



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 INTELIGENT 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 for-
mie elektronicznej jest zgodna z treścią w formie pisemnej.

Oświadczam ponadto, że złożona w dziekanacie praca dyplomowa ani jej frag-
menty nie były wcześniej przedmiotem procedur procesu dyplomowania związa-
nych 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 konwojach. W części opisowej dokumentu, została zaprezentowana niezbędną teorią 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	13
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
2.4.3. Zalety i wady silników krokowych	32
2.5. Silnik komutatorowy (DC)	33
2.6. Silnik bezszczotkowy z wirującym magnesem (BLDC)	35
3. Zasilanie silników	37
3.1. Tryby pracy	39
3.2. Sterowanie mostka „H”	40
3.2.1. Sterowanie bipolarne	40
3.2.2. Sterowanie unipolarne	41
4. Rozwiązania komercyjne i Open Source	43
4.1. Sterowniki jedno-układowe	43
4.1.1. AD3950 - Allegro MicroSystems	44
4.1.2. DRV8825 - Texas Instruments	45
4.1.3. TMCC160 - Trinamic	46
4.2. Sterowniki pełnowymiarowe	47
4.2.1. Simplexmotion 100A - Simplex Motion AB	47
4.2.2. Mechaduino - Tropical Labs	48
4.2.3. Sterowniki firmy Technosoft	50
Literatura	51
Spis tabel	52
Spis rysunków	53

Wprowadzenie

Chcąc zaprojektować system napędowy dla określonej aplikacji należy wziąć pod uwagę bardzo wiele czynników. Po odpowiedzieniu 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, wiedę 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 skrynek". 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

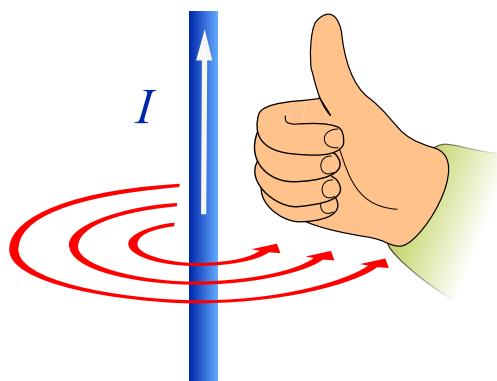
Przegląd i analiza rozwiązań technologicznych, układów elektronicznych i oprogramowania stosowanych w sterownikach silników oferowanych przez wybranych producentów. Projekt uniwersalnego, kompaktowego sterownika do silników *DC* (prądu stałego), *BLDC* (*Brushless DC Motor*), krokowych oraz liniowych *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 dostosowanie 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 wystającymi w elektromagnetyzmie, dzięki którym silniki działają. Rozdział został opracowany na podstawie źródła [19]

1.1. Natężenie pola magnetycznego

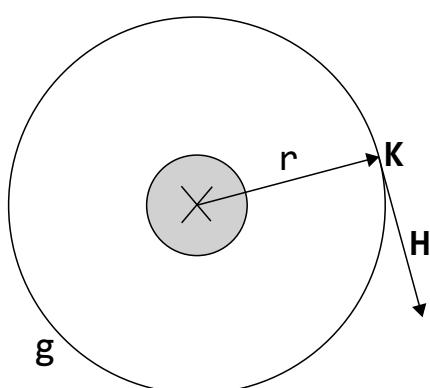
Pole magnetyczne wytwarza się wokół przewodnika przez który płynie prąd elektryczny. Pole to charakteryzuje wektory natężenia, które w każdym punkcie są styczne do okręgów linii sił pola. Środek każdego z okręgów jest zbieżny z osią geometryczną przewodu (przewodnika). Stosując regułę prawej dłoni (Rysunek 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 [18]

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 [27]

- 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 nieskończonie długi o przekroju kołowym znikomo małym płynie nie zmieniający się prąd 1 A [21].

1.2. Indukcja magnetyczna

Do opisu pola magnetycznego poza 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) [21].*

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

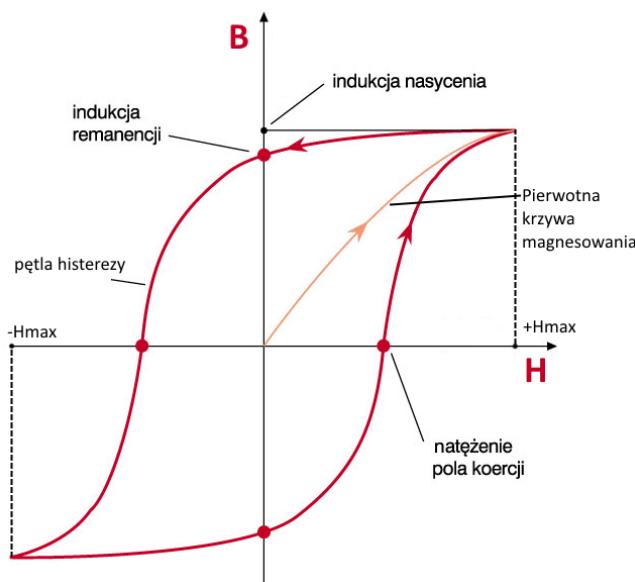
Wyrażając to w innych jednostkach:

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

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 twardej. 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. Wyróżniamy pierwotną krzywą magnesowania i krzywą zamkniętą pełnego przemagnesowania (pętlą histerezy magnetycznej 1.3).



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

Źródło: Na podstawie [27]

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.

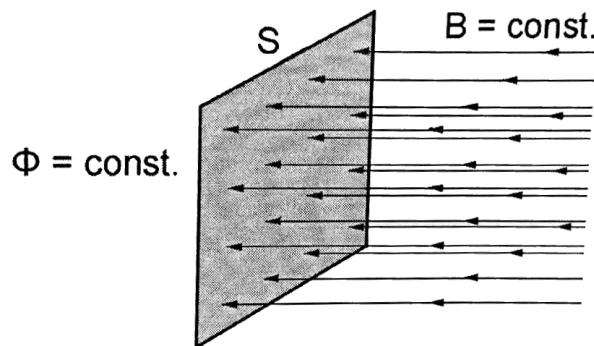
Jednostką indukcji magnetycznej jest tesla [T]. Definicja tej jednostki jest następująca:

Definicja 1.3. *Tesla jest to indukcja magnetyczna pola magnetycznego równomiernego, przy której na przekrój poprzeczny $1m^2$ przypada strumień magnetyczny $1Wb$ (weber) [21].*

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

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 [19]

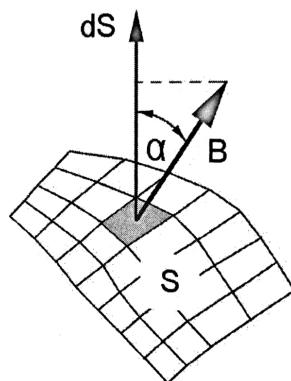
Wyraża się go wzorem:

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

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 [19]

$$\Phi = \int_S BdS \cos \alpha \quad (1.12)$$

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 [21].*

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

1.4. Siła elektrodynamiczna

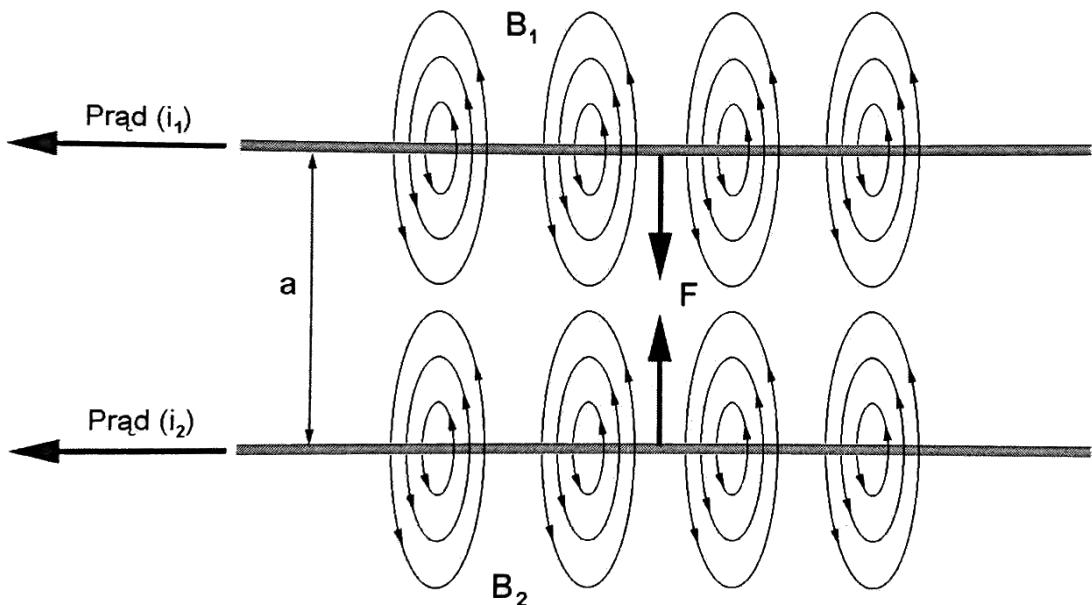
W przestrzeni wokół przewodnika z prądem wytwarzane jest pole magnetyczne. Jeśli umieścić w tej przestrzeni drugi przewodnik z prądem, który wytwarza własne pole magnetyczne to przewodniki te będą się przyciągały lub odpychały. Siły z którymi oddziałują na siebie oba przewody nazywane są silami elektrodynamicznymi. Na rysunku 1.6 przedstawiono dwa nieskończoność długie, równoległe do siebie przewody z prądami i_1 i i_2 , które znajdują się w środowisku jednorodnym. Linie pola magnetycznego wytwarzanego 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 wytwarzanego 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 przewodniki z prądem

Źródło: Na podstawie [19]

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 przewodniki będą się przyciągać. Jeśli były by przeciwnie- 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, nieskończonym długich przewodach o przekroju kołowym znacznie małym, umieszczonych w próżni w odległości 1 m od siebie wytwarza między tymi przewodami siłę $2 \cdot 10^{-7} N$ na każdy metr długości [21].

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

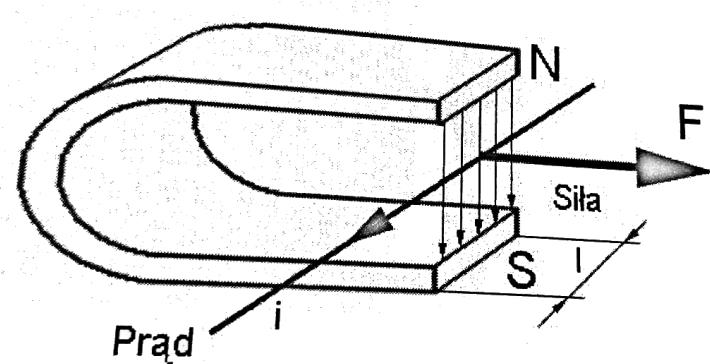
$$F = Bil \quad (1.17)$$

- B: indukcja wytwarzana przez magnes trwały,
- i: natężenie 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).

1.5. Samoindukcja

Indukowana w obwodzie elektrycznym siła elektromotoryczna (SEM) jest równa prędkości, z jaką zmienia się strumień magnetyczny przechodzący przez ten obwód.



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

Źródło: Na podstawie [19]

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 [21].*

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

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:

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

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 [24] i [20].

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),
- szeregowe,
- 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 szeregowe 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.

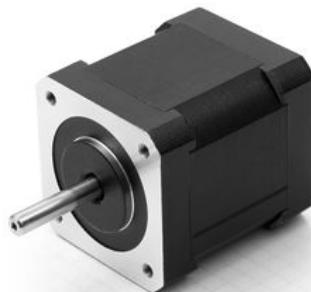
Daje to sześć różnych kombinacji konstrukcyjnych silników krokowych.



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

Źródło: Na podstawie [11]

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 [11]

– Silniki bezszczotkowe z wirującym magnesem (BLDC) - W literaturze angielskiej silniki te są opisywane jako prądu stałego (*BrushLess DC*). W przypadku silników dwubiegunkowych 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 wielobiegunkowych trójfazowych z wirującym magnesem [24]. Mylne 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.

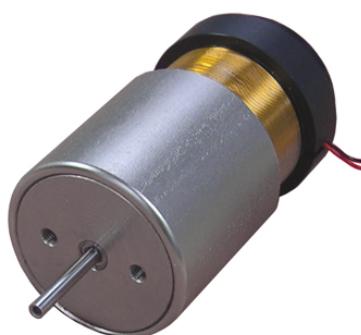
- Silniki liniowe - Wynikiem działania takiej maszyny jest przemieszczenie liniowe, a nie ruch obrotowy. Konstrukcja takiego silnika w dużym uproszczeniu polega na „rozwinięciu” wirnika i stojana na płaszczyźnie. Nazwa silnik liniowy lub *Linear Actuator* bardzo często dotyczy zwykłego silnika krokowego 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 [11]

- 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 [10]

2.2. Parametry silników

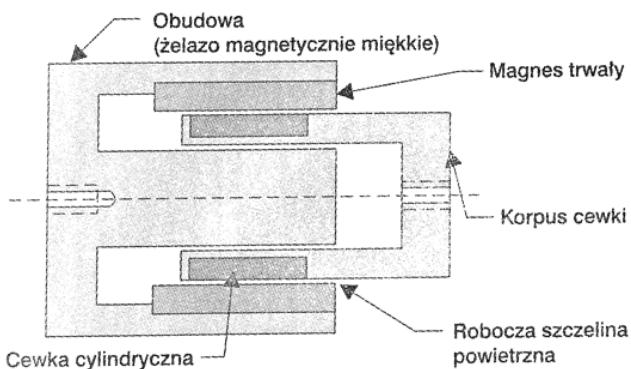
Podstawowe parametry silnika są czasami podawane na jego tablicy znamionowej. Pozostałe należy odszukać w jego karcie katalogowej lub oszacować według właściwości poszczególnych rodzajów silników.

- 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 Nutono-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 rozpoczęcia pracy 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 odkurzaczyczy 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 silownik, bo zakres jego ruchu nie przekracza zwykle kilku centymetrów.



Rysunek 2.5: Budowa cylindrycznego silnika VCM

Źródło: Na podstawie [24]

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 samo-indukcji jest proporcjonalne do szybkości poruszania się cewki. [24].

Podstawowe części składowe silnika VCM to:

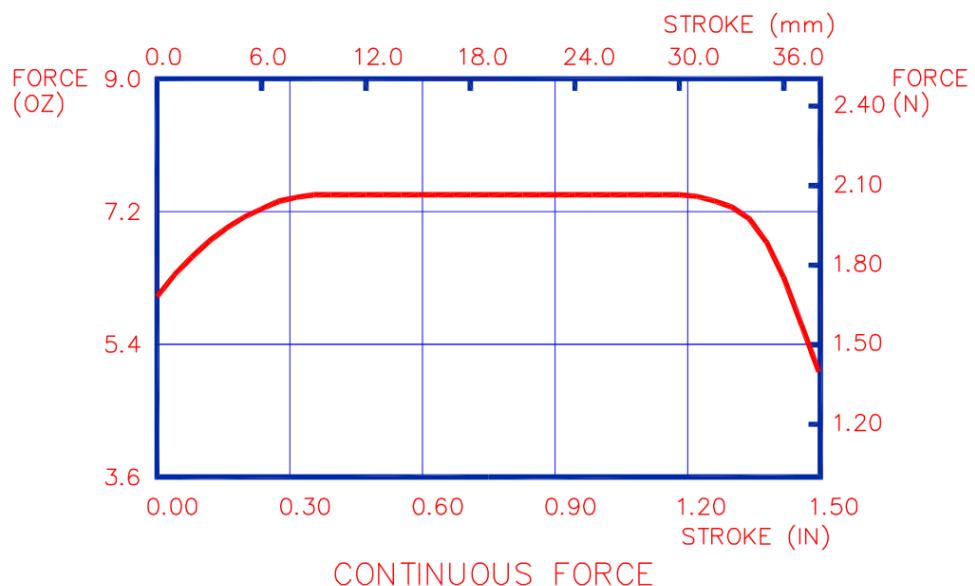
- dwa magnesy trwałe ułożone tak, aby były skierowane tym samym biegunem w stronę cewki,
- cewka poruszająca się w szczelinie między magnesami,
- obudowa z miękkiego żelaza zamykająca obwód magnetyczny.

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 wybrany 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 projektant musi zadbać o to, aby korpus wsuwał i wysuwał się z cylindra równolegle, stosując odpowiednie mocowanie mechaniczne obu części. Nie zapewniwszy 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 zmieniąca.



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

Źródło: Na podstawie [10]

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 użwojenie 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.

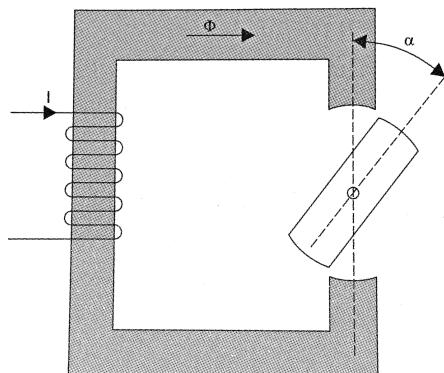
2.4. Silnik krokowy

Silniki krokowe są maszynami elektrycznymi bez komutatorowymi. Zazwyczaj wszystkie użwojenia 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/ użwojenia 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.



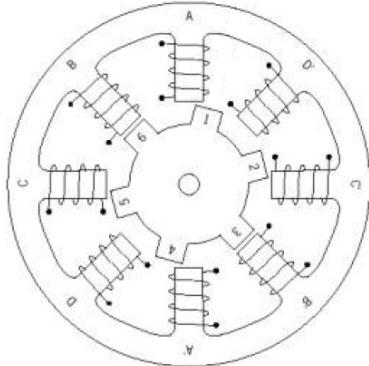
Rysunek 2.7: Powstawanie reluktancyjnego momentu obrotowego.

Źródło: Na podstawie [24]

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 skupią się w obszarze o najmniejszej reluktancji. Rysunek 2.7 przedstawia powstawanie reluktancyjnego momentu obrotowego. Strumień indukcji Φ to funkcja prądu użwojenia I i reluktancji obwodu magnetycznego R_m .

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

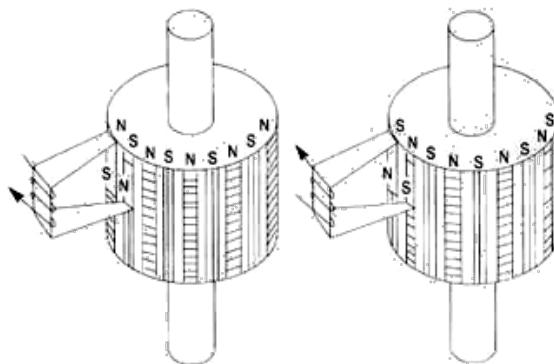
Obrócenie ruchomego elementu o kąt α spowoduje że będzie on próbował powrócić do położenia $\alpha = 0$, w którym reluktancja obwodu jest najmniejsza. W silnikach VRM przepływ prądu stałego przez uzwojenia powoduje, że zęby wirnika ustaważą się naprzeciw zasilanego uzwojenia.



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

Źródło: Na podstawie [24]

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



Rysunek 2.9: Zasada działania silnika PM.

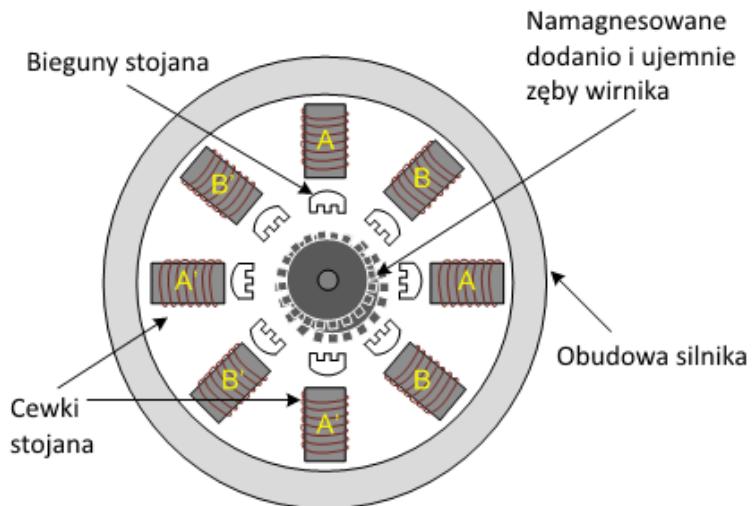
Źródło: Na podstawie [12]

Główną zaletą silnika krokowego PM jest zastosowanie magnesów trwałych w stojanie, dzięki czemu nie ma potrzeby stosowanie 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.

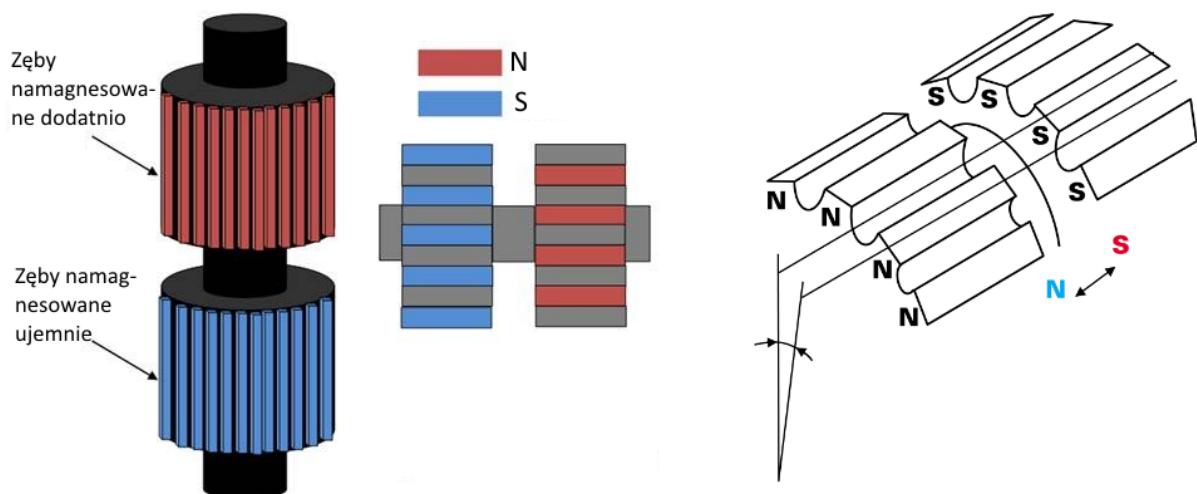
Niestety silniki hybrydowe są około 2-3 razy droższe od silników PM. Wirnik silnika HB (*Hybrid Motor*) jest zbudowany z uzębionych nabiegunków i magnesu trwałego, powodującego naprzemienne magnesowanie zębów biegunami N i S. Uzębiony stojan konstrukcją przypomina ten z silnika VRM.



Rysunek 2.10: Konstrukcja dwufazowego silnika krokowego hybrydowego.

Źródło: Na podstawie [5]

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 ząbka. Silniki HB dzięki poprawionym parametrom są obecnie najbardziej popularnymi silnikami krokowymi, pomimo niskiej ceny silników PM.

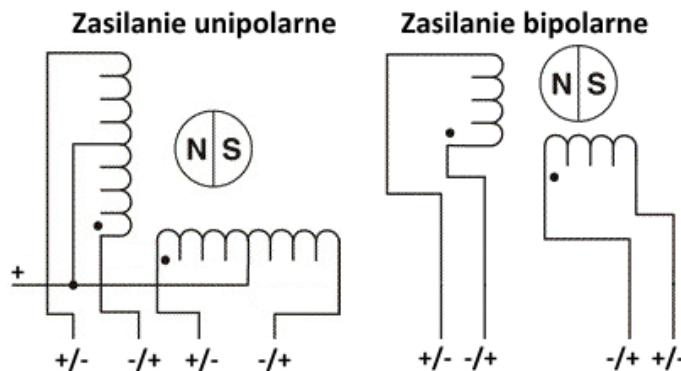


Rysunek 2.11: Budowa wirnika silnika krokowego hybrydowego dwufazowego.

Źródło: Na podstawie [23]

2.4.2. Sterowanie

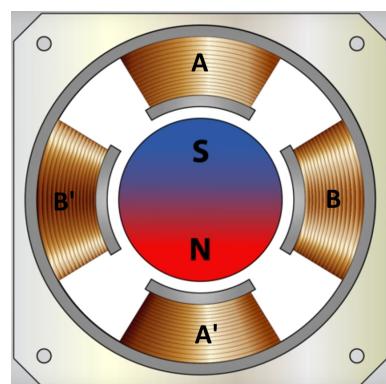
W pierwszej kolejności należy rozróżnić sposób zasilania silnika krokowego, który może być unipolarny lub bipolarny (rys. 2.12).



Rysunek 2.12: Sposób sterowania (zasilania) silnika krokowego dwufazowego- z lewej unipolarne, z prawej bipolarne.

Źródło: Na podstawie [6]

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 zwierającą w odpowiedniej kolejności i na odpowiedni czas końcówki 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 negatywne przełożenie na moment obrotowy.



Rysunek 2.13: Uproszczony model silnika krokowego dwufazowego o kroku 90°.

Źródło: Na podstawie [7]

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

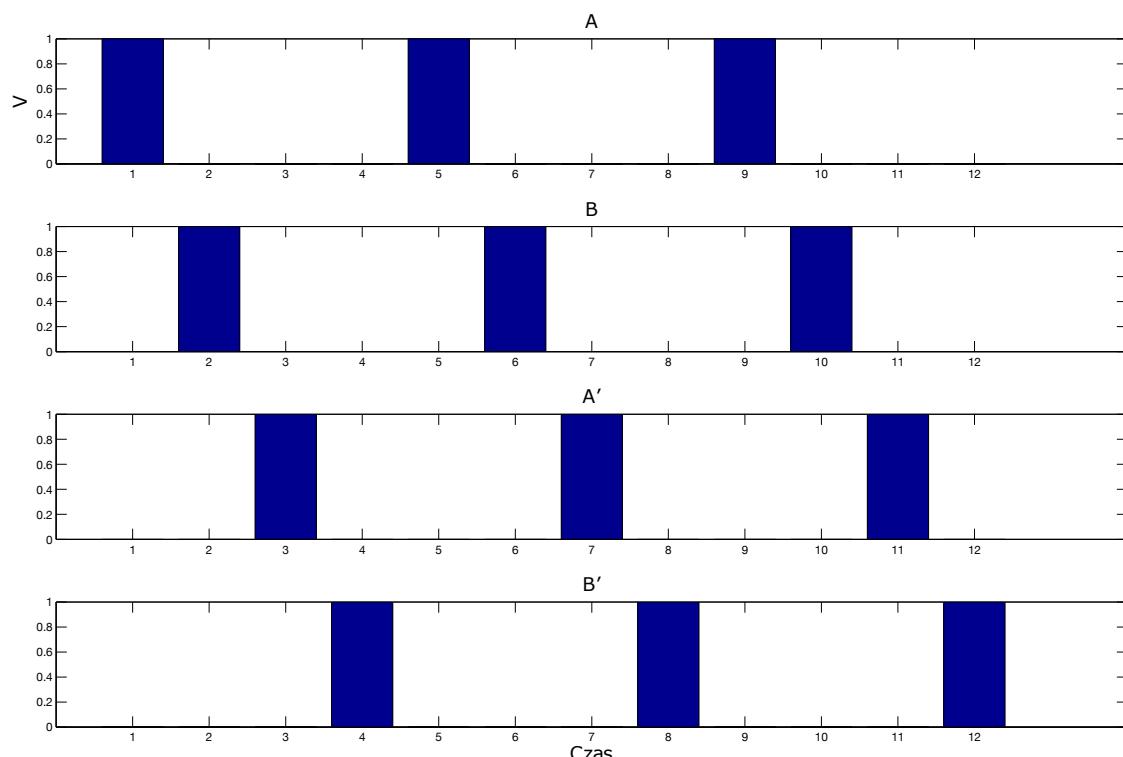
- Falowe,
- Pełnokrokowe,
- Półkrokowe,

– 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 w czterech pełnych komutacjach. Silnik posiada 2 uzwojenia A i B nawinięte w taki sposób, że pary A/A' i B/B' są ze sobą połączone (uzwojenie podzielone na dwie sekcje). Przykładając napięcie do cewki A, w zależności od polaryzacji tego napięcia, prąd będzie wpływał przez uzwojenie A i wypływał z uzwojenia A' lub na odwrót. Tak samo ma się sytuacja w przypadku cewki B.

Sterowanie falowe

W przypadku braku zasilania, wirnik silnika ustawi się w jednej z czterech spoczynkowych pozycji (0° , 90° , 180° lub 270°). Dzieje się tak dlatego, że namagnesowany wirnik usiłuje zająć taką pozycję, aby reluctancja obwodu magnetycznego była jak najmniejsza, tzn. aby namagnesowane zęby wirnika były ustawione w jednej linii z dowolną parą zębów stojana. Znikomy moment obrotowy powodujący takie pozycjonowanie to inaczej moment bezprądowy (spoczynkowy).



Rysunek 2.14: Sekwencja zasilania uzwojeń przy sterowaniu falowym (obrót wirnika z rys. 2.13 według wskazówek zegara).

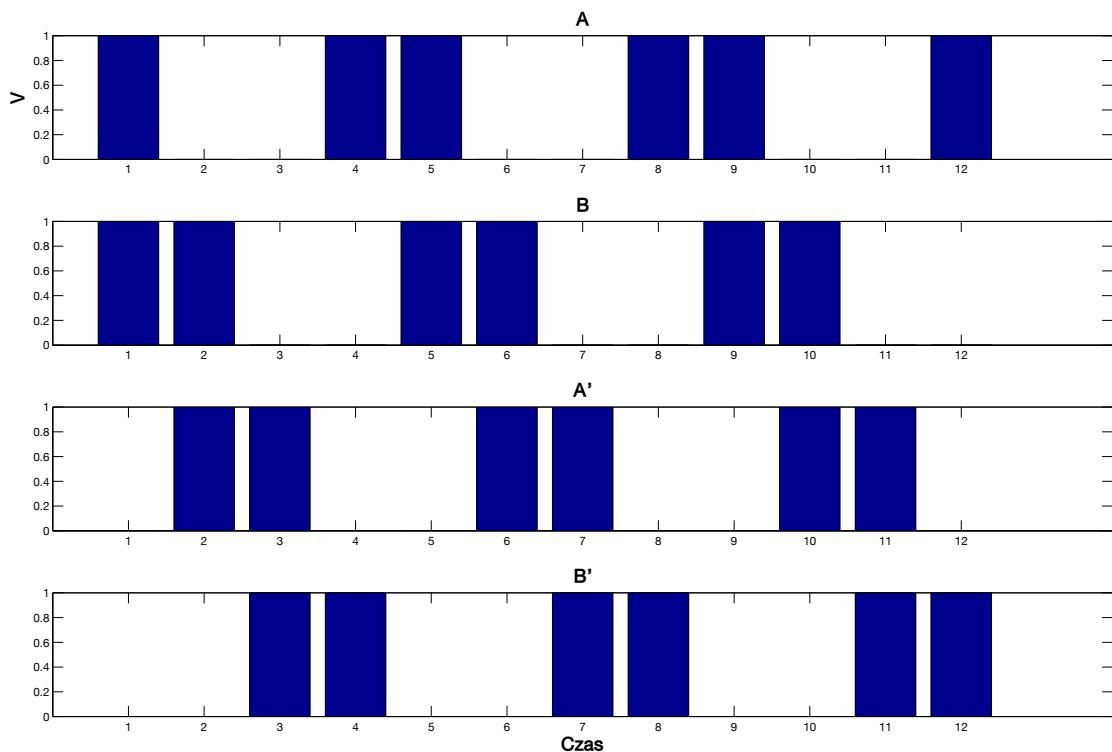
Źródło: Na podstawie [27]

Rysunek 2.14 prezentuje sekwencję dzięki której wirnik obróci się o trzy pełne obroty w prawo przy zastosowaniu sterowania falowego. Na osi odciętych znajdują się kolejne chwile w czasie, a na osi rzędnych wartość potencjału przyłożonego do danego zacisku (wartości 1 i 0 prezentujące stan wysoki lub niski potencjału). Aby

wirnik obracał się w przeciwnym kierunku, sekwencję należy odtworzyć w odwrotnej kolejności. Jak widać na przebiegach, w danym momencie w czasie prąd znajduje się zawsze tylko w jednym z uzwojeń, co nie umożliwia uzyskania maksymalnego dla danej maszyny momentu obrotowego. Pomimo że sterowanie falowe nie zapewnia uzyskania optymalnego momentu obrotowego, to przy zastosowaniu w niektórych aplikacjach jest wystarczające, a ponadto jest najprostsze do zaimplementowania.

Sterowanie pełnokrokowe

W trybie sterowania pełnokrokowego prąd płynie przez oba uzwojenia jednocześnie. Nie ma to wpływu na prędkość obrotową wirnika, ale ma znaczący wpływ na moment obrotowy, który jest dwa razy większy niż w trybie falowym. Pełny obrót wirnika dalej jest osiągany w czterech "ruchach", ale absolutna pozycja kątowa w każdym z nich jest względem trybu falowego przesunięta o 45° .



Rysunek 2.15: Sekwencja zasilania uzwojeń przy sterowaniu pełnokrokowym (obrót wirnika z rys. 2.13 według wskazówek zegara).

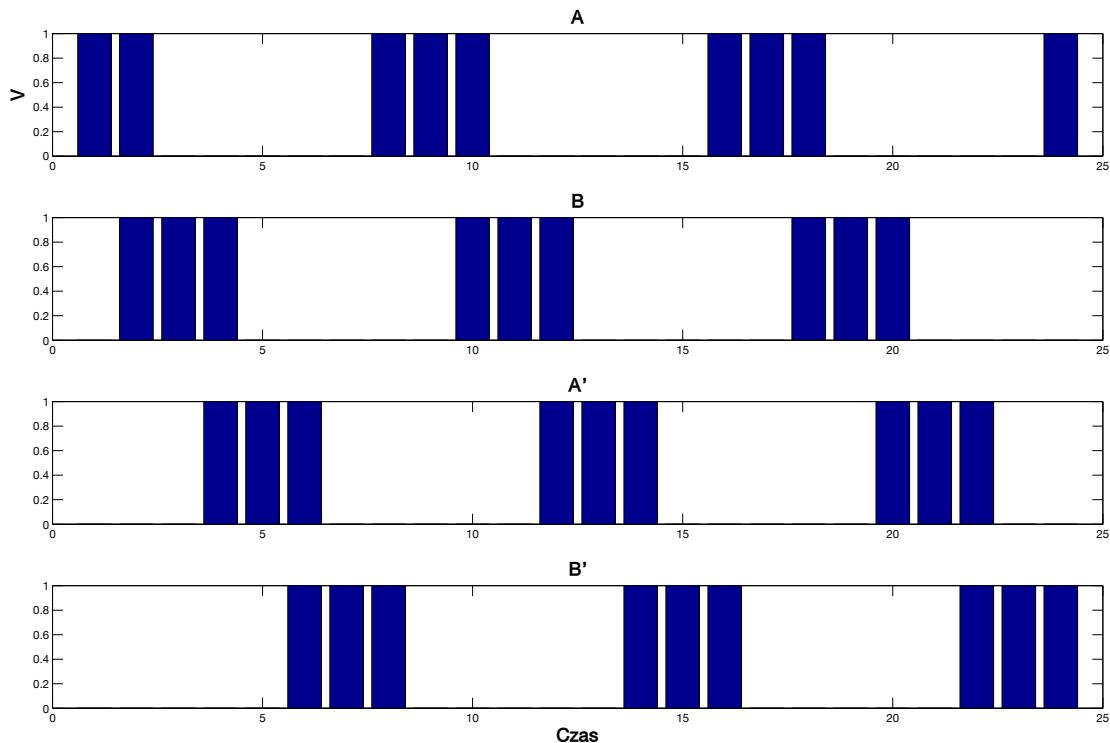
Źródło: Na podstawie [27]

Rysunek 2.15 przedstawia przebiegi dla 3 obrotów, sterując pełnokrokowo. Kolejne pozycje wirnika są następujące: 45° w pierwszym interwale czasowym, 135° w drugim, 225° kolejnym i 315° ostatnim (dla danego obrotu). Potem cykl się powtarza. Tryb pełnokrokowy pozwala osiągnąć optymalny dla danego silnika moment obrotowy, ale niestety rozdzielczość obrotu jest ograniczona do ilości kroków na obrót danego modelu maszyny. Typowe wartości kroków na obrót w silnikach krokowych hybrydowych to 100 (krok o rozdzielczości 3.6°), 200 (1.8°) i 400 (0.9°).

Aby uzyskać większą rozdzielcość kroku, należy zastosować sterowanie półkrokowe lub mikrokrokowe.

Sterowanie półkrokowe

Tryb półkrokowy jest połączeniem sterowania falowego i pełnokrokowego. Rozdzielcość obrotowa względem poprzednich trybów jest dwa razy większa, dlatego że uzwojenia naprzemiennie zasilane są pojedynczo/oba jednocześnie.

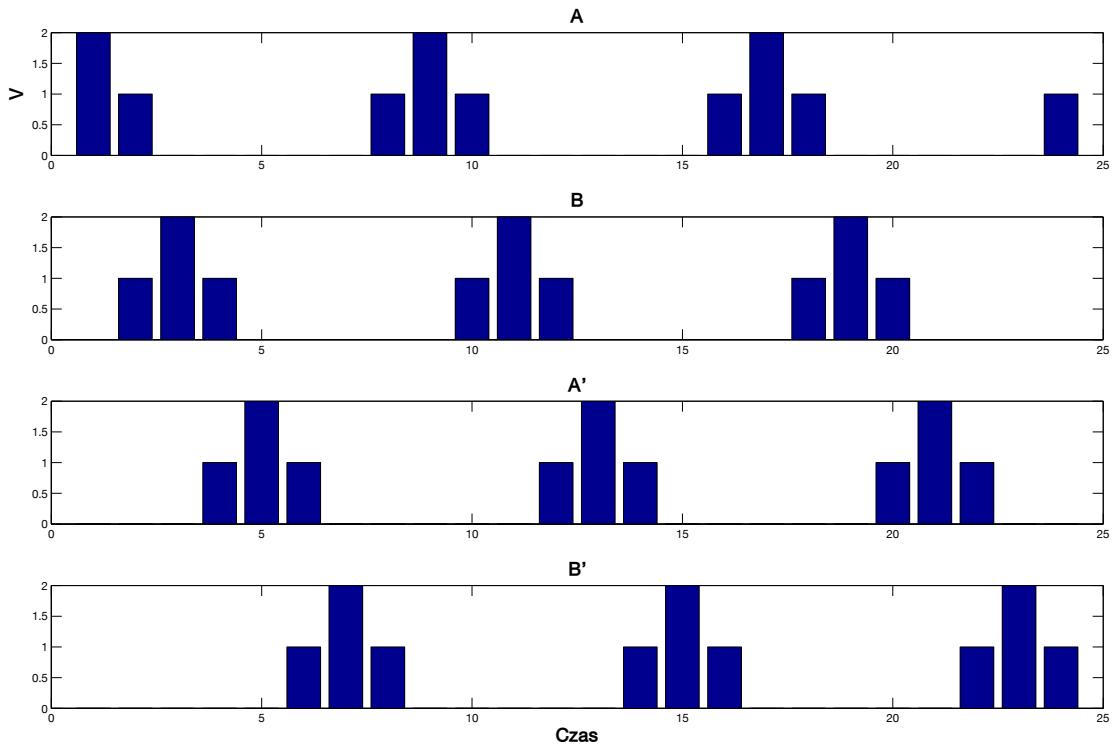


Rysunek 2.16: Sekwencja zasilania uzwojeń przy sterowaniu półkrokowym (obrót wirnika z rys. 2.13 według wskazówek zegara).

Źródło: Na podstawie [27]

Wadą takiego rozwiązania jest zmienny moment obrotowy- co drugi krok będzie "słabszy". Może to spowodować szarpanie wirnika przy dużych prędkościach obrotowych. Przy niskich prędkościach i obciążeniach natomiast, efekt ten rzadko występuje i można uzyskać polepszoną płynność ruchu, w porównaniu do poprzednich trybów. Aby uniknąć efektu zmiennego momentu, można zastosować sterowanie półkrokowe ze zmiennym prądem (rys. 2.17). Na rysunku widać że w momentach kiedy różnica potencjałów występuje tylko na jednym z uzwojeń, jest ona dwa razy większa niż w przypadku kiedy zasilane są obie cewki. Prąd płynący w uzwojeniach jest proporcjonalny do przyłożonego do nich napięcia, dlatego moment się wyrównuje i silnik nie jest narażony na szarpanie. Rozwiążanie te także nie pozostaje bez wad- Zakładając że dla momentu w czasie, w którym przez oba uzwojenia płynie prąd, wartość tego prądu jest maksymalna (nominalna) dla danego modelu silnika w każdym z uzwojeń, oznacza to że w chwilach kiedy napięcie jest podawane na tylko jedno uzwojenie, prąd w nim płynący jest większy od nominalnego (tak jak na rys. 2.17). To naraża silnik na nadmierne grzanie, a nawet na uszkodzenie. Z

drugiej strony można założyć że nominalny prąd ma płynąć w momencie zasilania jednego uzwojenia, a mniejszy przy zasilaniu dwóch. Ten tryb jest bezpieczny, ale optymalny moment obrotowy nie jest uzyskiwany.



Rysunek 2.17: Sekwencja zasilania uzwojeń przy sterowaniu półkrokowym ze zmiennym prądem (obrót wirnika z rys. 2.13 według wskazówek zegara).

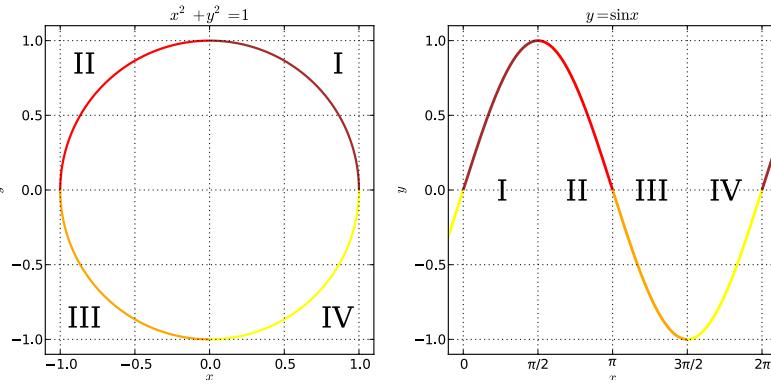
Źródło: Na podstawie [27]

Sterowanie mikrokrokowe

Największą rozdzielczość ruchu (teoretycznie nieograniczoną, a praktycznie ograniczoną możliwościami układu sterującego) można uzyskać przy zastosowaniu trybu mikrokrokowego. Aby obrócić wirnik z rys. 2.13 w najpłynniejszy możliwy sposób, kształt prądu podawany na uzwojenia powinien być naturalny dla danej konstrukcji silnika, czy też dla ruchu który wykonuje element ruchomy- W tym wypadku jest to ruch obrotowy.

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad (2.2)$$

Równanie 2.2 prezentuje wzór na jedynkę trygonometryczną. Można go użyć, aby uzyskać dowolną pozycję wirnika pomiędzy kolejnymi naturalnymi ułożeniami wirnika. W tym momencie należy rozróżnić dwa rodzaje pozycji kątowych wirnika silnika krokowego- magnetyczną oraz fizyczną. W przypadku silnika z rys. 2.13 obie pozycje będą się zawsze pokrywać, ze względu na to że potrzeba jedynie czterech pełnych kroków aby uzyskać pełen obrót- kąt „magnetyczny” 45° odpowiada obrotowi wirnika o 45° . Dla rzeczywistej sytuacji, w której silnik posiada np. 200 kroków

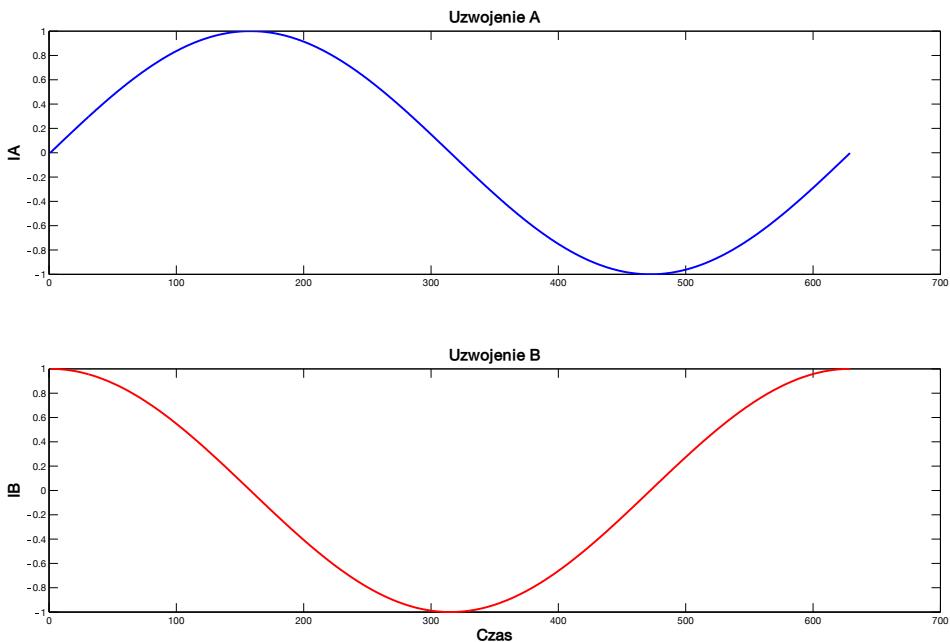


Rysunek 2.18: Ćwiartki okręgu i funkcji $\sin x$ w kartezjańskim układzie współrzędnych

Źródło: Na podstawie [18]

na obrót, jeden stopień magnetyczny odpowiadałby już jedynie $\frac{1}{50}$ stopnia w obrocie. Innymi słowy potrzeba 50 obrotów magnetycznych na 1 obrót fizyczny wirnika.

Tak więc, podając na uzwojenia silnika prąd o kształcie funkcji *sinus* (na pierwsze uzwojenie) i *cosinus* (na drugie) sumaryczny prąd w uzwojeniach zawsze będzie stały (wzór 2.2), a co za tym idzie stały będzie także moment obrotowy.

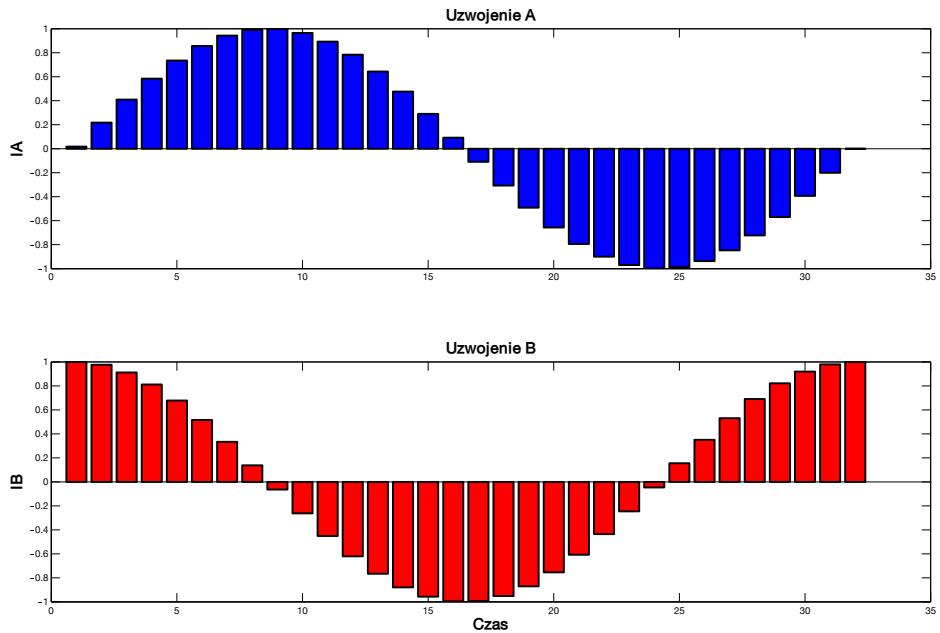


Rysunek 2.19: Kształt prądów podawanych na uzwojenia A i B w celu uzyskania optymalnej płynności obrotu w silniku krokowym hybrydowym dwufazowym.

Źródło: Na podstawie [27]

Prezentowane przebiegi z rys. 2.19 obróćą wał silnika o 360° magnetycznych. Maksymalna amplituda po znormalizowaniu reprezentuje wartość natężenia nominalnego prądu dla danego modelu silnika. Ze względu na opisywane własności, silniki krokowe mogą być sterowane częstotliwościami audio, takimi samymi jakie są podawane na głośniki (po odpowiednim wzmacnieniu), lub z napięcia sieciowego o odpowiednim przesunięciu międzyfazowym (np. dla silnika dwufazowego o 90° ,

a dla silnika trójfazowego o 60°). Zazwyczaj jednak silniki krokowe są sterowane z przekształtników, które same są zasilane napięciem stałym. Oznacza to że te przekształtniki muszą wytworzyć w „cyfrowy” sposób napięcie zmienne, o odpowiednim kształcie i zmiennej częstotliwości, aby poprawnie sterować silnikiem. W tym wypadku uzyskanie prądu w kształcie idealnej sinusoidy jest niemal niemożliwe i trzeba pogodzić się z określona dla danego sterownika rozdzielczością mikrokroków, która rośnie wraz z ceną przekształtnika. Rozdzielczości uzyskiwane w typowych sterownikach wynoszą od 8 do 32 mikrokroków na pełen krok.



Rysunek 2.20: Kształt prądów podawanych na uzwojenia A i B przy sterowaniu mikrokrokowym z rozdzielczością $\frac{1}{8}$ kroku.

Źródło: Na podstawie [27]

Tabela 2.1 prezentuje podsumowanie omówionych trybów sterowania silnikami krokowymi dla zasilania bipolarnego i unipolarnego.

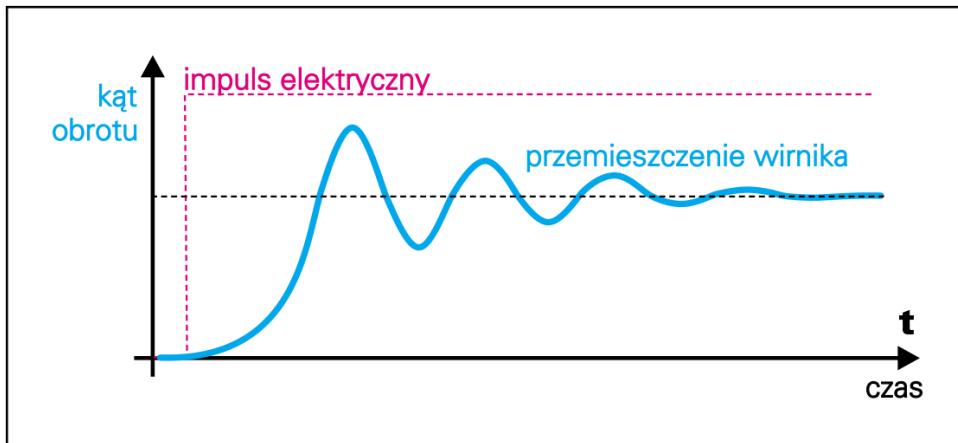
Tabela 2.1: Cechy poszczególnych trybów sterowania silnikiem krokowym

Źródło: Na podstawie [24]

Rodzaj sterowania	Falowe		Pełnokrokowe		Półkrokowe		Mikrokrokowe	
	Bi	Uni	Bi	Uni	Bi	Uni	Bi	Uni
Moment obrotowy	50%	25%	100%	50%	50-100 %	25-50 %	50%	25%
Komplikacja sterownika	średnia	mała	średnia	mała	duża	duża	duża	duża
Płynność ruchu	mała	mała	mała	mała	duża	duża	duża	duża
Rozdzielczość kroku	mała	mała	mała	mała	średnia	średnia	duża	duża

2.4.3. Zalety i wady silników krokowych

Możliwość sterowania silnikiem krokowym za pomocą impulsów jest dużą zaletą. Przy odpowiednio dobranym układzie napędowym, do pracy w ograniczonym obszarze dokładności silnik krokowy nie potrzebuje żadnego sprzężenia zwrotnego (praca w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego). Teoretycznie pozycja wirnika jest znana po każdej komutacji wykonanej przez układ sterujący. Niestety, wirnik i jego obciążenie posiadają pewną bezwładność co sprawia że przed osiągnięciem ustalonej pozycji występują drgania.



Rysunek 2.21: Wykres czasowy ilustrujący położenie wirnika podczas wykonywania skoku

Źródło: Na podstawie [23]

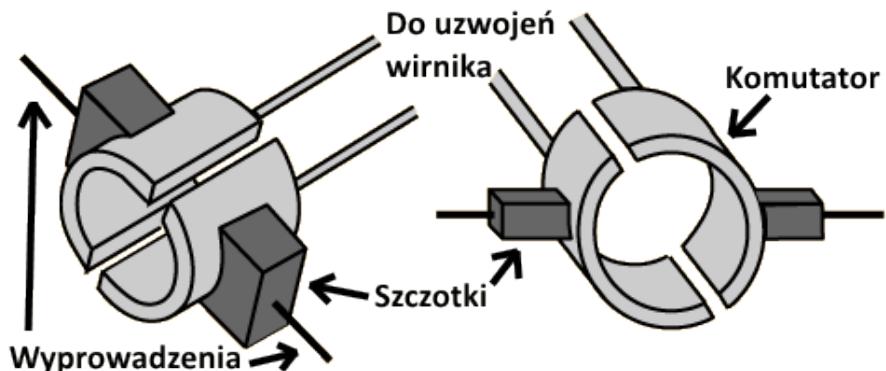
W przypadkach kiedy wymagana jest duża precyzja sterowania, tak duże drgania są bardzo niekorzystne. Nie ma prostych sposobów ich ograniczenia, niektóre z nich to:

- Tłumienie mechaniczne poprzez zwiększenie momentu tarcia.
- Sprzęgła elastyczne i przekładnie paskowe zastosowane w układzie napędowym, w celu redukcji przenoszonych drgań do obciążenia.
- Wybór pracy półkrokowej lub mikrokrokowej- Im bardziej przebieg prądu jest zbliżony do sinusoidalnego, tym ciszej i stabilniej pracuje silnik krokowy.
- Zastosowanie silnika krokowego o mniejszym skoku. Razem z krokiem zmniejszają się oscylacje.

Należy pamiętać że o wielkości i częstotliwości oscylacji decyduje głównie masa wirnika oraz wielkość i rodzaj obciążenia.

2.5. Silnik komutatorowy (DC)

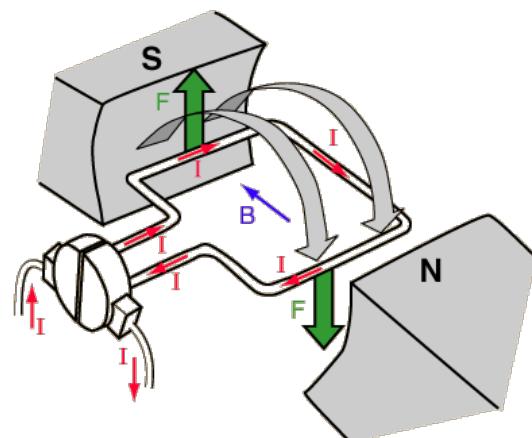
Silniki komutatorowe są wynalazkiem stosunkowo starym i pomimo swoich wad są dalej powszechnie stosowane w produktach konsumenckich jak i w przemyśle, głównie ze względu na prostotę regulacji prędkości i momentu obrotowego.



Rysunek 2.22: Uproszczona budowa komutatora typowego silnika elektrycznego

Źródło: Na podstawie [8]

Komutator jest szeregiem miedzianych płyt umieszczonych na bocznej powierzchni wirnika, po którym ślizgają się (zazwyczaj) węglowe szczotki do których doprowadzone jest napięcie (rys. 2.22). Zadaniem komutatora jest przełączanie kierunku przepływu prądu w uzwojeniach tak, aby oddziaływanie z polem magnetycznym stojana wprawiło wirnik w ruch obrotowy. Inaczej niż w przypadku silników VR, układ sterujący maszyną jest odciążony od zapewniania odpowiedniej komutacji, co sprawia że może on być o wiele prostszy w konstrukcji.



Rysunek 2.23: Zasada działania silnika komutatorowego z magnesem trwałym

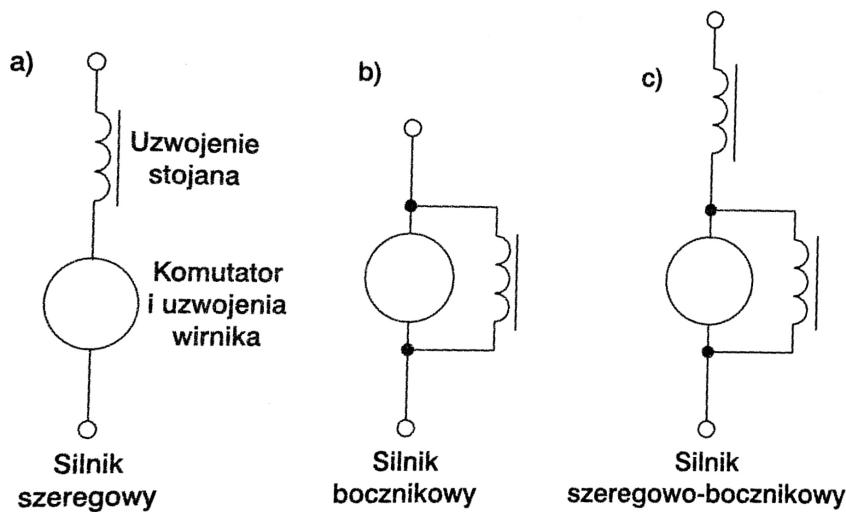
Źródło: Na podstawie [8]

Rysunek 2.23 prezentuje zasadę działania silnika komutatorowego, w którym do wytworzenia pola magnetycznego stojana został użyty magnes trwały. Tak skonstruowany silnik to PMDC (*Permanent Magnet DC*). Kiedy prąd elektryczny I przepływa przez cewkę znajdującą się w polu magnetycznym B , to siła magnetyczna F (Działająca prostopadle do ułożonych uzwojeń cewki i działającej indukcji) wywołuje moment obrotowy wprawiający wirnik w ruch. Podaną zależność przedstawia wzór

1.17. W silniku tego rodzaju obroty zależą liniowo od napięcia zasilania, a moment obrotowy od natężenia prądu. Przy wzroście obciążenia spadają obroty, a rośnie moment obrotowy i pobór prądu. Zmiana kierunku obrotów jest uzyskiwana poprzez zmianę biegunowości zasilania. Prędkość obrotową można łatwo regulować w granicy od 5% do 110% prędkości znamionowej, z zachowaniem dużego momentu obrotowego. Dobrą stabilizację momentu obrotowego można uzyskać poprzez zasilanie silnika ze źródła prądowego.

Do wytworzenia pola magnetycznego stojana można użyć elektromagnesu, zamiast magnesu trwałego. Taki silnik posiada dwa uzwojenia: wirnika i stojana. W zależności od układu połączeń można otrzymać silnik:

- szeregowy,
- bocznikowy,
- szeregowo-bocznikowy.



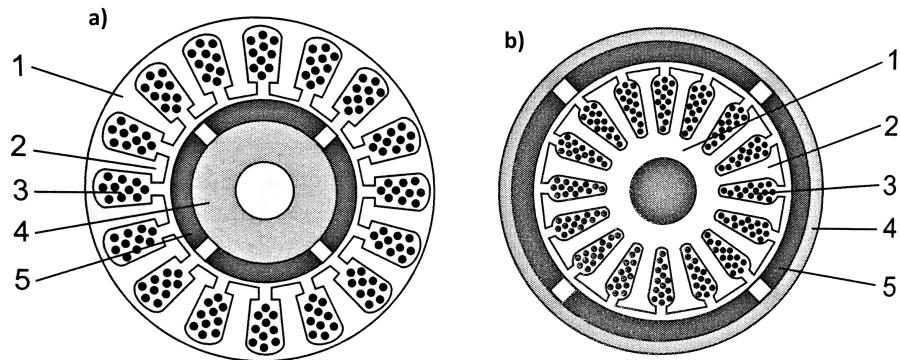
Rysunek 2.24: Możliwe konfiguracje uzwojeń wirnika i stojana: a) silnik szeregowy, b) bocznikowy, c) szeregowo-bocznikowy

Źródło: Na podstawie [24]

Silnik szeregowy ma bardzo duży moment obrotowy i rozruchowy, ale prędkość obrotowa jest silnie uzależniona od obciążenia silnika. W warunkach pracy bez obciążenia, silnik szeregowy może rozpędzać się bez ograniczeń, aż do jego uszkodzenia („Rozbieganie się” silnika). Silnik bocznikowy nie posiada tej wady – jego obroty są stałe i prawie niezależne od obciążenia. Niestety silniki bocznikowe zazwyczaj wymagają skomplikowanych układów płynnego rozruchu ograniczających prąd rozruchowy, a moment rozruchowy jest dużo mniejszy niż w modelach szeregowych. Wersja szeregowo-bocznikowa ma charakterystykę zbliżoną do szeregowego, a dodatkowe uzwojenie bocznikowe ogranicza maksymalne obroty przy pracy bez obciążenia. Regulacja obrotów jest możliwa poprzez zmianę napięcia zasilania. Kierunek obrotów jest stały, bez względu na biegunowość zasilania, co sprawia że maszynę można zasilać z sieci AC.

2.6. Silnik bezszczotkowy z wirującym magnesem (BLDC)

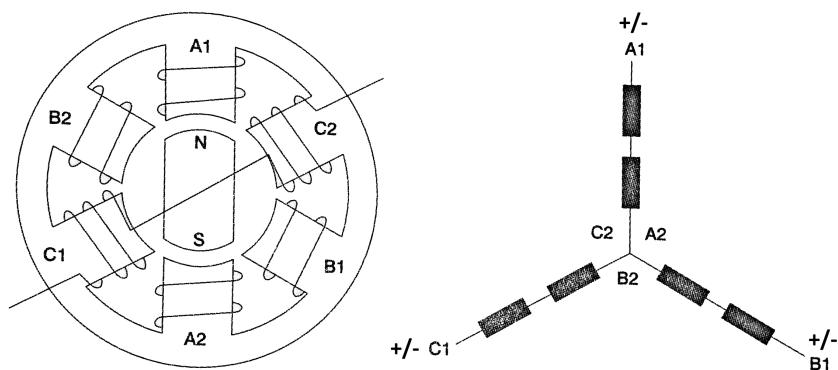
Konstrukcja silnika BLDC (*Brushless DC Motor*) jest odwrotnością silnika komutatorowego z magnesem trwałym: uzwojenia znajdują się w stojanie, a wirnik jest wykonany z odpowiednio ukształtowanego magnesu. Maszyny te są zaliczane do grupy silników prądu stałego, ale w praktyce pradem stałym zasilany jest jedynie falownik sterujący silnikiem, a sama maszyna zasilana jest falą prostokątną lub przebiegiem impulsowym przypominającym sinusoidę.



Rysunek 2.25: Przekrój typowego silnika PM BLDC: a) z wirkiem wewnętrznym, b) z wirkiem zewnętrznym, 1- jarzmo stojana (twornika), 2- zęby stojana, 3- żłobek z uzwojeniami, 4- wirnik, 5- magnes trwały

Źródło: Na podstawie [22]

Silniki BLDC są konstrukcyjnie bardzo podobne do silników krokowych- można przyjąć że silniki BLDC są pewną podgrupą silników krokowych o kroku 180° (silniki 2-fazowe) lub 120° (3-fazowe). Kryterium odróżniające silniki krokowe od BLDC może być takie, że w większości aplikacji dla poprawnej silnika BLDC jego sterownik musi dysponować sygnałem zwrotnym o aktualnym położeniu kątowym wirnika (np. z czujników Halla). Silniki krokowe natomiast mogą pracować w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego.

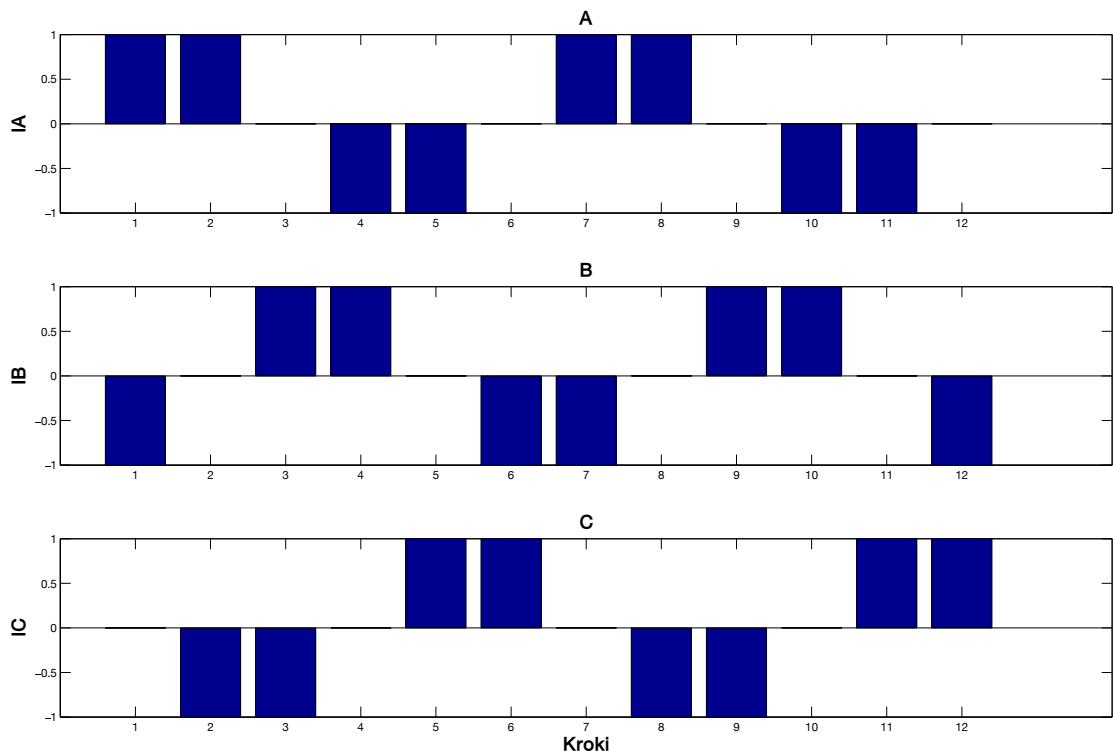


Rysunek 2.26: Konfiguracja uzwojeń trójfazowego silnika BLDC w gwiazdę

Źródło: Na podstawie [24]

Uzwojenia silnika BLDC dla maszyny 3-fazowej są układane w gwiazdę (rys. 2.26). Prąd z układu sterującego jest doprowadzany do wyprowadzeń A1, B1 i C1 podczas gdy pozostałe końce uzwojeń (A2, B2, C2) są ze sobą zwarte. Oznacza to że

w tym rodzaju maszyny, prąd przepływa zawsze przez co najmniej dwa uzwojenia, w jednym z dwóch możliwych kierunków (np. kiedy wyższy potencjał jest na C1, a niższy na A1 wtedy od C1 do A1). Rysunek 2.27 przedstawia tą zależność.



Rysunek 2.27: Uproszczone przebiegi prądów w uzwojeniach silnika 3-fazowego sterowanego bipolarnie

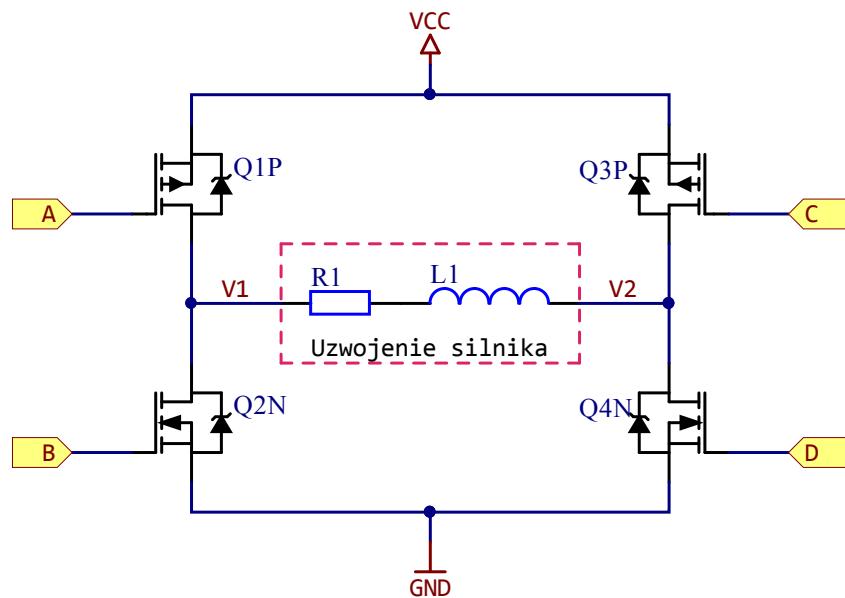
Źródło: Na podstawie [27]

Zmiany momentu obrotowego w funkcji kąta obrotu są w silniku trójfazowym niewielkie i można je jeszcze bardziej zredukować stosując impulsy prądowe o kształcie trapezowym. W celu uzyskania idealnie stałego momentu obrotowego należy zapewnić sinusoidalny przebieg prądu w uzwojeniach. Tak jak zaprezentowano na rys. 2.25 silniki bezszczotkowe mogą mieć różną konstrukcję wirnika. W przypadku budowy „klasycznej” wirnik w kształcie walca jest umieszczony wewnętrz stojana z uzwojeniami. W silniku z wirnikiem zewnętrznym magnetyczny wirnik ma kształt kubka i obraca się wokół nieruchomego stojana.

Do głównych zalet silników BLDC należy zaliczyć to że zjawisko rezonansu mechanicznego jest o wiele mniejsze niż w przypadku silników krokowych, dzięki czemu mogą one uzyskiwać prędkości obrotowe o wiele większe te pierwsze (powyżej 10000 RPM). Ponadto, przy tej samej wartości momentu obrotowego silnik BLDC może być mniejszy i lżejszy od krokowego. Z racji tego że BLDC nie posiada komutatora, a co za tym idzie szczotek, jego żywotność jest bardzo długa i jest praktycznie ograniczona żywotnością mechaniki układu napędowego. Największą niedogodnością jest natomiast to, że z silnikiem bezszczotkowym z wirującym magnesem nie da się w praktyce pracować w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego.

3. Zasilanie silników

Z praktycznego punktu widzenia najwygodniej było by, aby wyprowadzenia silnika były zasilane z idealnych źródeł prądowych. Tym sposobem, możliwe było by wymuszenie przepływu prądu w uzwojeniu o dowolnym natężeniu bez większego problemu. W praktyce niestety zbudowanie takiego falownika było by bardzo trudne, w szczególności jeśli miałyby on pracować z silnikami dużej mocy. Dlatego właśnie do sterowania silnikami stosuje się najczęściej metodę modulacji szerokości impulsów napięciowych (*Pulse width modulation*). Dzięki temu, uzwojenia maszyny są zasilane ze źródła napięciowego (które są tanie w budowie, np. wszelkiego rodzaju zasilacze lub baterie), do którego dostęp jest włączany i wyłączany w odpowiednim czasie i na określony czas.



Rysunek 3.1: Mostek typu „H” zbudowany z czterech tranzystorów polowych z izolowaną bramką (*Mosfet*)

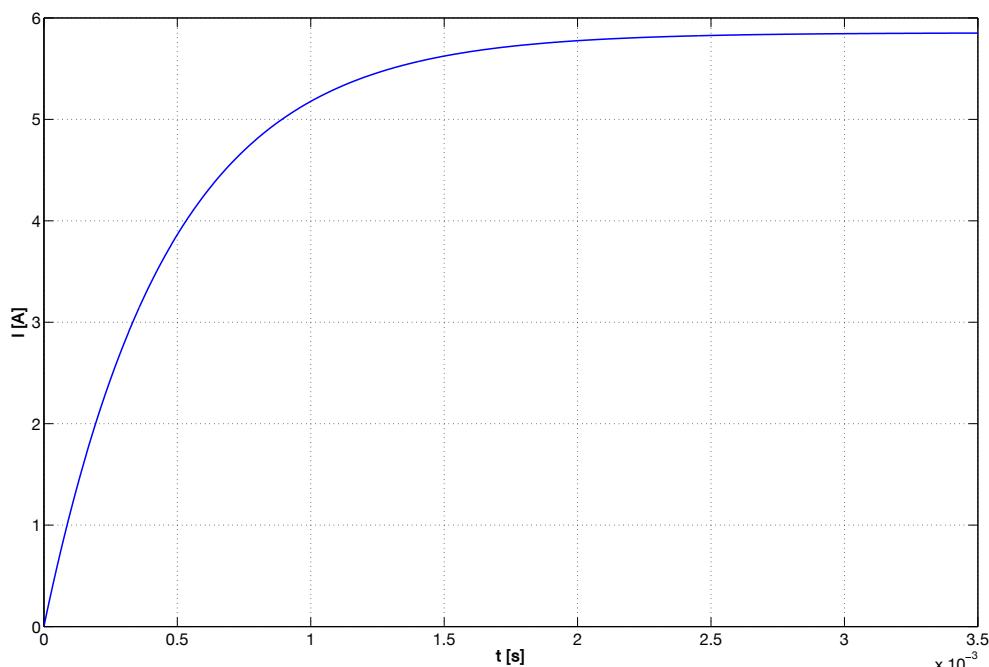
Źródło: Na podstawie [27]

Kwestią pozostaje dobranie odpowiednich „przełączników” które doprowadzały by i odcinały napięcie od uzwojenia. Rys. 3.1 prezentuje przykładowy mostek typu H, zbudowany z czterech tranzystorów polowych. Tak zbudowany układ może posłużyć do wymuszenia przepływu prądu w uzwojeniu silnika (które symbolizuje gałąź z rezystorem R1 i cewką L1) w dowolnym kierunku, w zależności od tego które z tranzystorów są aktualnie otwarte/ zamknięte. Jedna połowa mostka (półmostek) tworzy układ *Push-Pull*, który może w punkcie połączenia dwóch tranzystorów (V1 i V2) zapewnić potencjał o wartości przybliżonej do VCC lub GND. Nie zawsze jako klucze są wykorzystywane tranzystory typu Mosfet, w zależności od aplikacji są to też inne półprzewodniki takie jak tranzystory bipolarne, triaki czy tranzystory IGBT (*Insulated-gate bipolar transistor*). W komercyjnych sterownikach małej mocy jednak, najczęściej są to właśnie tranzystory polowe, z tą różnicą że górne tranzystory mostka są także tranzystoram typu N ze względu na ich lepsze względem typu P właściwości (Mobilność elektronów jest większa niż dziur, a to te pierwsze są nośnikami ładunków w tranzystorze typu N [26]). W takim wypadku jednak do

wysterowania górnego tranzystora potrzebne są dodatkowe układy elektroniczne, lub dodatkowe źródło zasilania, ze względu na to że napięcie na bramce musi być wyższe od napięcia na źródle tranzystora, w celu jego pełnego wysterowania. Diody połączone równolegle do tranzystorów są niezbędne- w przypadku ich braku prąd uzwojenia usiłowałby zaniknąć w czasie równym 0, co jest niemożliwe, ale napięcie samoindukcji osiągnęło by wartość od kilkuset woltów do kilku kV. Wtedy energia zgromadzona na indukcyjności może rozładować się na dwa sposoby:

- nastąpi przebicie tranzystora lub izolacji uzwojenia z wyładowaniem iskrowym,
- pojemność pasożytnicza uzwojenia stworzy obwód rezonansowy LC, energia zostanie wypromieniowana w postaci fali elektromagnetycznej i częściowo zamieniona w ciepło poprzez prądy wirowe zaindukowane w rdzeniu [24].

Dzięki indukcyjnej naturze uzwojeń silników, kluczując napięcie zasilania (w określonych interwałach czasowych) możliwe jest wymuszenie przepływu prądu w uzwojeniu o wartości bliskiej z góry założonej w sterowniku, bez względu na to że maszyna jest zasilana ze źródła napięciowego.



Rysunek 3.2: Przebieg prądu po podaniu impulsu napięciowego (w momencie $t = 0s$) o wartości $U = 24V$ na uzwojenie o rezystancji $R = 4.1\Omega$ i indukcyjności $L = 1.9mH$

Źródło: Na podstawie [27]

Czas w którym prąd w uzwojeniu osiągnie swoją maksymalną wartość przedstawia stała czasowa cewki τ :

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.1)$$

Gdzie L i R to indukcyjność i rezystancja uzwojenia. Aby obliczyć prąd uzwojenia w dowolnym momencie t należy użyć wzoru:

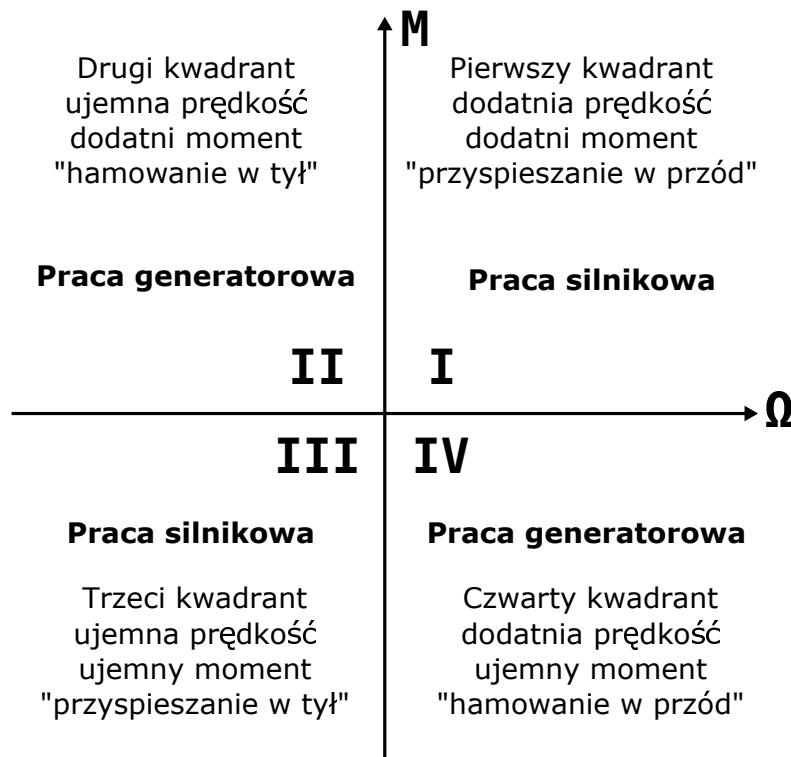
$$I_L = \frac{U}{R} \left(1 - \exp^{\frac{-t}{\tau}}\right) \quad (3.2)$$

Spadek napięcia na cewce podczas ładowania i rozładowywania cewki wyrażany jest wzorem:

$$U_L = -L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.3)$$

3.1. Tryby pracy

Obserwując kierunek przepływu energii w maszynie elektrycznej, można na tej podstawie wyróżnić jej dwa tryby pracy: silnikową oraz generatorową. W stanach ustalonych układu napędowego zjawiska te można zobrazować za pomocą charakterystyk mechanicznych (rys. 3.3), pokazujących zależność momentu M od prędkości Ω . Kształt charakterystyk zależy przede wszystkim od struktury i parametrów układów regulacyjnych i pomiarowych, a w pewnym zakresie również od charakterystyk przekształtnika oraz od typu i parametrów silnika [29].



Rysunek 3.3: Charakterystyki statyczne silnika: Ω - prędkość obrotowa, M - moment obrotowy

Źródło: Na podstawie [27]

Moc pobierana przez maszynę jest wyrażana wzorem:

$$P = \Omega M \quad (3.4)$$

Kiedy jest dodatnia (kwadrant I i III) oznacza to że maszyna pobiera ją z sieci i pracuje jako silnik napędzając element będący obciążeniem. W przypadku kiedy moc jest ujemna (kwadrant II i IV) silnik hamuje obciążenie pracując jako prądnica

(praca generatorowa), która poprzez przekształtnik oddaje energię do sieci [28]. Jest to związane z faktem że w uzwojeniu silnika powstaje siła elektromotoryczna (*Back EMF*), gdy wirnik obraca się z prędkością inną niż prędkość wirowania pola magnetycznego (samoindukcja, wzór 1.18). Innymi słowy w kwadrantach I i III silnik zamienia energię elektryczną na mechaniczną, a w pozostałych dwóch jest na odwrót.

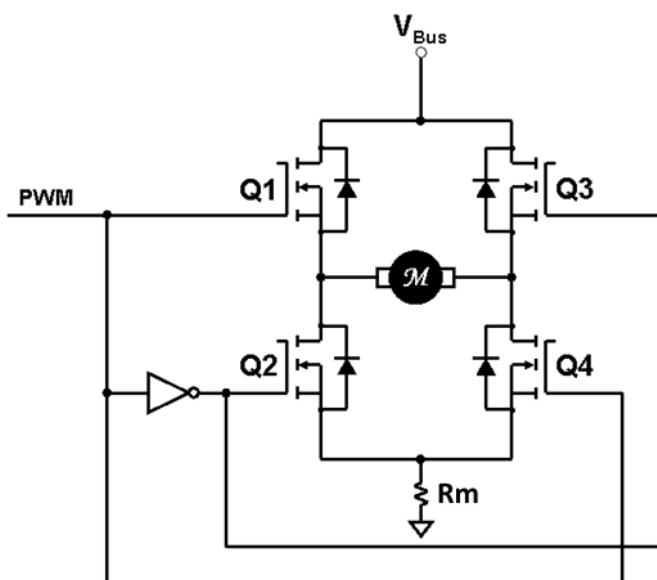
W zależności od topologii układu przekształtnikowego i zastosowanych algorytmów sterowania, maszyna elektryczna może mieć możliwość pracy tylko w części kadrantów (kiedy pracuje z prostym przekształtnikiem), lub we wszystkich (w tych bardziej zaawansowanych). Nie zawsze wszystkie tryby są potrzebne i dla prostych aplikacji, np. kiedy silnik ma pracować obracając się jedynie w jednym kierunku i nie ma potrzeby odprowadzania energii do sieci, może być używany tylko tryb z pierwszego lub trzeciego kwadrantu.

3.2. Sterowanie mostka „H”

Omawiany wcześniej mostek „H” (rys. 3.1), który służy do dostarczania prądu do uzwojeń może być sterowany na dwa sposoby- Unipolarny i Bipolarny. Oba sposoby mają swoje wady oraz zalety i w związku z tym sterownik, który nie potrafi obsłużyć obu tych trybów może być stosowany tylko w ograniczonych aplikacjach. Ponadto, trybów tych nie należy mylić z trybami zasilania silnika krokowego, które zostały omówione w podrozdziale 2.4.2.

3.2.1. Sterowanie bipolarne

Sterowaniem bipolarnym nazywa się takie sterowanie, w którym dla kolejnych okresów sygnałów sterujących PWM, wartość napięcia na uzwojeniu zmienia się w zakresie od V_{BUS} (napięcia źródła napięciowego zasilającego silnik) do $-V_{BUS}$. Ten sposób wysterowania mostka przedstawia schemat z rysunku 3.4. Jako obciążenie został przyjęty silnik DC.



Rysunek 3.4: Silnik DC sterowany bipolarnie

Źródło: Na podstawie [16]

Widoczne na schemacie połączenia i zastosowana bramka NOT jest tylko obrazowym odzwierciedleniem sposobu sterowania implementowanego programowo w sterowniku. W tak zbudowanym układzie nie ma żadnych sygnałów wejściowych informujących o tym w którą stronę wirnik silnika powinien się obracać, ani czy powinien w ogóle się obracać czy pozostać w spoczynku. Wszystkie te informacje są zakodowane w sygnale PWM. Zakładając sytuację bez obciążenia wirnika, wypełnienie impulsu powyżej 50% wymusi ruch „do przodu”, a poniżej 50% – „do tyłu”. Taka maszyna jest elektrycznym odpowiednikiem mechanicznej przekładni bezstopniowej CVT (*Continuously Variable Transmission*) [16]. W tego typu maszynie pozycję spoczynkową otrzymuje się poprzez zadawanie sygnału o wartości środkowej.

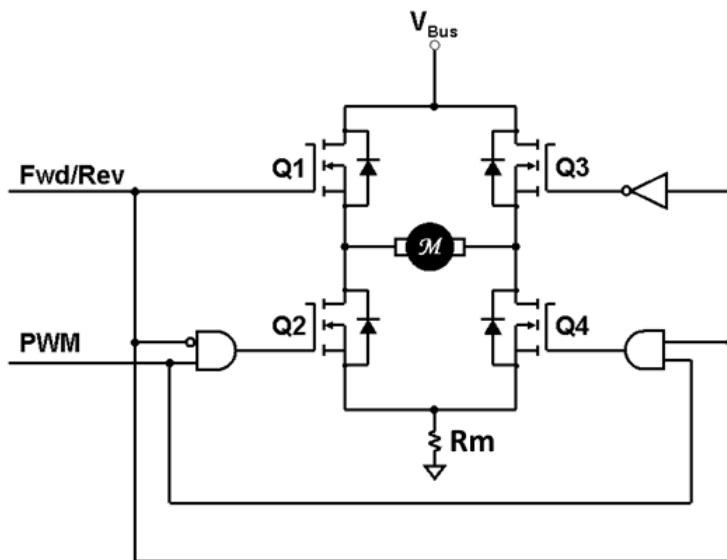
Przy sterowaniu bipolarnym, maszyna pracuje częściowo w czwartym kwadrancie charakterystyki (rys. 3.3). Tak długo, jak przyłożone do silnika średnie napięcie jest tej samej polaryzacji co SEM generowana w uzwojeniu, i jego amplituda jest wyższa od amplitudy tej SEM, wtedy maszyna pracuje w trybie silnikowym. W przypadku kiedy napięcie zasilania i SEM mają tą samą polaryzację, lecz SEM ma wyższą amplitudę to maszyna pracuje w trybie generatorowym.

Zaletą sterowania bipolarnego jest to że z sprzętowego punktu widzenia wymaga bardzo niewiele zasobów. W przypadku najprostszego sterowania wymagany jest tylko jeden sygnał PWM z mikrokontrolera lub innego urządzenia. Oznacza to że nawet najtańszy mikroprocesor wyposażony tylko w jedno wyprowadzenie PWM może posłużyć do zbudowania sterownika do silnika z jednym uzwojeniem. Ważniejszą zaletą jednak jest to, że używając tylko jednego rezystora pomiarowego (R_m na rys. 3.4) istnieje możliwość pomiaru prądu płynącego w uzwojeniu, w dowolnym momencie w czasie. Daje to możliwość swobodnego doboru sposobu próbkowania prądu i upraszcza układ sterujący. Najpoważniejszą wadą sterowania bipolarnego jest to że napięcie na uzwojeniu silnika posiada dużą zawartość harmonicznych, co z kolei powoduje duże tężnienia prądu w uzwojeniu i dodatkowe grzanie się silnika.

3.2.2. Sterowanie unipolarne

Zasadę działania sterowania unipolarnego można zaprezentować bazując na rysunku 3.5. Przy jego pomocy możliwe jest wysterowanie silnika w taki sposób, aby jego wirnik mógł obracać się w obu kierunkach (kwadranty I i III). Aby pracować w pierwszym kwadrancie, tranzystor Q1 jest włączony, a na bramkę Q4 podawany jest sygnał PWM. Kiedy Q4 jest otwarty, prąd płynie od V_{BUS} przez Q1, dalej przez uzwojenie i przez Q4 do masy poprzez rezistor R_m . Kiedy Q4 się zamyka, a ze względu na to że w uzwojeniu silnika jest indukcyjność, to będzie ono starało się utrzymać przepływ prądu w tym samym kierunku. Zwiększały się potencjał w punkcie połączenia drenu Q4 i źródła Q3 sprawia że dioda tranzystora Q3 zaczyna przewodzić. Z racji tego że Q1 jest cały czas otwarty, oczko prądowe zamknie się właśnie przez ten tranzystor, a nie przez obwód zasilania. Aby obracać wirnikiem w drugą stronę, należy otworzyć Q3 i kluczować Q2. W takim wypadku silnik pracuje w trzecim kwadrancie charakterystyki statycznej (negatywna prędkość i moment. Niezależnie od kierunku przepływu prądu w silniku, napięcie na niego podawane zawsze zmienia się w granicy od V_{BUS} do GND, a nie jak w schemacie obrazującym sterowanie bipolarne (rys. 3.4) od V_{BUS} do $-V_{BUS}$. Sprawia to że w takim układzie

silnik nie może oddawać energii do zasilania, bo prąd jest „zamknięty” w oczku utworzonym z Silnika, Q1 i Q3.



Rysunek 3.5: Silnik DC sterowany unipolarnie

Źródło: Na podstawie [16]

Zaletą prezentowanej topologii jest to że wymagany jest tylko jeden sygnał PWM do sterowania pojedynczym mostkiem (plus linia wejściowa ustalająca kierunek obrotów). Ponadto, w danym momencie kluczowany jest tylko jeden tranzystor, a więc co za tym idzie straty spowodowane przełączaniem są mniejsze niż w sterowaniu bipolarnym. Modulacja unipolarna wywołuje większą amplitudę tętnień prądu niż modulacja bipolararna przy tej samej częstotliwości modulacji [29].

Główną wadą tego typu sterowania jest to, że pomimo posiadania mostka H nie ma możliwości pracy we wszystkich czterech kwadrantach. Innymi słowy, aby zwolnić można wysterować mostek w taki sposób, żeby prąd swobodnie się rozładował z uzwojenia lub gwałtownie zmienić pozycję z kwadrantu z I do III, co można porównać do wrzucenia wstecznego biegu w aucie podczas jazdy. Przepływ prądu o bardzo wysokim natężeniu może uszkodzić uzwojenie silnika.

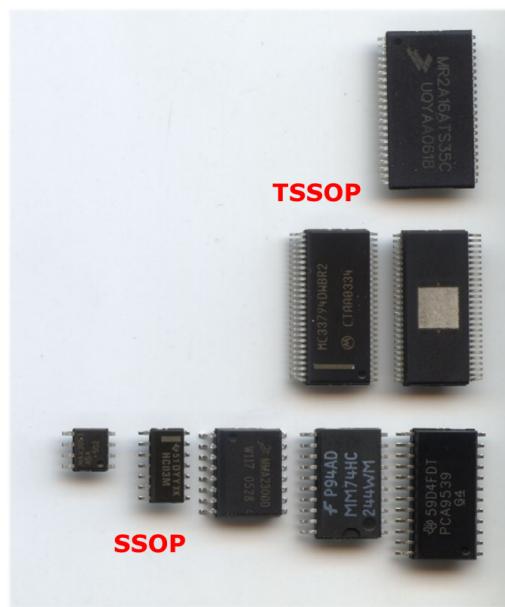
Bez względu na zastosowaną technikę modulacji, do wszystkich silników zasilanych napięciem stałym można użyć mostka typu „H” w celu realizacji tej modulacji.

4. Rozwiązania komercyjne i Open Source

Na rynku dostępnych jest bardzo wiele rozwiązań pozwalających w szybki sposób zacząć sterować konkretnym rodzajem silnika. Ceny poszczególnych sterowników różnią się od siebie znaczco, w taki sam sposób jak różni się ich funkcjonalność. Są też dostępne projekty bezpłatne (*Open Source i Open Hardware*) w rozumieniu konkretnych rozwiązań technologicznych, czy też „*Know How*”. Innymi słowy schematy elektryczne i mechaniczne, dane *CAD'owskie* i oprogramowanie są udostępnione za darmo, a samo urządzenie trzeba fizycznie wykonać samemu. W przypadku tych drugich należy także dokładnie zaznajomić się z licencją na zasadach jakiej są udostępnione, gdyż bardzo często zdarza się że nie można ich stosować bezpłatnie do zastosowań komercyjnych.

4.1. Sterowniki jedno-układowe

Pierwszą grupą sterowników są urządzenia, które dostarczają użytkownikowi jedynie część funkcjonalności związanej ze sterowaniem silnikiem- najczęściej tą która jest najtrudniejsza do zaimplementowania programowo lub sprzętowo na płytce PCB (*Printer Circuit Board*) urządzenia. Ich cena w porównaniu do układów zapewniających pełne sterowanie jest wielokrotnie niższa, a ponadto niejednokrotnie są one częścią tych układów.



Rysunek 4.1: Przykładowe typy obudów w jakich są produkowane układy scalone do sterowania silnikami. Na górze obudowy TSSOP (*Thin Shrink Small Outline Package*) i SSOP (*Shrink small outline package*) na dole

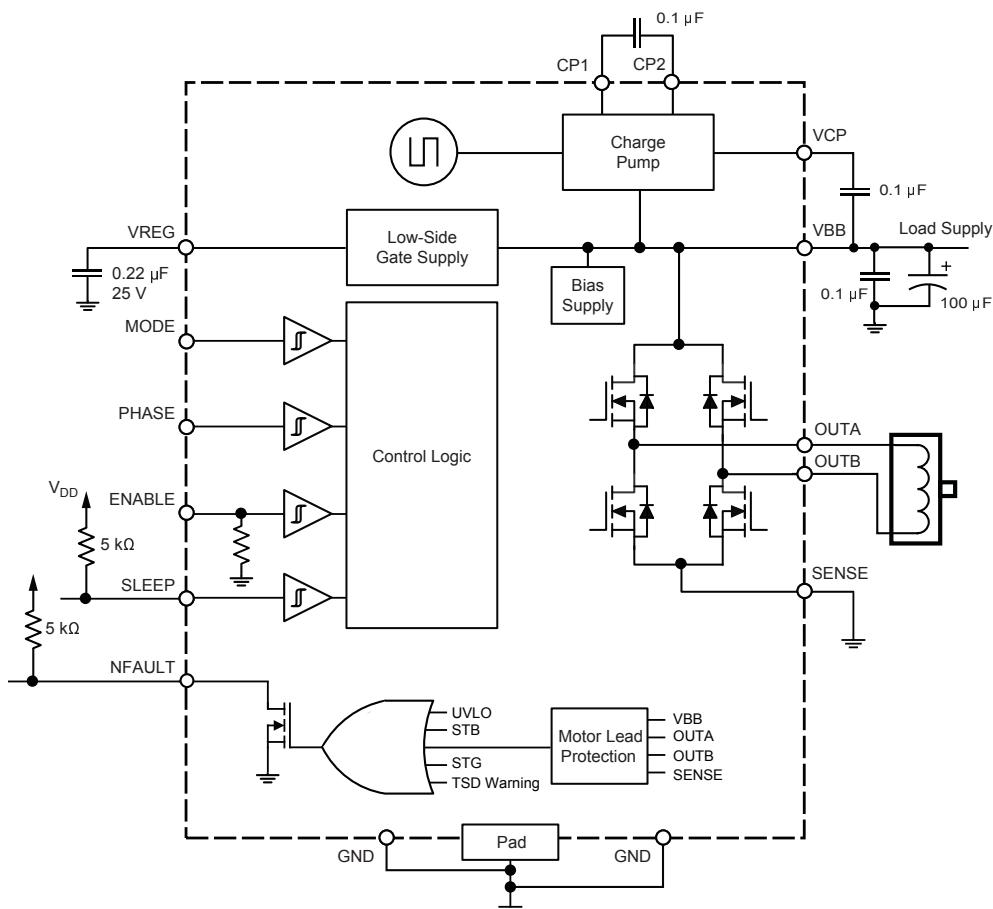
Źródło: Na podstawie [27]

Funkcjonalność danego układu mocno zależy od jego ceny- wraz z jej wzrostem algorytmy zaimplementowane w sterowniku są coraz lepsze, a dodatkowych potrzebnych komponentów elektronicznych do ich poprawnego działania potrzeba coraz mniej (np. końcówki mocy takie jak mostki H są zintegrowane w układzie). Ogólnie rzecz ujmując, urządzenia te stają się coraz bardziej „samodzielne”. Ponadto sterowniki do obsługi silników, które wymagają bardziej skomplikowanego

sterowania (np. Krokowe lub BLDC) są droższe od tych, które służą do zasilania prostych maszyn (np. silniki komutatorowe DC).

4.1.1. AD3950 - Allegro MicroSystems

Układ AD3950 produkowany przez firmę Allegro MicroSystems jest urządzeniem służącym do sterowania silnikami komutatorowymi DC, aczkolwiek nadaje się też do silników VCM. Najwyższe napięcie przy jakim może pracować to 36 V, a chwilowy prąd szczytowy który może dostarczyć do uzwojenia to $\pm 2.8A$.



Rysunek 4.2: Funkcjonalny schemat blokowy układu A3950

Źródło: Na podstawie [1]

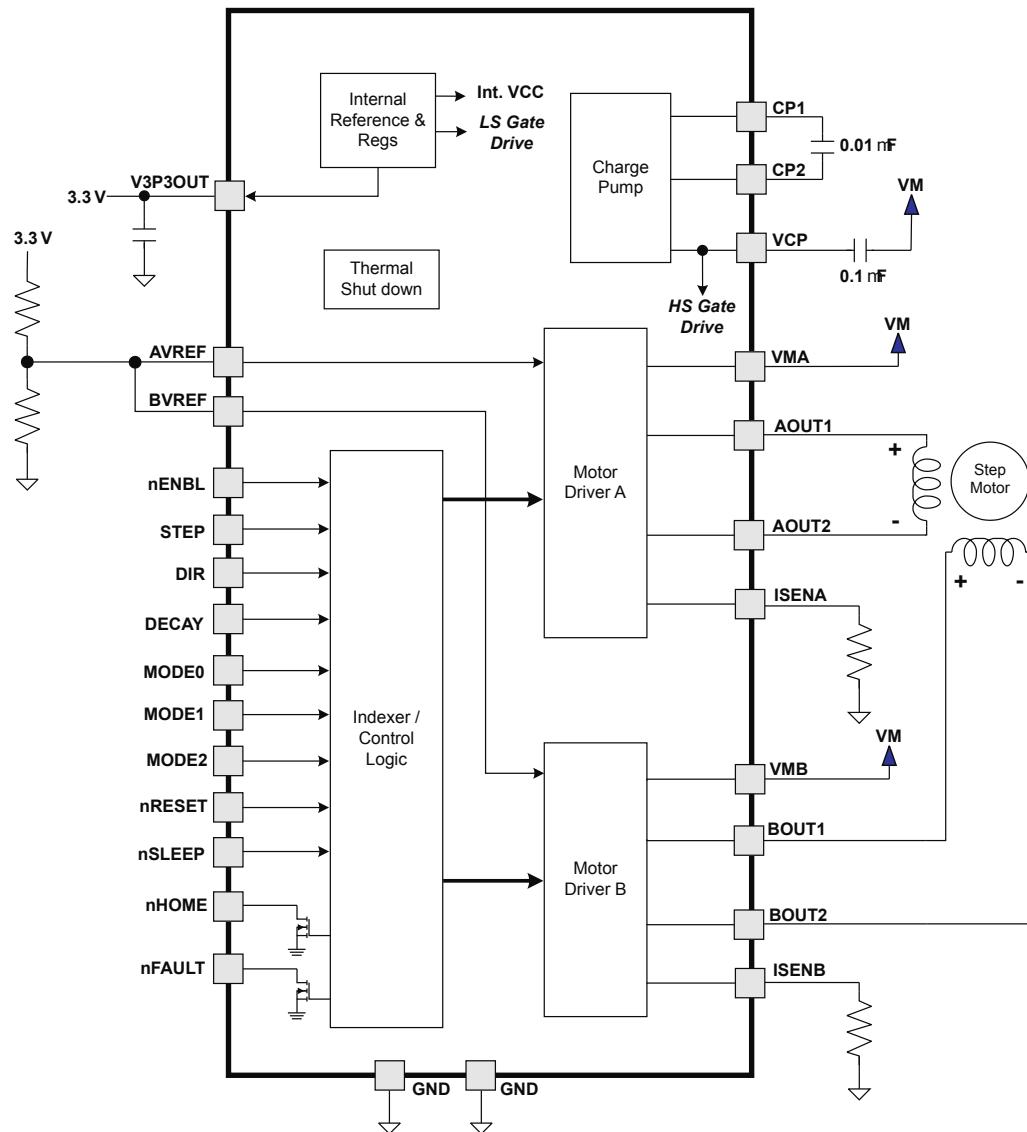
Układ posiada w swojej obudowie mostek H oraz „logikę” pozwalającą na sterowanie nim używając pojedynczego sygnału PWM w celu ustalenia prędkości obrotowej/ momentu i kilku linii typu I/O (Input/ Output), które służą między innymi do zmiany kierunku obrotów (poprzez zmianę kwadrantów pomiędzy pierwszym, a trzecim) i trybu hamowania (*Slow Decay* jak w sterowaniu unipolarnym lub *Fast Decay* w celu szybkiego hamowania, tak jak przy sterowaniu bipolarnym, tyle że sterownik dodatkowo nie pozwala na wejście silnika w tryb generatorowy zamykając odpowiednie klucze).

Urządzenie jak na swoją cenę detaliczną wynoszącą \$3.9 ([4]) posiada naprawdę duże możliwości- Zbudowanie w tej cenie podobnego urządzenia z komponentów

dyskretnych było by niemożliwe. W prostych aplikacjach w których potrzebne jest sterowanie silnikiem DC niskiej mocy układ sprawdza się znakomicie.

4.1.2. DRV8825 - Texas Instruments

Kontroler DRV8825 firmy Texas Instruments jest bardzo popularnym układem zarówno wśród hobbystów jak i profesjonalnych użytkowników. Urządzenie służy do zasilania pojedynczego silnika krokowego bipolarnego lub dwóch silników DC.



Rysunek 4.3: Funkcjonalny schemat blokowy układow DRV8825

Źródło: Na podstawie [15]

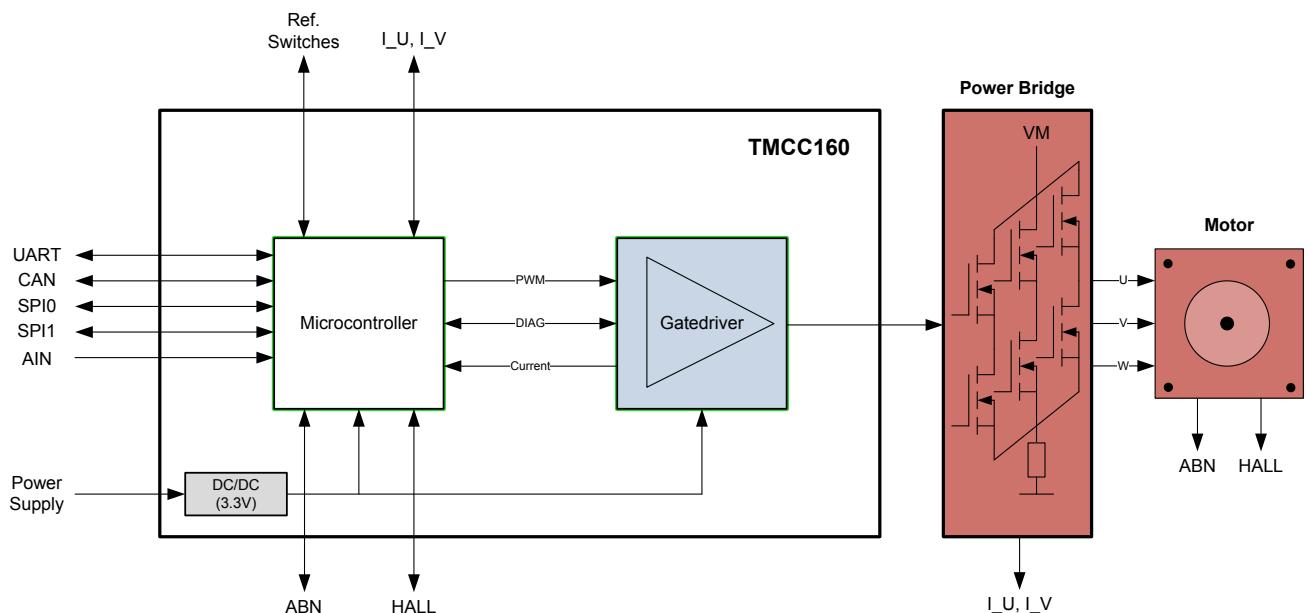
Ze względu na dużą ilość wyprowadzeń układ może wydawać się skomplikowany w obsłudze, lecz po wstępnej konfiguracji jego obsługa jest podobna do układu A3950 (sekcja 4.1.1). Sterowanie układem polega na podawaniu na wejście STEP impulsów napięciowych, gdzie w zależności od dokonanej za pomocą linii I/O, każdy taki impuls sprawia że silnik robi pełen krok lub mikrokrok (możliwość ustawienia ziarnistości od $\frac{1}{2}$ do $\frac{1}{32}$ kroku). Zmieniając częstotliwość podawania impulsów i stany linii MODE0 – MODE2 możliwe jest w miarę płynne sterowanie prędkością obrotó-

wą silnika krokowego. W urządzeniach takich jak skanery czy drukarki, w których prędkość obrotowa jest zazwyczaj stała, a wymagana dokładność pozycji wysoka, kontroler DRV8825 sprawdza się bardzo dobrze. Gorzej radzi sobie w aplikacjach w których należy dynamicznie zmieniać tryby pracy silnika (sekcja 2.4.2), a rozdzielcość wymaganego kroku jest bardzo duża, np. $\frac{1}{64}$ kroku.

Największą zaletą urządzenia jest taka, że odciąża on sterujący nim układ nadzędny od rygorystycznego, wykonywanego w czasie rzeczywistym sterowania silnikiem krokowym. Znacząca wada jest natomiast taka, że pomimo że możliwe jest zadanie maksymalnego prądu jakim mają być zasilane uzwojenia, to nie ma możliwości jego bezpośredniego pomiaru przez układ nadzędny.

4.1.3. TMCC160 - Trinamic

Trzecim prezentowanym układem jest sterownik do zasilania silników BLDC i PMSM firmy Trinamic- TMCC160. Poziom integracji tego urządzenia jest o wiele wyższy niż w przypadku dwóch pozostałych chipów (jest tak duży sklasyfikowanie go jako pełnowymiarowego pewnie nie było by błędem). W jego strukturze znajduje się potężny mikrokontroler typu Cortex® M4 z rodziny ARM, dzięki czemu komunikacja z może odbywać się poprzez jeden z dostępnych protokołów szeregowych. Na pokładzie jest także przetwornica DC-DC więc dodatkowe zewnętrzne przetworniki napięcia także nie są wymagane do zasilania logiki układu.



Rysunek 4.4: Ogólny schemat blokowy układu TMCC160

Źródło: Na podstawie [17]

Urządzenie jest jedynie tzw. *Gate Driver'em*, co oznacza że do pracy potrzebuje zewnętrznych końcówek mocy (co może być zaletą, gdyż dzięki temu można go dostosować do aplikacji niskiej i dużej mocy). TMCC160 potrafi nawet współpracować z czujnikami Hall'a i enkoderami inkrementalnymi- ma zaimplementowane algorytmy sterowania w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego.

Po dodaniu kilku elementów pasywnych i złącz do płytki PCB z TMCC160, użytkownik otrzymuje funkcjonalny serwo-mechanizm, który może być sterowany zarówno z mikrokontrolera o bardzo niskich zasobach (wysoki poziom integracji) jak i z komputera, dzięki mnogości dostępnych interfejsów szeregowych (np. RS232 lub CAN).

4.2. Sterowniki pełnowymiarowe

Druga grupa sterowników to urządzenia samodzielne, które do pracy potrzebują jedynie podłączenia do źródła zasilania, sygnału sterującego z układu wyższego poziomu (najczęściej interfejs szeregowy) jeśli komunikacja nie jest bezprzewodowa i samego silnika. Jeśli układ pracuje jako seromechanizm to wymagane jest jeszcze podłączenie urządzenia dostarczającego sygnał zwrotny, np enkodera. Istnieje wiele rodzajów kontrolerów tego typu, od takich do sterowania micro silnikami, po potężne falowniki do silników dużej mocy.

4.2.1. Simplexmotion 100A - Simplex Motion AB

Urządzenie Simplexmotion 100A jest sterownikiem o najwyższym poziomie integracji, ze względu na to że nawet sterowany silnik znajduje się w obudowie układu.



Rysunek 4.5: Inteligentny, wysoce zintegrowany serwo mechanizm Simplexmotion 100A szwedzkiej firmy Simplex Motion. Wymiary: 72 x 64 x 74 mm, waga: 660 gram. Cena: \$353

Źródło: Na podstawie [13]

Maszyna znajdująca się w urządzeniu to bezszczotkowy silnik BLDC prądu stałego o mocy 100 W (400 W w „piku”) i maksymalnej rozwijanej prędkości obrotowej 6000 rpm. Zamkając w jednej obudowie silnik i układ sterowania, producent

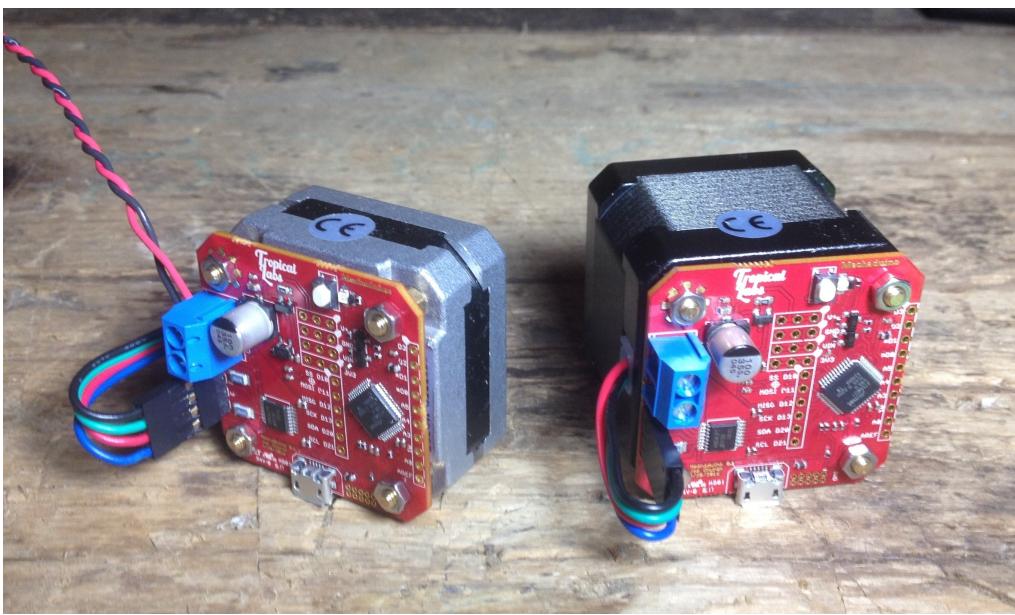
zwolnił użytkownika z dokonywania wielu niezbędnych połączeń potrzebnych do poprawnej pracy samego silnika, np. okablowanie do czujników Hall'a potrzebnych do poprawnej pracy BLDC. Wyprowadzone na zewnętrzne zaciski zostały jedynie:

- interfejs usb do wygodnego podłączenia układu do komputera w celu tuningu parametrów lub samego sterowania,
- interfejs RS485 działający w standardzie Modbus,
- wejście na kwadraturowy enkoder inkrementalny,
- wprowadzenia ogólnego przeznaczenia (I/O, PWM, wejścia analogowe),
- zaciski zasilania (12 - 24 V),

Ponadto producent zapewnia API (.Net, Linux i LabView) dzięki któremu użytkownicy mogą w prosty sposób zaprojektować własną aplikację sterującą tym seromechanizmem z komputera. Bez wątpienia wysoki poziom integracji Simplemotion 100A jest dużą zaletą w sytuacji kiedy zawarty w nim silnik odpowiada naszej aplikacji i czas na wdrożenie rozwiązania jest niewielki. Cechą ta jednak może wielokrotnie okazać się czynnikiem wykluczającym w danej aplikacji, że względu na to że silnik nie odpowiada wymaganiom. Dodatkowo, pomimo że wymiary urządzenia są naprawdę kompaktowe (większość obudowy wypełnia silnik) to nie zmieści się ona wszędzie tam, gdzie zmieściłby się sterownik oddzielony od sterowanej maszyny.

4.2.2. Mechaduino - Tropical Labs

Kolejny sterownik służy do sterowania silnikami krokowymi i jest projektem Open Source/ Hardware, udostępnionym na zasadach licencji *Creative Commons Attribution Share-Alike 4.0 License*, która mówi o tym że projekt może być używany i modyfikowany nawet w celach komercyjnych, o ile użytkownik w swoim produkcie umieści informacje o tym że bazuje na Mechaduino [3].



Rysunek 4.6: Sterownik do silników krokowych Mechaduino firmy Tropical Labs, kompatybilny sprzętowo i programowo z platformą Arduino Zero

Źródło: Na podstawie [9]

Projekt bazuje na sprzęcie z platformy Arduino Zero, co oznacza że firmware

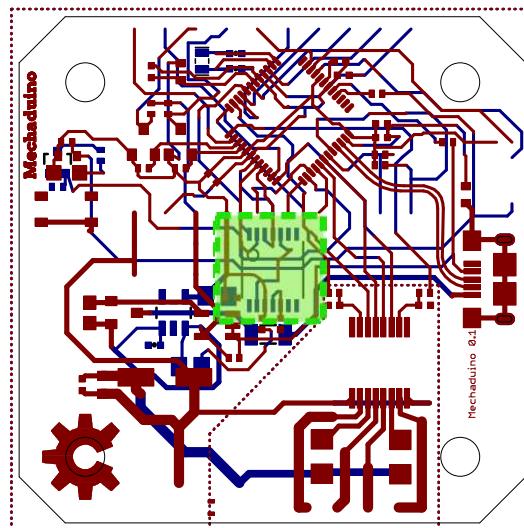
pracujący na sterującym mikrokontrolerze ATSAMD21G18 (Rdzeń ARM Cortex® M0+) może być napisany w środowisku programistycznym Arduino. Oprogramowanie takie pisze się szybciej niż w C czy assemblerze dzięki wysokopoziomowemu framework'owi. Wydajność takiego kodu jednak pozostawia wiele do życzenia.



Rysunek 4.7: Platforma Arduino Zero firmy Arduino

Źródło: Na podstawie [2]

Podobnie jak sterownik przedstawiony w poprzedniej sekcji (4.2.1), to urządzenie także posiada płytę sterownika połączoną z silnikiem (Pasuje do silników w standardzie NEMA17). PCB jest montowane za silnikiem, używając śrub na tulejkach dystansowych. Ze względu na otwartość konstrukcji jednak, nie jest problemem aby płytę zdjąć i umieścić w innym miejscu, o ile w danej aplikacji sterowanie w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego jest wystarczające.



Rysunek 4.8: Płytki Mechaduino z oznaczonym zielonym polem miejscem, w którym znajduje się magnetyczny, absolutny enkoder obrotowy AS5047 firmy AMS

Źródło: Na podstawie [9]

W przypadku kiedy praca w zamkniętej pętli jest niezbędna, płytka musi pozostać na silniku ze względu na to że na jej dolnej warstwie znajduje się enkoder magnetyczny (rys. 4.8), który współpracuje z magnesem przyklejonym na końcu wału silnika. W tym trybie, dokładność pozycjonowania wału silnika wynosi 0.1° po dokonaniu procedury kalibracji enkodera.

Kompaktowa końcówka mocy znajdująca się na PCB to układ A4954 firmy Allegro Microsystems. Są to zintegrowane w układzie scalonym dwa pełne mostki H, które mogą dostarczyć do silnika prąd o natężeniu szczytowym 2 A. Komunikacja z urządzeniem odbywa się poprzez port szeregowy USB lub I^2C (*Inter-Integrated Circuit*).

Niezaprzecjalną zaletą urządzenia jest otwartość kodu, dzięki czemu można dostosować sterownik do potrzeb swoich aplikacji na bardzo niskim poziomie. Mecha-duino jest jednak projektem hobbystycznym, którego oprogramowanie i hardware na dzień dzisiejszy nie są w pełni dopracowane, przez co nie nadaje się jeszcze do profesjonalnego zastosowania.

4.2.3. Sterowniki firmy Technosoft

Technosoft jest wiodącą firmą w zakresie opracowywania specjalizowanych rozwiązań i produkcji układów napędowych. Ilość sterowników dostępnych w ofercie firmy jest bardzo duża, dlatego w tej sekcji zostanie opisana tylko jedna rodzina, która była inspiracją do stworzenia prezentowanego dalej w pracy sterownika do silników.



Rysunek 4.9: Przykładowy sterownik z rodziny *Plug-in Intelligent Servo Drives*, PIM2403, firma Technosoft

Źródło: Na podstawie [14]

Literatura

- [1] Allegro MicroSystems, LLC. <http://www.allegromicro.com>.
- [2] Arduino Zero and Genuino Zero. <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardZero>.
- [3] Creative Commons - Attribution-ShareAlike 4.0 International. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.
- [4] Digikey Electronics. <http://www.digikey.com>.
- [5] Engineers Garage. <http://www.engineersgarage.com>.
- [6] Hackaday. <https://hackaday.com>.
- [7] How To Mechatronics. <http://howtomechatronics.com>.
- [8] HyperPhysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>.
- [9] Mechaduino. <http://tropical-labs.com/index.php/mechaduino>.
- [10] MotiCont. <https://http://moticont.com>.
- [11] Nanotec Electronic GmbH & Co. KG. <https://http://en.nanotec.com>.
- [12] National Instruments. <http://www.ni.com>.
- [13] Simplex motion AB. <http://simplexmotion.com>.
- [14] Technosoft S.A. <http://technosoftmotion.com>.
- [15] Texas Instruments. <https://ti.com>.
- [16] Texas Instruments- Motor Drive and Control. <https://ti.com/motorblog>.
- [17] Trinamic Motion Control. <http://www.trinamic.com>.
- [18] Wikimedia commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Manoderecha.svg>.
- [19] Jaszczuk W. *Elektromagnesy prądu stałego dla praktyków*, Wydanie 1. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2014.
- [20] Jones D. W. The University of Iowa, Department of Computer Science.
- [21] Kałuszko D., Szamotulski J. W. *SI. Legalne jednostki miar. Podstawowe przepisy prawne i komentarz*. Wydawnictwa normalizacyjne, Warszawa 1978.
- [22] Krykowski K. *Silniki PM BLDC- właściwości, sterowanie, aplikacje*, Wydanie 1. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2015.
- [23] Potocki L. Silniki krokowe od podstaw. *Elektronika dla Wszystkich* (sierpień 2002).
- [24] Przepiórkowski J. *Silniki elektryczne w praktyce elektronika*, Wydanie 2. Wydawnictwo BTC, Warszawa 2012.
- [25] Smith S. W. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów- Praktyczny poradnik dla inżynierów i naukowców*, Wydanie 1. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2007.
- [26] Tietze U., Schenk C. *Układy półprzewodnikowe*. Wydawnictwa naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [27] Łukasz Przeniosło. Opracowanie własne.
- [28] Wilson D. So, which PWM technique is best? (Part 1). *Electronic Components News* (luty 2012).
- [29] Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek T. *Automatyka napędu elektrycznego*, Wydanie 1. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.

Spis tabel

2.1 Cechy poszczególnych trybów sterowania silnikiem krokowym 31

Spis rysunków

1.1	Reguła prawej dłoni - sposób wyznaczania zwrotu linii sił pola magnetycznego wokół przewodnika w którym jest prąd elektryczny	8
1.2	Zwrot wektora natężenia pola magnetycznego w przestrzeni wokół przewodu przez który płynie prąd elektryczny (Zwrot za płaszczyznę rysunku od strony obserwatora)	8
1.3	Krzywa magnesowania przykładowego materiału twardego magnetycznie. Przy natężeniu koercji indukcja magnetyczna jest równa zeru.	10
1.4	Strumień indukcji magnetycznej wywołyany równomiernym polem magnetycznym o indukcji B prostopadłym do płaszczyzny S	11
1.5	Strumień indukcji magnetycznej przepływający przez dowolną powierzchnię	12
1.6	Siły działające na równoległe przewodniki z prądem	13
1.7	Siła elektrodynamiczna działająca na przewodnik z prądem umieszczony w stałym polu magnetycznym magnesu trwałego	14
2.1	Przykładowy silnik krokowy hybrydowy ST4118 w standardzie Nema17, produkowany przez firmę Nanotec	17
2.2	Przykładowy silnik BLDC (model DB42), produkowany przez firmę Nanotec	17
2.3	Przykładowy silnik krokowy hybrydowy L35 z przekładnią śrubową, produkowany przez firmę Nanotec	18
2.4	Przykładowy silnik liniowy VCM (model GVCM-051-051-01), produkowany przez firmę Moticont	18
2.5	Budowa cylindrycznego silnika VCM	20
2.6	Przykładowy przebieg siły $[\frac{N}{A}]$ pchającej/ ciągnącej w funkcji wysunięcia korpusu dla silnika liniowego VCM 019-048-02, firmy Moticont.	21
2.7	Powstawanie reluktancyjnego momentu obrotowego.	22
2.8	Silnik o zmiennej reluktancji (VRM)- Przekrój.	23
2.9	Zasada działania silnika PM.	23
2.10	Konstrukcja dwufazowego silnika krokowego hybrydowego.	24
2.11	Budowa wirnika silnika krokowego hybrydowego dwufazowego.	24
2.12	Sposób sterowania (zasilania) silnika krokowego dwufazowego- z lewej unipolarnie, z prawej bipolarne.	25
2.13	Uproszczony model silnika krokowego dwufazowego o kroku 90°	25
2.14	Sekwencja zasilania uzwojeń przy sterowaniu falowym (obrót wirnika z rys. 2.13 według wskazówek zegara).	26
2.15	Sekwencja zasilania uzwojeń przy sterowaniu pełnkrokowym (obrót wirnika z rys. 2.13 według wskazówek zegara).	27
2.16	Sekwencja zasilania uzwojeń przy sterowaniu półkrokowym (obrót wirnika z rys. 2.13 według wskazówek zegara).	28
2.17	Sekwencja zasilania uzwojeń przy sterowaniu półkrokowym ze zmiennym prądem (obrót wirnika z rys. 2.13 według wskazówek zegara).	29
2.18	Ćwiartki okręgu i funkcji $\sin x$ w kartezjańskim układzie współrzędnych	30
2.19	Kształt prądów podawanych na uzwojenia A i B w celu uzyskania optymalnej płynności obrotu w silniku krokowym hybrydowym dwufazowym.	30
2.20	Kształt prądów podawanych na uzwojenia A i B przy sterowaniu mikrokrokowym z rozdzielcością $\frac{1}{8}$ kroku.	31
2.21	Wykres czasowy ilustrujący położenie wirnika podczas wykonywania skoku	32
2.22	Uproszczona budowa komutatora typowego silnika elektrycznego	33
2.23	Zasada działania silnika komutatorowego z magnesem trwałym	33
2.24	Mögliwe konfiguracje uzwojeń wirnika i stojana: a) silnik szeregowy, b) bocznikowy, c) szeregowo-bocznikowy	34

2.25	Przekrój typowego silnika PM BLDC: a) z wirnikiem wewnętrznym, b) z wirnikiem zewnętrznym, 1- jarzmo stojana (twornika), 2- zęby stojana, 3- żłobek z uzwojeniami, 4- wirnik, 5- magnes trwały	35
2.26	Konfiguracja uzwojeń trójfazowego silnika BLDC w gwiazdę	35
2.27	Uproszczone przebiegi prądów w uzwojeniach silnika 3-fazowego sterowanego bipolarnie	36
3.1	Mostek typu „H” zbudowany z czterech tranzystorów polowych z izolowaną bramką (<i>Mosfet</i>)	37
3.2	Przebieg prądu po podaniu impulsu napięciowego (w momencie $t = 0s$) o wartości $U = 24V$ na uzwojenie o rezystancji $R = 4.1\Omega$ i indukcyjności $L = 1.9mH$	38
3.3	Charakterystyki statyczne silnika: Ω - prędkość obrotowa, M - moment obrotowy	39
3.4	Silnik DC sterowany bipolarnie	40
3.5	Silnik DC sterowany unipolarne	42
4.1	Przykładowe typy obudów w jakich są produkowane układy scalone do sterowania silnikami. Na górze obudowy TSSOP (<i>Thin Shrink Small Outline Package</i>) i SSOP (<i>Shrink small outline package</i>) na dole	43
4.2	Funkcjonalny schemat blokowy układu A3950	44
4.3	Funkcjonalny schemat blokowy układu DRV8825	45
4.4	Ogólny schemat blokowy układu TMCC160	46
4.5	Inteligentny, wysoce zintegrowany serwo mechanizm Simplexmotion 100A szwedzkiej firmy Simplex Motion. Wymiary: 72 x 64 x 74 mm, waga: 660 gram. Cena: \$353	47
4.6	Sterownik do silników krokowych Mechaduino firmy Tropical Labs, kompatybilny sprzętowo i programowo z platformą Arduino Zero	48
4.7	Platforma Arduino Zero firmy Arduino	49
4.8	Płytyka Mechaduino z oznaczonym zielonym polem miejscem, w którym znajduje się magnetyczny, absolutny enkoder obrotowy AS5047 firmy AMS .	49
4.9	Przykładowy sterownik z rodziny <i>Plug-in Intelligent Servo Drives</i> , PIM2403. firma Technosoft	50