

Silniki krokowe od podstaw



część 2 - powrót do źródeł

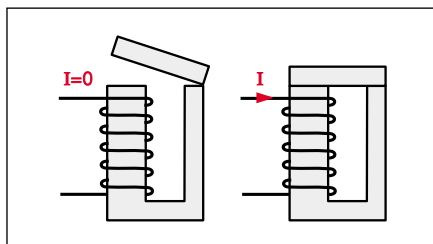
Aby w pełni wykorzystać silniki krokowe (stepper motors), potrzeba pewnej wiedzy i doświadczenia. Pierwsza część artykułu w numerze EdW 7/2002) udowodniła, że podstawowe, i co ważne, najczęściej stosowane sposoby sterowania są naprawdę bardzo proste. Prosta jest także podstawowa zasada działania tych silników, którą się teraz zajmujemy. W każdym z omawianych silników uzwojenia umieszczone są na stojanie. W żadnym nie ma uzwojeń na wirniku, a tym samym nie ma pierścieni ani szczotek. Dzięki temu trwałość silników krokowych jest bardzo duża i wyznaczona jest przede wszystkim przez trwałość łożysk.

VR - silniki krokowe o zmiennej reluktancji

Znasz na pewno przekaźnik, element elektroniczny, który zawiera cewkę, rdzeń, ruchomą kotwicę i styki. Przepływ prądu przez cewkę powoduje przyciągnięcie kotwicy (i przełączenie styków, co nas teraz zupełnie nie interesuje). Podobnie działa elektromagnes. Działanie przekaźnika i elektromagnesu ilustruje **rysunek 15**. Pole magnetyczne powstające w rdzeniu, mówiąc potocznie, przyciąga ruchomą kotwicę. Zamyka obwód magnetyczny. Bardziej ściśle należałoby stwierdzić, że układ dąży do zmniejszenia oporu magnetycznego, by przy danej sile magnetycznej wytworzonej przez cewkę, powstał jak największy strumień. Nie wdając się w szczegóły: przez przyciągnięcie kotwicy układ zmniejsza opór magnetyczny. A opór magnetyczny to reluktancja.

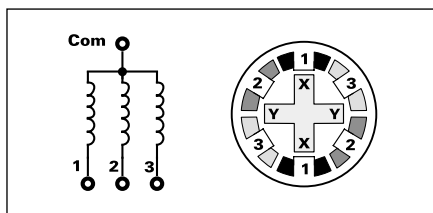
Na podobnej zasadzie działają tak zwane **reluktancyjne silniki krokowe**, zwane częściej **silnikami o zmiennej reluktancji**.

Skrótoowo oznaczane są **VR** – od angielskiego **Variable Reluctance**. Nie ma tu magnesów trwałych. Przyczyną ruchu wirnika jest, podobnie jak w przekaźniku, dążenie do zamknięcia obwodu magnetycznego i zmniejszenia oporu magnetycznego – reluktancji. Wykorzystuje się tu tzw. moment reluktancyjny. Aby uzyskać ruch ciągły, nie wystarczy jedna cewka. Schematyczną budowę sil-



Rys. 15

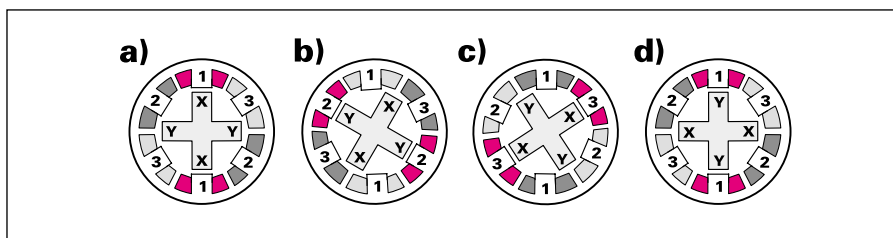
Rys. 16



nika reluktancyjnego z trzema uzwojeniami pokazuje **rysunek 16**. Wirnik (rotor) ma tu cztery zęby, a stator sześć biegunów. Każde z trzech uzwojeń podzielone jest na dwie części, nawinięte na przeciwległych biegunach. **Rysunek 17a** pokazuje położenie wirnika przy zasileniu uzwojenia A – uzwojenie, przez które płynie prąd zaznaczyłem kolorem czerwonym. Bieguny 1 przyciągają zęby X wirnika. Gdy zostanie zasilone uzwojenie 2 (pozostałe dwa uzwojenia nie będą zasilane), wytworzy ono strumień magnetyczny i (dla zmniejszenia oporu magnetycznego) wirnik obróci się o kąt 30 stopni. Zwróć uwagę, że wcześniej bieguny 1 przyciągały zęby X wirnika. Teraz bieguny 2 są bliżej zębów Y i właśnie je przyciągają. Dlatego wirnik obróci się o 30° w prawo, jak pokazuje **rysunek 17b**.

W następnym takcie zasilone zostanie uzwojenie 3 i bieguny 3 przyciągną zęby X – wirnik obróci się o dalsze 30° w prawo i ustawi w położeniu pokazanym na **rysunku 17c**. Zasilenie uzwojenia 1 spowoduje obrót o kolejne 30 stopni, jak pokazuje **rysunek 17d**. Ponieważ zęby X, Y wirnika niczym się nie różnią, sytuacja jest wtedy identyczna, jak na rysunku 17a i każdy kolejny impuls powoduje obrót o dalsze 30 stopni w prawo.

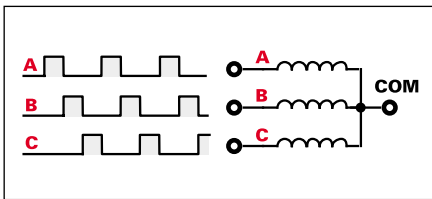
Fot. 17



Przepływ prądu przez uzwojenie powoduje takie ustawienie wirnika, żeby oporność magnetyczna była jak najmniejsza. Na stronie internetowej EdW można znaleźć stosowną animację, zrealizowaną w programie Flash (*Reluktancyjny.exe*).

Silniki VR (o zmiennej reluktancji) mogą mieć i zazwyczaj mają większą liczbę biegunów stojana i zębów wirnika. Wtedy skok jednostkowy jest mniejszy.

Do sterowania silnika reluktancyjnego trzyczwojeniowego potrzebna jest sekwencja impulsów, pokazana na **rysunku 18**. W danej chwili zasilane jest w nim tylko jedno uzwojenie.



Rys. 18

Warto zaznaczyć, że ze względu na brak magnesów trwałych wirnik niezasilanego silnika reluktancyjnego może się swobodnie obracać, co pozwala łatwo odróżnić taki silnik od innych silników krokowych.

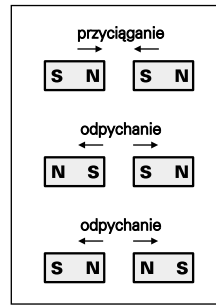
Silniki reluktancyjne nie mają dobrych parametrów i zostały wyparte przez inne rodzaje silników krokowych. Dlatego nie będziemy zajmować się wersjami o innej liczbie uzwojeń i biegunów, ani dodatkowymi szczegółami.

Silniki z magnesem stałym

Silniki z magnesem stałym (trwałym) nazywane są silnikami PM, co jest angielskim skrótem od **Permanent Magnet**. Podstawy działania silnika z magnesem stałym opierają się na wzajemnym oddziaływaniu biegunów. Magnes ma dwa bieguny, oznaczane N (north – północny) i S (south – południowy). Bieguny różnoimienne (N-S) przyciągają się, a jednoimienne (N-N, S-S) – odpychają, jak ilustruje to **rysunek 19**. Jeśli jeden z magnesów zastąpimy elektromagnesem, zjawiska będą identyczne. W elektromagnesie łatwo możemy zmienić biegunowość, zmieniając kierunek

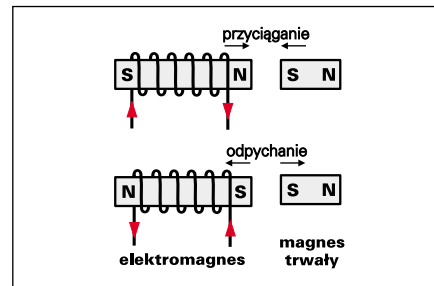
przepływu prądu, jak pokazuje **rysunek 20**.

Najprostszy silnik z magnesem stałym mógłby mieć dwa uzwojenia, a wirnik byłby namagnesowany promieniowo. **Rysunki 21a...21e** pokazują poszczególne fazy cyklu. Cztery fazy tworzą pełny cykl



Fot. 19

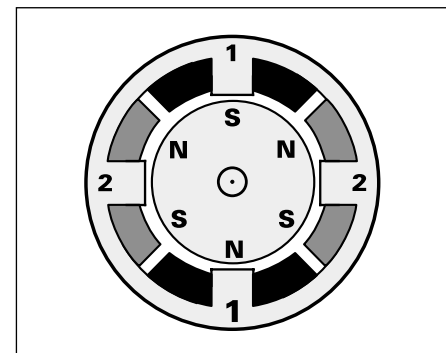
Fot. 20



i wirnik wykonuje pełen obrót. Tym razem mamy tylko dwa uzwojenia, ale w poszczególnych odcinkach czasu prąd płynie w nich w przeciwnych kierunkach. Zwróć uwagę, że przy takim sposobie sterowania uzwojeń uzyskujemy efekt wirowania pola magnetycznego (stojana) i to wirujące pole niejako zabiera za sobą namagnesowany wirnik.

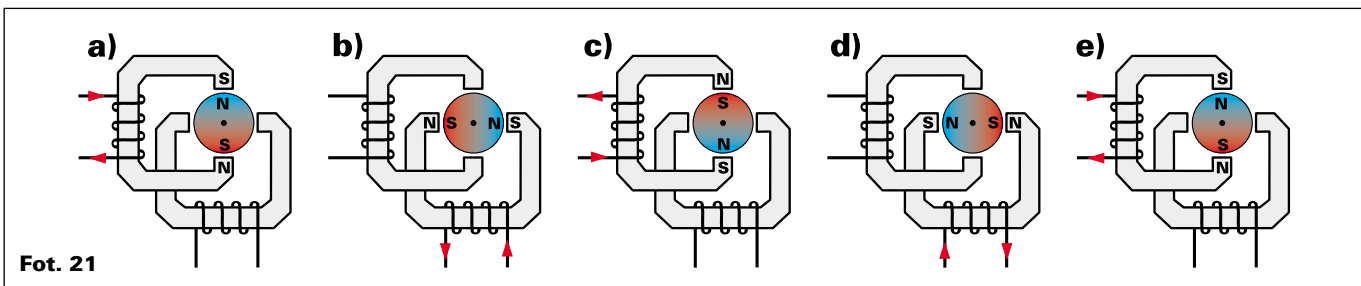
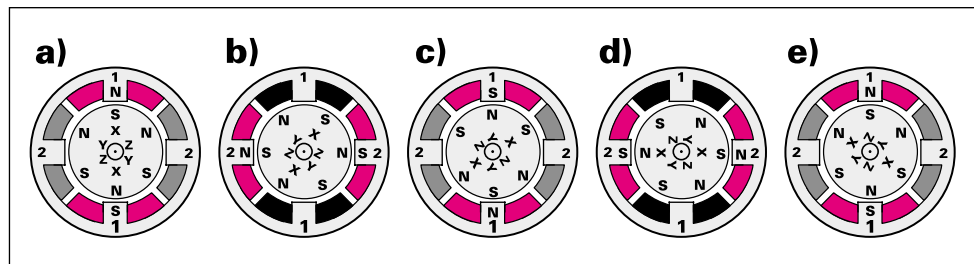
Jeden skok w takim silniku to obrót o 90°, co nie jest korzystne. Do różnych precyzyjnych zastosowań elementarny skok powinien być jak najmniejszy. Można to osiągnąć przez zwiększenie liczby biegunów wirnika. Rotor (wirnik) silnika nie posiada wtedy zębów, lecz jest namagnesowany naprzemiennie biegunami N i S, i co ważne, nie jest to pojedynczy magnes, tylko jakby złożenie kilku magnesów. **Rysunek 22** pokazuje uproszczoną budowę wewnętrzną jednej z odmian silnika

z magnesem stałym. Przepływ prądu przez uzwojenie 1 jest równoznaczne z powstaniem (elektro)magnesu o biegunach pokazanych na **rysunku 23a**. Przyciągające się magnesy spowodują odpowiednie ustawienie wirnika. Jeśli za chwilę przestanie płynąć prąd w uzwojeniu 1, a popłynie w uzwojeniu 2, zaczną oddziaływać elektromagnes 2 i bieguny wirnika oznaczone Z-Z. Wirnik obróci się zgodnie z ruchem wskazówek zegara o kąt 30 stopni i ustawi w położeniu pokazanym na **rysunku 23b**. Zauważ, że elektromagnes 2 oddziałuje z inną parą biegunów wirnika, niż wcześniej elektromagnes 1. Aby w następnym kroku uzyskać obrót o kolejne 30 stopni zgodnie z ruchem wskazówek zegara, należy uzyskać biegunowość elektromagnesu 1, jak pokazuje **rysunek 23c**. Aby to osiągnąć, należy zmienić kierunek przepływu prądu w tym uzwojeniu w stosunku do sytuacji z **rysunku 23a**. Kolejny krok i obrót o 30 stopni uzyskamy, jeśli w uzwojeniu 2 popłynie prąd w kierunku przeciwnym niż wcześniej, jak pokazuje **rysunek 23d**. Kolejny skok i dalszy obrót uzyskamy w sytuacji analogicznej jak na początku – ilustruje to **rysunek 23e**. Tym razem cztery takty cyklu spo-



Fot. 22

Fot. 23



Fot. 21

wodowały obrót wirnika tylko o jedną trzecią obrotu (120 stopni). Zauważ, że i tu mamy do czynienia z wirującym polem magnetycznym (stojana). Zwróć jednak uwagę na istotne różnice – wirujące pole stojana nie zabiera ze sobą wirnika, niemniej powoduje przeskoki między jego ustalonymi położeniami, a kierunki wirowania pola i wirnika są przeciwne.

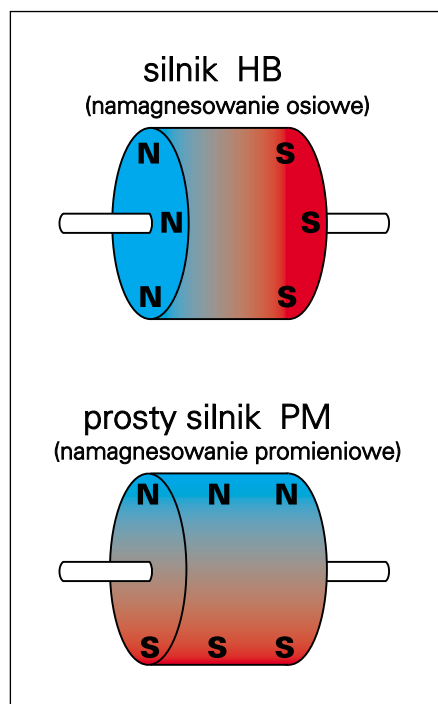
Ten przykładowy silnik ma dwie pary biegunów stojana i 3 pary biegunów wirnika, przez co jeden skok daje obrót o 30 stopni. Stosując inne (większe) liczby biegunów stojana i wirnika, można uzyskać mniejszy skok. Najczęściej spotyka się silniki PM (z magnesem stałym) o kącie skoku 7,5°...15°, co daje 48...24 skoki na jeden obrót wirnika.

Silniki z magnesem stałym (PM) są pod pewnymi względami lepsze od silników reluktancyjnych (VR) i bywają stosowane do dziś.

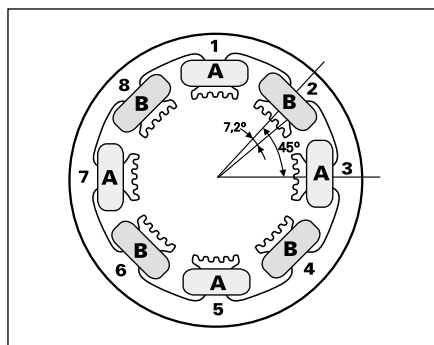
Silniki hybrydowe

Obecnie najczęściej stosowane są tak zwane silniki hybrydowe, które, zgodnie z nazwą, łączą w sobie właściwości i zalety obu typów omówionych wcześniej. Oznaczone są często skrótem **HB**, od angielskiego **hybrid**. Na fotografii tytułowej pokazane są składniki takiego silnika. Silnik hybrydowy (HB) zawiera magnesy trwałe, ale bieguny magnesu są w nim umieszczone osiowo, w przeciwieństwie do omawianych silników PM, co w uproszczeniu pokazuje

Rys. 24

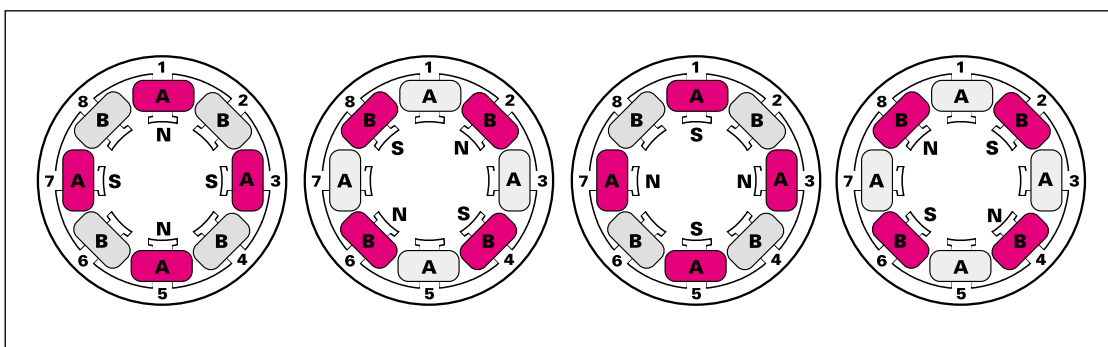


rysunek 24. Często magnes ten to pierścień (pierścienie) z silnie namagnesowanego materiału nałożony(-e) na osi wirnika. Stojan ma zwykle dwa uzwojenia i osiem biegunów, z tym, że po cztery bieguny współpracują z jednym uzwojeniem, jak pokazuje **rysunek 25**. Stosując odpowiednie układy sterujące, można tu uzyskać efekt wirowania pola magnetycznego, analogicznie jak na rysunkach 17,



Rys. 25

Rys. 26



21, 23. Przy najprostszym sposobie sterowania, dokładnie takim, jak na rysunku 21, mamy cztery możliwe stany namagnesowania biegunów stojana, jak pokazuje **rysunek 26**. Pole wiruje tu zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

Intuicja, bazująca na działaniu innych silników elektrycznych, może podpowiadać, że wirujące pole magnetyczne, wytworzone przez odpowiedni przebieg sterujący, niejako

zabiera ze sobą wirnik. Proste wyobrażenie, że wirujące pole zabiera ze sobą wirnik, jest prawdziwe tylko dla silnika z rysunku 21, gdzie wirowanie pola powoduje ruch obrotowy wirnika z taką prędkością, jak wiruje pole. Już analiza rysunku 23 pokazała, że nie zawsze tak jest – prędkość wirnika jest tam kilkakrotnie mniejsza, niż prędkość wirowania pola wytwarzanego przez uzwojenia stojana, a kierunki wirowania pola i wirnika są przeciwne. Niemniej jest prawdą, że wirujące pole magnetyczne stojana współdziała z polem magnesu stałego silnika PM i ruch jest wynikiem interakcji biegunów magnetycznych, według zasady z rysunku 19.

W silniku VR nie ma przyciągania i odpychania biegunów – ruch wynika z dążenia do zamknięcia obwodu magnetycznego - patrz rysunek 15. Także i w silnikach VR prędkość obrotowa wirnika jest tym mniejsza, im większa jest liczba biegunów i zębów wirnika.

Nasuwa się pytanie, co jest powodem ruchu w silniku hybrydowym? Czy oddziaływanie biegunów magnetycznych, czy dążenie do zamknięcia obwodu magnetycznego?

W silniku HB magnes jest, ale pełni inną rolę, niż w silniku PM. Wirnik jest tu namagnesowany osiowo, czyli zupełnie inaczej niż w silniku PM. Wirujące pole magnetyczne (porównaj rysunek 26) nie może „zabrać ze sobą” namagnesowanego wirnika, bo kierunki obu pól są „niewłaściwe”, prostopadłe – patrz rysunek 24. Można przyjąć, że dzięki prostopadłości ustawieniu, wirujące pole magnetyczne stojana nie reaguje z polem



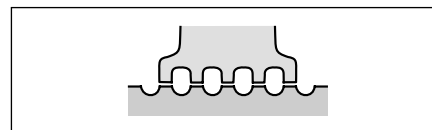
wirnika, a w każdym razie „nie zabiera go ze sobą”.

Już to wskazuje, że w silniku HB przyczyna ruchu jest podobna, jak w silniku VR. Silnik hybrydowy przypomina silnik VR o bardzo dużej liczbie biegunów i zębów wirnika. Czoła biegunów stojana oraz powierzchnia wirnika mają małe kanaliki-żłobki, pokazane na rysunku 25. Te drobne ząbki widać na **fotografii 3**, pokazującej stojany dwóch silników. Złośliwy wynalazca silnika hybrydowego zarządził, że wirnik jest podzielony na dwie części i żłobki obu tych części są przesunięte względem siebie o „połowę ząbka”. Pokazuje to **rysunek 27** i **fotografia 4**. Natomiast kanaliki na nabiegownikach stojana są ciągle na całej swej długości. Można przyjąć (w niewielkim uproszczeniu), że jeśli żłobki „północnej” połowy wirnika zgadzają się ze żłobkami niektórych nabiegowników, to na pewno żłobki „południowej” połowy nie zgadzają się ze żłobkami jakichś nabiegowników. Jeśli z kolei żłobki „południowej” połowy pasują do którychś żłobków, to „północne” do jakichś nie pasują. Są też pozycje pośrednie, gdy tak naprawdę nic do niczego nie pasuje.

I tu odgrywa swą rolę magnes stały wirnika. Obecność magnesu powoduje, że na-

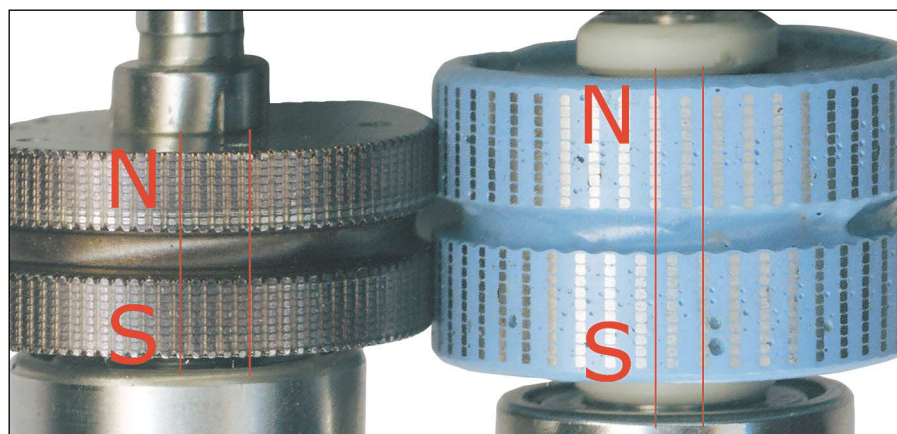
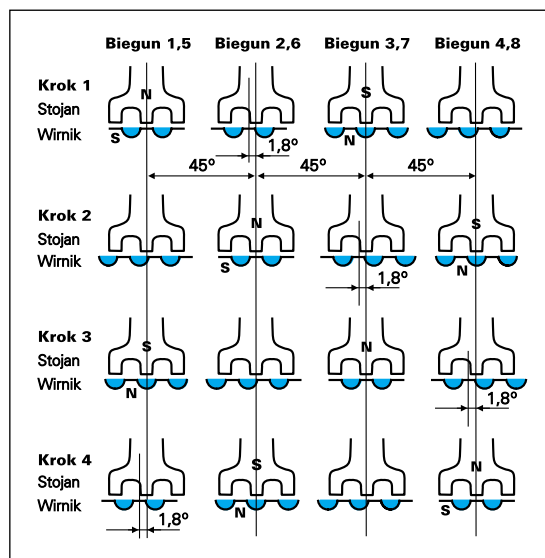
jak najwięcej żłobków stojana i wirnika jest ustawionych naprzeciw siebie, jak pokazuje **rysunek 28**. Wtedy strumień magnetyczny najmniej przebiega w powietrzu, a najwięcej w ferromagnetykach. Ponieważ żłobków jest wiele, wirnik ma kilkadziesiąt lub więcej „ulubionych” pozycji. Przekonasz się o tym, pokręcając oś silnika HB. Wirniki silników z fotografii 4 zdecydowanie różnią się liczbą ząbków, co oznacza, że mają różną liczbę „ulubionych pozycji”. Rozmiary i liczba tych żłobków (ząbków) wyznaczają jednostkowy skok silnika hybrydowego. Wyraźnie widać, że silnik z prawej strony zdjęcia ma większy skok. Typowo kąty silnika hybrydowego mieszczą się w zakresie 3,6...0,9°, co daje 100 - 400 kroków na jeden obrót wirnika. Mały skok jest tu zaletą – silnik można sterować bardziej precyzyjnie.

W silniku HB wirujące pole stojana nie zabiera ze sobą namagnesowanego wirnika, tylko przerzuca wirnik z jednego



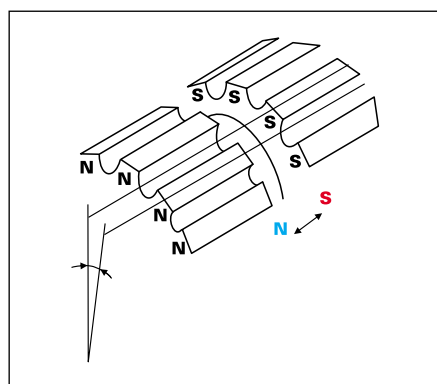
Rys. 28

Rys. 29



Fot. 4

Rys. 27



wet bez zasilania stojana wirnik stara się znaleźć takie położenie, żeby wypadkowa oporność magnetyczna obwodu (reluktancja) była jak najmniejsza. Następuje to, gdy

„ulubionego” położenia do drugiego na zasadzie, jak w silniku VR. Możliwe jest to właśnie dzięki przesunięciu „północnej” i „południowej” części wirnika o pół ząbka. Obecność magnesu poprawia właściwości silnika.

Zrozumienie szczegółów sprawia trudność nie tylko początkującym – w uproszczeniu można przyjąć, że sytuacja jest bardzo podobna do tej z rysunku 16. Najpierw pole magnetyczne jednego z uzwojeń stojana powoduje przyciągnięcie zębów X wirnika („północnych”), a w następnym takcie pole drugiego uzwojenia przyciąga zęby Y („południowe”). W rzeczywistości sprawa jest bardziej zawiła, zwłaszcza przy różnych sposobach sterowania. Jeżeli masz ochotę, porównaj rysunki 16, 17 i 26 z **rysunkiem 29**, który pokazuje wzajemne pozycje ząbków przy

różnym namagnesowaniu biegunów stojana. Niebieskie wypełnienie żłobków nie ma znaczenia – kolor ten pojawił się tylko ze względu na wypełnienie żłobków modelu z fotografii 4. Rysunek 29 pokazuje poszczególne stany przy najprostszym sterowaniu (tzw. falowym). Przy wspomnianym wcześniej sterowaniu pełnokrokowym i półkrokowym, pojawiają się położenia pośrednie. Na razie nie zajmujemy się tymi szczegółami, żeby jeszcze bardziej nie skomplikować zagadnienia.

Jeżeli nawet nie do końca rozumiesz zależności z rysunku 29, zapamiętaj, że wirnik silnika HB ma kilkadziesiąt do kilkuset „ulubionych pozycji”, a kolejne impulsy sterujące w pewien sposób przerzucają wirnik z jednej takiej pozycji do następnej. Czym więcej ząbków-żłobków, tym dokładniej można kontrolować ruch wirnika. Silnik HB dzięki obecności magnesu trwałego ma też znacznie lepsze charakterystyki momentu od silników VR i PM. Dlatego silniki HB obecnie są zdecydowanie najbardziej popularne, mimo że silniki PM są znacznie tańsze.

W następnym odcinku zajmiemy się sposobami sterowania.

Leszek Potocki