



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. Podstawowe informacje o silnikach | 16 |
| 2.1. Podział silników elektrycznych | 16 |
| 2.2. Parametry silników | 19 |
| 2.3. Silnik liniowy (VCM) | 20 |
| 2.4. Silnik krokowy | 22 |
| 2.4.1. Rodzaje silników krokowych | 22 |
| 2.4.2. Sterowanie | 25 |
| Literatura | 27 |
| Spis tabel | 28 |
| Spis rysunków | 29 |

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

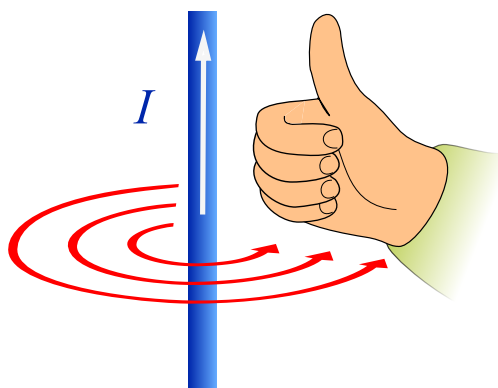
Przegląd i analiza rozwiązań technologicznych, układów elektronicznych i oprogramowania stosowanych w sterownikach silników oferowanych przez wybranych producentów. Projekt uniwersalnego, kompaktowego sterownika do silników *DC* (prądu stałego), *BLDC* (*Brushless DC Motor*), krokowych oraz liniowych *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 [8]

1.1. Natężenie pola magnetycznego

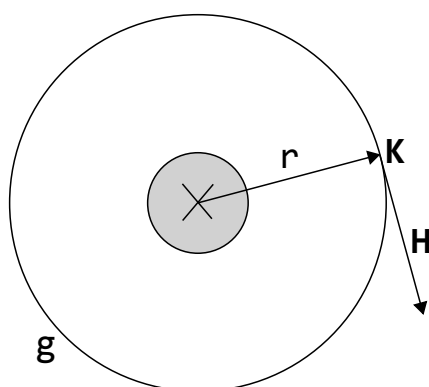
Pole magnetyczne wytwarza się wokół przewodnika przez który płynie prąd elektryczny. Pole to charakteryzują wektory natężenia, które w każdym punkcie są styczne do okręgów linii sił pola. Środek każdego z okręgów jest zbieżny z osią geometryczną przewodu (przewodnika). Stosując regułę prawej dłoni (Rysunek 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 [7]

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 [14]

– 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 [10].*

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 izotropowym ¹ 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) [10].

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

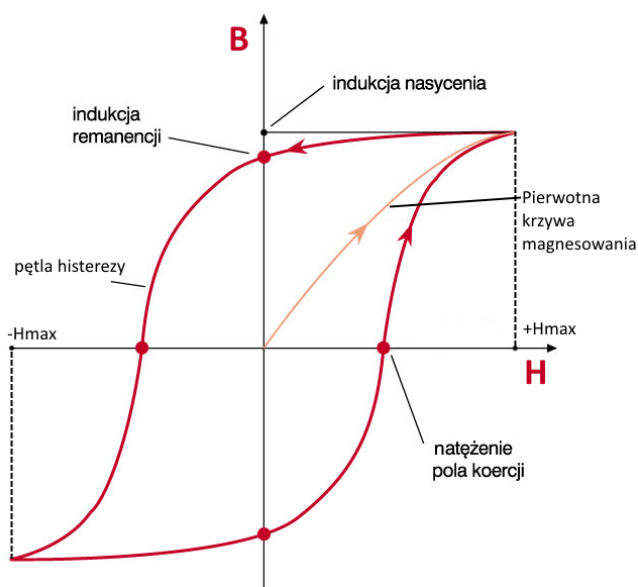
Wyrażając to w innych jednostkach:

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

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 [14]

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.

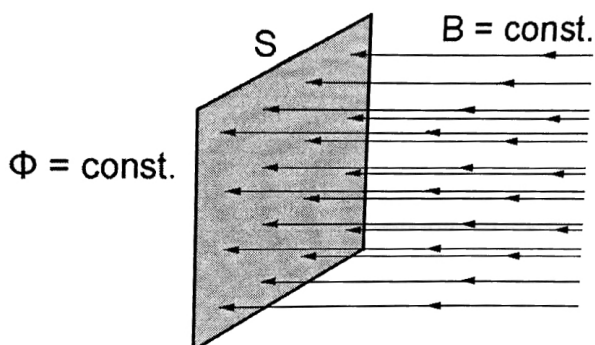
Jednostką indukcji magnetycznej jest tesla [T]. Definicja tej jednostki jest następująca:

Definicja 1.3. *Tesla jest to indukcja magnetyczna pola magnetycznego równomiernego, przy której na przekrój poprzeczny $1m^2$ przypada strumień magnetyczny $1Wb$ (weber) [10].*

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

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 [8]

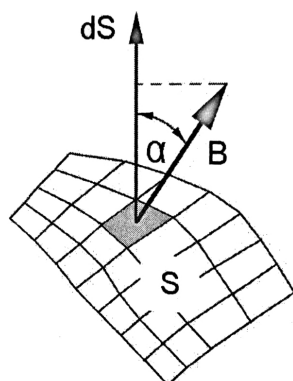
Wyraża się go wzorem:

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

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 [8]

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

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 [10].*

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

1.4. Siła elektrodynamiczna

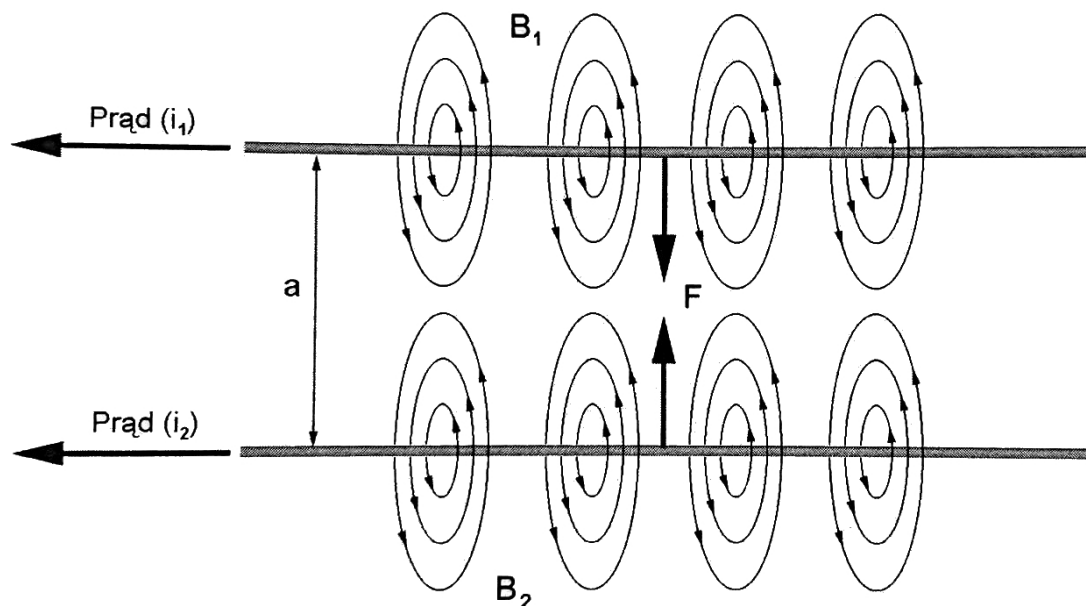
W przestrzeni wokół przewodnika z prądem wytwarzane jest pole magnetyczne. Jeśli umieścić w tej przestrzeni drugi przewodnik z prądem, który wytwarza własne pole magnetyczne to przewodniki te będą się przyciągały lub odpychały. Siły z którymi oddziałują na siebie oba przewody nazywane są siłami elektrodynamicznymi. 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 [8]

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].

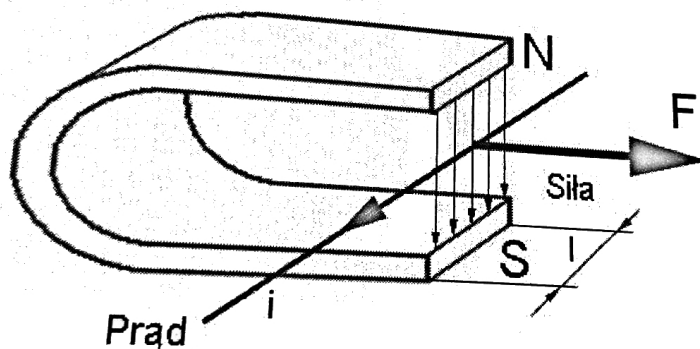
Definicja 1.5. *Amper jest to prąd elektryczny nie zmieniający się, który płynąc w dwóch równoległych prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o przekroju kołowym znikomo małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 m od siebie wytwarza między tymi przewodami siłę $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$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

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 [8]

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 [10].*

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

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. Podstawowe informacje o silnikach

Rozdział ten przedstawia podział maszyn elektrycznych ze względu na ich różne parametry, oraz opis tych silników, które są (i które jeszcze nie są, ale będą) wspierane przez skonstruowany sterownik. Rozdział został opracowany głównie na podstawie źródeł [12] i [9].

2.1. Podział silników elektrycznych

Istnieje bardzo wiele rodzajów silników, a ponadto cały czas powstają nowe konstrukcje, które trudno jest sklasyfikować standardowymi przy pomocy klasycznych definicji. Podział na silniki AC i DC nie wystarczy- w przypadku zastosowania elektronicznego modułu sterującego rodzaj zasilania silnika nie ma tak dużego znaczenia. Nie można także jednoznacznie stwierdzić czy maszyna z wirującymi magnesami to silnik prądu stałego czy przemiennego. Biorąc to pod uwagę, silniki elektryczne można podzielić na trzy podstawowe grupy:

Silniki prądu stałego - DC

Zaliczane są tu silniki komutatorowe:

- z magnesem trwałym (PMDC),
- szeregowo,
- bocznikowe,
- szeregowo-bocznikowe.

Silniki prądu przemiennego - AC

Do tej grupy zaliczane są silniki zasilane bezpośrednio z sieci prądu przemiennego. W tym przypadku podział jest bardziej skomplikowany, ze względu na większą ilość kryteriów.

- Silniki asynchroniczne - Charakteryzuje je tzw. "poślizg". Rotor takiego silnika wiruje z niższą prędkością od prędkości wirowania pola magnetycznego. Najpopularniejszymi silnikami z tej grupy są silniki klatkowe:
 - 1-fazowe kondensatorowe,
 - 1-fazowe ze zwartą fazą rozruchową,
 - 1-fazowe z odłączanym uzwojeniem rozruchowym,
 - 1-fazowe trójfazowe,
- Silniki synchroniczne - Rotor wiruje z prędkością równą prędkości wirowania pola magnetycznego. Mogą być jednofazowe lub trójfazowe. Ze względu na konstrukcję, silniki te dzielą się na reluktancyjne lub z wirującym magnesem.
- Silniki komutatorowe uniwersalne - Komutatorowe silniki szeregowo przystosowane konstrukcyjnie do zasilania z jednej fazy prądu przemiennego.

Silniki z komutacją elektroniczną

Do tej grupy zalicza się silniki, których działanie nie było by możliwe bez elektronicznego układu sterującego (sterowanie impulsowe). Najpopularniejsze z nich to:

– Silniki krokowe - Ze względu na konstrukcję wyróżnia się silniki:

- o zmiennej reluktancji,
- z magnesem trwałym,
- hybrydowe.

Ze względu na sposób sterowania uzwojeniami:

- Silniki unipolarne,
- Silniki bipolarne.

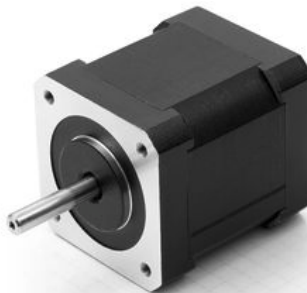
Daje to sześć różnych kombinacji konstrukcyjnych silników krokowych.



Rysunek 2.1. Przykładowy silnik krokowy hybrydowy ST4118 w standardzie Nema17, produkowany przez firmę Nanotec

Źródło: Na podstawie [5]

Nema (*National Electrical Manufacturers Association*) to stowarzyszenie producentów urządzeń elektrycznych, którego siedziba mieści się w USA. Standard Nema określa między innymi wymiary silników krokowych. Numer 17 oznacza szerokość i wysokość silnika 1.7 x 1.7 cala (43.2 x 43.2 mm).



Rysunek 2.2. Przykładowy silnik BLDC (model DB42), produkowany przez firmę Nanotec

Źródło: Na podstawie [5]

– Silniki bezszczotkowe z wirującym magnesem (BLDC) - W literaturze angielskiej silniki te są opisywane jako prądu stałego (*BrushLess DC*). W przypadku silników dwubiegunowych z czujnikami Halla (np. tego typu, które są używane w małych wentylatorach do chłodzenia radiatorów) może to być uzasadnione.

Nie można jednak jednoznacznie zaliczyć do grupy DC silników wielobiegowych trójfazowych z wirującym magnesem [12]. Mylnie może być także to, że w przypadku silników z wbudowanym sterownikiem nie różnią się one z punktu użytkownika od silnika komutatorowego z magnesem trwałym. Maszyny BLDC charakteryzują się bardzo wysoką prędkością obrotową, w szczególności w porównaniu do silników krokowych.

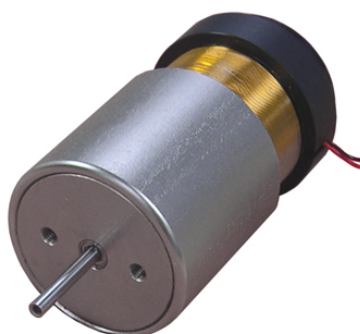
- Silniki liniowe - Wynikiem działania takiej maszyny jest przemieszczenie liniowe, a nie ruch obrotowy. Konstrukcja takiego silnika w dużym uproszczeniu polega na „rozwinęciu” wirnika i stojana na płaszczyźnie. Nazwa silnik liniowy lub *Linear Actuator* bardzo często dotyczy zwykłego silnika krokowego z wbudowaną przekładnią śrubową zamieniającą ruch obrotowy na posuwisto-zwrotny, co bardzo często wprowadza niejasności i wątpliwości podczas projektowanie systemów napędowych.



Rysunek 2.3. Przykładowy silnik krokowy hybrydowy L35 z przekładnią śrubową, produkowany przez firmę Nanotec

Źródło: Na podstawie [5]

- Silniki liniowe VCM - Zasada działania silnika VCM (*Voice Coil Motor*) lub VCA (*Voice Coil Actuator*) jest bardzo zbliżona do zasady działania cewki głośnikowej w szczelinie magnesu. Przesunięcie liniowe tych silników nie przekracza najczęściej 50 mm.



Rysunek 2.4. Przykładowy silnik liniowy VCM (model GVCM-051-051-01), produkowany przez firmę Moticont

Źródło: Na podstawie [4]

2.2. Parametry silników

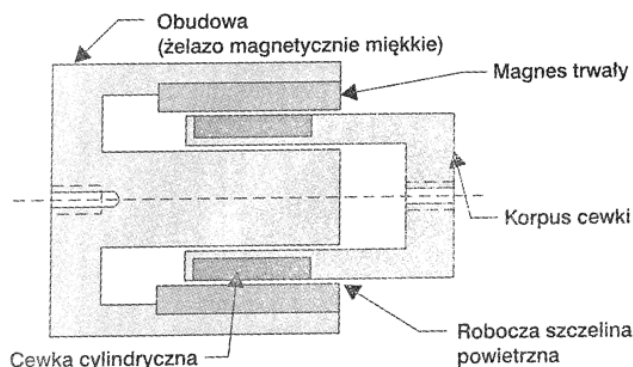
Podstawowe parametry silnika są czasami podawane na jego tablicy znamionowej. Pozostałe należy odszukać w jego karcie katalogowej lub oszacować według właściwości poszczególnych rodzajów silników.

- Moc znamionowa: Podawana jest moc elektryczna w watach pobierana przez silnik przy pracy z normalną prędkością obrotową. Moc mechaniczna jest mniejsza i zależy od sprawności silnika (typowo od 40 do 80 %).
- Napięcie zasilania: Znamionowa wartość napięcia zasilającego (stałego lub zmiennego), przy której określone są pozostałe parametry. Najczęściej silniki mogą być zasilane napięciem niższym. Nie należy stosować napięć dużo wyższych od znamionowego (max. +15 %).
- Moment obrotowy: Siła z jaką silnik potrafi obracać obciążeniem. Parametr ten jest podawany w Niutono-metrach $[Nm]$. Typowe wartości dla małych silników: od 0.01 do 50 Nm. Dla większości rodzajów silników występuje zależność momentu obrotowego i natężenia prądu pobieranego przez maszynę.
- Moment rozruchowy: Ważny parametr informujący o tym czy silnik jest w stanie wystartować pod obciążeniem. Podawany w Nm lub w procentach momentu obrotowego. W zależności od rodzaju silnika moment może być mały (do 150 %), średni (150 - 250 %) lub duży (> 250 %).
- Obroty znamionowe: Wyrażane w RPM-ach (*Revolutions per minute*). Zawsze podawane są przy znamionowym obciążeniu i napięciu zasilania, lub podana jest charakterystyka obrotów w funkcji obciążenia. Obroty silników zawierają się w granicach od 100 do 100000 RPM, ale najczęściej spotykane wartości to od 1000 do 4000 RPM. Dla maszyn prądu przemiennego podawane są obroty przy określonej częstotliwości napięcia sieciowego (50 lub 60 Hz). Dla silników krokowych obroty znamionowe nie są podawane. Zamiast tego występują obroty maksymalne lub dopuszczalna częstotliwość impulsów.
- Prąd znamionowy i rozruchowy: Czyli pobór prądu w normalnych warunkach pracy i w czasie rozpędzania silnika. Ten drugi może być nawet 2 - 8 krotnie większy od znamionowego (największe prądy rozruchowe mają silniki indukcyjne). Prąd rozruchowy nie występuje w silnikach sterowanych impulsowo.
- Kierunek obrotów: Parametr dotyczący przede wszystkim silników komutatorowych szeregowych i niektórych silników indukcyjnych jedno fazowych. Dla tych silników kierunek obrotów jest wymuszony przez konstrukcję silnika. W pozostałych maszynach kierunek zależy od polaryzacji przyłożonego do ich zacisków napięcia lub w przypadku maszyn ze sterowaniem impulsowym- od kolejności podawanie impulsów na poszczególne uzwojenia.
- Konstrukcja mechaniczna: Wymiary, ciężar, średnica wału, mocowania, rodzaj łożysk wirnika itp.

- Konstrukcja obudowy, chłodzenie: Spotykane są silniki o konstrukcji otwartej w której uzwojenia są dostępne z zewnątrz lub zamkniętej w której silnik jest całkowicie obudowany. W silnikach otwartych często wymagane jest chłodzenie strumieniem powietrza- np. silniki odkurzaczy czy wiertarek.

2.3. Silnik liniowy (VCM)

Pierwszym z silników obsługiwanych przez projektowany sterownik jest silnik liniowy VCM. Jego konstrukcja jest bardzo prosta, aczkolwiek sam proces technologiczny wymagany do jego wytworzenia już nie. Z tego właśnie powodu VCM nawet bardzo małej mocy są drogie (Cena od \$100 za pojedyncze sztuki). Ciężko jest tak naprawdę stwierdzić czy jest to silnik czy siłownik, bo zakres jego ruchu nie przekracza zwykle kilku centymetrów.



Rysunek 2.5. Budowa cylindrycznego silnika VCM

Źródło: Na podstawie [12]

Nazwa silnika pochodzi od jego zasady działania- identycznie jak w zwykłym głośniku jest to cewka poruszająca się w szczelinie magnesu. Zgodnie z regułą Lorentza:

Definicja 2.1. *Jeżeli przez cewkę znajdującą się w polu magnetycznym przepływa prąd, to na cewkę działa siła proporcjonalna do natężenia prądu, a napięcie samoindukcji jest proporcjonalne do szybkości poruszania się cewki. [12].*

Podstawowe części składowe silnika VCM to:

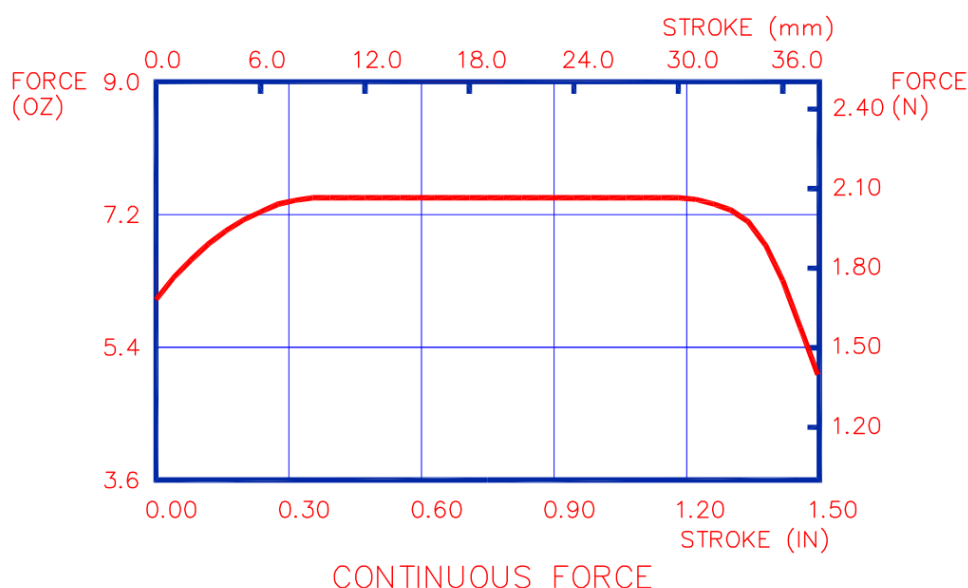
- dwa magnesy trwałe ułożone tak, aby były skierowane tym samym biegunem w stronę cewki,
- cewka poruszająca się w szczelinie między magnesami,
- obudowa z miękkiego żelaza zamykająca obwód magnetyczny.

Zmieniając natężenie i polaryzację przepływającego prądu, możliwe jest bardzo precyzyjne sterowanie położeniem cewki. Ze względu na to układ elektroniczny sterujący silnikiem nie wymaga wielu komponentów, a algorytm sterowania nie jest skomplikowany. VCM ma jednak jeszcze jedną zaletę, która sprawia że jest on wybierany do niektórych aplikacji zamiast np. tańszego silnika krokowego z przekładnią śrubową- pozwala wykonywać bardzo dynamiczne ruchy i posiada wysoką zwrotność. „Liniowy” silnik krokowy o podobnej mocy nawet z zastosowaniem śruby o dużym skoku, nie będzie w stanie osiągnąć podobnych prędkości przy zachowaniu dobrego momentu. Brak konieczności zamiany ruchu obrotowego na posuwisto-zwrotny

eliminuje błędy pozycji (które mogą wynikać np. z luzów w przekładni). Silniki VCM stosowane są wszędzie tam, gdzie potrzebne jest dokładne i szybkie ustawienie pozycji, np. w precyzyjnych urządzeniach mechanicznych i optycznych.

Aby efektywnie i bezpiecznie korzystać z silników VCM w danej aplikacji, należy mieć na uwadze kilka ważnych cech tych urządzeń:

- Korpus cewki nie jest w żaden sposób przymocowany do obudowy silnika. Oznacza to że to projektant musi zadbać o to, aby korpus wsuwał i wysuwał się z cylindra równolegle, stosując odpowiednie mocowanie mechaniczne obu części. Nie zapewniając tego, uzwojenie silnika jest narażone na starcie się lakieru izolacyjnego, poprzez ocieranie się o obudowę.
- W zależności od aktualnego położenia (wysunięcia) korpusu, zależność między siłą a przepływającym przez uzwojenie prądem jest zmienna.



Rysunek 2.6. Przykładowy przebieg siły $[\frac{N}{A}]$ pchającej/ ciągnącej w funkcji wysunięcia korpusu dla silnika liniowego VCM 019-048-02, firmy Moticont.

Źródło: Na podstawie [4]

Graf 2.6 prezentuje zależność między siłą silnika a położeniem jego cewki. Jak widać największa i stała siła ($2\frac{N}{A}$) występuje dopiero kiedy korpus jest trochę wysunięty, i zaczyna lawinowo spadać przy końcowym wysuwie. Jeżeli układ mechaniczny, którego częścią jest silnik nie zostanie wyposażony w odpowiednią blokadę, korpus może wypaść z cylindra ponieważ silnik nie będzie już w stanie go utrzymać.

- Producent w karcie katalogowej silnika podaje parametr maksymalnej ciągłej mocy (*Max continuous power*) i odpowiada ona zazwyczaj prądowi, który płynie przez cewkę w momencie niepełnego wysunięcia (należy oczywiście wziąć pod uwagę fizyczne obciążenie części ruchomej- masę obudowy lub korpusu, w zależności od tego która z części jest przymocowana, a która „jeździ”). Przy dużym wysunięciu zależność siły do płynącego przez cewkę prądu drastycznie spada i utrzymując cylinder długo w takiej pozycji można w bardzo łatwy spo-

sób spalić uzwojenie silnika.

Przy zastosowaniu odpowiedniej konstrukcji układu napędowego (zachowana równoległość części mechanicznych) i sterowania zapewniającego ochronę przed zbyt dużym prądem płynącym przez cewkę, silnik VCM z czasem nie ulega właściwie żadnej degradacji i długość jego działania jest ograniczona żywotnością części mechanicznych układu.

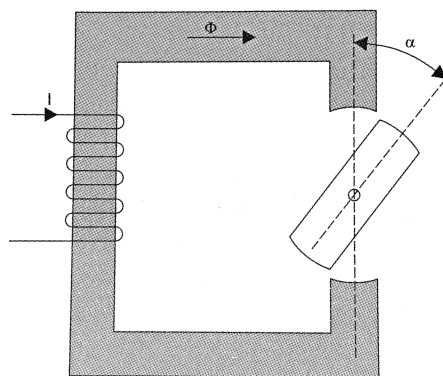
2.4. Silnik krokowy

Silniki krokowe są maszynami elektrycznymi bez komutatorowymi. Zazwyczaj wszystkie uzwojenia silnika są częścią stojana, podczas gdy rotor jest magnesem trwałym lub w przypadku silników VRM (*Variable Reluctance Motor*) zębatym blokiem z materiału magnetycznie miękkiego (patrz sekcja 1.2.1). Komutacja (czyli zmiana kierunku/ uzwojenia w którym następuje przepływ prądu elektrycznego) musi być wymuszona poprzez zewnętrzne urządzenie sterujące maszyną- takie sterowniki są zazwyczaj projektowane w taki sposób, aby zapewnić możliwość utrzymania wirnika w niemal dowolnej pozycji kątowej, oraz obracać nim w obu kierunkach.

2.4.1. Rodzaje silników krokowych

Silniki krokowe ze względu na konstrukcję można podzielić na trzy główne grupy:

- silniki o zmiennej reluktancji,
- z magnesem trwałym,
- hybrydowe.



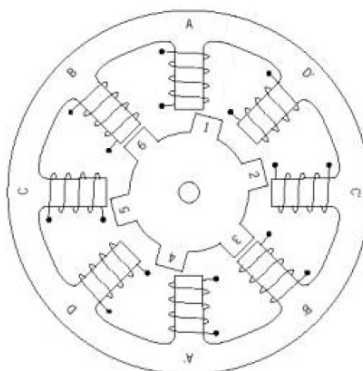
Rysunek 2.7. Powstawanie reluktancyjnego momentu obrotowego.

Źródło: Na podstawie [12]

Reluktancja jest parametrem analogicznym do rezystancji elektrycznej, lecz odniesionym do strumienia magnetycznego- jest to inaczej „rezystancja magnetyczna” (patrz sekcja 1.6). Podobnie jak prąd płynie drogą o najmniejszej rezystancji, tak linie sił pola skupiają się w obszarze o najmniejszej reluktancji. Rysunek 2.7 przedstawia powstawanie reluktancyjnego momentu obrotowego. Strumień indukcji Φ to funkcja prądu uzwojenia I i reluktancji obwodu magnetycznego R_m .

$$\Phi = \frac{I}{R_m} \quad (2.1)$$

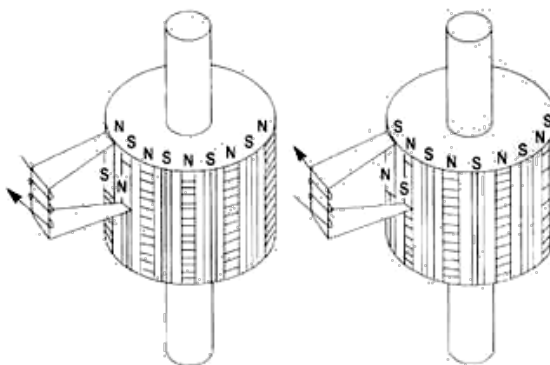
Obrócenie ruchomego elementu o kąt α spowoduje że będzie on próbował powrócić do położenia $\alpha = 0$, w którym reluktancja obwodu jest najmniejsza. W silnikach VRM przepływ prądu stałego przez uzwojenia powoduje, że zęby wirnika ustawiają się naprzeciw zasilanego uzwojenia.



Rysunek 2.8. Silnik o zmiennej reluktancji (VRM)- Przekrój.

Źródło: Na podstawie [12]

W odróżnieniu do VRM, wirnik silnika krokowego PM (*Permanent Magnet*- Magnes trwały) nie posiada zębów. Jest wykonany w postaci walca naprzemiennie namagnesowanego biegunami N i S. Specyficzny rodzaj zębów ma rdzeń stojana. W zależności od kierunku przepływu prądu w uzwojeniu przyciągane są odpowiednie bieguny wirnika (rysunek 2.9).



Rysunek 2.9. Zasada działania silnika PM.

Źródło: Na podstawie [6]

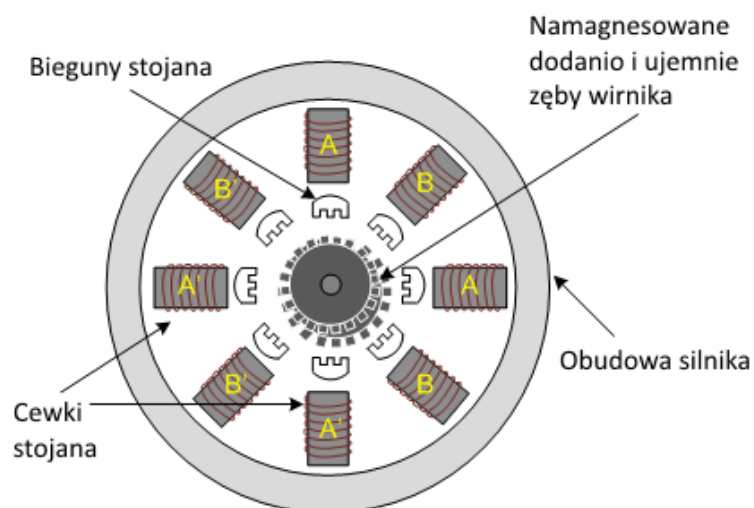
Główną zaletą silnika krokowego PM jest zastosowanie magnesów trwałych w stojanie, dzięki czemu nie ma potrzeby stosowania szczotek jak w silnikach DC oraz jego niska cena. Wadą tego typu maszyny jest relatywnie niski moment obrotowy i brak możliwości rozwijania dużych prędkości obrotowych.

Silnik hybrydowy łączy w sobie cechy obu rozwiązań, dzięki czemu zostały poprawione takie parametry jak:

- moment obrotowy,
- maksymalna prędkość obrotowa,

– rozdzielczość kroku.

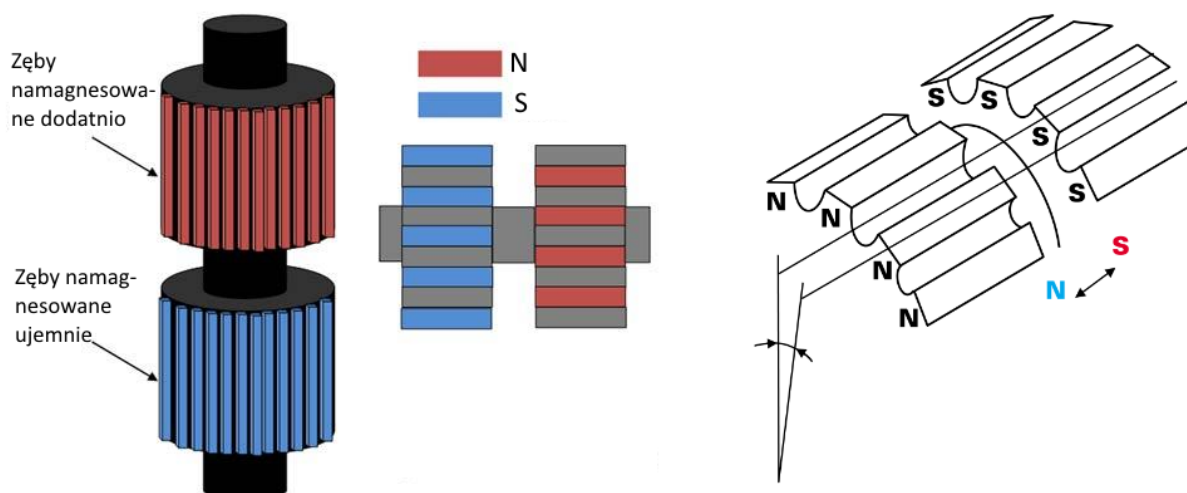
Niestety silniki hybrydowe są około 2-3 razy droższe od silników PM. Wirnik silnika HB (*Hybrid Motor*) jest zbudowany z uzębionych nabiegunków i magnesu trwałego, powodującego naprzemienne magnesowanie zębów biegunami N i S. Uzębiony stojan konstrukcją przypomina ten z silnika VRM.



Rysunek 2.10. Konstrukcja dwufazowego silnika krokowego hybrydowego.

Źródło: Na podstawie [1]

W silniku HB wirujące pole stojana „przerzuca” wirnik z jednego położenia do drugiego na zasadzie jak w silniku VRM. Jest to możliwe dzięki przesunięciu „północnej” i „południowej” części wirnika o pół zębka. Silniki HB dzięki poprawionym parametrom są obecnie najbardziej popularnymi silnikami krokowymi, pomimo niskiej ceny silników PM.

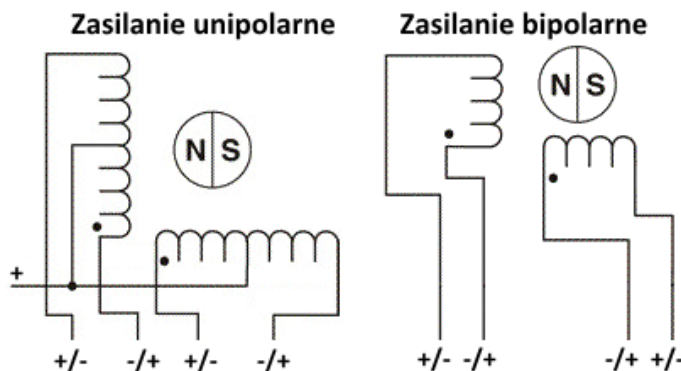


Rysunek 2.11. Budowa wirnika silnika krokowego hybrydowego dwufazowego.

Źródło: Na podstawie [11]

2.4.2. Sterowanie

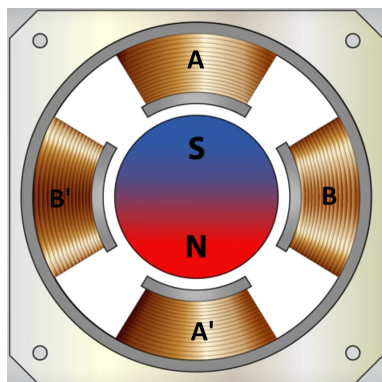
W pierwszej kolejności należy rozróżnić sposób zasilania silnika krokowego, który może być unipolarny lub bipolarny (rys. 2.12).



Rysunek 2.12. Sposób sterowania (zasilania) silnika krokowego dwufazowego- z lewej unipolarnie, z prawej bipolarnie.

Źródło: Na podstawie [2]

Przy zasilaniu unipolarnym, dla pojedynczego uzwojenia na zewnątrz silnika wyprowadzone są trzy przewody- Oba końce cewki i odczep w połowie jej długości. Podłączając do odczepu „+” zasilania można sterować połówkami uzwojeń zwiernając w odpowiedniej kolejności i na odpowiedni czas do masy. W zasilaniu bipolarnym, prąd płynie zawsze przez całe uzwojenie (z silnika wyprowadzone są tylko dwa przewody na cewkę). Zaletą wariantu unipolarnego jest możliwość znacznego uproszczenia układu sterowania. Poważną wadą natomiast jest to, że prąd podawany jest zawsze tylko na połowę danego uzwojenia, co ma bezpośrednie, negatywne przełożenie na moment obrotowy.



Rysunek 2.13. Uproszczony silnik krokowy dwufazowy.

Źródło: Na podstawie [3]

Oddzielną sprawą jest sposób/ sekwencja podawania impulsów prądowych do uzwojeń silnika. Sterowanie pod tym względem dzieli się na:

- Falowe,
- Pełnokrokowe,
- Półkrokowe,

– Mikrokrokowe.

Do pomocy w wyjaśnieniu poszczególnych typów sterowania posłuży rysunek 2.13, prezentujący uproszczony silnik krokowy. Maszyna składa się z wirnika zbudowanego jak na rys. 2.11, tyle że z ilością zębów (na wirniku i stojanie) pozwalającą osiągnąć pełen obrót wirnika w czterech pełnych komutacjach.

Literatura

- [1] Engineers Garage. <http://www.engineersgarage.com>.
- [2] Hackaday. <https://hackaday.com>.
- [3] How To Mechatronics. <http://howtomechatronics.com>.
- [4] MotiCont. <https://http://http://moticont.com>.
- [5] Nanotec Electronic GmbH & Co. KG. <https://http://en.nanotec.com>.
- [6] National Instruments. <http://www.ni.com>.
- [7] Fernando J. Wikimedia commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Manoderecha.svg>, 2008.
- [8] Jaszczuk W. *Elektromagnesy prądu stałego dla praktyków*, Wydanie 1. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2014.
- [9] Jones D. W. The University of Iowa, Department of Computer Science.
- [10] Kałużsko D., Szamotulski J. W. *SI. Legalne jednostki miar. Podstawowe przepisy prawne i komentarz*. Wydawnictwa normalizacyjne, Warszawa 1978.
- [11] Potocki L. Silniki krokowe od podstaw. *Elektronika dla Wszystkich* (sierpień 2002).
- [12] Przepiórkowski J. *Silniki elektryczne w praktyce elektronika*, Wydanie 2. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2012.
- [13] Smith S. W. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów- Praktyczny poradnik dla inżynierów i naukowców*, Wydanie 1. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2007.
- [14] Łukasz Przeniosło. Opracowanie własne.
- [15] Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T. *Automatyka napędu elektrycznego*, Wydanie 1. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.

Spis tabel

Spis rysunków

| | |
|---|----|
| 1.1Reguła prawej dłoni - sposób wyznaczania zwrotu linii sił pola magnetycznego wokół przewodnika w którym jest prąd elektryczny | 8 |
| 1.2Zwrot wektora natężenia pola magnetycznego w przestrzeni wokół przewodu przez który płynie prąd elektryczny (Zwrot za płaszczyzną rysunku od strony obserwatora) | 8 |
| 1.3Krzywa magnesowania przykładowego materiału twardego magnetycznie. Przy natężeniu koercji indukcja magnetyczna jest równa zeru. | 10 |
| 1.4Strumień indukcji magnetycznej wywołany równomiernym polem magnetycznym o indukcji B prostopadłym do płaszczyzny S | 11 |
| 1.5Strumień indukcji magnetycznej przepływający przez dowolną powierzchnię | 12 |
| 1.6Siły działające na równoległe przewodniki z prądem | 13 |
| 1.7Siła elektrodynamiczna działająca na przewodnik z prądem umieszczony w stałym polu magnetycznym magnesu trwałego | 14 |
| 2.1Przykładowy silnik krokowy hybrydowy ST4118 w standardzie Nema17, produkowany przez firmę Nanotec | 17 |
| 2.2Przykładowy silnik BLDC (model DB42), produkowany przez firmę Nanotec | 17 |
| 2.3Przykładowy silnik krokowy hybrydowy L35 z przekładnią śrubową, produkowany przez firmę Nanotec | 18 |
| 2.4Przykładowy silnik liniowy VCM (model GVCM-051-051-01), produkowany przez firmę Moticont | 18 |
| 2.5Budowa cylindrycznego silnika VCM | 20 |
| 2.6Przykładowy przebieg siły $[\frac{N}{A}]$ pchającej/ciągącej w funkcji wysunięcia korpusu dla silnika liniowego VCM 019-048-02, firmy Moticont. | 21 |
| 2.7Powstawanie reluktancyjnego momentu obrotowego. | 22 |
| 2.8Silnik o zmiennej reluktancji (VRM)- Przekrój. | 23 |
| 2.9Zasada działania silnika PM. | 23 |
| 2.10Konstrukcja dwufazowego silnika krokowego hybrydowego. | 24 |
| 2.11Budowa wirnika silnika krokowego hybrydowego dwufazowego. | 24 |
| 2.12Sposób sterowania (zasilania) silnika krokowego dwufazowego- z lewej unipolarnie, z prawej bipolarnie. | 25 |
| 2.13Przeczony silnik krokowy dwufazowy. | 25 |