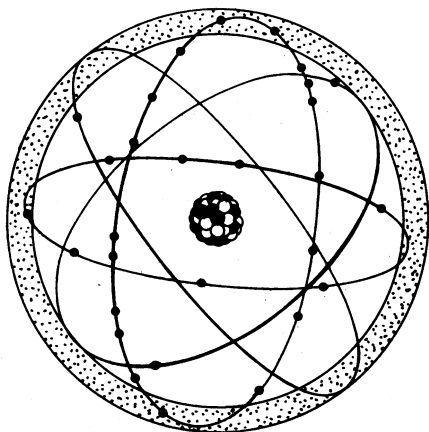
Każda materia składa się z olbrzymiej ilości nadzwyczaj małych części składowych: atomów i cząsteczek, związanych ze sobą siłami atomowymi. **Atomy** są najmniejszymi częściami pierwiastków chemicznych (miedzi, węgla, tlenu, wapnia i ponad stu innych). **Cząsteczki** powstają w wyniku chemicznego połączenia ze sobą atomów jednego lub wielu różnych pierwiastków. To one są najmniejszymi cząstkami złożonych substancji o różnych właściwościach (jak na przykład woda, ciała organiczne, stopy metalowe, tworzywa termoplastyczne).

Zgodnie ze współczesną wiedzą, **atom** jest zbudowany z jeszcze mniejszych cząstek, zwanych elementarnymi: **elektronów, protonów i neutronów**. Protony i neutrony tworzą **jądro** atomu, wokół którego krążą bardzo lekkie elektrony, stanowiące tak zwaną **powłokę elektronową** (rys. 1).

Elektrony są obdarzone elementarnym ładunkiem elektrycznym ujemnym, a protony – takim samym ładunkiem, lecz dodatnim. Zwykle liczba elektronów w powłoce odpowiada liczbie protonów w jądrze atomu. Liczba protonów w jądrze określa rodzaj pierwiastka, a liczba protonów i neutronów decyduje o masie atomowej.

Elektrony tworzące powłokę wypełniają te miejsca na kolejnych orbitach, począwszy od najbliższej jądra. Ogromne znaczenie dla zjawisk elektrycznych (jak też chemicznych) mają elektrony na ostatniej, zewnętrznej orbicie, zwanej **orbitą walencyjną**.

Jeżeli w powłoce atomu występuje tyle samo elektronów, ile protonów zawiera jego jądro, atom taki jest obojętny elektrycznie. Jeśli natomiast równo-



Rys. 1. Budowa atomu miedzi

☼ obszar powłoki elektronowej

- elektrony na orbitach
- protony } w jądrze
- neutrony }

waga ta zostanie zakłócona, to występuje nadmiar lub niedobór elektronów. Wówczas atom w pierwszym przypadku jest obdarzony ujemnym ładunkiem elektrycznym, w drugim zaś dodatnim. Atomy takie nazywa się **jonami**: **anionami**, gdy jest naładowany ujemnie i **kationami**, gdy jest naładowany dodatnio. Kationy powstają w wyniku oderwania części elektronów od atomów. Elektrony takie występują w substancji obok atomów; nazywa się je **elektronami swobodnymi**. Elektrony swobodne mogą być przechwytywane przez pobliskie atomy i w ten sposób powstają aniony.

W niektórych ciałach stałych występują duże ilości elektronów swobodnych, które pod działaniem odpowiednich sił przemieszczają się jak chmura w pustych przestrzeniach międzyatomowych. Zjawisko to wywołuje **prąd elektryczny**, nazywany **elektronowym**. Ciała takie nazywa się przewodzącymi lub **przewodnikami** prądu elektrycznego. W cieczech i gazach mogą występować jony (cząstki obdarzone ładunkiem), które przemieszczają się pod działaniem odpowiednich sił. Wywołuje to **prąd elektryczny**, nazywany **jonowym**. Ciała te są więc również przewodnikami prądu.

Zwraca się uwagę na to, że odległości elektronów w powłoce atomu od jądra oraz odległości między atomami w cząsteczkach, a także odległości wzajemne między cząsteczkami są bardzo duże w stosunku do ich wymiarów. W strukturze każdego ciała występują więc puste przestrzenie, niemniej jednak dzięki działaniu sił wewnątrzatomowych i wewnątrzcząsteczkowych opisana struktura ma charakter trwały.

W ciałach stałych niezawierających elektronów swobodnych lub w cieczech i gazach niezjonizowanych prąd elektryczny nie może powstać. Materiały te nazywa się nieprzewodzącymi lub **dielektrykami** (izolatorami elektrycznymi). W nich również pod wpływem sił elektrycznych może nastąpić przesunięcie elektronów, ale tylko w obrębie atomów. Powoduje to odkształcenie orbit, po których krążą lekkie elektrony względem jąder atomowych masywnych i dlatego nieruchomych. W pewnych obszarach atomów występuje wtedy przewaga ujemnych ładunków elektrycznych elektronów, a w innych – dodatnich ładunków protonów w jądrach. Nazywa się to **polaryzacją** atomów lub cząsteczek, a te po spolaryzowaniu nazywa się **dipolami**.

Takie bardzo małe, trwające tylko tysięczne części sekundy, przesunięcia powłoki elektronowej w atomach dielektryków, nazywa się **prądem elektrycznym przesunięcia**. Wywołuje on podobne zjawiska jak prąd elektronowy, tyle że bardzo krótkotrwałe.

2. Podstawowe wielkości elektryczne

Skutki wywoływane przepływem prądu elektrycznego zależą od intensywności przemieszczania się ładunków elektrycznych, czyli od **natężenia prądu elektrycznego**. Wielkość ta odpowiada ilości ładunków elektrycznych przepływających w danym miejscu przewodnika w jednostce czasu. Do określenia ilości ładunku elektrycznego elektronów trzeba by użyć bardzo dużych liczb. Z tego względu wprowadzono jednostkę zwaną **kulombem** (oznaczoną literą C), odpowiadającą ilości $6 \cdot 10^{18}$ (6 miliardom miliardów) elektronów. Jednostką miary natężenia prądu elektrycznego w układzie SI jest **amper** (w skrócie A), odpowiadający przepływowi ładunku 1 kulomba w ciągu 1 sekundy. Na przykład żarówka do świecenia potrzebuje przepływu prądu o natężeniu dziesiątych części ampera, średniej wielkości silnik elektryczny do obracanie się wymaga prądu o natężeniu kilku amperów, a ogrzewacz elektryczny do ogrzewania pomieszczenia – prądu o natężeniu kilkunastu amperów.

Prąd elektryczny, przepływając, wykonuje pracę, co oznacza zużywanie **energii elektrycznej**. Energię tę wyraża się w **watosekundach** (W·s) lub najczęściej w jednostkach 3 600 000 razy większych – **kilowatogodzinach** (kWh).

Energia zużywana w jednostce czasu wyznacza moc; w tym przypadku **moc elektryczną**. Wyraża się ją w **watach** (W) lub w tysiąc razy większych jed-

nostkach – **kilowatach** (kW). Moc określa zdolność urządzeń do wykonania zadań. Znając moc urządzenia elektrycznego i czas jego użytkowania, po przemnożeniu obu wielkości wyznacza się zużycie energii elektrycznej. Na przykład grzejnik o mocy 2 kW włączony przez 3 godziny (3 h) zużywa energię elektryczną $2 \text{ kW} \cdot 3 \text{ h} = 6 \text{ kWh}$.

Kolejną podstawową wielkością elektryczną jest **napięcie**. Odpowiada ono energii zużywanej na przeniesienie jednostkowego ładunku elektrycznego (np. elektronu) z jednego miejsca do drugiego. Należy więc zawsze podać między jakimi punktami jest ono określone. By tego uniknąć, wprowadzono pojęcie **potencjału** elektrycznego. Jest to napięcie w danym miejscu względem ziemi, przy czym zakłada się, że ziemia ma zawsze potencjał równy zeru. Napięcie między określonymi punktami odpowiada więc różnicy potencjałów w tych punktach.

Napięcie i potencjał wyraża się w **woltach** (w skrócie V) lub w tysiąc razy większych jednostkach – **kilowoltach** (kV). Warto wiedzieć, że większość domowych urządzeń elektrycznych pracuje przy napięciu 230 V, choć silniki elektryczne o większej mocy są zasilane napięciem 400 V. Natomiast przenośne aparaty elektryczne pracują na ogół przy napięciu od 1,5 V do 9 V.

Między omówionymi wielkościami występują następujące zależności:

$$\begin{aligned} W &= P \cdot t \\ P &= U \cdot I \end{aligned}$$

w których:

W – energia elektryczna ($W \cdot s$),

P – moc (W),

U – napięcie (V),

I – natężenie prądu (A),

t – czas (s).

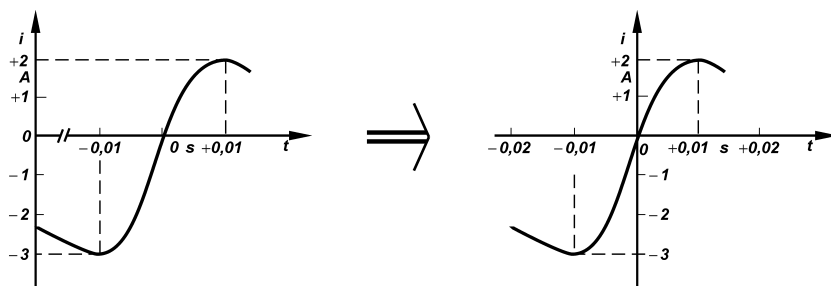
Mnożąc napięcie (w woltach) przez natężenie prądu (w amperach), uzyskuje się moc (w watach). Dzielicz natomiast moc (w watach) przez napięcie (w woltach), uzyskuje się w wyniku wartość natężenia prądu (w amperach). Na przykład żarówka o mocy 75 W na napięciu 230 V pobiera prąd o natężeniu $75 \text{ W} : 230 \text{ V} = 0,33 \text{ A}$.

3. Rodzaje prądu elektrycznego

Prądy elektryczne różnią się w zależności od tego, jak zmienia się w czasie ich natężenie. Można to przedstawić wykreślnie, jak na rysunku 2, odkładając na osi pionowej wartości natężenia prądu, a na osi poziomej – czas.

Prąd może płynąć przez dany przekrój przewodnika w dwóch kierunkach; na wykresie zaznacza się to, odkładając wartość natężenia w górę lub w dół od poziomej osi, czyli jako wartość dodatnią lub ujemną. Przyjęto uważać za dodatni kierunek prądu ten, który jest przeciwny do kierunku przepływu elektronów, ponieważ mają one ładunek elektryczny ujemny.

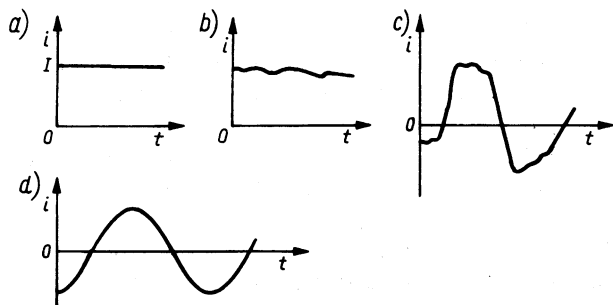
Wykres czasowy prądu na rysunku 2 odczytuje się następująco. W chwili uznanej za początkową ($t = 0$ s) prąd nie płynie. Po upływie czasu $t = 0,01$ s = 10 ms osiąga on natężenie prądu 2 A, a wcześniej (przed 20 milisekundami) w chwili $t = -10$ ms miał wartość 3 A i płynął w kierunku przeciwnym.



Rys. 2. Przykładowy przebieg zmian natężenia prądu elektrycznego (przedstawiony w różny sposób)

Na rysunku 3 pokazano cztery przykładowe wykresy zmian natężenia prądu w funkcji czasu. W pierwszym przypadku natężenie prądu nie zmienia się z upływem czasu; mówi się wtedy, że jest to **prąd stały**. W drugim przypadku natężenie prądu zmienia się w czasie, ale prąd nie zmienia kierunku – jest to prąd jednokierunkowy. Jeśli występuje zmiana kierunku przepływu prądu, prąd nazywa się zmiennym – w pewnych przedziałach czasu prąd płynie w jednym kierunku, a w innych – prąd płynie w przeciwnym kierunku. W ostatnim przypadku przedstawiono szczególny przebieg prądu zmiennego, czyli prąd sinusoidalnie zmienny. Jest on powszechnie stosowany i nazywa się zwykłe **prądem przemiennym**.

Jak wynika z rysunku 3d, prąd zaczyna płynąć w jednym kierunku i jego natężenie stopniowo wzrasta do wartości maksymalnej, następnie natężenie

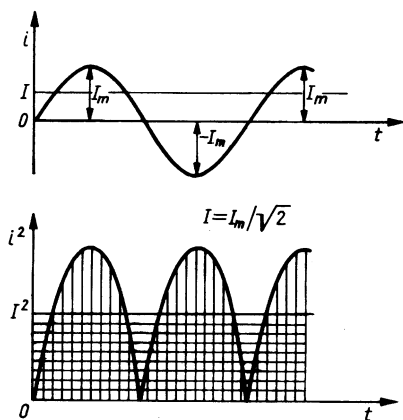


Rys. 3. Przykłady przebiegów prądu: a) stałego; b) wyprostowanego; c) zmiennego; d) sinusoidalnie zmiennego

prądu maleje, aż prąd przestaje płynąć, po czym zaczyna znów płynąć, lecz w przeciwnym kierunku, a jego natężenie wzrasta do takiej samej wartości jak poprzednio (choć o przeciwnym znaku) i z kolei maleje, aż do wartości zerowej, po czym cykl się powtarza. Opisane zmiany powtarzają się w taki sam sposób w przedziałach czasu, nazywanych **okresem**, oznaczanych symbolem T .

Wykorzystywane w elektrotechnice **prądy sinusoidalnie zmienne** mają najczęściej okres zmian równy $1/50$ s. Zmieniają one zatem kierunek przepływu 100 razy w ciągu sekundy. Często zamiast okresu zmian stosuje się wielkość odwrotną, zwaną **częstotliwością** $f = 1/T$. Jej jednostką jest **herc** (w skrócie Hz). Na przykład prąd o okresie $T = 1/50$ s ma częstotliwość $f = 50$ Hz.

W przypadku prądów sinusoidalnie zmiennych ich wartości ulegają ciągłym i szybkim zmianom (rys. 4). W praktyce stosuje się tak zwane **wartości sku-**



Rys. 4. Wartości maksymalna i skuteczna natężenia prądu przemiennego oraz przebieg wartości prądu podniesionej do kwadratu

teczne natężenia prądu – oznaczane jako I – oraz napięcia U (w elektrotechnice wartości te oznacza się wielką literą bez żadnego indeksu dolnego).

Wartość skuteczną natężenia każdego okresowego prądu sinusoidalnie zmiennego określa się w taki sposób, aby odpowiadała ona wartości natęże-

nia prądu stałego, powodującego takie same efekty cieplne. Na przykład, jeśli grzejnik zasilany prądem stałym o natężeniu 5 A nagrzewa się tak samo jak przy zasilaniu prądem sinusoidalnie zmiennym w tym samym czasie, to mówi się, że ten prąd ma natężenie o wartości skutecznej równej również 5 A. Jest to wartość stała, uśredniona dla całego okresu skwadratowanego przebiegu zmian natężenia prądu. Okazuje się, że wartość ta jest $\sqrt{2}$ (czyli 1,42) razy mniejsza od wartości maksymalnej I_m , zwanej amplitudą. A zatem wartość skuteczną prądu wyraża się wzorem

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Podobnie też wartość skuteczna napięcia ma postać

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Wraz ze zmianami natężenia prądu i wartości napięcia zmienia się także moc. Moc jest bowiem iloczynem natężenia prądu i napięcia w przypadku ich wartości chwilowych. A zatem wartość chwilowa mocy $p = u \cdot i$. Nie zawsze dotyczy to wartości skutecznych prądu I oraz napięcia U , gdyż tylko w szczególnym przypadku moc $P = U \cdot I$.

W codziennej praktyce używa się pewnych skrótów myślowych. Na przykład zamiast określenia „natężenie prądu” lub „wartość skuteczna prądu zmiennego” mówi się krótko „prąd” i to pojęcie stosuje się w dalszych rozdziałach książki. Podobnie zamiast „uśredniona wartość mocy” wprowadza się określenie „moc”. Zwykło się „prąd wyprostowany” nazywać „prądem stałym”, a prąd sinusoidalnie zmienny – „prądem przemiennym”.

Zalety prądu sinusoidalnie zmiennego (o czym będzie mowa dalej) powodują, że jest on powszechnie stosowany do zasilania takich odbiorników, jak lampy, silniki i grzejniki elektryczne. Prąd stały lub wyprostowany jest wykorzystywany w aparatach i przenośnych urządzeniach elektrycznych, na przykład w odbiornikach radiowych i telewizyjnych, lampach, golarkach, a także w samochodach i galwanotechnice.

4. Pole elektryczne

Przestrzeń, w której występują siły oddziałujące na ładunki elektryczne, nazywa się **polem elektrycznym**. Pole takie powstaje wskutek rozdzielania różnoimiennych (o różnych znakach) ładunków elektrycznych w wyniku odpowiednich działań mechanicznych, chemicznych, cieplnych lub świetlnych.

Miejsca nagromadzenia ładunków jednoimiennych, między którymi występuje pole elektryczne, nazywa się **elektrodami** lub **biegunami** (dodatnimi lub ujemnymi, zależnie od znaku ładunków). Bezpośrednią przyczyną rozdzielania cząstek dodatnich lub ujemnych nazywa się **siłą elektromotoryczną** wywołującą napięcie i wyrażoną w woltach. Aparat lub urządzenie, w którym to zachodzi, zwie się **źródłem napięcia**.

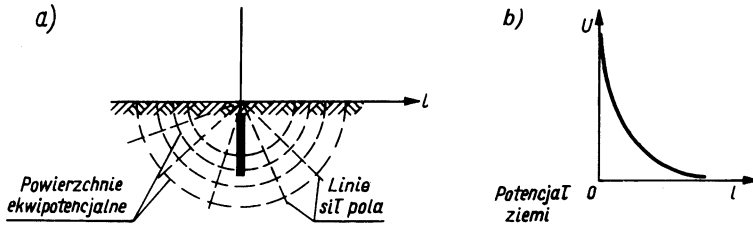
W celu scharakteryzowania stopnia oddziaływania różnych pól na punktowy ładunek elektryczny q stosuje się pojęcie **natężenia pola elektrycznego**. Oznacza się je literą E i mierzy w woltach na metr (V/m). Siłę F działającą na ten ładunek znajdujący się w polu elektrycznym wyraża się wzorem

$$F = q \cdot E$$

W różnych miejscach pola występuje natężenie pola elektrycznego o różnej wartości i kierunku. Linie poprowadzone od jednego bieguna pola do drugiego (między punktami o różnym potencjale), stycznie do kierunku natężenia pola w kolejnych punktach, nazywa się **liniami sił**. Tam, gdzie się one zagęszczają, natężenie pola jest większe. Jeśli w polu elektrycznym występują swobodne ładunki elektryczne, poruszają się one wzdłuż linii sił, tym szybciej, im większe jest natężenie pola. Natężenie pola E jest tym większe, im jest wyższe napięcie U między biegunami i mniejsza odległość x między nimi. Wynika to ze wzoru

$$E = \frac{U}{x}$$

Punkty, w których występuje takie samo napięcie pola, tworzą powierzchnie prostopadłe do linii sił pola, nazywane powierzchniami ekwipotencjalnymi (jednakowego potencjału). Te na przekroju pola dokonany wzdłuż linii sił wyznaczają linie ekwipotencjalne. Między powierzchniami ekwipotencjalnymi występuje określone napięcie elektryczne, które zsumowane wzdłuż linii sił na całej odległości między biegunami pola odpowiada napięciu wytworzonemu między tymi biegunami.

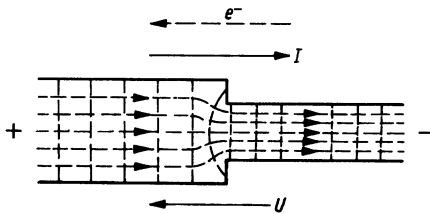


Rys. 5. Pole elektryczne rozptyłu prądu z uziomu (a) i rozkład napięcia na powierzchni ziemi przy uziomieniu (b)

Pole elektryczne występujące w ośrodku przewodzącym jest określane jako **pole przepływowe**, gdyż wywołuje przepływ prądu elektrycznego.

Na rysunku 5 przedstawiono przekrój pola rozptyłu prądu z uziomu rurowego do ziemi. Jak widać napięcie między elektrodą uziomu a ziemią rozkłada się na pewnej odległości.

Na rysunku 6 pokazano rozkład linii sił i linii ekwipotencjalnych w przewodzie o zmiennym przekroju. W obu odcinkach przewodu występuje tak zwane jednorodne pole elektryczne, którego natężenie we wszystkich punktach jest takie samo, równe napięciu między liniami ekwipotencjalnymi, podzielonemu przez odległość między nimi.

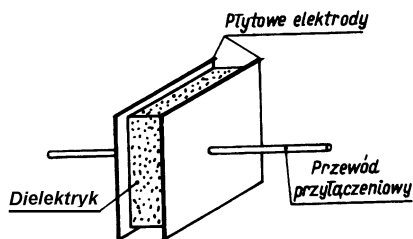


Rys. 6. Przepływowe pole elektryczne w przewodniku

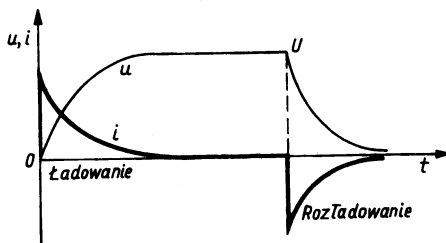
Elektrony swobodne w ośrodku przewodzącym przepływają w polu elektrycznym do elektrody dodatniej – podobnie jak kationy w zjonizowanym ośrodku płynnym – aniony zaś do elektrody ujemnej. Za dodatni kierunek prądu przyjęto kierunek ruchu dodatnich ładunków elektrycznych od elektrody dodatniej do ujemnej. Jest on przeciwny do kierunku przepływu elektronów, czyli najmniejszych ładunków ujemnych, oznaczonych e^- . Natomiast za dodatni kierunek napięcia przyjęto kierunek ku biegunowi o wyższym potencjale, czyli od elektrody ujemnej do dodatniej, a więc przeciwnie do kierunku prądu, co zaznaczono na rysunku 6.

Pole elektryczne wytworzone między elektrodami umieszczonymi w ośrodku izolacyjnym (np. w powietrzu, oleju lub porcelanie) nazywa się **statycznym polem elektrycznym**. Pole to wywołuje krótkotrwały przepływ prądu

przesunięcia, który doprowadza do zgromadzenia się ładunków elektrycznych na elektrodach w sposób trwały, dodatnich po stronie wyższego potencjału, a ujemnych na drugiej elektrodzie. Taki układ (rys. 7) magazynuje energię elektryczną przesunięcia ładunków i nazywa się **kondensatorem** elektrycznym. Energię tę wyzwala się przez połączenie przewodem obu elektrod, co wywołuje przepływ krótkotrwałego prądu wyrównania ładunków, w kierunku przeciwnym do prądu przesunięcia (rys. 8).

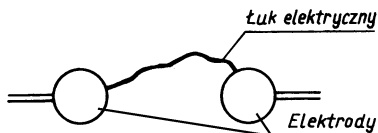


Rys. 7. Kondensator płaski



Rys. 8. Narastanie i obniżanie się napięcia na kondensatorze przy ładowaniu oraz rozładowaniu prądem i

Natężenie statycznego pola elektrycznego utrzymuje trwale powłoki elektronowe atomów ośrodka izolacyjnego w wymuszonym stanie odkształcenia, tym silniejszego, im większa jest wartość natężenia pola. Po przekroczeniu tzw. **wytrzymałości elektrycznej** następuje wyrwanie elektronów z zewnętrznych orbit atomów, co prowadzi do przepływu między elektrodami prądu elektronowego, zwanego prądem przebicia lub **wyładowaniem elektrycznym**. Taki jest na przykład mechanizm powstawania krótkotrwałej iskry elektrycznej, rozładowującej kondensator, która może się przekształcić w łuk elektryczny przy zasilaniu kondensatora z zewnętrznego źródła energii elektrycznej (rys. 9).



Rys. 9. Kulowy kondensator powietrzny, w którym nastąpiło wyładowanie elektryczne

W przeciwieństwie jednak do przepływu prądu elektronowego w ośrodku przewodzącym (w którego budowie wewnętrznej występują elektrony swobodne) prąd przebicia w ośrodku izolacyjnym jest związany ze zmianą jego struktury na przewodzącą.

5. Pole magnetyczne

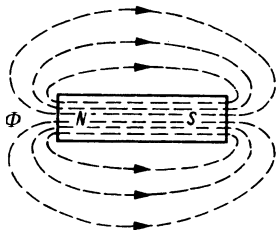
Każdemu elektrycznemu polu przepływowemu towarzyszy zawsze **pole magnetyczne**, w którym występują siły magnetyczne, skierowane prostopadle do kierunku przepływu prądu. Istnienie pola magnetycznego jest więc związane z ruchem ładunków elektrycznych. Elektrony krążące wokół jądra atomów obracające się same wokół swych osi wytwarzają tak zwany **moment magnetyczny**. Oznacza to, że atomy i cząsteczki można traktować jak niewielkie magnesy elementarne słabsze lub silniejsze. Odpowiednie ich zgrupowanie i ustawienie w materiale decyduje o jego właściwościach magnetycznych.

Z tego względu rozróżnia się materiały diamagnetyczne, paramagnetyczne i ferromagnetyczne. W **materiałach diamagnetycznych**, do których należą na przykład miedź i woda, elementarne magnesy ustawiają się w taki sposób, że ich działanie magnetyczne znosi się, a przy umieszczeniu ich w zewnętrznym polu magnetycznym nie zmieniają go lub tylko je nieco osłabiają. **Materiały paramagnetyczne**, takie jak aluminium i powietrze, wzmacniają zewnętrzne pole magnetyczne, ale w ograniczonym stopniu. Natomiast **materiały ferromagnetyczne**, przede wszystkim żelazo i jego stopy, wpływają na silne jego wzmocnienie przez odpowiednio uporządkowane ustawienie się elementarnych magnesów w ich strukturze.

Zależnie od budowy krystalicznej tych materiałów dzieli się je na twarde i miękkie. Materiały magnetycznie miękkie po usunięciu z obszaru zewnętrznego pola magnetycznego wracają do poprzedniego stanu chaotycznego układu magnesów elementarnych. Twarde materiały ferromagnetyczne natomiast zachowują na stałe uporządkowany ich układ. W ten sposób powstają magnesy trwałe, wytwarzające własne, statyczne pole magnetyczne. Jednak nagrzewanie lub udary mechaniczne naruszają uporządkowany układ elementarnych magnesów, w wyniku czego magnesy trwałe tracą swe właściwości.

Pole magnetyczne zewnętrzne jest wytwarzane przez magnesy. Mają one zawsze dwa bieguny: północny **N** i południowy **S**; w przyrodzie bowiem nie występują jednoimienne ładunki magnetyczne, jak to jest w przypadku ładunków elektrycznych. Linie sił pola magnetycznego przebiegają od jednego bieguna magnesu do drugiego, przy czym za dodatni uznaje się kierunek od bieguna **N** do **S**.

Na rysunku 10 pokazano przebieg linii sił pola magnetycznego wokół prostego magnesu trwałego. Linie te są widoczne, gdy magnes taki umieści się na papierze z opiłkami stalowymi, po wstrząśnięciu papieru. Wtedy bowiem opiłki ustawiają się wzdłuż linii sił pola i tylko opór tarcia nie pozwala na ich ruch ku biegunowi.

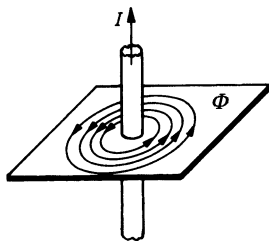


Rys. 10. Linie sił pola magnetycznego wokół sztabki magnesu trwałego

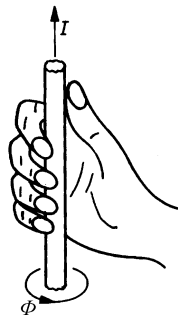
Podobnie jak w przypadku pola elektrycznego, siłę działania pola magnetycznego w poszczególnych miejscach charakteryzuje się **natężeniem pola magnetycznego**, które oznacza się literą H . Jednostką jego jest amper na metr (A/m). Wiązki linii sił pola magnetycznego nazywa się **strumieniem magnetycznym**. Wielkość tę oznacza się dużą literą grecką Φ (wym. fi). Jednostką strumienia magnetycznego jest weber (Wb).

Wokół każdego przewodnika, przez który przepływa prąd elektryczny, występuje pole magnetyczne. Można to stwierdzić, umieszczając poziomo kartkę papieru z opiłkami stalowymi w taki sposób, by przewodnik przebijał ją pionowo. Ukaże się wtedy obraz pola magnetycznego utworzony przez kołowe linie sił, jak na rysunku 11.

Kierunek działania tych sił w przypadku prostoliniowego przewodnika z prądem ustala się za pomocą **reguły prawej dłoni** (rys. 12).

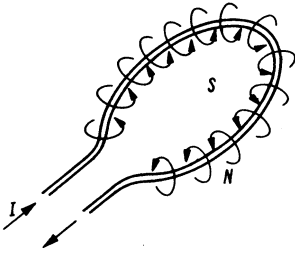


Rys. 11. Obraz linii sił pola magnetycznego po ułożeniu się opiłków wokół przewodu z prądem elektrycznym



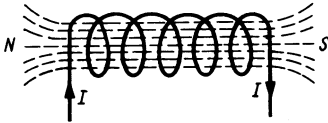
Rys. 12. Wyjaśnienie reguły prawej dłoni przy wyznaczaniu kierunku linii sił pola magnetycznego wokół przewodu z prądem

Jeśli przewodnik tworzy zwoj, jak na rysunku 13, to przy przepływie prądu elektrycznego pole magnetyczne wewnątrz zwoju będzie się zagęszczać. Powstanie układ magnetyczny, w którym biegun północny będzie z jednej strony płaszczyzny zwoju, biegun południowy zaś z drugiej.



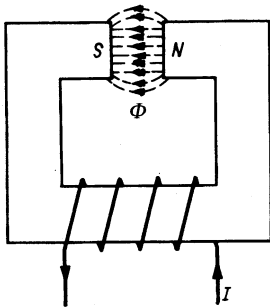
Rys. 13. Pole magnetyczne wytworzone przez zwoj przewodu z prądem

Uwzględniając, że pola magnetyczne dodają się lub odejmują zależnie od tego, czy ich linie sił są zgodne czy przeciwne, dla uzyskania silniejszego pola magnetycznego (inaczej ujmując – większego strumienia magnetycznego) można utworzyć z przewodnika tak zwaną cewkę o wielu zwojach nawiniętych w tym samym kierunku, co pokazano na rysunku 14.

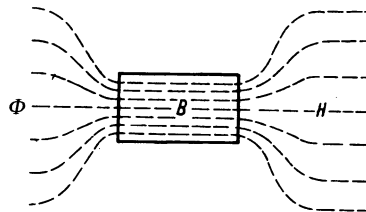


Rys. 14. Strumień magnetyczny długiej jednowarstwowej cewki, zwanej solenoidem

W ten sposób powstaje **elektromagnes**. Elektromagnes działa tym silniej – wytwarza silniejsze pole magnetyczne – im więcej ma zwojów i im większa jest wartość prądu przepływającego przez zwoje cewki. Strumień magnetyczny zależy od liczby tak zwanych amperozwojów. W celu wzmocnienia działania elektromagnesu cewkę umieszcza się na rdzeniu wykonanym z materiału ferromagnetycznego. Rdzeń taki może być różnie ukształtowany, na przykład jak na rysunku 15, dla uzyskania w ograniczonym obszarze silnego pola magnetycznego jednorodnego (o jednakowym natężeniu).



Rys. 15. Elektromagnes z rdzeniem: Φ – strumień magnetyczny w szczelinie powietrznej



Rys. 16. Skupienie linii sił pola magnetycznego w rdzeniu ferromagnetycznym: H – natężenie pola magnetycznego w powietrzu, B – indukcja magnetyczna w rdzeniu

Rdzeń umieszczony w cewce pod wpływem jej pola magnetycznego magnesuje się i wzmacnia to pole przez skupienie jego linii sił (rys. 16). W rdzeniu o określonym przekroju poprzecznym zamyka się strumień magnetyczny.

Strumień magnetyczny wyraża się wzorem

$$\Phi = B \cdot S_r$$

gdzie:

B – indukcja magnetyczna,

S_r – pole powierzchni rdzenia w m².

Indukcja magnetyczna B jest mierzona w teslach (w skrócie T), a odpowiada gęstości linii sił pola magnetycznego w rdzeniu i jest określona wzorem

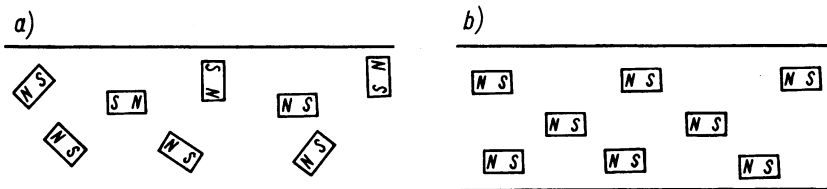
$$B = \mu \cdot H$$

gdzie μ (czyt. mi) jest cechą materiału magnetycznego, zwaną **przenikalnością magnetyczną**.

Dzięki temu, stosując rdzeń z bardzo dobrego materiału ferromagnetycznego, można wzmocnić natężenie pola H uzyskiwane w cewce bez rdzenia nawet 10 tysięcy razy i więcej.

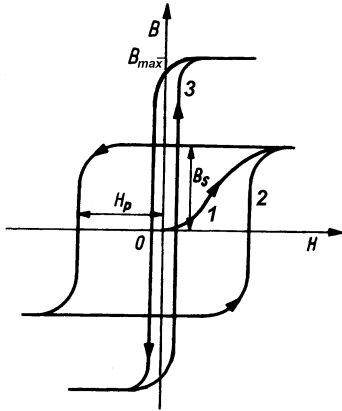
Wzmacnianie pola elektromagnesu polegające na stosowaniu rdzenia ferromagnetycznego jest wynikiem uporządkowania magnesów elementarnych w materiale tego rdzenia w sposób pokazany na rysunku 17. Takie obracanie cząstek materii rdzenia zależy od natężenia pola cewki H . Jednak ilość magnesów elementarnych jest skończona i dlatego przy pewnej wartości H następuje tzw. zjawisko nasycenia, kiedy dalsze zwiększanie natężenia pola H nie powoduje już wzrostu indukcji magnetycznej B .

Oznacza to, że przenikalność magnetyczna zależy od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego H . Zależność tę przedstawiają charakterystyki na



Rys. 17. Chaotyczny (a) i uporządkowany (b) po namagnesowaniu układ magnesów elementarnych w materiale ferromagnetycznym

rysunku 18. Wykres 3 odnosi się do miękkiego materiału ferromagnetycznego o dużej przenikalności magnetycznej, a wykres 2 do twardego materiału ferromagnetycznego o mniejszej wartości μ .



Rys. 18. Pętle histerezy: 2 – stali twardej, 3 – miękkiego materiału ferromagnetycznego o dużej przenikalności magnetycznej oraz 1 – charakterystyka magnesowania pierwotnego: B_s – magnetyzm szczątkowy, H_p – natężenie powściągające pola

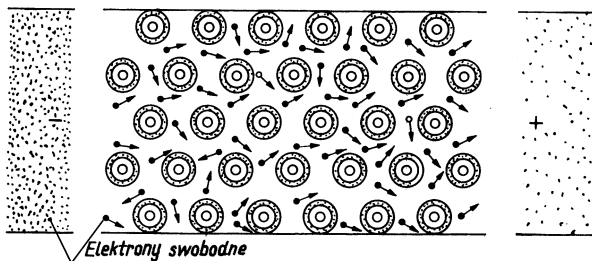
Wykres taki ma postać tzw. **pętli histerezy** i należy go odczytywać postępując wzdłuż zaznaczonych strzałek przebiegu. Jak widać, po umieszczeniu rdzenia w cewce i przyłączeniu jej do źródła napięcia rdzeń magnesuje się stopniowo w miarę wzrostu wartości prądu w cewce, co objawia się wzrostem indukcji magnetycznej B w rdzeniu, aż do stanu nasycenia B_{\max} . Po wyłączeniu napięcia rdzeń rozmagnesowuje się, ale nie całkowicie, gdyż przy natężeniu pola $H = 0$ pozostaje pewna wartość indukcji B_s , zwana pozostałością magnetyczną (magnetyzmem szczątkowym).

Aby rozmagnesować rdzeń całkowicie, należy spowodować przepływ przez cewkę prądu w przeciwnym kierunku o wartości wywołującej natężenie pola H_p , zwane powściągającym. Dalszy wzrost natężenia pola H cewki doprowadza do ponownego namagnesowania rdzenia, ale już przy przeciwnej biegowości i tak cykl ten powtarza się. Zjawisko to nazywa się **histerezą**.

Umieszczenie rdzenia z twardego materiału ferromagnetycznego w cewce zasilanej prądem stałym umożliwi powstanie magnesu trwałego, a to dzięki dużemu magnetyzmowi szczątkowemu. Rdzeń cewki poddawany przepływowi prądu przemiennego powinien być wykonany z miękkiego materiału ferromagnetycznego, by łatwo się rozmagnesowywał, czyli charakteryzował się bardzo wąską pętlą histerezy. Konieczność wytwarzania pola koercji (powściągającego) jest bowiem związana z pewną stratą energii na obracanie magnesów elementarnych w strukturze rdzenia, co objawia się zbędnym nagrzewaniem rdzenia. Energia ta jest tym większa, im większa jest powierzchnia pętli histerezy.

6. Działanie ciepłe prądu elektrycznego

W przewodnikach elektrony swobodne poruszające się pod wpływem napięcia napotykaą na swej drodze mnóstwo atomów substancji, z którymi się zderzają, zmieniają chwilowo kierunek ruchu, by znów przemieszczać się w kierunku działania sił pola elektrycznego (rys. 19). Przy tych zderzeniach wytracają prędkość, oddając część energii ruchu atomom i cząsteczkom materii. Wywołują także ich drgania w strukturze wewnętrznej przewodnika i powodują wzrost jego temperatury. W ten sposób następuje przemiana energii elektrycznej zużywanej na przepływ elektronów swobodnych w ciepło nagrzewania przewodnika.



Rys. 19. Ruch elektronów swobodnych w materiale przewodnika pod wpływem napięcia elektrycznego

Z tego zjawiska wynika pojęcie oporu stawianego przepływowi prądu elektrycznego. Wielkość ta jest nazywana **rezystancją** i oznaczana literą **R**. Jednostką rezystancji jest **om**, oznaczony grecką literą Ω (omega). Wartość oporu zależy od wymiarów przewodnika i cechy jego materiału zwanej oporem właściwym – **rezystywnością** ρ (wym. ro). Im większa jest długość l przewodnika i mniejsza powierzchnia jego przekroju S , tym więcej występuje zderzeń elektronów swobodnych z atomami, a więc tym większa jest rezystancja. Jest ona również tym większa, im większa jest rezystywność materiału przewodnika, która zależy od gęstości „upakowania” atomów i ilości elektronów swobodnych w jego strukturze. Rezystancję przewodnika wyznacza się z zależności

$$\| R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

w której: l podano w m, S – mm², ρ – $\Omega \cdot m$.

Rezystywność ρ podana w $\Omega \cdot m$ wyraża się bardzo małymi liczbami. Z tego względu stosuje się na ogół wielkość odwrotną: $1/\rho = \gamma$ (czyt. gamma), nazy-

waną **przewodnością właściwą (konduktywnością)**. Jej jednostką jest siemens na metr (S/m) lub inaczej $1/(\Omega \cdot m)$. Wynosi ona dla:

srebra	$61,9 \cdot 10^6$ S/m,
miedzi	$58,5 \cdot 10^6$ S/m,
aluminium	$36,9 \cdot 10^6$ S/m,
stali	ok. $14 \cdot 10^6$ S/m.

Z porównania tych wartości wynika, że bardzo dobrym materiałem przewodzącym, a przy tym stosunkowo tanim jest miedź. Z niej to najczęściej wykonuje się przewody zarówno instalacji elektrycznych, jak i uzwojenia maszyn elektrycznych oraz innych urządzeń elektrycznych.

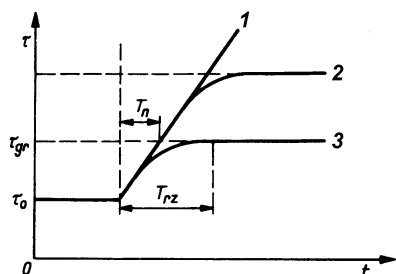
Przewodnik jest nagrzewany prądem elektrycznym tym intensywniej, im większa jest jego rezystancja, a zwłaszcza wartość skuteczna prądu. Ciepła wytwarza się tym więcej, im dłużej trwa przepływ prądu. Ilość energii przekształconej w ciepło, nazywane ciepłem Joule'a (czyt. dzuła), którego jednostką jest $W \cdot s$, wyraża zależność

$$\| W_c = I^2 \cdot R \cdot t$$

gdzie:

- I – wartość skuteczna prądu, w A,
- R – rezystancja przewodnika, w Ω ,
- t – czas, w s.

Przepływ prądu wywołuje nagrzewanie przewodnika do coraz wyższej temperatury. Ciepło przewodnika jest oddawane do otoczenia tym intensywniej, im większa jest różnica temperatur przewodnika i jego bezpośredniego otoczenia. Temperatura przewodnika wzrasta więc coraz wolniej, aż ustala się na poziomie maksymalnym, kiedy ilość ciepła wytwarzanego przez przepływ prądu jest równa ilości ciepła oddawanego przez nagrany przewodnik do otoczenia. Obrazuje to wykres na rysunku 20.



Rys. 20. Przebieg narastania temperatury τ przewodnika nagrzewanego prądem elektrycznym:

1 – izolowanego cieplnie, 2 – słabo chłodzonego, 3 – silnie chłodzonego

Czas narastania temperatury przewodnika określa się jako **stałą czasową** T_n , wyznaczaną na poziomie temperatury maksymalnej. Praktycznie przyjmuje się, że czas rzeczywisty T_{rz} osiągnięcia temperatury ustalonej τ_{gr} (czyt. tau) wynosi od $2T_{rz}$ do $3T_{rz}$. Im intensywniej przewodnik jest chłodzony (np. umieszczony jest w wodzie lub wykazuje dużą powierzchnię zewnętrzną), tym niższą osiąga temperaturę τ_{gr} , a czas nagrzania T_{rz} jest tym dłuższy.

Efektem nagrzewania przewodnika wskutek przepływu prądu elektrycznego są straty energetyczne. Jeśli więc ma on być zastosowany do przekazywania energii elektrycznej, to należy się starać, by taki przewód nagrzewał się możliwie słabo. Osiąga się to dzięki wykonaniu przewodów z materiałów o możliwie dużej przewodności właściwej i odpowiednich przekrojach poprzecznych dla zapewnienia małej ich rezystancji. Do takich materiałów należy miedź oraz aluminium.

Efekt cieplny prądu jest wykorzystywany także do budowy grzejników elektrycznych. Ciepło jest wtedy energią użyteczną, a więc chodzi o stosowanie w nich przewodników o możliwie dużej rezystancji. Na przewody grzejne używa się materiałów o możliwie dużej rezystywności, rzędu $1 \Omega \cdot m$ (np. specjalny stop – kanthal) i wykonuje je o małym przekroju, by nagrzewały się do wysokiej temperatury.

Temperatura graniczna nagrzewania się przewodów grzejnych nie powinna być jednak wyższa od wartości dopuszczalnej dla ich materiału ze względu na możliwość stopienia się przewodu. Ponieważ obliczenia temperatury granicznej są dość skomplikowane, korzysta się zwykle z tabel dopuszczalnej obciążalności przewodów grzejnych, wyrażonej w A/m^2 ich powierzchni zewnętrznej. Obciążalność wyznacza się doświadczalnie, w określonych warunkach (np. do nagrzewania wody czy powietrza, w osłonie czy bez osłony).

Materiały izolacyjne można nagrzewać prądem elektrycznym, ale tylko prądem zmiennym. Nie następuje to od ciepła Joule'a, dielektryki bowiem nie zawierają elektronów swobodnych. Szybkozmiennie prądy przesunięcia powodują obroty dipoli elektrycznych i są przyczyną drgania cząsteczek substancji dielektryka w takt zmian kierunku działania napięcia, i to właśnie wywołuje efekty cieplne.

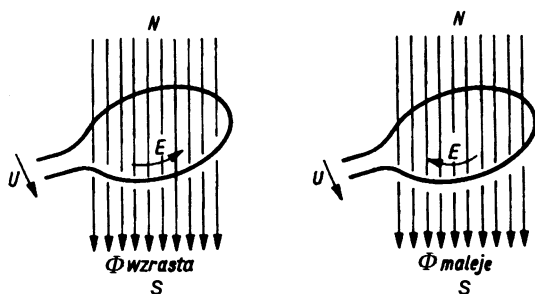
Takie nagrzewanie materiałów elektroizolacyjnych, nazywane pojemnościowym, jest tym intensywniejsze, im większa jest częstotliwość zmian napięcia. Jako w pełni efektywne stosuje się napięcie o częstotliwości rzędu kilkudziesięciu milionów herców. Nie można jednak przekroczyć właściwej dla danego materiału tak zwanej częstotliwości relaksacyjnej, gdyż bezwładność elektronów powoduje, że przestają one reagować na zmiany kierunku sił szybkozmiennego pola elektrycznego.

7. Pole elektromagnetyczne

Podobnie jak przepływ prądu elektrycznego powoduje powstawanie pola magnetycznego, tak pole magnetyczne przy zmianach jego natężenia może wywoływać przepływ prądu, gdyż w przewodniku jest **indukowana siła elektromotoryczna** (sem). Siła ta (a więc również wytwarzane napięcie) jest tym większa, im silniejsze jest pole magnetyczne oraz im szybsze są jego zmiany. Kierunek indukowanej sem i prądu zmieniają się zależnie od tego, czy pole magnetyczne wzmacnia się, czy słabnie.

Na rysunku 21 pokazano kierunek indukowanej siły elektromotorycznej w zwoju przewodnika umieszczonego w zmiennym polu magnetycznym przy zwiększaniu i zmniejszaniu się natężenia tego pola. Zasada wyznaczania tego kierunku sem jest zgodna z regułą Lenza.

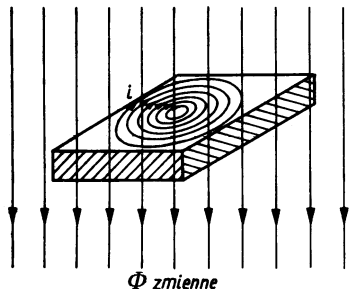
Jeśli więc pole główne (strumień magnetyczny) wzrasta, to kierunek indukowanej w zwoju siły elektromotorycznej oraz prądu będzie taki, że wytwarzane przez ten prąd pole magnetyczne będzie miało kierunek przeciwny niż kierunek pola głównego. Przy zmniejszającym się polu głównym kierunki są odwrotne.



Rys. 21. Kierunek indukowanej siły elektromotorycznej E w zwoju nieruchomym, w zmiennym polu magnetycznym

Indukowana siła elektromotoryczna, a więc i napięcie, są tym większe, im szybsze są zmiany strumienia magnetycznego i im więcej zwojów tworzy przewodnik w obszarze działania zmiennego w czasie pola magnetycznego.

Jeśli w zmiennym polu magnetycznym zamiast zwoju znajduje się płyta przewodnika, to w niej będą indukowane prądy przepływające po torach kołowych, jak pokazano na rysunku 22. Są one zwane **prądami wirowymi**. Wskutek rezystancji materiału przewodnika powodują one jego nagrzewanie oraz niepożądane straty energii. Straty te ogranicza się, wykonując rdzeń z blach z materiału przewodzącego, rozdzielonych cienkimi warstwami materiału izo-

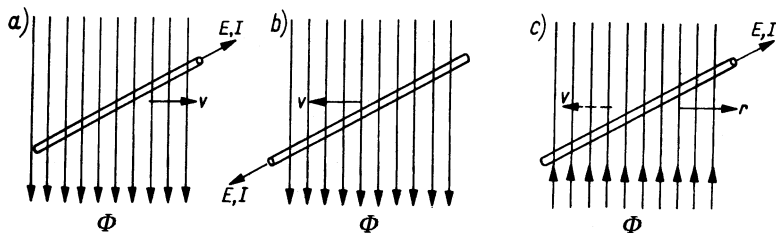


Rys. 22. Prądy wirowe indukowane w materiale przewodzącym w zmiennym polu magnetycznym

lacyjnego. W ten sposób zmniejsza się wartość prądów wirowych, co mimo zwiększonej rezystancji zdecydowanie obniża straty energii.

Siła elektromotoryczna indukuje się nie tylko wskutek zmian pola magnetycznego w czasie, lecz także przez przesuwanie zwoju przewodnika względem pola magnetycznego lub pola magnetycznego względem zwoju.

Na rysunku 23 przedstawiono oba przypadki oraz zależność kierunku indukowanego prądu elektrycznego od kierunku przemieszczania się zwoju względem pola magnetycznego i od kierunku linii sił tego pola.



Rys. 23. Siła elektromotoryczna i prąd indukowane w przewodzie przesuwającym się w stałym polu magnetycznym:

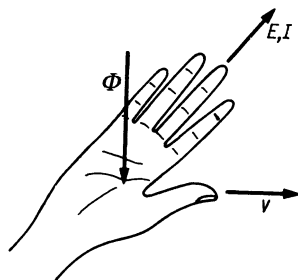
v – kierunek ruchu przewodu względem pola, r – kierunek przesuwania się pola względem nieruchomego przewodu

Na rysunku 24 wskazano jak określa się kierunek indukowanej sem i prądu z zastosowaniem **reguły prawej dłoni**.

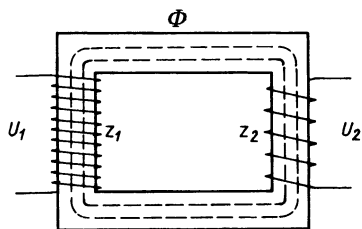
|| Gdy linie sił pola magnetycznego przenikają dłoń od wewnątrz, a kciuk wskazuje kierunek ruchu przewodu względem pola, wówczas pozostałe palce wskażą kierunek siły elektromotorycznej i prądu.

Opisane zjawiska **indukcji elektromagnetycznej** wykorzystuje się w prądnicach, czyli elektrycznych maszynach obrotowych napędzanych przez turbi-

ny parowe, wodne, gazowe lub silniki spalinowe i inne. Wytwarzają one prąd elektryczny przede wszystkim w elektrowniach. Zjawiska takie występują także w transformatorach, a więc w urządzeniach stacjonarnych, służących do zmiany poziomu napięcia przemiennego, stosowanych głównie w sieciach elektroenergetycznych.



Rys. 24. Reguła prawej dłoni



Rys. 25. Transformator

Zasadę działania **transformatora** wyjaśniono na rysunku 25. Na zamkniętym rdzeniu ferromagnetycznym są nawinięte cewki o różnej zwykle liczbie zwojów z . Jeśli do cewki, zwanej pierwotną, poda się napięcie przemiennego u_1 , to płynący przez jej zwoje prąd i_1 spowoduje powstanie w rdzeniu zmiennego strumienia magnetycznego Φ . Strumień ten, przenikając przez zwoje drugiej cewki, indukuje w niej siłę elektromotoryczną. Powoduje ona powstanie na zaciskach uzwojenia napięcia przemiennego u_2 , którego wartość zależy od liczby zwojów obu cewek z_1 i z_2 . Napięcie to wywołuje przepływ w cewce prądu przemiennego i_2 o tej samej częstotliwości co prąd i_1 . Występuje przy tym z dobrym przybliżeniem zależność

$$\left\| \begin{array}{l} K_u = \frac{U_1}{U_2} = \frac{z_1}{z_2} \\ K_i = \frac{I_1}{I_2} = \frac{z_2}{z_1} \end{array} \right.$$

w której U oraz I wyrażają wartości skuteczne, odpowiednio napięcia i prądu transformatora.

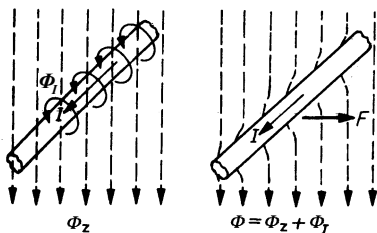
Zależność tę nazywa się przekładnią transformatora: K_u – napięciową, K_i – prądową.

Jeśli w stałym polu magnetycznym znajduje się przewod, przez który przepływa prąd elektryczny, to na niego działa siła, starając się usunąć go z obszaru pola magnetycznego. Nazywane to jest **działaniem elektrodynamicznym**.

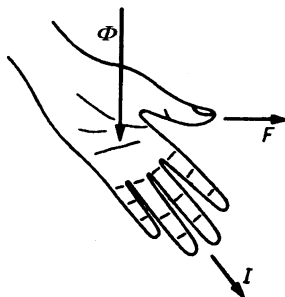
Działanie elektrodynamiczne wyjaśniono na rysunku 26. Pole magnetyczne

ze strumieniem Φ_I wytwarzane wokół przewodnika, przez który płynie prąd elektryczny, a znajduje się on w zewnętrznym polu magnetycznym Φ_z , ma z jednej strony przewodnika kierunek zgodny, a z drugiej jego strony – przeciwny do kierunku sił pola zewnętrznego. Sumując się z polem zewnętrznym Φ_z wzmacnia go z jednej, a osłabia z drugiej strony przewodu. Wytwarza zatem siłę mechaniczną F działającą na przewód w kierunku prostopadłym do linii sił pola zewnętrznego Φ_z , wyrażoną zależnością

$$F = B \cdot I \cdot l$$



Rys. 26. Powstawanie siły F usuwającej przewód z prądem z obszaru działania zewnętrznego pola magnetycznego



Rys. 27. Reguła lewej dłoni

Kierunek działania siły F można wyznaczyć, korzystając z **reguły lewej dłoni** (rys. 27):

Ustawiając dłoń tak, by strumień magnetyczny Φ_z przenikał ją od wewnątrz, a cztery palce były zgodne z kierunkiem prądu I , kciuk wskaże kierunek działania siły F .

Siła ta jest tym większa, im silniejszy jest strumień magnetyczny Φ_z , im jest większa wartość prądu I oraz większa długość l przewodnika w obszarze pola magnetycznego Φ_z .

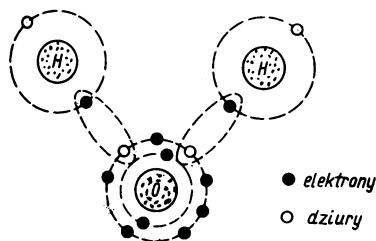
Oddziaływanie elektrodynamiczne wykorzystuje się w silnikach elektrycznych do wytwarzania momentu napędowego. Trzeba tylko zadbać o to, by siły mechaniczne miały określony i stały kierunek działania. Jeśli więc strumień magnetyczny lub prąd elektryczny zmieniają swój kierunek, to jednocześnie powinien się zmienić kierunek drugiej wielkości. Tylko wtedy bowiem siła F będzie działać w tym samym kierunku, zapewniając pożądane działanie napędu.

8. Procesy elektrochemiczne

W praktyce oprócz przewodników metalowych stosuje się przewodniki cieczowe, zwane elektrolitami.

Elektrolitami są najczęściej wodne roztwory kwasów, zasad lub soli. Pod wpływem działania wody (rys. 28) następuje proces rozpadu cząsteczek związków kwasowych, zasadowych i solnych na dwie części, z których jedne są pozbawione elektronów, a drugie wykazują ich nadmiar. Tworzą się jony: dodatnie w pierwszym i ujemne w drugim przypadku, a **zjonizowany roztwór** staje się przewodnikiem prądu elektrycznego. Rozpad ten nazywa się dysocjacją.

Jeżeli w takiej mieszaninie z jonami, nazywanej **elektrolitem**, umieścić w pewnej odległości dwie płytki metalowe i przyłączyć do nich źródło napięcia stałego w czasie, to w elektrolicie między tymi płytkami (biegunami), nazywanymi **elektrodami**, przepływa prąd jonowy. Do elektrody ujemnej (kathody) przemieszczają się jony z niedoborem elektronów, zwane kationami, a do elektrody dodatniej (anody) – jony z nadmiarem elektronów, zwane anionami. Kationami są przede wszystkim jony metalu i wodoru, anionami tak zwane reszty kwasowe i zasadowe.

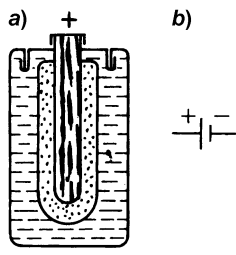


Rys. 28. Budowa cząsteczki wody H_2O

Ruch jonów w elektrolicie jest bardzo powolny z powodu silnego hamowania ich przez ośrodek. Jony po osiągnięciu elektrod osadzają się na nich lub w wyniku reakcji chemicznej z wodą tworzą inne związki chemiczne, lub uchodzą z elektrolitu w postaci gazu. Proces ten nazywa się **elektrolizą**. Wykorzystuje się go do pokrywania różnych przedmiotów cienką warstwą metali, uzyskiwania czystych metali, otrzymywania tlenu i wodoru z wody i tym podobne.

Procesy elektrochemiczne wykorzystuje się również do wytwarzania źródeł napięcia stałego, zwanych ogniwami lub bateriami. Przy odpowiednim doborze materiału elektrod i elektrolitu wskutek dysocjacji roztworu powstaje siła elektromotoryczna, tworząc chemiczne źródło prądu stałego, zwane **ogniwem galwanicznym**. W jednym z rozwiązań ogniwa suchego jako biegun ujemny

wykorzystuje się podłużny kubek cynkowy, a za biegun dodatni służy wstawiony do środka pręcik grafitowy (węglowy) umieszczony w elektrolicie (rys. 29). Ogniwo to stosuje się do zasilania niewielkich aparatów elektrycznych, takich jak latarki ręczne, radioodbiorniki, golarki i inne.



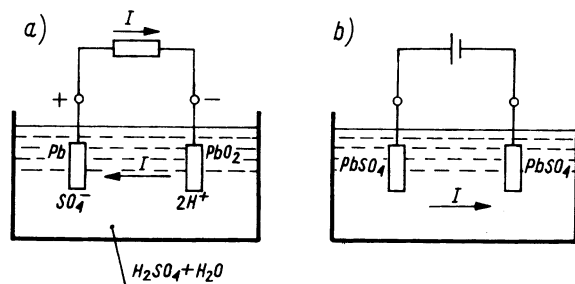
Rys. 29. Ogniwo galwaniczne pierwotne Leclanchego (a) i jego symbol graficzny (b)

Po przyłączeniu do jego elektrod aparatu użytkowanego lub innego odbiornika (np. żarówki) napięcie występujące między biegunami ogniwa powoduje przepływ prądu przez ten aparat i samo ogniwo. W ogniwie występują reakcje chemiczne między elektrodą a elektrolitem. Po pewnym czasie ogniwa się wyczerpują. Są to tzw. **ogniwa pierwotne**. Napięcie pojedynczego ogniwa wynosi zazwyczaj 1,5 V. W ostatnim okresie pojawiły się różne inne rozwiązania ogniw galwanicznych, których zasada działania jest podobna, ale charakteryzuje je o wiele dłuższe działanie i mniejsze wymiary.

Procesy elektrochemiczne w roztworach są często odwracalne. Oznacza to, że rozkład elektrolitu, wywołany przepływem prądu elektrycznego w jednym kierunku, może być odwrócony przez wymuszenie przepływu prądu w przeciwnym kierunku. Rozwiązania wymaga jednak zachowanie odkładających się na elektrodach substancji, jako nośników energii. Wykorzystuje się to w konstrukcji ogniw wtórnych, nazywanych **akumulatorami**. Umożliwiają one wielokrotne ich użytkowanie dzięki odwracalnym przemianom energii: chemicznej w elektryczną w procesie wyładowania i elektrycznej w chemiczną w procesie ładowania. Uzupełnianie chemicznej energii ogniwa kosztem energii elektrycznej, pobieranej z zewnętrznego źródła napięcia stałego jest zwane ładowaniem.

Do najczęściej stosowanych należy akumulator ołowiowo-kwasowy. W akumulatorze tym stosuje się elektrody w postaci płyt: dodatnią z ołowiu, a ujemną z dwutlenku ołowiu. Jako elektrolit służy roztwór wodny kwasu siarkowego, którego cząsteczki ulegają pod wpływem wody rozpadowi na jon wodoru i jon reszty kwasowej SO_4^- . Podczas wyładowywania, czyli korzystania z akumulatora jako źródła napięcia, na elektrodzie ujemnej powstaje siarczan ołowiu, a jony wodoru docierają do elektrody dodatniej. Tam w połączeniu z kwasem siarkowym z roztworu przetwarzają substancje elektrody na siarczan

ołowiu, pozostawiają zaś wodę, która zmniejsza gęstość elektrolitu. W procesie ładowania, tj. przyłączenia akumulatora do zewnętrznego źródła napięcia stałego, następują odwrotne reakcje chemiczne, przywracające poprzedni stan elektrod (rys. 30).



Rys. 30. Proces rozładowania (a) i ładowania (b) akumulatora ołowiowo-kwasowego

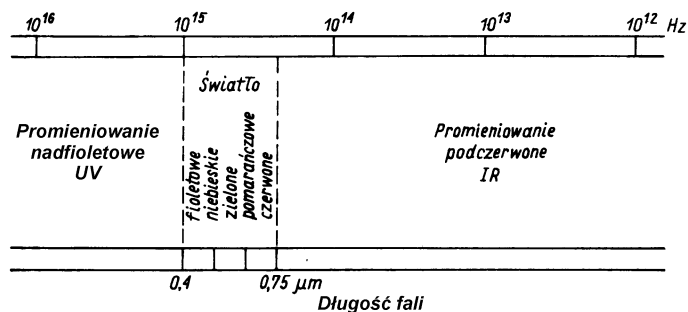
W stanie naładowanym elektroda ujemna ma barwę szarą, a elektroda dodatnia – brunatną. Akumulator nie powinien być przeładowany ani zbyt rozładowany, bo grozi to zniszczeniem jego płyt. W stanie naładowania pojedyncze ogniwo akumulatora osiąga napięcie około 2,65 V, a w stanie rozładowania około 1,75 V. Zdolność akumulatora do gromadzenia energii elektrycznej nazywa się **pojemnością akumulatora**, której jednostką jest amperogodzina ($A \cdot h$). Z pojemności wynika, jak długo można pobierać prąd elektryczny o żądanym natężeniu. Im mniejszy jest ten prąd, tym akumulator może pracować dłużej i odwrotnie. Jest jednak graniczna dopuszczalna wartość prądu rozładowania, którego przekroczenie grozi zniszczeniem płyt akumulatora.

Podobnie jak w przypadku ogniw pierwotnych, w ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój konstrukcji akumulatorów w dążeniu do zwiększenia ich pojemności, zmniejszenia wymiarów, wydłużenia czasu użytkowania oraz ułatwienia ich obsługi. Główna koncepcja ich działania jest jednak podobna do opisanej. Nowoczesne baterie chemiczne z elektrolitem ciekłym są budowane w naczyniach zamkniętych i praktycznie nie wymagają uzupełniania elektrolitu. Wprowadzono również baterie z elektrolitem stałym w postaci galaretowatego żelu.

Akumulatory są powszechnie stosowane do rozruchu w samochodach oraz jako źródło energii elektrycznej do zasilania instalacji bezpieczeństwa i układów sygnalizacji, a także jako źródła awaryjnego zasilania szpitali, zakładów przemysłowych i podobnych.

9. Promieniowanie elektromagnetyczne

Przepływ prądu elektrycznego zmiennego w czasie wywołuje promieniowanie elektromagnetyczne w postaci rozchodzących się w powietrzu fal (rys. 31) o określonej długości (częstotliwości). Promieniowanie takie o częstotliwości rzędu 10^{15} Hz (ściślej o długościach fal od $0,4 \mu\text{m}$ do $0,75 \mu\text{m}$) jest postrzegane przez człowieka jako widzialne (światło białe) i wykorzystywane do oświetlenia. Promieniowanie o mniejszej częstotliwości, rzędu 10^{12} do 10^{15} Hz, nazywane podczerwonym (IR), stosuje się do celów grzewczych, a promieniowanie o częstotliwości większej, rzędu 10^{15} do 10^{16} Hz, zwane nadfioletowym (UV) – między innymi w medycynie, do celów kosmetycznych i bakteriobójczych.



Rys. 31. Zakresy widma promieniowania elektromagnetycznego

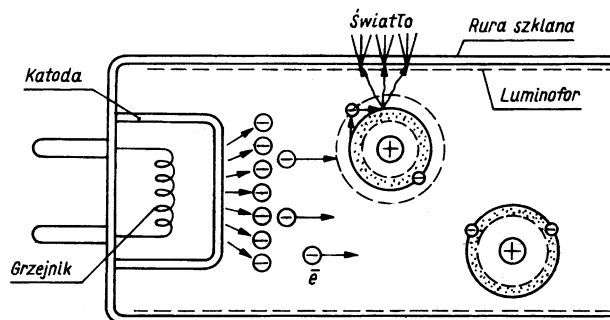
Sz szczególnie przydatne okazuje się bezprzewodowe przenoszenie energii w zakresie tak zwanej bliskiej podczerwieni. Promieniowanie takie występuje przy nagrzewaniu prądem elektrycznym elementów wykonanych z materiału przewodzącego o dużym oporze – metalowego (np. wolframu) lub ceramicznego (np. krzemu lub karborundu) – do temperatury od kilkuset do 1000 K.

W wyniku nagrzewania elementów z materiału przewodzącego o dużym oporze elektrycznym do znacznie wyższej temperatury (około 2400 K) powstaje promieniowanie świetlne. Taką temperaturę wytrzymuje praktycznie tylko włókno wolframowe, przy czym musi być ono chronione przed utlenianiem na przykład przez umieszczenie w szklanej bańce z próżnią.

Inny sposób uzyskiwania promieniowania w zakresie widma widzialnego i nadfioletowego polega na wykorzystaniu zjawisk towarzyszących przepływowi prądu w gazach zjonizowanych. Wiąże się to z ruchem elektronów oraz

jonów w polu elektrycznym, wytworzonym między elektrodami przyłączonymi do zewnętrznego źródła napięcia. Poruszające się elektrony zależnie od prędkości, czyli energii kinetycznej, zderzając się z atomami gazu, mogą powodować ich jonizację przez wybite elektronów z powłoki lub tak zwane wzbudzenie do wyższej energii.

Wzbudzenie atomu następuje, kiedy elektrony krążące na zewnętrznych orbitach, po uzyskaniu dodatkowej energii, przechodzą na dalsze orbity na chwilę, po czym powracają na poprzednie orbity, emitując nadmiar energii w postaci cząstek, zwanych **fotonami**. Te elementarne ilości energii zależą od tego, na której orbicie znajdzie się elektron wzbudzonego atomu, a więc zależą od budowy atomu, czyli rodzaju gazu. Z kolei od energii fotonów zależy częstotliwość promieniowania elektromagnetycznego. Również elektrony swobodne przechwytywane przez zjonizowane atomy emitują nadmiar energii w postaci fotonów. Opisane procesy emisji fotonów przy przepływie elektronów swobodnych w gazie pokazano na rysunku 32. Zjawisko to nazywa się **elektroluminescencją**.



Rys. 32. Wzbudzenie i dejonizacja atomów gazu przez elektrony swobodne w gazie oraz fotoluminescencja luminoforu w rurze świetlówki

Barwa gazów świecących zależy od ich rodzaju, np. neon świeci na czerwono, pary sodu – na żółto, a pary rtęci – światłem ultrafioletowym. Aby jednak uzyskać pożądane barwy światła, w tym światła białego, konieczne jest wykorzystanie zjawiska **fotoluminescencji** specjalnych proszków i ich mieszanin, czyli **luminoforów**. Pokrywa się nimi wewnętrzną powierzchnię bańki szklanej z gazem.

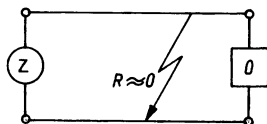
Zdolność świecenia luminoforów określoną barwą następuje pod wpływem bombardowania przez fotony o energii większej od odpowiadającej pożądanej barwie światła. Jest to konieczne, gdyż luminofor, przetwarzając promieniowanie, powoduje pewne straty energii promienistej, a więc musi być pobudzany do świecenia promieniowaniem o nieco większej energii, na przykład promieniowaniem nadfioletowym par rtęci. Wyładowanie elektryczne w parach rtęci jest wykorzystywane również w promiennikach światła ultrafioletowego.

Aby pobudzić gaz do świecenia, należy go zjonizować. Następuje to w wyniku przepływu strumienia elektronów swobodnych pod wpływem napięcia elektrycznego między elektrodami. Elektrony te zderzają się z atomami gazu i jonizują je, wytrącając elektrony z ich powłok, po czym tak powstałe elektrony jonizują dalsze atomy gazu, aż dochodzi po pewnym czasie do zjonizowania wszystkich. Gdyby gaz miał normalne ciśnienie, doszłoby do przepływu prądu o bardzo dużym natężeniu, to jest do powstania łuku elektrycznego, wytwarzającego bardzo wysoką temperaturę. By tego uniknąć i stworzyć warunki dla elektroluminescencji i fotoluminescencji, trzeba znacznie obniżyć ciśnienie gazu.

Rtęć w normalnej temperaturze ma postać kropli; dla zapoczątkowania procesu jonizacji konieczne jest dodatkowe zastosowanie innego gazu obojętnego, zwykle argonu, który po zjonizowaniu i ogrzaniu zapewnia odparowanie rtęci. Po włączeniu napięcia powstaje wyładowanie elektryczne, zwane zapłonem, między elektrodami do czasu wystąpienia świecenia gazu i luminoforu.

10. Obwody elektryczne

Obwód elektryczny jest połączeniem źródła energii elektrycznej z odbiornikiem za pomocą przewodów łączących (rys. 33), które umożliwiają przepływ prądu elektrycznego. **Źródłem energii** jest urządzenie, które wytwarza siłę elektromotoryczną kosztem innej formy energii, na przykład mechanicznej, cieplnej lub chemicznej. Potocznie za źródło prądu uznaje się zaciski, między którymi występuje napięcie elektryczne. **Odbiornikiem elektrycznym** jest natomiast urządzenie, w którym zachodzi przemiana energii elektrycznej w inną formę energii, na przykład w ciepło (w grzejniku), energię mechaniczną (w silniku), energię promienistą (w lampie) lub w inną formę energii elektrycznej (w prostownikach).



Rys. 33. Prosty obwód elektryczny:

Z – źródło napięcia, O – odbiornik z zaznaczonym zwarciem

Źródło energii elektrycznej wraz z odbiornikiem i łączącymi je **przewodami** stanowią zamkniętą drogę utworzoną z materiałów przewodzących dla

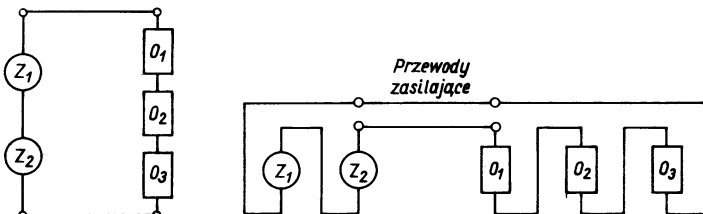
przepływu prądu (strumienia elektronów swobodnych). Materiał izolacyjny żył przewodów (polwinit, włókno szklane, powietrze itp.) stosuje się dla zapobieżenia upływowi prądu poza obwód, na przykład do ziemi.

Elektrony przemieszczają się w przewodach z niezbyt dużą prędkością wypadkową, wynoszącą kilka milimetrów na sekundę. Oznacza to, że przy prądzie przemiennym o częstotliwości 50 Hz elektrony przemieszczają się w jednym i drugim kierunku w zakresie zaledwie kilkunastu mikrometrów względem położenia równowagi. Po włączeniu zasilania obwodu wszystkie odbiorniki zaczynają jednak działać natychmiast, gdyż sygnał uruchamiający elektrony rozprzestrzenia się wzdłuż przewodów z prędkością bliską 300 000 km/s, a więc praktycznie od razu w całym obwodzie. Z taką bowiem prędkością wzdłuż przewodów przebiega fala napięciowa, przyjmująca przy prądzie przemiennym postać sinusoidalną o bardzo dużej długości.

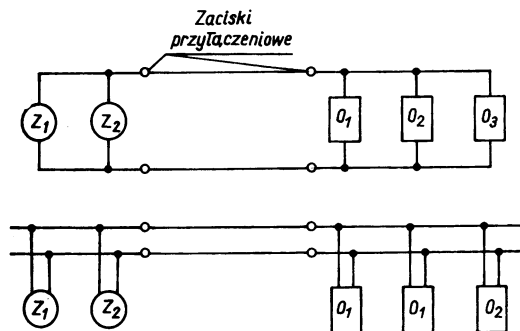
Prąd, przepływając przez przewody zasilające, powoduje ich nagrzewanie, a to wywołuje straty energii i związane z tym straty napięcia zasilającego. Straty te powinny być jak najmniejsze; często stosuje się przewody o odpowiednio dużych przekrojach i wówczas straty energii są bardzo małe.

W razie bezpośredniego zetknięcia przewodów łączących o małej rezystancji, a także w razie połączenia ich bardzo grubym drutem lub przedmiotem z podobnego materiału przewodzącego następuje przepływ bardzo dużego prądu (rys. 33). Nazywa się to **zwarcie**m. Prąd zwarciovowy jest ograniczony głównie przez rezystancję wewnętrzną źródła energii i jego moc oraz rezystancję miejsca zwarcia. Gdy źródło prądu ma dużą moc, a zwarcie jest pełne (przewody stykają się bezpośrednio), prąd zwarciovowy może osiągnąć niemal nieograniczenie dużą wartość.

Obwód elektryczny może zawierać kilka źródeł napięcia i wiele odbiorników. Elementy te mogą być **łączone** ze sobą w dwojaki sposób: **szeregowe** lub **równoległe**. W pierwszym połączeniu prąd o tej samej wartości przepływa kolejno przez wszystkie odbiorniki (rys. 34), w drugim zaś wszystkie odbiorniki pracują przy tym samym napięciu (rys. 35). Przy połączeniu szeregowym napięcie zespołu źródeł (np. baterii ogniów galwanicznych) dodaje się. Napięcie zasilania rozdziela się na odbiorniki zależnie od ich mocy. Im większa moc odbiornika, tym wyższe napięcie ($U = P/I$) występuje na nim.



Rys. 34. Połączenie szeregowe źródeł i odbiorników (dwa równorzędne sposoby)



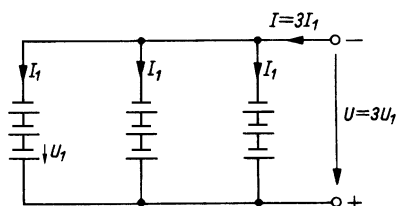
Rys. 35. Połączenie równoległe źródeł i odbiorników (dwa równorzędne sposoby)

W praktyce korzysta się często z połączenia równoległego z dwóch powodów:

- umożliwia ono włączanie i wyłączanie poszczególnych źródeł prądu i odbiorników praktycznie bez naruszania warunków pracy pozostałych;
- pozwala na produkowanie odbiorników na kilka znormalizowanych napięć, co upraszcza ich konstruowanie, ułatwia wykorzystanie, produkcję, naprawę i tym podobne.

Dzięki połączeniom równoległym i szeregowym jest możliwe tworzenie złożonych układów obwodów rozgałęzionych.

Często ogniwa galwaniczne łączy się szeregowo dla uzyskania wyższego napięcia zasilania oraz niektóre odbiorniki (np. lampki choinkowe) dla obniżenia ich napięcia pracy i uproszczenia konstrukcji. Możliwe jest też połączenie szeregowo-równoległe, na przykład akumulatorów (rys. 36) dla uzyskania wyższego napięcia zasilania i poboru większego prądu.



Rys. 36. Połączenie szeregowo-równoległe ogniw galwanicznych

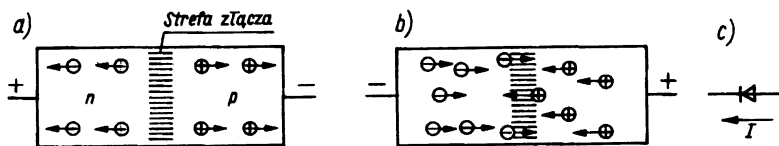
Powyższe omówienie dotyczy zarówno obwodów prądu stałego, jak i przemiennego. Jak już jednak nadmieniono poprzednio, zalety prądu sinusoidalnie zmiennego – przede wszystkim ekonomiczny przesył i rozdział energii elektrycznej na duże odległości i na dużym obszarze, prostota konstrukcji maszyn elektrycznych oraz możliwość wykorzystania grzejników pojemnościowych i indukcyjnych – są powodem zdominowania przez te prądy całej dziedziny elektroenergetyki. Prądy stałe natomiast są powszechnie stosowane przede wszyst-

kim w elektronice, zasilaczach awaryjnych i urządzeniach sygnalizacyjnych oraz w transporcie elektrycznym i przemyśle chemicznym.

Urządzenia elektroniczne najczęściej pobierają bardzo małą energię. Jeśli są to aparaty przenośne, to źródłem energii są wstawione do nich baterie ogniwo galwanicznych o napięciu od 1,5 V do 9 V. Natomiast aparaty, z których korzysta się w stałym miejscu, bywają zasilane z akumulatorów; ale najczęściej przyłączane są do odbiorczych instalacji elektrycznych prądu przemiennego za pośrednictwem **zasilaczy**.

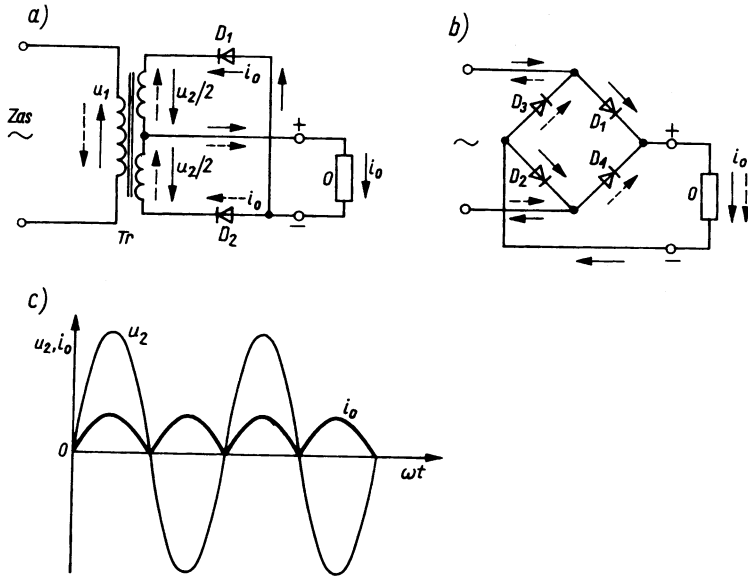
Zasilacze przetwarzają prąd przemienny na wyprostowany. Ponieważ instalacje elektryczne pracują przy napięciu nominalnym 230 V, konieczne jest najpierw zredukowanie go do wymaganej wartości za pomocą transformatora, do którego uzwojenia wtórne dołącza się układ prostowniczy. Układ prostowniczy zestawia się z małych elementów elektronicznych przewodzących prąd w jednym tylko kierunku, nazywanych **diodami**. Wytwarzane są one z materiału półprzewodnikowego.

Zasadę działania **diody półprzewodnikowej** wyjaśniono na rysunku 37. Tylko przy odpowiednim spolaryzowaniu diody (rys. 37b), w obszarze złącza występują ładunki elektryczne, które mogą przepłynąć przez ten obszar. Przy przeciwnie skierowanym napięciu (rys. 37a) brak jest ładunków, które mogłyby tworzyć prąd elektryczny; jest to kierunek zaporowy polaryzacji diody. Przez diodę przepływa więc prąd tylko w tych połówkach okresu zmian prądu przemiennego, kiedy dioda jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Na rysunku 37c pokazano symbol graficzny diody z zaznaczonym kierunkiem przepustowym.



Rys. 37. Zasada działania diody półprzewodnikowej: a) przy polaryzacji w kierunku zaporowym; b) w kierunku przepuszczania; c) symbol diody

Dla zwiększenia sprawności prostowania prądu przemiennego stosuje się **układy prostowania dwupołkowego**: przeciwsobne z użyciem dwóch diod i transformatora oraz mostkowe z użyciem czterech diod. Układy te pokazano schematycznie na rysunku 38 z zaznaczeniem przepływu prądu przez odbiornik prądu stałego przy obu kierunkach napięcia przemiennego. W obu połówkach okresu zmian napięcia zasilania przez odbiornik włączony za ukła-

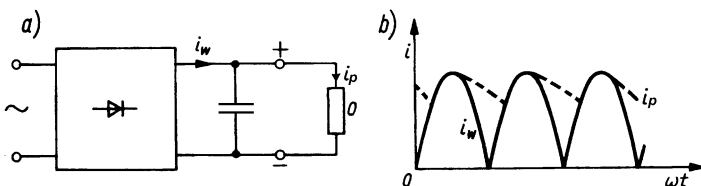


Rys. 38. Prostowanie dwupołówkowe: a) w układzie przeciwobnym; b) w układzie mostkowym; c) przebieg prądu wyprostowanego:

Tr – transformator obniżający napięcie zasilania, zas – zasilanie napięciem przemiennym, D – diody, θ – odbiornik prądu zmiennego, \rightarrow kierunek napięcia lub prądu w jednej oraz \leftarrow drugiej połowie okresu zmian napięcia zasilania

dem prostowniczym przepływa prąd w tym samym kierunku. Ma on jednak charakter pulsujący.

W celu wygładzenia tego przebiegu zwykle włącza się za układem prostowniczym kondensator równoległe do odbiornika. Kondensator ładuje się przy narastaniu napięcia, a rozładowuje, gdy napięcie się obniża i w ten sposób przeciwdziała jego zanikowi. Dzięki temu prąd przepływający przez odbiornik ma charakter falujący, jak pokazano na rysunku 39. Dołączenie odpowiedniego



Rys. 39. Układ prostujący z kondensatorem wyrównującym (a) i efekt wyrównywania zmian prądu (b)

kondensatora jest wystarczającym warunkiem zasilania większości urządzeń elektronicznych codziennego użytku.

Wiele z nich, na przykład odbiorniki telewizyjne, komputery, mają układy prostownicze wbudowane wewnątrz i dlatego są one przyłączane bezpośrednio do instalacji prądu przemiennego o napięciu 230 V.

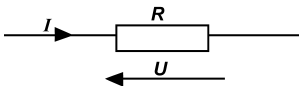
11. Obwody prądu stałego

Obwodami prądu stałego są obwody ze źródłami napięć (lub prądów) stałych w czasie. Rozpatruje się w tym przypadku głównie zależności między wartością prądu I , napięciem U i mocą P oraz energią W .

Prawo Ohma w obwodach prądu stałego wyraża zależność między napięciem, prądem i rezystancją. Ma ono postać

$$U = I \cdot R$$

Oznacza to, że wartość prądu jest tym większa, im wyższe jest napięcie i mniejsza rezystancja rozpatrywanego fragmentu obwodu elektrycznego (rys. 40).



Rys. 40. Fragment obwodu elektrycznego

Prąd płynący w obwodzie wyraża się wzorem

$$I = \frac{U}{R}$$

w którym:

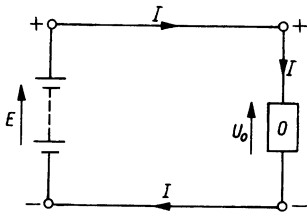
I – prąd, w A,

U – napięcie, w V,

R – rezystancja, w Ω .

Z zależności $U = I \cdot R$ można obliczyć napięcie, natomiast ze wzoru $R = U/I$ – rezystancję, przy znajomości wartości dwóch pozostałych wielkości.

Na rysunku 41 przedstawiono prosty obwód prądu stałego, na którym grotty wskazują przepływ prądu (umowny kierunek prądu). Strzałkami zaznaczono kierunki siły elektromotorycznej E oraz napięcia U_0 między zaciskami odbiornika. Tu zasadą jest, że strzałka wskazuje biegun o wyższym potencjale, czyli od minusa (–) do plusa (+). Konsekwencją takiego oznaczenia jest to, że w źródle zwroty napięcia i prądu są zgodne, a w odbiorniku zwroty napięcia i prądu są przeciwne.



Rys. 41. Prosty obwód prądu stałego

Przy przyłączaniu odbiorników prądu stałego do źródła napięcia trzeba mieć na uwadze, że z wyjątkiem grzejników i żarówek, pozostałe odbiorniki oraz przyrządy pomiarowe działają poprawnie tylko przy jednym, określonym kierunku przepływu prądu; dlatego mają one zawsze wyraźnie oznaczoną biegunowość. Obowiązuje zasada łączenia ze sobą jednoimiennych biegunów źródła i odbiornika (tj. plus z plusem i minus z minusem).

Z obowiązującej powszechnie zasady zachowania energii wynikają **prawa Kirchhoffa**. Zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa:

W węźle obwodu elektrycznego, czyli w miejscu połączenia kilku przewodów, suma prądów dopływających jest równa sumie prądów wypływających.

Ogólnie można to zapisać wzorem

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

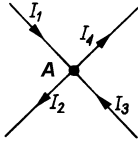
Uwzględnia się przy tym znak + lub – dla prądów dopływających i wypływających z węzła.

Symbolem $\sum_{k=1}^n$ oznacza się sumę n składników, z których każdy oznaczony jest kolejnym wskaźnikiem k -tym zmieniającym się od 1 do n , a więc

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n.$$

W przypadku pokazanym na rysunku 42 występuje zależność

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4 \text{ lub } I_1 + I_3 - I_2 - I_4 = 0$$



Rys. 42. Węzeł w obwodzie rozgałęzionym

Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa:

Suma napięć wzdłuż całego, zamkniętego obwodu równa się zeru.
Zapisuje się to wzorem

$$\sum_{i=1}^m U_i = \sum_{j=1}^n I \cdot R_j$$

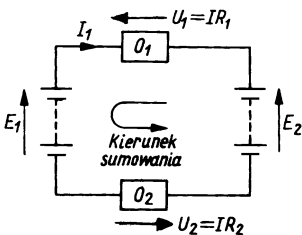
Uwzględnia się wtedy znak + lub -, zależnie od tego, czy kierunek napięcia jest zgodny czy przeciwny do kierunku sumowania przyjętego dowolnie, ale jednakowo dla całego obiegu zamkniętego.

Na przykład w obwodzie na rysunku 43

$$-E_1 + E_2 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2$$

skąd

$$I = \frac{E_2 - E_1}{R_1 + R_2}$$



Rys. 43. Przykładowy obwód prądu stałego

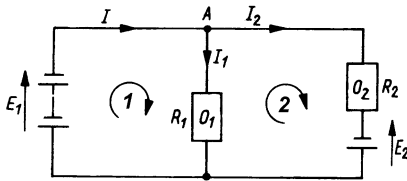
Obydwa prawa Kirchhoffa oraz prawo Ohma umożliwiają obliczanie obwodów rozgałęzionych.

Dla pokazanego na rysunku 44 przykładowego obwodu obliczenia polegają na rozwiązaniu następującego układu równań:

$$I = I_1 + I_2 \quad \text{dla wężła } A$$

$$E_1 = I_1 \cdot R_1 \quad \text{dla oczka } 1$$

$$-I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = -E_2 \quad \text{dla oczka } 2$$



Rys. 44. Przykładowy obwód rozgałęziony prądu stałego

Jeśli są dane: E_1, E_2, R_1, R_2 , a poszukiwane wartości prądów: I, I_1 oraz I_2 , to w wyniku rozwiązania powyższych równań otrzymuje się

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1} \quad I_2 = \frac{E_1 - E_2}{R_2} \quad I = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_1 - E_2}{R_2}$$

Gdyby wynik obliczeń wartości któregoś prądu był ujemny, oznaczałoby to, że wyznaczony na rysunku 44 i przyjęty do obliczeń kierunek tego prądu jest w rzeczywistości przeciwny.

Na podstawie podanych zależności można dojść do wniosków dotyczących obliczenia **rezystancji zastępczej** szeregowego i równoległego układu połączeń odbiorników, lecz z n rezystorami (jak na rysunkach 45 i 46).

Przy połączeniu szeregowym (rys. 45)

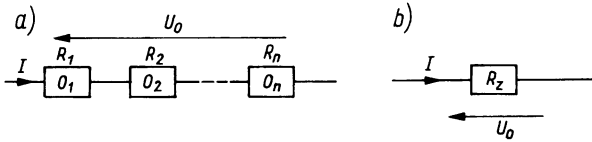
$$U_o = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + \dots + I \cdot R_n = I \cdot R_z$$

przy czym

$$\left\| \right. R_z = \sum_{k=1}^n R_k$$

Rezystancja zastępcza jest równa sumie rezystancji odbiorników połączonych szeregowo, a więc

$$R_z = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$



Rys. 45. Połączenie szeregowo odbiorników (a) i ich rezystancja zastępcza (b)

Przy połączeniu równoległym (rys. 46) wartości prądu przepływającego przez poszczególne odbiorniki są określone prawem Ohma, czyli

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2} \quad \dots \quad I_n = \frac{U_n}{R_n}$$

Prąd zasilający cały układ zgodnie z prawem Kirchhoffa jest sumą

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

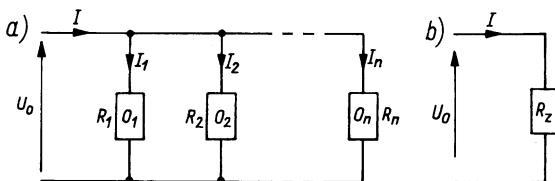
zatem

$$I = \sum_{k=1}^n I_k = \sum_{k=1}^n \frac{U}{R_k} = \frac{U}{\sum_{k=1}^n R_k} = \frac{U}{R_z}$$

a więc

$$\left\| \frac{1}{R_z} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \right.$$

Odwrotność rezystancji zastępczej jest równa sumie odwrotności rezystancji poszczególnych odbiorników.



Rys. 46. Połączenie równoległe odbiorników (a) i ich rezystancja zastępcza (b)

Prąd zasilający cały układ wynika ze wzoru

$$I = \frac{U}{R_z}$$

Jak podano już uprzednio, w obwodzie prądu stałego moc P jest określona jako iloczyn napięcia i natężenia prądu. A zatem

$$\| \quad P = U \cdot I$$

gdzie:

P – moc, w W,

U – napięcie, w V,

I – wartość prądu, w A.

Energię elektryczną przy stałej mocy oblicza się jako iloczyn mocy i czasu trwania przepływu prądu, według zależności

$$\| \quad W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t$$

w której:

W – energia, w J,

P – moc, w kW,

t – czas, w sekundach (s).

W praktyce bardzo często wartości wielkości w powyższym wzorze wyraża się w innych jednostkach: W w kWh, P w kW, a czas t w h (godzinach).

12. Podstawowe przebiegi w obwodzie prądu przemiennego

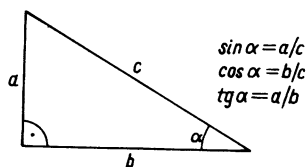
Podobnie jak w przypadku obwodów prądu stałego, w obwodach prądu sinusoidalnie zmiennego zachodzi potrzeba dodawania, mnożenia i dzielenia wartości napięć oraz prądów występujących w różnych układach połączeń, ale są to wielkości sinusoidalnie zmienne. Działania te trzeba by było wykonywać krok po kroku dla kolejnych chwil. Takie postępowanie byłoby bardzo pracochłonne i niepraktyczne. Obliczenia można jednak sprowadzić do prostych działań arytmetycznych lub algebraicznych na wartościach skutecznych napięć i prądów, przedstawiając przebiegi sinusoidalne za pomocą **wirujących wektorów**, nazywanych czasami wskazami. Wektorem nazywa się tu skierowany odcinek prostej, określony przez jego długość i zwrot zaznaczony strzałką. Wektor ten obraca się wokół punktu zaczepienia (swego początku).

Na rysunku 47 pokazano przebieg sinusoidalny zmian wielkości a w czasie, przy czym może to być na przykład napięcie, prąd, moc. Małą literą a oznaczono wartości chwilowe, które analizowana wielkość przyjmuje w danej chwili. Przebieg ten charakteryzuje się wartością maksymalną A_m , zwaną amplitudą, długością okresu (zmian) T i przesunięciem początku sinusoidy względem zera na osi czasu, nazywanym **przesunięciem fazowym** w chwili t_0 .

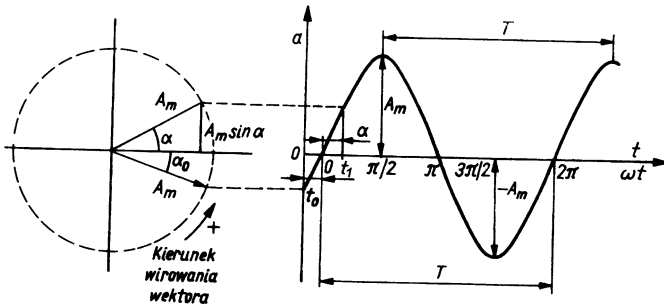
Przebieg sinusoidalny jest funkcją kątową sinus¹⁾, zatem oś odciętych wykresu na rysunku 47 musi być wyskalowana w kącie α , a nie w czasie t . Korzystając z okresowości funkcji kątowych, okres T przyrównuje się do kąta pełnego 360° lub 2π radianów w mierze łukowej²⁾. Na osi odciętych wykresu sinusoidy należy więc odmierzyć kąt

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t = \omega \cdot t$$

¹⁾ Sinus (w skrócie sin) jest funkcją kątową, wyrażającą w trójkącie prostokątnym stosunek przyprostokątnej a naprzeciw kąta α do przeciwprostokątnej c , $\sin \alpha = a/c$. Kosinus (w skrócie cos) natomiast wyraża stosunek przyprostokątnej b przyległej do kąta α do przeciwprostokątnej c , czyli $\cos \alpha = b/c$. Wreszcie tangens (w skrócie tg) wyraża stosunek przyprostokątnych: $\operatorname{tg} \alpha = a/b$.



²⁾ 1 rad wyraża kąt środkowy, odcinający na okręgu łuk o długości średnicy okręgu; a że długość okręgu odpowiada 2π jego promienia, kąt pełny jest równy 2π radianów.



Rys. 47. Przedstawienie przebiegu sinusoidalnego za pomocą wektora wirującegocego

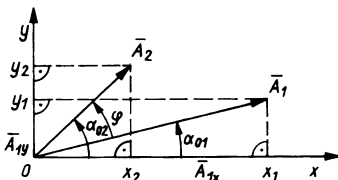
gdzie $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ nazywa się **pulsacją**.

Przesunięcie fazowe względem zera czasu wyraża się kątem $\alpha_0 = t_0 \cdot 2 \cdot \pi / T$.

Wektor o długości odpowiadającej wartości A_m jest zaczepiony w początku osi współrzędnych (x, y) i wiruje w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara z prędkością kątową 2π w ciągu jednego okresu T zmian wielkości a , a więc z prędkością ω . Jeśli wziąć pod uwagę ten wektor obrócony o kąt α_0 na wykresie względem osi x , to rzut końca takiego wektora na pionową oś rzędnych odpowiadałby występującej w danej chwili wartości wielkości a zmieniającej się sinusoidalnie.

A więc przebieg zmieniającej się sinusoidalnie wielkości może być w sposób jednoznaczny zastąpiony takim wirującym wektorem. Jego długość jest miarą wartości maksymalnej A_m przebiegu, a kąt nachylenia względem osi x – miarą przesunięcia fazowego względem chwili przyjętej za zerową. Jeśli kąt ten jest dodatni, czyli jest odmierzany w kierunku uznanym za dodatni (przeciwym do ruchu wskazówek zegara), to przebieg jest przyspieszony względem zera na osi odciętych wykresu przebiegów sinusoidalnych. I odwrotnie, przy kącie ujemnym przebieg jest opóźniony względem chwili zerowej.

Zwykle w praktyce długość wektora wyznacza się w skali wartości skutecznych A , a nie maksymalnych A_m , gdyż to upraszcza obliczenia. Aby odtworzyć przebieg sinusoidalny, zmierzoną długość wektora według ustalonej dla wykresu skali (np. 1 mm odpowiada napięciu 1 V, a 2 mm odpowiada prądowi 1 A) należy pomnożyć przez $\sqrt{2} = 1,42$, co odpowiada stosunkowi A_m/A .



Rys. 48. Wykres wektorowy dla dwóch przykładowych przebiegów sinusoidalnych a_1 i a_2

Na rysunku 48 przedstawiono dwa wektory: \vec{A}_1 i \vec{A}_2 (kreską nad symbolem zaznacza się, że jest to wektor) przebiegów a_1 i a_2 o jednakowej częstotliwości, o wartości skutecznej A_1 i A_2 , które są przesunięte względem siebie o kąt φ . Kąt ten może mieć wartość dodatnią lub ujemną zależnie od tego, czy traktuje się przebieg a_1 względem a_2 (wtedy zgodnie z rysunkiem 48 kąt $\varphi = \alpha_{01} - \alpha_{02} > 0$), czy też przebieg a_2 względem a_1 (wtedy $\varphi = \alpha_{02} - \alpha_{01} < 0$).

Wektory dla ułatwienia obliczeń można rozłożyć na dwie składowe prostopadłe do siebie, leżące na osi x i na osi y . Korzystając z zależności trygonometrycznych (w pierwszym przypadku z funkcji $\cos \alpha_0$, a w drugim – $\sin \alpha_0$), można napisać

$$A_{1x} = A_1 \cdot \cos \alpha_{01} \quad A_{1y} = A_1 \cdot \sin \alpha_{01}$$

$$A_{2x} = A_2 \cdot \cos \alpha_{02} \quad A_{2y} = A_2 \cdot \sin \alpha_{02}$$

Długość obu wektorów można wyznaczyć, korzystając z twierdzenia Pitagorasa

$$A_1 = \sqrt{A_{1x}^2 + A_{1y}^2} \quad A_2 = \sqrt{A_{2x}^2 + A_{2y}^2}$$

Znając wartości składowych wektorów, można obliczyć kąt α przesunięcia fazowego, najlepiej korzystając z funkcji tangensa. A więc

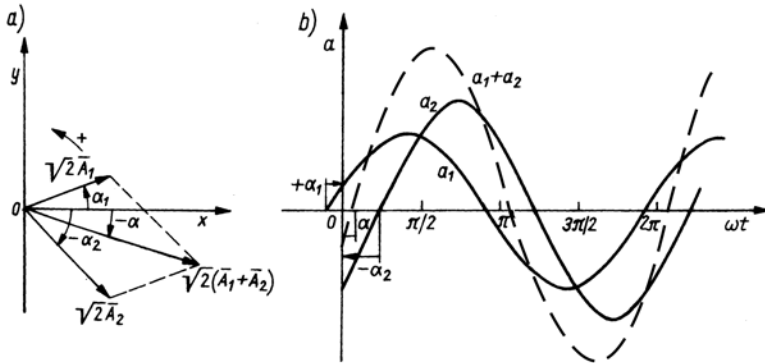
$$\operatorname{tg} \alpha_{01} = \frac{A_{1y}}{A_{1x}} \quad \operatorname{tg} \alpha_{02} = \frac{A_{2y}}{A_{2x}}$$

a kąt odczytuje się z tabel funkcji trygonometrycznych, znajdując $\operatorname{arctg} \alpha$. Przy ujemnej wartości tangensa kąt α jest ujemny.

Najczęściej zadanie polega na sumowaniu lub odejmowaniu przebiegów sinusoidalnych o tej samej częstotliwości (np. wartości prądów lub napięć). Zadanie to można rozwiązać przez sumowanie reprezentujących te przebiegi wektorów, unieruchomionych w chwili $t = 0$. Ustalenie chwili $t = 0$ nie ma żadnego znaczenia fizycznego, można więc sumowane wektory rysować w dowolnym położeniu na płaszczyźnie rysunku, byle tylko były one obrócone o te same kąty względem siebie, gdyż to określa ich wzajemne przesunięcie w czasie.

Chcąc na przykład dodać dwa przebiegi sinusoidalne a_1 i a_2 , jak na rysunku 49, wystarczy znaleźć sumę wektorową wektorów $\vec{A}_1 + \vec{A}_2$. Jak wiadomo, sumę tę uzyskuje się kreśląc równoległobok na dwóch wektorach jako jego bokach,

przy czym przekątna tego równoległoboku przedstawia wektor wypadkowego przebiegu sinusoidalnego o przesunięciu fazowym α względem zera czasu oraz wartości maksymalnej $\sqrt{2}(A_1 + A_2)$.



Rys. 49. Dodawanie wektorów dwóch przebiegów sinusoidalnych (a) i wyznaczanie tych przebiegów w czasie (b)

Zamiast wykreślnie można wektor wypadkowego przebiegu obliczyć, znajdując składowe wektorów na osi x i y , a więc

$$A_{1y} = A_1 \cdot \sin \alpha_1 \quad A_{2y} = -A_2 \cdot \sin \alpha_2 \quad \text{wzdłuż osi } y$$

$$A_{1x} = A_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad A_{2x} = -A_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad \text{wzdłuż osi } x$$

Następnie sumuje się te składowe arytmetycznie, znajdując składowe wektora wypadkowego

$$A_y = A_{1y} + A_{2y} \quad \text{wzdłuż osi } y$$

$$A_x = A_{1x} + A_{2x} \quad \text{wzdłuż osi } x$$

Wartość skuteczną przebiegu wypadkowego wyznacza się ze wzoru

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

oraz przesunięcie fazy α odpowiadające wartości

$$\text{arc tg } \alpha = \frac{A_y}{A_x}$$

W celu wykreślenia przebiegu wypadkowego (jak na rys. 49b) należy obliczyć jego wartość maksymalną jako $\sqrt{2}A$ i uwzględnić przesunięcie fazowe α w stosunku do punktu 0 na osi czasu t , zwracając uwagę na znak $\operatorname{tg}\alpha$. Ujemna wartość $\operatorname{tg}\alpha$, a więc i kąta α wskazuje na opóźnienie, a dodatnia na przyspieszenie przebiegu wypadkowego w stosunku do punktu $t = 0$.

13. Właściwości obwodu prądu przemiennego

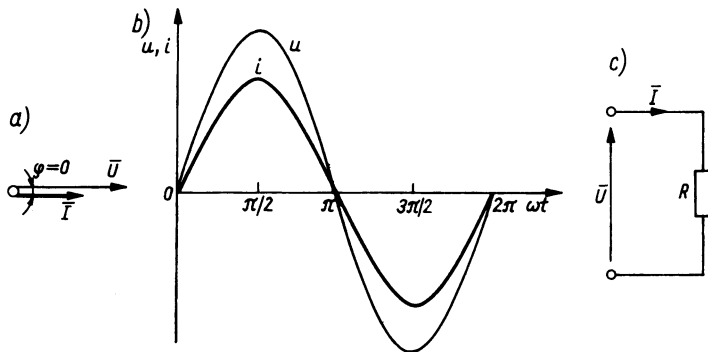
W obwodach prądu przemiennego zależność wartości prądu od napięcia jest bardziej złożona niż przy prądzie stałym. Na zależność tę mają bowiem wpływ inne właściwości obwodu oprócz **rezystancji** R , a to **indukcyjność** L i **pojemność** C . Zależy przy tym od nich nie tylko stosunek wartości maksymalnych (a więc i wartości skutecznych) przebiegów prądu i napięcia, lecz także przesunięcie tych przebiegów w fazie o kąt oznaczony literą φ (grecka litera fi) i nazywany **przesunięciem fazowym** przebiegu prądu względem przebiegu napięcia. Co do kształtu tych przebiegów, w większości przypadków przy sinusoidalnych zmianach napięcia również prąd zmienia się sinusoidalnie z tą samą częstotliwością. Tylko w obwodach z elementami nieliniowymi występuje odkształcenie przebiegów sinusoidalnych.

W obwodzie prądu przemiennego, podobnie jak w obwodzie prądu stałego, **rezystancja** R powoduje przemianę energii elektrycznej w ciepło. Im wartość prądu jest większa, tym nagrzewanie elementów odbiornika i przewodów zasilających jest intensywniejsze. Ponieważ rezystancja nie zależy od wartości prądu, zmiany prądu występują przy tym w takt zmian napięcia zasilającego.

Z powyższego wynika, że prawo Ohma jest spełnione dla wszystkich wartości chwilowych napięcia i prądu, czyli $i = u/R$, a więc również dla wartości skutecznych. Jeśli zatem indukcyjności i pojemności mają pomijalnie małe znaczenie w stosunku do rezystancji (np. w odbiorniku grzejnym), to można przyjąć

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{oraz} \quad \varphi = 0$$

przy czym I i U są wartością skuteczną odpowiednio prądu i napięcia.



Rys. 50. Wykres wektorowy (a) oraz przebieg napięcia i prądu (b) dla obwodu z rezystancją (c)

Na rysunku 50 pokazano przebiegi napięcia i prądu oraz wykres wektorowy dla takiego przypadku.

Na schematach obwodu prądu sinusoidalnie zmiennego strzałki napięcia i prądu symbolizują wektor tych wielkości, a nie rzeczywisty kierunek przepływu prądu czy działania napięcia, które ulegają przecież ciągłym zmianom. Kierunek strzałek \vec{U} i \vec{I} odpowiada tym samym zasadom, co w obwodach prądu stałego. Odwrócenie strzałki wskazuje na przesunięcie przebiegu o 180° lub odwrócenie go względem osi czasu.

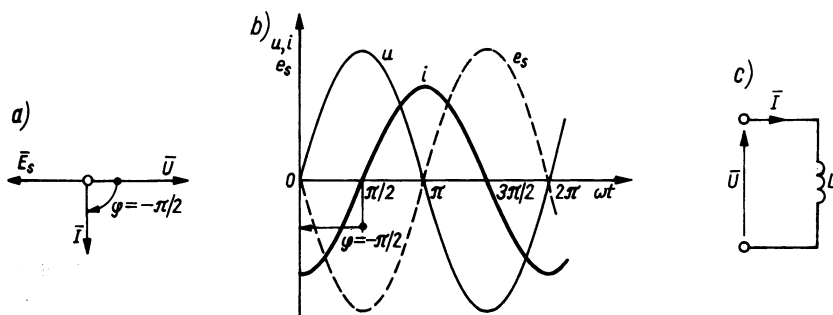
Jak to już omówiono w rozdziale 7, wokół przewodów, przez które przepływa prąd elektryczny, występuje pole magnetyczne. Jeśli wartość prądu się zmienia, to takim samym zmianom ulega również pole magnetyczne. Ale w przewodach znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym jest wytwarzana siła elektromotoryczna sem, która zgodnie z regułą Lenza przeciwdziała zmianom pola, a więc również zmianom wartości prądu elektrycznego. Zjawisko to nazywa się **samoindukcją** obwodu elektrycznego.

Wartość sem, czyli napięcia samoindukcji zależy od parametrów określających warunki powstawania pola magnetycznego, ujętych w pojęciu wielkości **indukcyjności** obwodu, oznaczanej literą L i wyrażanej w henrach H. Indukcyjność jest tym większa, im więcej zwojów tworzy przewód, im większą przenikalność magnetyczną ma rdzeń, na który nawinięto zwoje przewodu, im większą średnicę ma ten rdzeń i im krótszą tworzy drogę dla strumienia magnetycznego. Elementem o dużej indukcyjności jest więc wielozwojowa cewka z rdzeniem ferromagnetycznym, a w szczególności uzwojenie transformatora. Trzeba jednak mieć na uwadze, że przewody zasilające, tworzące jeden zwoj bez rdzenia, również wykazują indukcyjność, choć o małej wartości.

Siła elektromotoryczna **samoindukcji**, a więc i napięcie mają tę samą war-

tość, ale sem ma przeciwny znak, czyli jej przebieg jest odwrócony o $\pi/2$ względem osi czasu. Siła ta zależy od prędkości i kierunku zmian prądu w czasie. Jest ona tym większa, im szybsze są zmiany wartości prądu. Na sinusoidalnym przebiegu prądu zmiany te są najszybsze przy przejściu sinusoidy przez zero, a nie występują przy osiągnięciu wartości maksymalnej, dodatniej czy ujemnej. Przebieg sinusoidalny zmian napięcia samoindukcji (w takt wywołującego ją prądu) osiąga największą wartość, gdy zachodzi zmiana kierunku prądu, a przechodzi przez zero w chwilach osiągnięcia przez prąd maksymalnej wartości. Oznacza to, że przebieg tego napięcia opóźnia się względem przebiegu zmian prądu o 90° lub $\pi/2$ radianów.

Na rysunku 51 przedstawiono przebieg czasowy (zmiany w czasie) prądu i napięcia samoindukcji zgodnie z powyższym omówieniem. Jeśli wziąć pod uwagę tylko indukcyjność obwodu, to aby mógł płynąć prąd, napięcie zewnętrzne powinno zrównoważyć sem samoindukcji. Przebieg zmian napięcia odpowiada więc odwróconej względem osi czasu sinusoidzie napięcia. Przebieg zmian prądu jest zatem opóźniony względem przebiegu napięcia o kąt $\varphi = -90^\circ$ lub $-\pi/2$ radianów.



Rys. 51. Wykres wektorowy (a) oraz przebieg napięcia i prądu (b) w obwodzie z indukcyjnością (c)

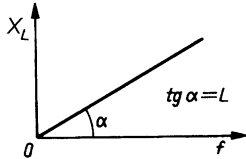
Indukcyjność, przeciwstawiając się zmianom wartości prądu, stawia jakby opór jego przepływowi. Opór ten nazywa się oporem indukcyjnym lub równoważnie **reaktancją indukcyjną**, oznaczoną literą X_L i wyrażaną jak rezystancja w Ω . Jest on tym większy, im większa jest indukcyjność L i im większa jest częstotliwość zmian napięcia, a raczej pulsacja $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$. A zatem

$$\| X_L = \omega \cdot L$$

oraz

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega \cdot L}$$

Na rysunku 52 pokazano zależność reaktancji indukcyjnej X_L od częstotliwości napięcia f . Jak widać, przy prądzie stałym $X_L = 0$. Oznacza to, że indukcyjność obwodu nie wywiera żadnego wpływu na przepływ prądu stałego.



Rys. 52. Zależność reaktancji indukcyjnej od częstotliwości prądu

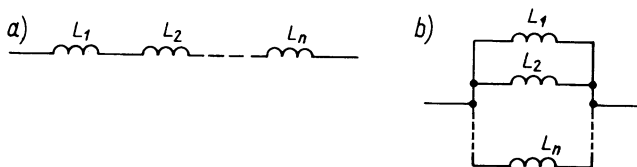
Wzór na reaktancję indukcyjną wskazuje, że w przypadku szeregowego i równoległego połączenia indukcyjności (np. cewek), jak na rysunku 53, **indukcyjność zastępczą** wyznacza się ze wzorów podobnych, jak na rezystancję zastępczą przy odpowiednim połączeniu oporników. A zatem

– dla połączenia szeregowego

$$\| L_z = \sum_{i=1}^n L_i$$

– dla połączenia równoległego

$$\| \frac{1}{L_z} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i}$$



Rys. 53. Połączenie szeregowo (a) i równoległe (b) indukcyjności

Często w obwodach prądu przemiennego stosuje się kondensatory. Kondensator jest utworzony z przewodników rozdzielonych dielektrykiem. Wskutek zmian kierunku przyłożonego napięcia zmienia się polaryzacja atomów i cząsteczek materiału izolacyjnego w kondensatorze. Powoduje to na okładzinach kondensatora gromadzenie się ładunku elektrycznego na zmianę jednego lub drugiego znaku. Ładunki ujemne w postaci elektronów dopływają od jednego

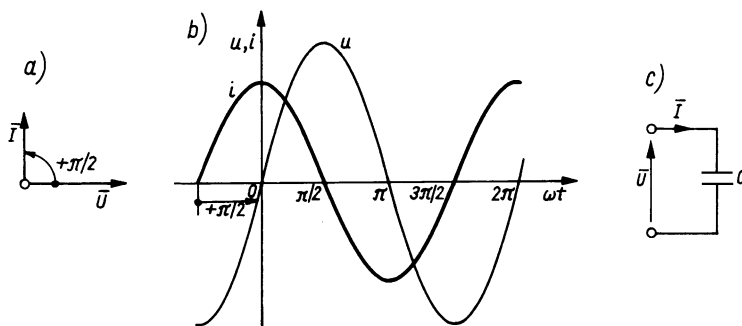
lub drugiego bieguna źródła prądu, a więc w obwodzie płynie prąd przemienny w sposób ciągły.

Kondensator gromadzi na okładzinach tym większy ładunek elektryczny, im wyższe jest napięcie między nimi i im większą ma on **pojemność elektryczną**, oznaczaną literą C i wyrażaną w faradach F. Pojemność ta jest tym większa, im większa jest powierzchnia okładzin S , im cieńsza oddziela je warstwa d izolacji oraz im lepszy jest to materiał izolacyjny, czyli im większą ma **przenikalność elektryczną** ε . Pojemność wyznacza się ze wzoru

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d}$$

Przy sinusoidalnych zmianach napięcia zasilającego prąd w kondensatorze osiąga największą wartość, gdy zmiany napięcia są najszybsze, a więc podczas zmiany kierunku napięcia. Prąd ma wartość zerową w chwilach osiągnięcia przez napięcie wartości maksymalnych, ponieważ polaryzacja cząstek substancji izolacyjnej osiąga wtedy stan uporządkowany. Kierunek przepływu prądu jest zgodny z kierunkiem napięcia, gdy kondensator się rozładowuje, gdyż ładunki elektryczne przepływają z okładzin pod działaniem napięcia, a przeciwny – gdy się ładuje, tj. gdy napięcie zmieni kierunek działania, doprowadzając do zmiany kierunku polaryzacji cząstek substancji dielektryka.

Takie procesy mogą zachodzić tylko przy sinusoidalnych zmianach wartości prądu wyprzedzających zmiany napięcia o kąt $\alpha = +90^\circ$. Obrazuje to rysunek 54.



Rys. 54. Wykres wektorowy (a) oraz przebieg napięcia i prądu (b) w obwodzie z pojemnością (c)

Wartość prądu w kondensatorze przy danym napięciu jest tym większa, im większa jest pojemność kondensatora i im szybsze są zmiany chwilowe, czyli im większa jest częstotliwość. Oznacza to, że iloczyn $\omega \cdot C$ wyraża przewod-

ność kondensatora przy prądzie sinusoidalnym, a więc odwrotność tej przewodności stanowi opór dla przepływu tego prądu, zwany oporem pojemnościowym lub inaczej **reaktancją pojemnościową**, oznaczaną jako X_C i wyrażoną w Ω . A zatem

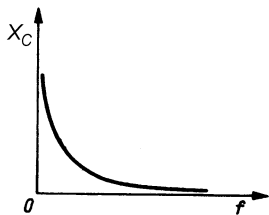
$$\| X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

oraz

$$I = \frac{U}{X_C} = U \cdot \omega \cdot C$$

Przewody linii zasilającej są oddzielone izolacją żył między sobą oraz powietrzem względem ziemi. Przedstawiają one również określoną pojemność, ale tak małą, że opór pojemnościowy tego układu jest bardzo duży. Dlatego prądy upływowe poza obwód są w warunkach normalnej pracy linii zawsze bardzo małe; w urządzeniach niskiego napięcia są one rzędu miliamperów.

Na rysunku 55 przedstawiono zależność reaktancji pojemnościowej od częstotliwości napięcia zasilającego. Jak widać, przy prądzie stałym reaktancja X_C jest nieskończenie duża, to znaczy kondensator tworzy przerwę izolacyjną w obwodzie. Natomiast im większa jest częstotliwość napięcia zasilającego, tym mniejszy opór stwarza kondensator dla przepływu prądu.



Rys. 55. Zależność reaktancji pojemnościowej od częstotliwości napięcia

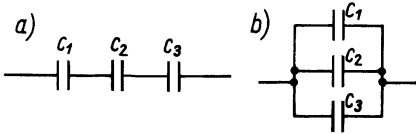
Ze względu na to, że pojemność C występuje w mianowniku wzoru na reaktancję pojemnościową, **pojemność zastępczą** w przypadku szeregowego i równoległego połączenia kondensatorów (rys. 56) wyznacza się ze wzorów odwrotnych niż w przypadku rezystancji i indukcyjności, czyli

– dla połączenia szeregowego

$$\| \frac{1}{C_z} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

– dla połączenia równoległego

$$C_z = \sum_{i=1}^n C_i$$



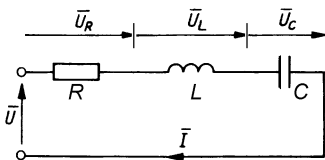
Rys. 56. Połączenie szeregowe (a) i równoległe (b) pojemności

14. Obwody RLC

W obwodach prądu przemiennego na zależności prądu, napięcia, mocy i energii wywierają wpływ wszystkie trzy właściwości: rezystancja R , indukcyjność L oraz pojemność C . Zależnie od rodzaju odbiorników niektóre z nich mają dominujące znaczenie, a inne mniejsze, a nawet mogą być pominięte. Na przykład grzejniki elektryczne są odbiornikami, które wystarczająco charakteryzuje tylko rezystancja R , silniki wykazują zawsze znaczną indukcyjność, ale też znaczącą rezystancję, a kondensatory są odbiornikami pojemnościowymi z niewielką rezystancją. Użyte w poprzednich rozdziałach symbole rezystancji, indukcyjności i pojemności mogą więc jednocześnie oznaczać jeden z podanych odbiorników energii elektrycznej.

W przypadku przewodów łączeniowych tylko ich rezystancja jest dominująca, choć często o małej wartości. Pozostałe parametry mogą być wtedy pominięte. Przy dużych długościach linii napowietrznych pewne znaczenie ma indukcyjność, a w liniach kablowych – również pojemność.

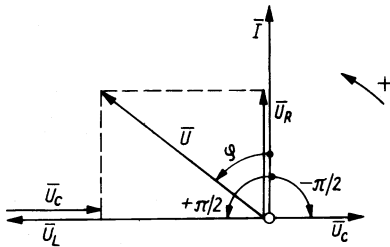
Odbiorniki charakteryzowane przez dwa lub nawet wszystkie trzy parametry jednocześnie mogą być rozpatrywane jako szeregowe lub równoległe ich układ. Na rysunku 57 przedstawiono obwód RLC. Reprezentuje on połączone szeregowo elementy: opornik, cewkę i kondensator.



Rys. 57. Obwód szeregowy RLC

Przez wszystkie elementy układu przepływa ten sam prąd sinusoidalny. Natomiast na elementach występują wprawdzie napięcia o przebiegu sinusoidalnym, ale o różnych wartościach maksymalnych, a więc i skutecznych, oraz różnie przesunięte w czasie. Jeżeli przebieg napięcia na oporniku jest w fazie z przebiegiem prądu, to napięcie na cewce wyprzedza przebieg prądu o kąt $+\pi/2$, a na kondensatorze opóźnia się o kąt $-\pi/2$. Suma przebiegów sinusoidalnych tych napięć – pomijając spadki napięcia na przewodach jako bardzo małe – odpowiada przebiegowi sinusoidalnemu napięcia zasilającego cały układ.

Zastępując przebiegi sinusoidalne napięć i prądu wektorami, można omówione zależności przedstawić wykreślnie, jak to pokazano na rysunku 58 dla przyjętych wartości skutecznych, odpowiadających długości wektorów dla reprezentowanych przez nie wielkości. Wykres zaczyna się rysować od wektora prądu, jest on bowiem jednakowy w całym układzie.



Rys. 58. Wykres wektorowy napięć i prądu dla obwodu szeregowego RLC z przewagą indukcyjności

Wektor \bar{I} może być narysowany w dowolnym położeniu, na przykład pionowym ku górze. Wektor napięcia \bar{U}_R pokrywa się z wektorem \bar{I} , gdyż ich przebiegi są w fazie ($\varphi_R = 0$). Wektor \bar{U}_L jest obrócony o kąt $\pi/2$ w kierunku dodatniego obrotu, a wektor \bar{U}_C – o kąt $\pi/2$ w kierunku odwrotnym. Suma tych wektorów odpowiada wektorowi napięcia zasilającego \bar{U} , co zapisuje się następująco:

$$\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C = \bar{I} \cdot R + \bar{I} \cdot \omega \cdot L + \bar{I} \frac{1}{\omega \cdot C}$$

przy czym napięcie \bar{U}_R jest w fazie z prądem \bar{I} , napięcie \bar{U}_L wyprzedza prąd \bar{I} o 90° , a napięcie \bar{U}_C opóźnia się względem prądu \bar{I} o 90° . Tak więc napięcia \bar{U}_L i \bar{U}_C są przesunięte o 180° względem siebie, a ich wypadkowa ma długość $\bar{U}_L - \bar{U}_C$. Napięcie \bar{U}_R jest prostopadłe do tego wypadkowego wektora $\bar{U}_L - \bar{U}_C$. Długość wektora napięcia \bar{U} , czyli jego wartość skuteczną można obliczyć ze wzoru

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

Im większą wartość przyjmie wyrażenie pierwiastka, tym mniejsza będzie wartość prądu przy danym napięciu zasilania, a więc wyrażenie to odpowiada oporowi dla przepływu prądu. Opór ten, wynikający łącznie z cech rezystancji, indukcyjności i pojemności obwodu, nazywa się **impedancją** oraz oznacza literą Z i wyraża się w Ω .

Prawo Ohma dla obwodów prądu przemiennego ma postać

$$\| I = \frac{U}{Z}$$

gdzie impedancja

$$\| Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

Przesunięcie fazowe φ przebiegu prądu względem napięcia zasilania U całego układu

$$\| \varphi = \arctg \frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}$$

Rozpatrując powyższy wzór na impedancję, łatwo dojść do wniosku, że przy bardzo małej indukcyjności L i przy nieskończenie dużej pojemności C , czyli w obwodzie bez przerwy izolacyjnej, prawo Ohma wyraża się wzorem

$$I = \frac{U}{R}$$

jak przy prądzie stałym, tylko że napięcie i prąd są tu wyrażone w wartościach skutecznych.

W obwodzie z rezystancją i indukcyjnością, zasilanym ze źródła napięcia stałego, indukcyjność nie odgrywa żadnej roli (ponieważ $f=0$). Wartość prądu zależy tylko od wartości napięcia i rezystancji. W obwodzie z przerwą izolacyjną, np. z włączonym szeregowo kondensatorem, prąd stały nie płynie niezależnie od wartości pojemności, gdyż reaktancja pojemnościowa X_C jest nieskończenie duża (przy $f=0$). Warto jednak wiedzieć, że w rzeczywistości materiały izolacyjne wykazują pewną ilość elektronów swobodnych, które powodują, że przez izolację płynie niewielki prąd elektryczny, ale przy bardzo dużych napięciach prąd może osiągać duże wartości.

W obwodach prądu przemiennego mają również zastosowanie oba omówione poprzednio (w odniesieniu do obwodów prądu stałego) **prawa Kirchhoffa**, z tym jednak, że w podanych wzorach należy i tu stosować wielkości wektorowe napięć i prądów. Umożliwia to obliczenia rozgałęzionych obwodów prądu przemiennego.

W przypadku układu równoległego *RLC* zasilanego napięciem sinusoidalnie zmiennym, w jego gałęziach płyną prądy pod działaniem tego samego napięcia *U*. Łatwo więc obliczyć wartości prądu w każdej gałęzi w opisany wyżej sposób. Prąd zasilający cały układ jest sumą prądów w poszczególnych gałęziach. Jego wartość można więc wyznaczyć, dodając wektorowo obliczone wartości prądów w gałęziach i znajdując wartość skuteczną tego prądu zasilania, jak też przesunięcie fazowe jego przebiegu względem napięcia zasilania.

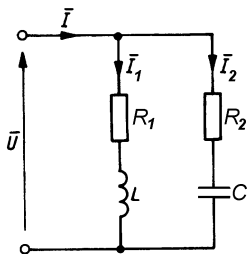
Taki sposób postępowania wyjaśnia obliczenie przykładowego obwodu rozgałęzionego, pokazanego na rysunku 59. Składa się on z dwóch gałęzi: jednej z cewką, drugiej z kondensatorem, przy czym w obydwu gałęziach występuje rezystancja. W tych gałęziach prądy \vec{I}_1 i \vec{I}_2 płyną przy tym samym napięciu \vec{U} . Zgodnie z poprzednimi wzorami wartości skuteczne obu prądów i ich przesunięcia fazowe względem napięcia \vec{U} można wyrazić następująco:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega \cdot L)^2}}$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\omega \cdot L}{R_1}$$

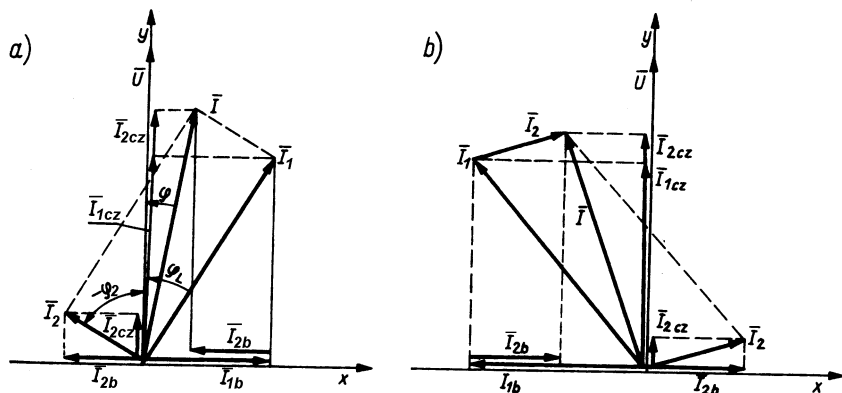
$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + \frac{1}{(\omega \cdot C)^2}}}$$

$$\varphi_2 = -\arctg \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R_2}$$



Rys. 59. Przykładowy obwód rozgałęziony *RLC* prądu przemiennego

Wykres wektorowy napięcia i prądów w rozpatrywanym obwodzie rozgałęzionym pokazano na rysunku 60. Wykres zaczyna się rysować od wektora napięcia \vec{U} , w stosunku do którego rysuje się wektory prądów: \vec{I}_1 i \vec{I}_2 , korzystając z podanych wyżej obliczeń. Prądy te można zsumować wykreślnie, tworząc



Rys. 60. Wykres wektorowy napięcia i prądów w obwodzie z rysunku 59 o przewodzie indukcyjności (a) i przewodzie pojemności (b)

na nich równoległobok i znajdując wektor prądu zasilającego cały układ \vec{I} jako jego przekątną.

Można jednak również rozwiązać zadanie rachunkowo, wyznaczając składowe wektorów \vec{I}_1 i \vec{I}_2 rzutowane na kierunek wektora \vec{U} , czyli prądy czynne $I_{cz} = I \cdot \cos \varphi$ oraz składowe prostopadłe do wektora \vec{U} , czyli prądy bierne $I_b = I \cdot \sin \varphi$. Następnie sumuje się algebraicznie te składowe oraz oblicza wartość skuteczną (przy wykorzystaniu twierdzenia Pitagorasa) i przesunięcie fazowe. Wówczas

$$I_{cz} = I_{1cz} + I_{2cz} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 + I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

$$I_b = I_{1b} + I_{2b} = I_1 \cdot \sin \varphi_1 - I_2 \cdot \sin \varphi_2$$

po czym:

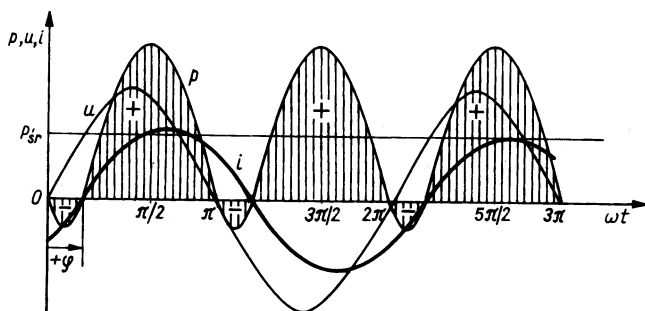
$$I = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n I_{icz}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n I_{ib}\right)^2}$$

$$\varphi = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n I_{ib}}{\sum_{i=1}^n I_{icz}}$$

Jak wynika z wykresu wektorowego na rysunku 60a, przyłączenie kondensatora równoległe do odbiornika indukcyjnego zmniejsza przesunięcie fazowe przebiegu prądu pobieranego przez układ względem przebiegu napięcia zasilania. Przy mniejszym kącie φ współczynnik mocy $\cos\varphi$ jest większy; można więc przez odpowiedni dobór pojemności kondensatora doprowadzić do kąta φ bliskiego zeru, czyli $\cos\varphi$ bliskiego 1. Należy jednak unikać sprowadzenia przesunięcia fazowego do zera, gdyż grozi to przepięciami, jakie mogą spowodować uszkodzenia izolacji urządzeń.

15. Moc w obwodzie prądu przemiennego

Moc pobierana przez element obwodu prądu sinusoidalnie zmiennego ulega ciągłym zmianom, wyraża ją bowiem wzór $p = u \cdot i$. Na rysunku 61 przedstawiono przebieg zmian mocy chwilowej odbiornika wynikający z mnożenia wartości chwilowych napięcia i prądu w każdej chwili ich zmian, w którym występuje przesunięcie fazowe między przebiegiem napięcia i prądu. Jak wynika z wykresu, w niektórych przedziałach zmian napięcia i prądu moc jest ujemna, czyli jest oddawana przez odbiornik do źródła prądu. Moc chwilowa jest dodatnia, gdy odbiornik pobiera energię ze źródła prądu. Z tego względu **moc średnia** P_{sr} za okres T przekazywana przez źródło prądu do odbiornika jest mniejsza od iloczynu wartości skutecznych napięcia U oraz prądu I .



Rys. 61. Wykres zmienności napięcia, prądu i mocy czynnej w obwodzie RL prądu sinusoidalnego

Moc ta – zwana **mocą czynną** – jest wyrażona zależnością

$$\| P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

w której:

P – moc, w W,

U – wartość skuteczna napięcia, w V,

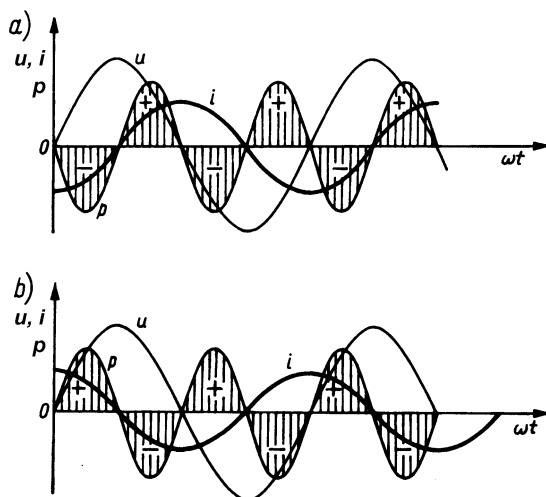
I – wartość skuteczna prądu, w A,

$\cos \varphi$ – **współczynnik mocy** o wartości w zakresie od zera przy kącie $\varphi = 90^\circ$ do jedności przy $\varphi = 0^\circ$.

Przebieg zmienności mocy jest także sinusoidalny, lecz jego częstotliwość jest dwukrotnie większa od częstotliwości napięcia i prądu. Suma pól powierzchni pod wykresem zmian mocy (zakreskowanych na rysunku 61) z uwzględnieniem znaku odpowiada energii elektrycznej przekazanej przez źródło prądu do odbiornika w okresie T . Wartość średnia mocy P , stała w całym okresie T , jest wyznaczona w taki sposób, by pole prostokąta o wysokości P i długości T było równe sumie pól pod wykresem zmian mocy chwilowych.

Wartość mocy czynnej P jest zależna zarówno od wartości skutecznych napięcia i prądu, jak i od współczynnika mocy, będącego funkcją kosinusoidalną kąta przesunięcia fazowego przebiegów zmian prądu i napięcia. Osiąga ona wartość maksymalną $P = P_{\max} = U \cdot I$ przy kącie $\varphi = 0$, a jest równa zero przy kącie $\varphi = \pm 90^\circ$.

Wykresy zmian wartości mocy chwilowej przy kącie przesunięcia fazowego $\varphi = \pm 90^\circ$ pokazano na rysunku 62. Dotyczą one wyidealizowanych przypadków obwodów z jedną tylko dominującą wielkością, a więc z przewagą indukcyjności lub pojemności. W pierwszym przypadku (rys. 62a) energia przekazana w ćwiartce okresu T ze źródła do odbiornika na wytworzenie w



Rys. 62. Wykres zmienności mocy czynnej w obwodach z indukcyjnością L (a) i pojemnością C (b)

nim pola magnetycznego jest w następnej ćwiartce okresu oddawana stopniowo do źródła przy zmniejszaniu się natężenia tego pola. W drugim przypadku (rys. 62b) jest podobnie, z tym że energia pobrana ze źródła jest magazynowana w polu elektrycznym kondensatora, a następnie oddawana stopniowo do źródła przy zmniejszaniu się natężenia pola (zaniku pola).

Jak wynika z powyższego omówienia, jedynie moc P jest wykorzystywana w odbiorniku do uzyskania energii użytkowej i stąd jej nazwa moc czynna. Energia ta jest wyznaczana ze wzoru

$$\| \quad W = P \cdot t = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

gdzie: t – czas, zwykle w godzinach (h), a wtedy energia W jest wyrażona w kilowatogodzinach (kWh), gdy P wyraża się w kilowatach (kW).

Jest to **energia czynna** zużyta przez odbiornik.

Ponieważ parametry konstrukcyjne urządzeń elektroenergetycznych (np. prądnic, transformatorów), takie jak ich wymiary i masa są dostosowane do znamionowych wartości napięcia i prądu, to iloczyn

$$\| \quad S = U \cdot I$$

ma znaczenie praktyczne. Chodzi o to, iż urządzenia te są wykorzystywane w pełni tylko przy współczynniku mocy pobieranej $\cos\varphi = 1$. **Moc** S nazywa się **pozorną**, a jej jednostką jest kilowoltoamper (kVA).

Jeśli odbiorniki pobierają energię przy $\cos\varphi$ mniejszym od jedności, to urządzenia zasilające muszą być zbudowane na moc pozorną większą od pobieranej przez odbiorniki mocy czynnej P . Stąd dążenie do **poprawy współczynnika mocy** pobieranej przez odbiorniki, np. przez dołączanie kondensatora równolegle do odbiorników indukcyjnych. Jest to **kondensator do kompensacji** mocy biernej.

Niekiedy przydatne jest skorzystanie z pojęcia tzw. **mocy biernej**, wyrażanej wzorem

$$\| \quad Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

Jednostką tej mocy jest var, oznaczany var, lub kilowar (kvar). Istnieją na przykład liczniki energii, skonstruowane do pomiaru energii biernej

$$W_b = Q \cdot t = U \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot t$$

wyrażonej w kilowarogodzinach (kvarh). Wielkość ta wskazuje na to, że dane urządzenie pobiera energię przy $\cos\varphi < 1$, czyli nie jest w pełni wykorzystane.

Wpływa to na zwiększony koszt dostawy energii elektrycznej i dlatego taryfy opłat za energię elektryczną przewidują opłaty karne za pobór energii biernej, który jest mierzony przez specjalne liczniki energii biernej.

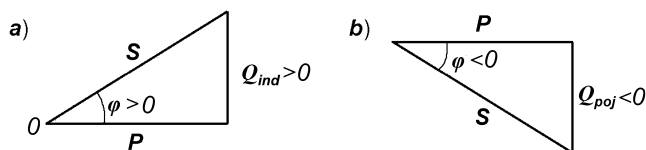
Między mocą czynną P , mocą bierną Q a mocą pozorną S występuje następująca zależność:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

lub inaczej

$$\| P = \sqrt{S^2 - Q^2}$$

Często tę relację przedstawia się za pomocą tak zwanego **trójkąta mocy**, czyli trójkąta prostokątnego o postaci jak na rysunku 63.



Rys. 63. Zależności między mocą czynną P , mocą bierną Q a mocą pozorną S w obwodzie o charakterze indukcyjnym (a) oraz pojemnościowym (b)

16. Przebiegi odkształcone

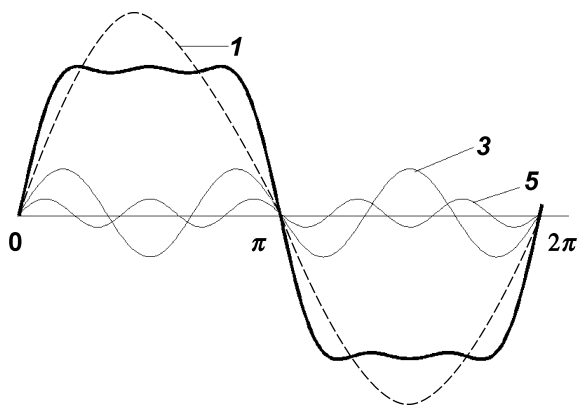
Przebiegi dokładnie sinusoidalne są zwane **harmonicznymi**. W praktyce przebiegi czasowe napięcia i prądu coraz częściej bywają odkształcone od sinusoidalnych. Pod tym względem rozróżnia się odkształcenia powodowane przez:

- źródła wytwarzające napięcia niesinusoidalne,
- odbiorniki z **elementami nieliniowymi** (podczas gdy źródła wytwarzają napięcia sinusoidalne).

Niektóre urządzenia i odbiorniki, między innymi spawarki, elektromagnesy, układy elektroniczne z diodami i tranzystorami, charakteryzują się zmienną rezystancją, indukcyjnością lub pojemnością, zależną od wartości napięcia.

Taką ich cechę określa się mianem **nieliniowości**. Stosowanie tych urządzeń powoduje odkształcenia od sinusoidalnego przebiegu prądu, a także napięcia na tych elementach. Jeżeli jednak przebiegi te są nadal okresowe, to można je rozłożyć obliczeniowo na szereg przebiegów sinusoidalnych o różnej częstotliwości i amplitudzie. Są to tak zwane **wyższe harmoniczne**. Inaczej ujmując ten problem, można sobie wyobrazić, że przebieg odkształcony powstaje przez nałożenie na dany, podstawowy sinusoidalny przebieg napięcia lub prądu kilku przebiegów, również sinusoidalnych, lecz o zwielokrotnionych częstotliwościach i różnych amplitudach.

W przypadku gdy przebieg okresowy niesinusoidalny jest symetryczny względem osi czasu, jego rozkład zawiera tylko harmoniczne o częstotliwości nieparzystej (inaczej nieparzystego rzędu). Oznacza to, że przebieg od-



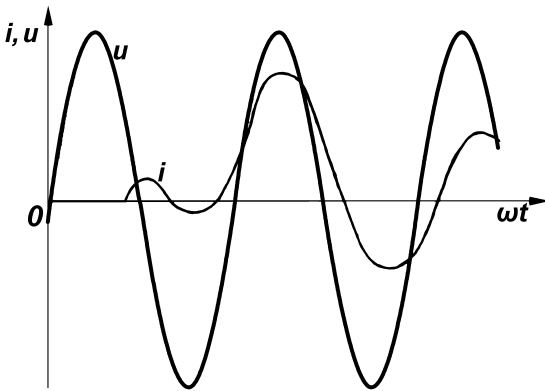
Rys. 64. Przebieg okresowy odkształcony i jego rozkład na składowe harmoniczne: 1 – podstawową (pierwszego rzędu), 3 i 5 – wyższych rzędów

kształcony o częstotliwości f_1 składa się z harmonicznej składowej podstawowej o częstotliwości f_1 i harmonicznych wyższego rzędu o częstotliwościach $3f_1$, $5f_1$, $7f_1$ itd. Współczynnik odkształcenia przebiegu rzeczywistego określa się jako stosunek wartości amplitud sumy harmonicznych wyższego rzędu do amplitudy harmonicznej podstawowej. Na rysunku 64 pokazano przykładowo rozkład przebiegu odkształconego, zawierającego trzy harmoniczne.

W stanach nieustalonych wywołanych zmianami w obwodach elektrycznych (na przykład przy ich załączaniu) ujawniają się wpływy energii zmagazynowanej w polu magnetycznym cewek i polu elektrycznym kondensatorów. Każda zmiana wartości prądu w obwodzie z indukcyjnością powoduje powstawanie siły elektromotorycznej samoindukcji, przeciwdziałającej tym zmianom. W chwili zmiany w obwodzie osiąga ona dużą wartość, a prąd zmienia się z pewnym opóźnieniem. W obwodzie z pojemnością każda zmiana kierun-

ku napięcia powoduje powstawanie chwilowego przepływu prądu o dużej wartości. W wyniku tego napięcie utrzymuje się na ograniczonym poziomie, a odkształcenia przebiegu prądu szybko zanikają.

Na rysunku 65 pokazano przykładowo przebieg prądu w obwodzie z indukcyjnością i pojemnością po załączeniu napięcia zasilania. Przebieg ten zależy nie tylko od parametrów obwodu, lecz także od chwili (fazy) załączenia napięcia zasilania. Są to zależności złożone. Chociaż trzeba się liczyć z możliwością chwilowych **przepięć** nazywanych **łączeniowymi** i przetężeń prądu, w praktyce są one zwykle dość ograniczone i mogą być groźne tylko dla szczególnie wrażliwych odbiorników.



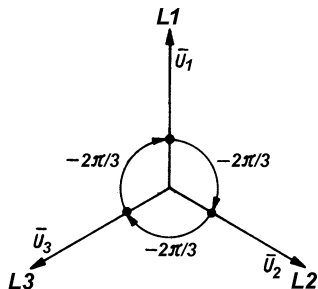
Rys. 65. Przebieg czasowy prądu w przykładowym obwodzie przy załączeniu przemiennego napięcia zasilania

17. Obwody trójfazowe

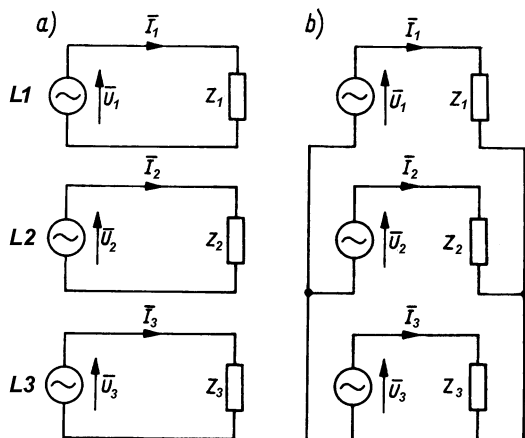
Obwodem trójfazowym nazywa się układ trzech obwodów prądu przemiennego, w których występują przebiegi napięć o jednakowej częstotliwości i tej samej wartości maksymalnej, lecz przesunięte względem siebie w fazie o $2\pi/3$ (o kąt 120°), czyli w czasie o $1/3$ okresu T .

Na rysunku 66 pokazano wykres wektorowy napięć w tych trzech obwodach, nazywanych fazami, a na rysunku 67 – schematy układu nieskojarzonego i skojarzonego.

Układ skojarzony jest połączeniem trzech obwodów jednofazowych zawierających źródło i odbiornik o impedancji Z . W układzie tym stosuje się



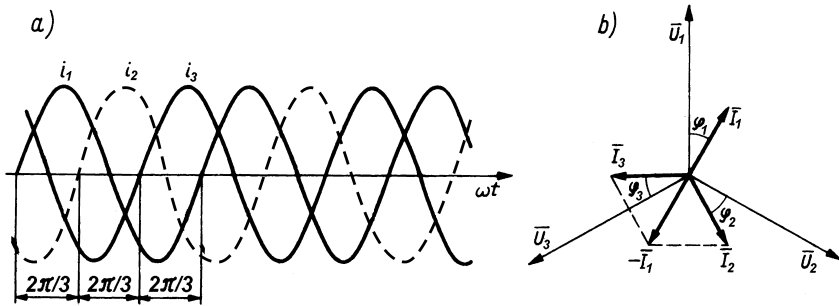
Rys. 66. Wykres wektorowy napięć fazowych w obwodzie trójfazowym



Rys. 67. Układ trójfazowy: nieskojarzony (a) i skojarzony (b) przez połączenie w gwiazdę

o połowę mniej przewodów, co jest możliwe, jeśli obwody są **symetryczne**. Oznacza to, że nie tylko wartości maksymalne, a więc i wartości skuteczne napięcia fazowego poszczególnych faz są jednakowe, lecz także impedancja odbiorników we wszystkich fazach jest taka sama pod względem wartości i przesunięcia fazowego. Wynika stąd, że przebiegi czasowe prądów we wszystkich trzech fazach są takie same, o jednakowej wartości maksymalnej i skutecznej oraz jednakowym przesunięciu fazowym względem napięć fazowych. Przesunięcia wzajemne prądów fazowych podobnie jak napięć wynoszą zatem 120° .

Na rysunku 68b przedstawiono wykres wektorowy napięć i prądów takiego **układu symetrycznego**. Należy zauważyć, że dodając wykreślnie trzy wektory prądów fazowych uzyskuje się sumę równą zero, czyli $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = 0$. Można to sprawdzić na przebiegach prądów fazowych (rys. 68a), sumując wartości chwilowe prądów $i_1 + i_2 + i_3$ dla dowolnych chwil i znajdując, że się zawsze znoszą w węzle na rysunku 68b. A więc zbędne staje się prowadzenie przewodu powrotnego.

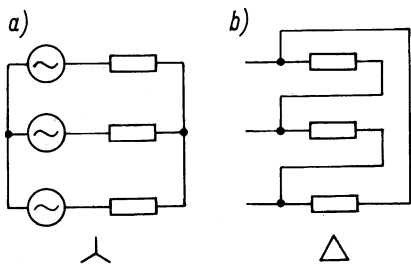


Rys. 68. Przebiegi prądów w trzech fazach (a) oraz wykres wektorowy napięć i prądów fazowych (b)

Oszczędność liczby przewodów (trzy lub cztery przewody zamiast sześciu) przy przesyłce tej samej mocy od źródła do odbiorników jest powodem powszechnego stosowania układów trójfazowych we wszystkich elektroenergetycznych liniach przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. A są jeszcze inne zalety układów trójfazowych, między innymi prostota konstrukcji trójfazowych silników elektrycznych, ze względu na możliwość wytwarzania pola wirującego, a także ich duża sprawność.

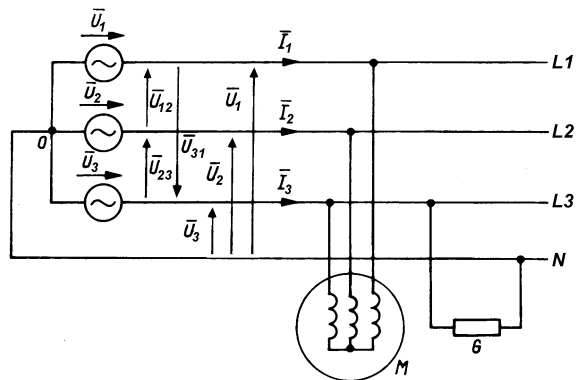
Na rysunku 67 oznaczono fazy układu trójfazowego symbolami L1, L2 i L3, przy czym jest zasadą, że jeśli przebieg napięcia przewodu fazowego (linii) oznaczy się jako L1, uznając go za podstawowy, to w fazie L2 jest on opóźniony w stosunku do przebiegu napięcia w fazie poprzedniej o 120° . Podobnie przebieg napięcia w fazie L3 jest opóźniony o 120° w stosunku do przebiegu w fazie L2. Fazy bywają też oznaczane literami R, S, T lub A, B, C z zachowaniem tej samej zasady. Ta kolejność faz ma duże znaczenie praktyczne w przypadku silników trójfazowych, gdyż wyznacza kierunek ich obrotów. Gdy wystąpi zmiana kolejności faz na zaciskach silnika trójfazowego, wówczas powoduje ona zmianę kierunku jego obrotów, co najczęściej kończy się awarią.

Łączenie źródeł i odbiorników poszczególnych faz w obwodzie trójfazowym może być rozwiązane na dwa sposoby. Albo końce faz łączy się w jednym punkcie, zwanym **neutralnym**, a początki łączy z przewodami linii, tworząc tzw. **połączenie w gwiazdę**, albo koniec każdej fazy łączy się z początkiem następną i przyłącza do przewodów linii, tworząc **połączenie w trójkąt**. Połączenia te pokazano na rysunku 69. Częściej korzysta się z połączeń w gwiazdę, zwłaszcza w źródle, ze względu na możliwość uzyskania w układzie dwóch poziomów napięcia zasilania.



Rys. 69. Połączenie faz źródła prądu i odbiornika w gwiazdę (a) i samego odbiornika w trójkąt (b), oznaczone odpowiednimi symbolami

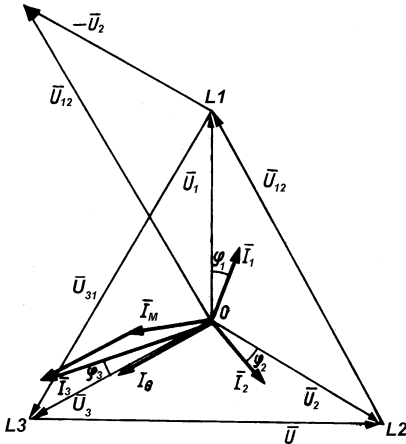
Na rysunku 70 pokazano schemat części obwodu trójfazowego z przewodem neutralnym, ze źródłem połączonym w gwiazdę i przyłączonym silnikiem trójfazowym M połączonym w gwiazdę oraz jednofazowym grzejnikiem G . Wykres wektorowy napięć i prądów tego układu z zaznaczeniem napięć fazowych i międzyprzewodowych przedstawiono na rysunku 71. Napięcia fazowe \vec{U}_1 , \vec{U}_2 i \vec{U}_3 tworzą gwiazdę. Chcąc znaleźć napięcia między przewodami fazowymi: L1-L2, L2-L3 i L3-L1, zwane napięciami międzyprzewodowymi, należy dodać odpowiednie wektory napięć fazowych, na przykład \vec{U}_1 i \vec{U}_2 dla uzyskania wektora napięcia \vec{U}_{12} .



Rys. 70. Układ trójfazowy z przewodem neutralnym, ze źródłem i odbiornikiem trójfazowym połączonymi w gwiazdę i z odbiornikiem jednofazowym

Dla tego przypadku należy od wektora \vec{U}_1 odjąć \vec{U}_2 , gdyż na drodze od L2 do L1 wektor \vec{U}_2 jest skierowany przeciwnie, a \vec{U}_1 zgodnie z kierunkiem sumowania, co pokazano na rysunku 71. Uwzględniając, że napięcia fazowe mają jednakową wartość skuteczną, a kąt między nimi wynosi 120° , napięcie międzyprzewodowe jest $\sqrt{3}$ razy wyższe niż fazowe. W Polsce napięcia fazowe linii trójfazowych doprowadzonych do wsi wynoszą 230 V, a międzyprzewodowe $\sqrt{3} \cdot 230 \text{ V} = 400 \text{ V}$.

Silnik trójfazowy (rys. 70) jest zasilany napięciem 400 V, natomiast grzejnik jednofazowy – napięciem 230 V. Do realizacji zasilania jest konieczny tzw.



Rys. 71. Wykres wektorowy napięć i prądów dla układu z rysunku 70

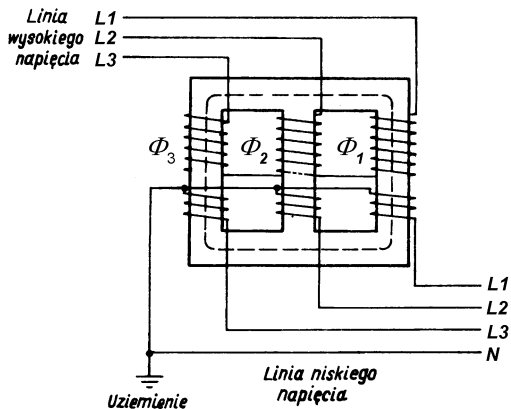
przewód neutralny, wyprowadzony z punktu neutralnego źródła prądu. Taki jest cel budowy linii czteroprzewodowych.

Odbiorniki trójfazowe, konstruowane z zasady jako symetryczne, pobierają taki sam prąd we wszystkich trzech fazach. Natomiast odbiorniki jednofazowe, powodujące przepływ prądu przez jeden z przewodów fazowych i przewód neutralny, wywołują asymetrię układu trójfazowego. Przewód neutralny pełni w tym przypadku funkcję przewodu wyrównawczego.

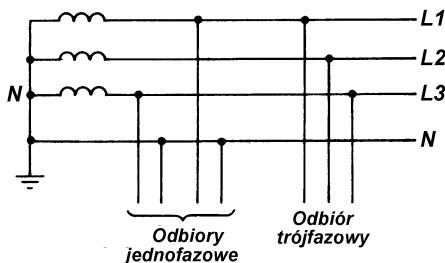
Linie trójfazowe z przewodem neutralnym, o napięciu 230/400 V, są zasilane najczęściej z transformatorów przyłączonych do linii wysokiego napięcia, na przykład 15 kV. **Transformator** taki składa się z rdzenia zawierającego trzy kolumny i dwa jarzma, które tworzą zamknięte obwody magnetyczne (drogi strumieni magnetycznych). Na kolumnach rdzenia są nawinięte uzwojenia fazowe wysokiego i niskiego napięcia, jak pokazano schematycznie na rysunku 72. Uzwojenia te, zwane uzwojeniem pierwotnym i wtórnym, tworzą obwody elektryczne. Dzięki symetrycznej budowie transformatora prądy trzech faz oraz wywołane przez nie strumienie magnetyczne sumują się do zera.

Na rysunku 73 przedstawiono tylko uzwojenie wtórne transformatora trójfazowego, pokazywane zwykle jako źródło napięcia linii trójfazowych o napięciu 230/400 V. Uzwojenie to jest połączone w gwiazdę z uziemionym punktem neutralnym. Uziemienie (połączenie z ziemią) wykonuje się za pomocą tak zwanego **uziomu**, zwykle w postaci płyt metalowych lub zespołu rur, pograżonych pionowo w ziemię.

Uziemienie punktu neutralnego uzwojenia wtórnego w transformatorze zasilającym linie 230/400 V wynika z warunku nieprzekroczenia wartości napięcia 250 V względem ziemi, co było kryterium zaliczenia tych linii do urządzeń niskiego napięcia. W razie zwarcia z ziemią (doziemienia) fazy L1

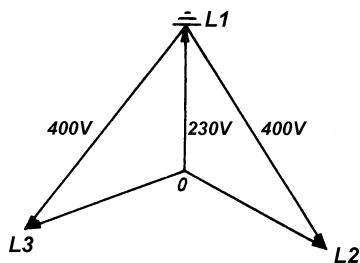


Rys. 72. Budowa transformatora zasilającego linię trójfazową 230/400 V



Rys. 73. Schemat obwodu trójfazowego z przewodem neutralnym, zasilanego z wtórnego uzwojenia transformatora z rysunku 72

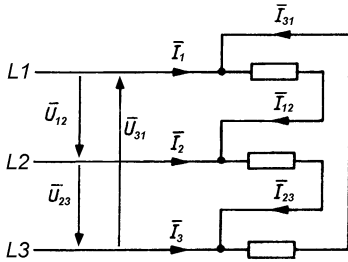
w układzie z niezziemionym punktem neutralnym, pozostałe przewody fazy znalazłyby się pod napięciem 400 V względem ziemi (rys. 74). Uziemienie punktu neutralnego (zerowego) w transformatorze i przewodu neutralnego w liniach 230/400 V przynosi też inne korzyści.



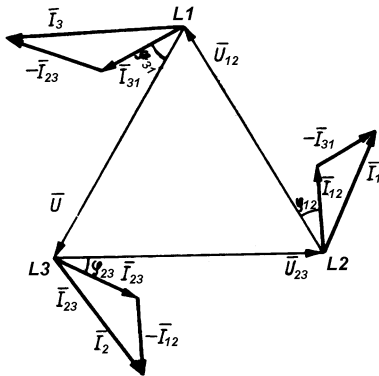
Rys. 74. Napięcia względem ziemi przewodów fazy L2 i L3 oraz przewodu neutralnego przy doziemieniu fazy L1

W odbiorniku o fazach połączonych w trójkąt (rys. 75) poszczególne fazy znajdują się pod napięciem międzyprzewodowym, a prądy dopływające do układu przewodami fazowymi linii zasilającej rozdzielają się na dwie sąsiednie fazy odbiornika. Na wykresie wektorowym napięć i prądów w obwodzie

(rys. 76) przedstawiono sumowanie się prądów w fazach L1 i L2 z uwzględnieniem ich kierunków ($\vec{I}_{12} - \vec{I}_{31}$) odpowiadające prądowi przewodowemu \vec{I}_1 . Sumowanie to daje wynik podobny jak przy sumowaniu napięć fazowych w układzie gwiazdowym. Oznacza to, że przy zachowaniu symetrii faz prąd w przewodzie zasilającym jest $\sqrt{3}$ razy większy od prądu fazowego, natomiast napięcie fazowe w rozpatrywanym układzie odpowiada napięciu międzyprzewodowemu.



Rys. 75. Połączenie faz odbiornika trójfazowego w trójkąt z zaznaczeniem napięć i prądów



Rys. 76. Wykres wektorowy napięć i prądów dla układu z rysunku 75

W przypadku ogólnym moc układu trójfazowego jest sumą mocy czynnej jęch trzech faz, a zatem

$$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi_3$$

Przy równości napięć fazowych U_f i jednakowym prądzie I_f (przy takim samym obciążeniu faz), a więc w obwodzie **symetrycznym**

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

Zależnie od układu połączeń obwodu trójfazowego rozróżnia się wielkości:

– przy **połączeniu w gwiazdę**

$$\begin{cases} U_p = \sqrt{3} \cdot U_f \\ I_p = I_f \end{cases}$$

– przy **połączeniu w trójkąt**

$$\begin{cases} U_p = U_f \\ I_p = \sqrt{3} \cdot I_f \end{cases}$$

Moc czynna odbiornika w obwodzie symetrycznym jest zawsze wyrażona wzorem

$$P = 3 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos\varphi$$

Wzór ten można napisać w postaci

$$\| P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

przy czym: I oraz U oznacza skuteczne wartości prądu przewodowego i napięcia międzyprzewodowego (w układzie 230/400 V należy przyjmować napięcie $U = 400$ V).

Podobnie **energia czynna odbiornika** pobierana w symetrycznym układzie trójfazowym w czasie t jest wyznaczana z zależności

$$\| W = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot t$$

W przypadku energii biernej jest wyrażona wzorem

$$\| W_b = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot t$$

Podkreślić należy, że energia bierna nie ma interpretacji fizycznej, a jest stosowana jedynie w przypadku rozliczeń z przedsiębiorstwem energetycznym.

Indeks podstawowych pojęć

- A** akumulator (32)
 - amper (11)
 - anion (10)
 - atom (9)
- B** biegun źródła (16)
- C** ciepło Joule'a (25)
 - $\cos\varphi$ (63)
 - cząsteczka (9, 31)
 - częstotliwość (14)
- D** dielektryk (11)
 - dipol (11)
 - dioda półprzewodnikowa (39)
 - działanie elektrodynamiczne (29)
- E** elektroda (16, 31)
 - elektrolit (31)
 - elektroliza (31)
 - elektroluminescencja (35)
 - elektromagnes (21)
 - elektron (9)
 - elektron swobodny (10)
 - element nieliniowy (65)
 - energia bierna (64)
 - energia czynna (46, 64, 74)
 - energia elektryczna (11, 46)
- F** farad (55)
 - fotoluminescencja (35)
 - foton (35)
- H** harmoniczna (65, 66)
 - henr (52)
 - herc (14)
 - histereza (23)
- I** impedancja (59)
 - indukcja elektromagnetyczna (28)
 - indukcja magnetyczna (22)
 - indukcyjność (51, 52)
 - indukcyjność zastępcza (54)
 - izolator elektryczny (11)
- J** jądro atomu (9)
 - jon (10)
- K** kation (10)
 - kierunek dodatni napięcia (17)
 - kierunek dodatni prądu (13, 17)
 - kilowat (12)
 - kilowatogodzina (11)
 - kilowolt (12)
 - kondensator do kompensacji (64)
 - kondensator elektryczny (18)
 - konduktywność (25)
 - kulomb (11)
- L** linie sił pola elektrycznego (16)
 - linie sił pola magnetycznego (20)
 - luminofor (35)
- M** magnetyzm szczałkowy (23)
 - materiał diamagnetyczny (19)
 - materiał ferromagnetyczny (19)
 - materiał paramagnetyczny (19)
 - moc bierna (64)
 - moc czynna (62)
 - moc elektryczna (11)
 - moc pozorną (64)
 - moc średnia (62)
 - moment magnetyczny (19)
- N** nagrzewanie pojemnościowe (26)

- napięcie elektryczne (12)
 natężenie pola elektrycznego (16)
 natężenie pola magnetycznego (20)
 natężenie pola powściągające (23)
 natężenie prądu elektrycznego (11)
 neutron (9)
 nieliniowość (66)
- O** obwód elektryczny (36)
 odbiornik elektryczny (36)
 ogniwo galwaniczne (31)
 ogniwo pierwotne (32)
 okres zmian (14)
 om (24)
 opór właściwy (24)
 orbita walencyjna (9)
- P** pętla histerezy (23)
 pojemność akumulatora (33)
 pojemność elektryczna (55)
 pojemność zastępcza (56)
 polaryzacja (11)
 pole elektryczne (16)
 pole magnetyczne (19)
 pole przepływowe (16)
 pole statyczne (17)
 połączenie równoległe (37)
 połączenie szeregowo (37)
 połączenie w gwiazdę (69)
 połączenie w trójkąt (69)
 potencjał elektryczny (12)
 powierzchnia ekwipotencjalna (16)
 powłoka elektronowa (9)
 prawo Kirchhoffa (42, 60)
 prawo Ohma (41, 59)
 prąd elektronowy (10)
 prąd elektryczny (9)
 prąd jonowy (10)
 prąd przemienny (13)
 prąd przesunięcia (11)
 prąd sinusoidalnie zmienny (14, 47)
- prąd wirowy (27)
 prąd wyprostowany (14)
 prąd zmienny (13)
 prąd stały (13)
 promieniowanie nadfioletowe UV (34)
 promieniowanie podczerwone IR (34)
 promieniowanie świetlne (34)
 proton (9)
 przenikalność elektryczna (55)
 przenikalność magnetyczna (22)
 przebiegi łączeniowe (67)
 przesunięcie fazowe (47, 51, 59)
 przewodnik elektryczny (10)
 przewodność właściwa (25)
 przewód (36)
 przewód neutralny (71)
 pulsacja (48, 53)
 punkt neutralny (69)
- R** reaktancja indukcyjna (53)
 reaktancja pojemnościowa (56)
 reguła lewej dłoni (30)
 reguła prawej dłoni (20, 28)
 rezystancja (24, 51)
 rezystancja zastępcza (44)
 rezystywność (24)
 roztwór zjonizowany (31)
- S** samoindukcja (52)
 siła elektromotoryczna (16)
 siła elektromotoryczna indukowana (27)
 siła elektromotoryczna samoindukcji (52)
 stała czasowa nagrzewania (26)
 strumień magnetyczny (22)
- T** tesla (22)
 transformator (29, 71)

-
- trójkąt mocy (65)
- U** układ prostowania (39)
układ trójfazowy skojarzony (67)
układ trójfazowy symetryczny (68)
uziom (71)
- W** wartość skuteczna (14)
wektor wirujący (47)
wat (11)
watosekunda (11)
weber (20)
wolt (12)
- współczynnik mocy (63)
wyładowanie elektryczne (18)
wytrzymałość elektryczna (18)
wzbudzenie atomu (35)
- Z** zasilacz (39)
zwarcie (37)
- Ź** źródło energii (36)
źródło napięcia (16)
źródło prądu (41)