



Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie



Wydział
Elektryczny

Łukasz Przeniosło

nr albumu: 21789

kierunek studiów: Elektrotechnika

specjalność: urządzenia i instalacje elektryczne

forma studiów: studia niestacjonarne

**UNIWERSALNY INTELIGENTNY STEROWNIK SILNIKÓW DO
ZASTOSOWAŃ PRZEMYSŁOWYCH**

**UNIVERSAL INTELLIGENT MOTOR DRIVER FOR INDUSTRIAL
APPLICATIONS**

Praca dyplomowa magisterska
napisana pod kierunkiem:

dr inż. Michała Bonisławskiego

Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych

Data wydania tematu pracy: 01.08.2015 r.

Data złożenia tematu pracy: 01.06.2016 r.

Szczecin 2016

OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY DYPLOMOWEJ

Oświadczam, że praca dyplomowa inżynierska/magisterska pt.
„UNIWERSALNY INTELIGENTNY STEROWNIK SILNIKÓW DO ZASTOSOWAŃ PRZEMYSŁOWYCH”

napisana pod kierunkiem: dr inż. Michała Bonisławskiego
jest w całości moim samodzielnym autorskim opracowaniem sporządzonym przy wykorzystaniu wykazanej w pracy literatury przedmiotu i materiałów źródłowych. Złożona w dziekanacie Wydziału Elektrycznego treść mojej pracy dyplomowej w formie elektronicznej jest zgodna z treścią w formie pisemnej.

Oświadczam ponadto, że złożona w dziekanacie praca dyplomowa ani jej fragmenty nie były wcześniej przedmiotem procedur procesu dyplomowania związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w uczelniach wyższych.

.....
podpis dyplomanta

Szczecin, dn. 01.06.2016 r.

Streszczenie pracy

Praca przedstawia projekt systemu sterowniczego do różnorodnych silników elektrycznych, na który składają się między innymi: Zbudowane w oparciu o 32 bitowy mikrokontroler urządzenie do którego podłączany jest silnik i peryferia (sterownik) oraz aplikacja PC-owa służąca do nastaw niezbędnych do poprawnego działania układu parametrów brzegowych oraz badania pracy zasilanego przez sterownik silnika. Rozwiązanie ma zostać zastosowane do sterowania elementami ruchomymi w maszynach typu *Pick and Place*, drukarkach szablonowych, drukarkach 3D oraz we wszelkiego rodzaju konwojerach. W części opisowej dokumentu, została zaprezentowana niezbędna teoria nt. silników elektrycznych oraz sterowania. Ponadto, zostały porównane komercyjne rozwiązania sterowników różnej klasy, które są dostępne na rynku.

Słowa kluczowe

Sterowanie, silnik, elektronika mocy, oprogramowanie

Abstract

The paper presents a project of a control system, that can be used with a various types of electric motors. Among others the main components of the system are: built upon a 32 bit microcontroller device, to which the motors and peripherals are connected (the driver) and a PC application used for defining critical operating parameters and for gathering connected motor work diagnostics . This application is to be used with Pick and Place machines, stencil printers, 3D printers and all sort of conveyors. In the generic part of the text, the essential theory of electric motors and control has been described. Also, commercially available on the market motor drivers of various class has been compared.

Key words

Controll, motor, power electronics, software

Spis treści

Wprowadzenie	6
Cel pracy	6
Zakres pracy	7
1. Elektromagnetyzm	8
1.1. Natężenie pola magnetycznego	8
1.2. Indukcja magnetyczna	9
1.2.1. Materiały ferromagnetyczne	10
1.3. Strumień indukcji magnetycznej	11
1.4. Siła elektrodynamiczna	12
1.5. Samoindukcja	14
1.6. Reluktancja	15
2. Silniki elektryczne	16
2.1. Silniki prądu stałego (DC)	16
2.1.1. Budowa	16
2.1.2. Zasada działania	16
2.1.3. Sterowanie	16
2.2. Silniki liniowe (VCM)	17
2.2.1. Budowa	17
2.2.2. Zasada działania	17
2.2.3. Sterowanie	17
2.3. Silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC)	18
2.3.1. Budowa	18
2.3.2. Zasada działania	18
2.3.3. Sterowanie	18
2.4. Silniki krokowe	19
2.4.1. Budowa	19
2.4.2. Zasada działania	19
2.4.3. Sterowanie	19
Literatura	20

Wprowadzenie

Chcąc zaprojektować system napędowy dla określonej aplikacji należy wziąć pod uwagę bardzo wiele czynników. Po odpowiedzeniu sobie na 2 podstawowe pytania jednak, ilość zmiennych ulega zmniejszeniu dzięki temu że odpowiedzi nadają kierunek kolejnym rozważaniom. Te pytania to: Ile chcemy zapłacić za system, oraz ile inżynierskiej pracy (której duża część to oprogramowanie) jesteśmy w stanie wykonać sami. Skłaniając się coraz bardziej w stronę gotowych rozwiązań, szybko zauważymy że ilość środków finansowych jakie jesteśmy zmuszeni wyłożyć jest bardzo duża. Jest to cena za łatwość i szybkość wdrożenia danego sterownika do projektu. Ceny takich systemów bardzo rzadko mają odzwierciedlenie w zastosowanym w ich strukturze *hardware*, jest to raczej cena za *know-how* producenta, wiedzę ekspercką, wsparcie techniczne oraz dziesiątki roboczogodzin programistów i elektroników tworzących produkt. W przypadku posiadania dużych środków takie rozwiązanie wydaje się być najbardziej odpowiednie. Ma ono jednak jedną znaczącą wadę (pomijając cenę oczywiście)- Pomimo tego że producenci sterowników do silników prześcigają się w ilości posiadanych cech czy technologii, to korzystając z takiego urządzenia nijako jesteśmy zmuszeni z korzystania z zamkniętego, ograniczonego systemu. System taki może lepiej lub gorzej wpasowywać się w ramy naszej aplikacji. Rzadko kiedy wpasowuje się idealnie, a najczęściej brakuje mu jakichś właściwości, lub jest przewymiarowany.

Drugą opcją jest zakup taniego zintegrowanego chipu, który po raz kolejny w zależności od wyłożonych środków (w o wiele mniejszej skali), zawiera w sobie mniej lub więcej logiki i czasami końcówki mocy. Taki układ można także zbudować z elementów dyskretnych, co nie obniża znacząco kosztów, lecz daje możliwość większej kontroli nad parametrami układu przez to że nie używamy elementów "czarnych skrzynek". Wady takiego rozwiązania są takie, że zintegrowane sterowniki są projektowane pod zastosowanie z konkretnym rodzajem silnika (np tylko do silników krokowych) i służą do sterowania silnikami małej mocy jeśli mają zintegrowane końcówki. W przypadku stosowania układów tego typu oraz dyskretnych, projektant jest zmuszony zaprojektować obwód drukowany oraz napisać bardzo dużą ilość kodu zawierającego wiele skomplikowanych procedur, które muszą działać w czasie rzeczywistym.

W przypadku, kiedy ilość produkowanych maszyn współpracującymi ze sterownikami do silników jest duża, posiadając odpowiednią wiedzę i umiejętności, bardziej opłaca się finansowo zaprojektować rozwiązanie własne, "od zera". Ponadto, proces tworzenia tego typu systemu dostarcza ogromną ilość wiedzy praktycznej, której zdobycie inaczej było by bardzo utrudnione.

Cel pracy

Zbudować sterownik do sterowania różnego typu silników (krokowych, *BLDC*, liniowych i *DC*), z możliwością dostosowywania parametrów, używając aplikacji PC. Aplikacja ma pozwalać na strojenie działających w sterowniku regulatorów, wybierać tryby pracy i badać działanie systemu w czasie rzeczywistym. Urządzenie ma zostać użyte w maszynach przemysłowych służących do produkcji urządzeń elektronicznych.

Zakres pracy

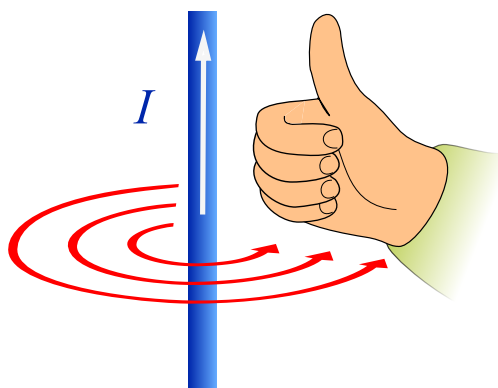
Przegląd i analiza rozwiązań technologicznych, układów elektronicznych i oprogramowania stosowanych w sterownikach silników oferowanych przez wybranych producentów. Projekt uniwersalnego, kompaktowego sterownika do silników *DC* (prądu stałego), *BLDC* (*Brushless DC Motor*), krokowych oraz liniowych *VCM* (*Voice Coil Motor*, inaczej *VCA - Voice Coil Actuator*) wraz z opisem sposobów regulacji i algorytmów zawierających elementy *AI*, które zostaną zaimplementowane w nowoczesnym 32 bitowym mikrokontrolerze z rodziny *ARM*. Opracowanie aplikacji na PC umożliwiającej dostrajanie parametrów dla konkretnego silnika oraz analizowanie jego pracy. Wykonanie, uruchomienie i badania laboratoryjne prototypu urządzenia. Prezentacja przykładowego zastosowania sterownika w rzeczywistym układzie.

1. Elektromagnetyzm

Aby zrozumieć zasadę działania większości silników elektrycznych, należy najpierw zaznajomić się z podstawowymi jednostkami występującymi w elektromagnetyzmie, dzięki którym silniki działają. Rozdział został opracowany na podstawie źródła [2]

1.1. Natężenie pola magnetycznego

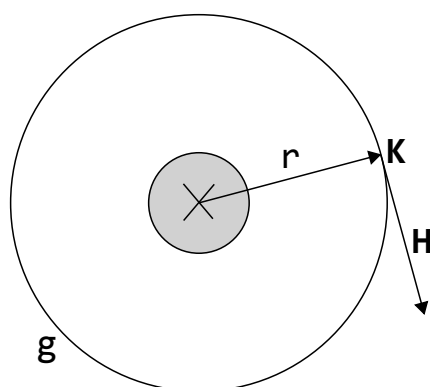
Pole magnetyczne wytwarza się wokół przewodnika przez który płynie prąd elektryczny. Pole to charakteryzują wektory natężenia, które w każdym punkcie są styczne do okręgów linii sił pola. Środek każdego z okręgów jest zbieżny z osią geometryczną przewodu (przewodnika). Stosując regułę prawej dłoni (Rysunek 1.1), palce wskazują zwrot wektorów, a kciuk zwrot i kierunek płynącego prądu.



Rysunek 1.1. Reguła prawej dłoni – sposób wyznaczania zwrotu linii sił pola magnetycznego wokół przewodnika w którym jest prąd elektryczny

Źródło: Na podstawie [1]

Do wyznaczenia natężenia pola magnetycznego w dowolnym punkcie na zewnątrz przewodu należy posłużyć się rysunkiem 1.2



Rysunek 1.2. Zwrot wektora natężenia pola magnetycznego w przestrzeni wokół przewodu przez który płynie prąd elektryczny (Zwrot za płaszczyznę rysunku od strony obserwatora)

Źródło: Na podstawie [5]

– K: punkt w przestrzeni wokół przewodnika,

- g: Okrąg na którym leży punkt K,
- r: promień okręgu g,
- H: wektor natężenia pola.

W przypadku linii pola, która przechodzi przez punkt K, przepływ przez powierzchnię o brzegu g równa się prądowi i. Na podstawie prawa przepływu można zapisać że:

$$\oint_C H dl = i \quad (1.1)$$

Natężenie pola H jest stałe na całym obwodzie okręgu g (Pole jest symetryczne)

$$\oint_C H dl = H \int_C dl = H 2\pi r \quad (1.2)$$

Porównując stronami równania (1.1) i (1.2) natężenie pola w punkcie K można obliczyć ze wzoru:

$$H = \frac{i}{2\pi r} \quad (1.3)$$

Jednostka natężenia pola magnetycznego to amper na metr [$\frac{A}{m}$], a jego definicja to:

Definicja 1.1. *Amper na metr jest to pole magnetyczne, jakie występuje na powierzchni bocznej walca kołowego o obwodzie 1 m, stycznie do powierzchni bocznej tego walca i prostopadle do jego tworzącej, gdy przez znajdujący się w osi tego walca przewód prostoliniowy nieskończenie długi o przekroju kołowym znikomo małym płynie nie zmieniający się prąd 1 A [3].*

1.2. Indukcja magnetyczna

Do opisu pola magnetycznego po za natężeniem pola magnetycznego H, potrzebna jest jeszcze jedna wielkość wektorowa- Indukcja magnetyczna B. W środowisku izotropowym¹ H i B są do siebie proporcjonalne. Współczynnik proporcjonalności to przenikalność magnetyczna środowiska μ . Indukcję magnetyczną można zapisać równaniem:

$$B = \mu H \quad (1.4)$$

Wielkość μ , która określa własności magnetyczne środowiska przedstawia się zależnością:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1.5)$$

- μ_0 : przenikalność magnetyczna próżni, która wynosi:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{H}{m} \quad (1.6)$$

¹ Jednakowe własności fizyczne we wszystkich kierunkach.

– μ_r : względna przenikalność magnetyczna środowiska.

Jednostką przenikalności magnetycznej jest Henr na metr $[\frac{H}{m}]$, a jej definicja to:

Definicja 1.2. *Henr na metr jest to przenikalność magnetyczna bezwzględna środowiska izotropowego w którym polu magnetycznemu $1 [\frac{A}{m}]$ odpowiada indukcja magnetyczna $1 T$ (tesla) [3].*

$$1 \frac{H}{m} = \frac{1 T}{1 \frac{A}{m}} \quad (1.7)$$

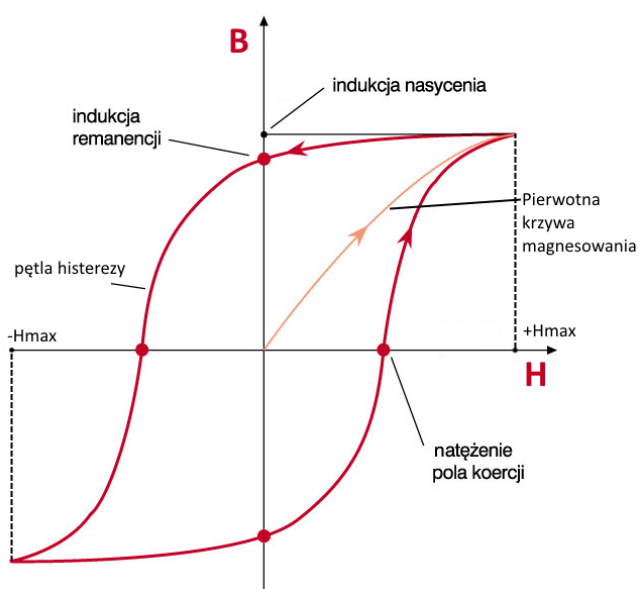
Wyrażając to w innych jednostkach:

$$1 \frac{H}{m} = 1 \frac{N}{A^2} \quad (1.8)$$

Równanie w którym występuje jednostka siły jest szczególnie przydatne w sytuacjach, w których analizowane są siły wytwarzane przez pole magnetyczne towarzyszące przepływowi prądu (np. Aplikacje z udziałem silników elektrycznych).

1.2.1. Materiały ferromagnetyczne

Materiały ferromagnetyczne dzieli się na miękkie i twarde magnetycznie. W maszynach elektrycznych stosowane są obwody magnetyczne, które wykonane są z materiałów magnetycznie miękkich. Nie dotyczy to magnesów trwałych stosowanych w niektórych maszynach, które są wykonane z materiałów magnetycznie twardych. Magnetycznie miękkie materiały są łatwe do magnesowania przy użyciu zewnętrznego pola magnetycznego. Po zaniku tego pola magnesowanie także zanika. Właściwości magnetyczne ferromagnetyków określają krzywe magnesowania. Wyodróżniamy pierwotną krzywą magnesowania i krzywą zamkniętą pełnego przemagnesowania (pętla histerezy magnetycznej 1.3).



Rysunek 1.3. Krzywa magnesowania przykładowego materiału twardego magnetycznie. Przy natężeniu koercji indukcja magnetyczna jest równa zero.

Źródło: Na podstawie [5]

Krzywą magnesowania pierwotną, otrzymuje się dla ferromagnetyka magnesowanego po raz pierwszy od stanu $H = 0$ i $B = 0$ przy monotonicznie rosnącym natężeniu pola H , aż do nasycenia materiału magnetycznego. Przy przemagnesowaniu ferromagnetyka od $-H_{max}$ do $+H_{max}$ i odwrotnie od $+H_{max}$ do $-H_{max}$ otrzymujemy symetryczną krzywą zamkniętą, inaczej pętlę histerezy magnesowania. Kształt pętli zależy od wielu czynników, między innymi od składu ferromagnetyka i sposobu jego obróbki.

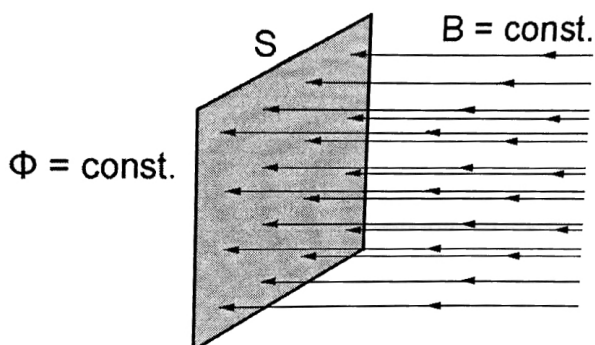
Jednostką indukcji magnetycznej jest tesla [T]. Definicja tej jednostki jest następująca:

Definicja 1.3. *Tesla jest to indukcja magnetyczna pola magnetycznego równomiernego, przy której na przekrój poprzeczny $1m^2$ przypada strumień magnetyczny $1Wb$ (weber) [3].*

$$1T = \frac{1Wb}{1m^2} = \frac{1kg}{1s^2 \cdot 1A} \quad (1.9)$$

1.3. Strumień indukcji magnetycznej

Strumień magnetyczny, który przepływa przez powierzchnię S , definiowany jest jako iloczyn skalarny wektora indukcji magnetycznej i wektora normalnego do powierzchni S . Jeśli pole magnetyczne $B = const$ i przechodzi przez płaszczyznę S prostopadłą do linii pola, to iloczyn indukcji magnetycznej B i powierzchni pola S to strumień indukcji magnetycznej (rys. 1.4). W magnetyzmie strumień indukcji jest odpowiednikiem natężenia prądu w elektryczności.



Rysunek 1.4. Strumień indukcji magnetycznej wywołany równomiernym polem magnetycznym o indukcji B prostopadłym do płaszczyzny S

Źródło: Na podstawie [2]

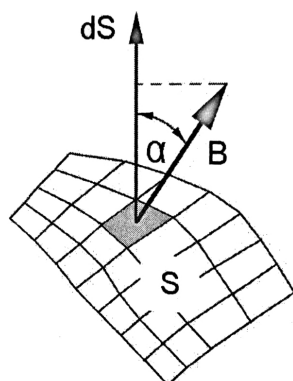
Wyraża się go wzorem:

$$\Phi = BS \quad (1.10)$$

W przypadku kiedy płaszczyzna S nie jest prostopadła do linii sił pola magnetycznego, to należy wziąć pod uwagę wartość α , która wyraża kąt pochylenia płaszczyzny S do linii pola:

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (1.11)$$

Całkowity strumień indukcji przenikający powierzchnię S będzie całką powierzchniową liczoną po całej powierzchni S .



Rysunek 1.5. Strumień indukcji magnetycznej przepływający przez dowolną powierzchnię

Źródło: Na podstawie [2]

$$\Phi = \int_S B dS \cos \alpha \quad (1.12)$$

Jednostką strumienia magnetycznego jest weber $[Wb]$.

Definicja 1.4. *Weber jest to strumień magnetyczny, który malejąc jednostajnie do zera w czasie 1 s indukuje siłę elektromotoryczną 1 V w obejmującym ten strumień magnetyczny obwodzie zamkniętym jednozwojowym wykonanym z przewodu o przekroju kołowym znikomo małym [3].*

$$1Wb = 1V \cdot 1s = \frac{1kg \cdot 1m^2}{1s^2 \cdot 1A} \quad (1.13)$$

1.4. Siła elektrodynamiczna

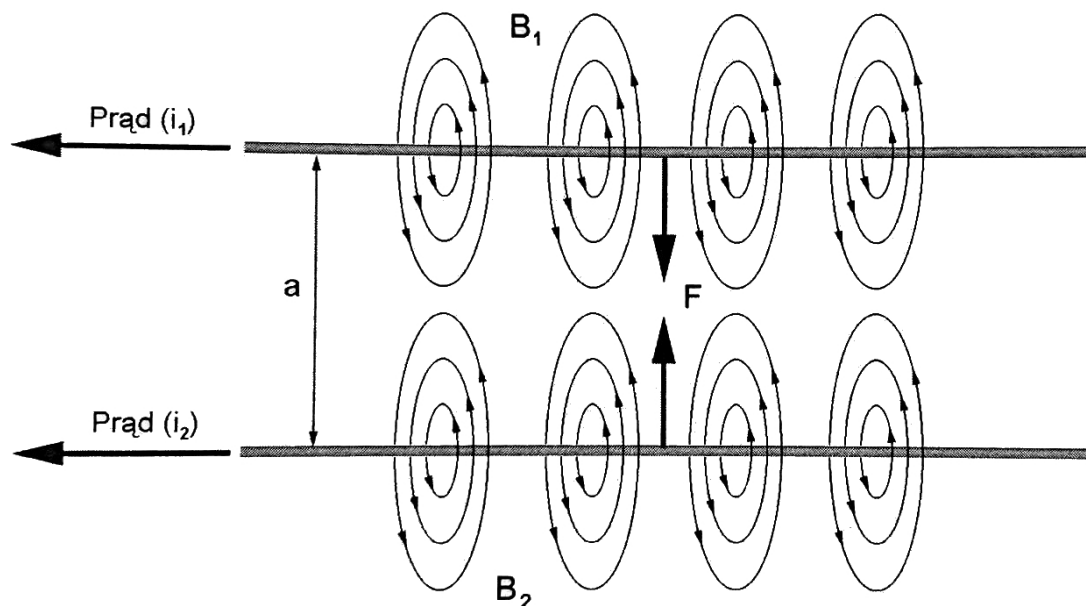
W przestrzeni wokół przewodnika z prądem wytwarzane jest pole magnetyczne. Jeśli umieścić w tej przestrzeni drugi przewodnik z prądem, który wytwarza własne pole magnetyczne to przewodniki te będą się przyciągały lub odpychały. Siły z którymi oddziałują na siebie oba przewody nazywane są siłami elektrodynamicznymi. Na rysunku 1.6 przedstawiono dwa nieskończenie długie, równoległe do siebie przewody z prądami i_1 i i_2 , które znajdują się w środowisku jednorodnym. Linie pola magnetycznego wytworzonego przez prąd i_1 to okręgi o środkach na osi przewodu pierwszego i są prostopadłe do osi obu przewodów. Siła działająca na odcinek o długości l przewodu drugiego to:

$$F = B_1 i_2 l \quad (1.14)$$

B_1 to indukcja magnetyczna pola wytworzonego przez prąd i_1 (wzór 1.3).

$$B_1 = \mu_0 H_1 = \mu_0 \frac{i_1}{2\pi a} \quad (1.15)$$

a to odległość analizowanych przewodów.



Rysunek 1.6. Siły działające na równoległe przewody z prądem

Źródło: Na podstawie [2]

Po podstawieniu wzorów 1.14 i 1.15 otrzymuje się:

$$F = B_1 i_2 l = \mu_0 \frac{i_1}{2\pi a} i_2 l = \mu_0 \frac{i_1 i_2 l}{2\pi a} \quad (1.16)$$

W przypadku rysunku 1.6 zwroty prądów są zgodne, więc przewody będą się przyciągać. Jeśli były by przeciwne- odpychały by się. Jednostką natężenia prądu elektrycznego jest amper $[A]$.

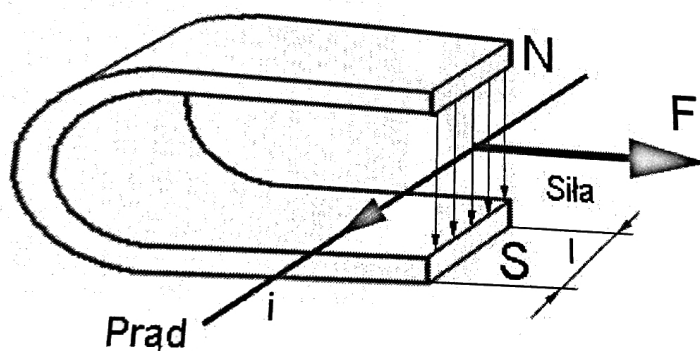
Definicja 1.5. *Amper jest to prąd elektryczny nie zmieniający się, który płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 m od siebie wytwarza między tymi przewodami siłę $2 \cdot 10^{-7} N$ na każdy metr długości [3].*

Wartość siły elektrodynamicznej działającej na przewód z prądem, który jest umieszczony w polu magnetycznym wytwarzanym przez magnes trwały można obliczyć ze wzoru:

$$F = B i l \quad (1.17)$$

- B : indukcja wytwarzana przez magnes trwały,
- i : natężenia prądu w przewodniku,
- l : długość przewodnika w zasięgu indukcji B .

Zjawisko z rysunku 1.7 jest wykorzystywane do budowy elektrodynamicznych silników prądu stałego. Kierunek działania siły elektrodynamicznej można wyznaczyć posługując się regułą trzech palców lewej dłoni (Reguła Flemminga).



Rysunek 1.7. Siła elektrodynamiczna działająca na przewodnik z prądem umieszczony w stałym polu magnetycznym magnesu trwałego

Źródło: Na podstawie [2]

1.5. Samoindukcja

Indukowana w obwodzie elektrycznym siła elektromotoryczna (SEM) jest równa prędkości, z jaką zmienia się strumień magnetyczny przechodzący przez ten obwód. Powstawanie indukowanej siły elektromotorycznej zachodzi pod wpływem względnego ruchu źródła pola magnetycznego i obwodu.

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.18)$$

- ε : indukowane napięcie,
- Φ : strumień indukcji magnetycznej B,
- t: czas.

Minus we wzorze bierze się z zasady zachowania energii- oznacza że SEM jest skierowana tak, aby przeciwdziałać przyczynie jej powstawania (Zasada przekory Lenza).

Indukcja własna (samoindukcja) jest szczególnym przypadkiem zjawiska indukcji elektromagnetycznej i występuje, gdy SEM wytwarzana jest w tym samym obwodzie, w którym jest prąd. Zachodzi, gdy prąd zmienia swoją wartość, przez co zmienia się pole magnetyczne przez niego wytwarzane. Powstająca siła elektromotoryczna samoindukcji przeciwstawia się natężeniu prądu płynącego dotychczas. Samoindukcja spowalnia narastanie prądu i opadanie prądu w obwodzie, odpowiednio przy załączeniu i odłączeniu zasilania od obwodu. SEM samoindukcji ε_L opisuje wzór:

$$\varepsilon_L = -L \frac{di(t)}{dt} \quad (1.19)$$

Wartość SEM samoindukcji zależy od prędkości zmian prądu w obwodzie i od indukcyjności obwodu L. Gdy w otoczeniu obwodu nie ma obiektów ferromagnetycznych, to przenikalność magnetyczna ośrodka $\mu_r = 1$, a indukcyjność w równaniu 1.19 jest stała i zależy tylko od geometrii obwodu. Indukcyjność obwodu określa jego zdolność do wytwarzania strumienia pola magnetycznego Φ_L , powstającego w wyniku przepływu przez obwód prądu elektrycznego i:

$$\Phi_L = Li \quad (1.20)$$

Jednostką indukcyjności jest henr $[H]$.

Definicja 1.6. *Henr jest to indukcyjność obwodu, w którym indukuje się siła elektromotoryczna 1 V, gdy prąd elektryczny płynący w tym obwodzie zmienia się jednostajnie o 1 A w czasie 1 s [3].*

$$1H = \frac{1kg \cdot 1m^2}{1s^2 \cdot 1A} = \frac{1Wb}{1A} \quad (1.21)$$

W obecności ferromagnetyków w otoczeniu przewodnika z prądem zmiana natężenia prądu, która powoduje zmianę natężenia pola magnetycznego, powoduje z kolei zmianę przenikalności magnetycznej. Oznacza to, że indukcyjność obwodu elektrycznego z prądem jest wówczas funkcją natężenia prądu płynącego w tym obwodzie.

$$\Phi_L = L(i)i \quad (1.22)$$

Zależność siły elektromotorycznej samoindukcji ε_L od zmian natężenia prądu przyjmuje postać:

$$\varepsilon_L = -\frac{d\Phi_L}{dt} = -\left(L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{dt}\right) \quad (1.23)$$

1.6. Reluktancja

Dla obwodu magnetycznego obowiązuje podobna zależność jak dla obwodu elektrycznego i prawa Ohma: napięcie magnetyczne U_μ wzdłuż odcinka obwodu magnetycznego równa się iloczynowi oporu magnetycznego R_μ i strumienia magnetycznego Φ w tym odcinku i jest spowodowane przepływem tego strumienia. Napięcie magnetyczne dla całego obwodu jest równe sumie napięć dla jego fragmentów, jeśli płynie przez nie ten sam strumień magnetyczny:

$$U_\mu = \Phi R_\mu \quad (1.24)$$

Reluktancja jest odpowiednikiem magnetycznym rezystancji, czyli jest to inaczej opór magnetyczny.

$$R_\mu = \frac{l}{\mu S} = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S} \quad (1.25)$$

- l : długość obwodu $[m]$,
- μ : przenikalność magnetyczna materiału $[\frac{H}{m}]$,
- μ_r : względna przenikalność magnetyczna materiału (bezwymiarowa),
- μ_0 : przenikalność magnetyczna próżni $[\frac{H}{m}]$,
- S : przekrój poprzeczny obwodu $[m]$.

2. Silniki elektryczne

2.1. Silniki prądu stałego (DC)

2.1.1. Budowa

2.1.2. Zasada działania

2.1.3. Sterowanie

2.2. Silniki liniowe (VCM)

2.2.1. Budowa

2.2.2. Zasada działania

2.2.3. Sterowanie

2.3. Silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC)

2.3.1. Budowa

2.3.2. Zasada działania

2.3.3. Sterowanie

2.4. Silniki krokowe

2.4.1. Budowa

2.4.2. Zasada działania

2.4.3. Sterowanie

Literatura

- [1] Fernando J. Wikimedia commons, 2008. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Manoderecha.svg>.
- [2] Jaszczyk W. *Elektromagnesy prądu stałego dla praktyków*, Wydanie 1. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2014.
- [3] Kałużko D., Szamotulski J. W. *SI. Legalne jednostki miar. Podstawowe przepisy prawne i komentarz*. Wydawnictwa normalizacyjne, Warszawa 1978.
- [4] Przepiórkowski J. *Silniki elektryczne w praktyce elektronika*, Wydanie 2. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2012.
- [5] Łukasz Przeniosło. Opracowanie własne.
- [6] Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T. *Automatyka napędu elektrycznego*, Wydanie 1. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.