

Konrad ZAJKOWSKI, Stanisław DUER, Dominik ŁYSKOJĆ

SPOSOBY REGULACJI PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ SILNIKA W POJEŹDZIE Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM

Streszczenie

W artykule omówiono możliwe metody regulacji prędkości silnika elektrycznego w samochodzie elektrycznym. Przedstawiono stosowane rozwiązania oraz możliwe metody poprawy regulacyjności silnika. Przedstawiono metody sterowania prędkością w silnikach o działaniu ciągłym i dyskretnym.

Słowa kluczowe: silnik bezszczotkowy, silnik BLDC, sterowanie PWM.

WSTĘP

Od współczesnych pojazdów napędzanych energią elektryczną wymaga się możliwości regulacji prędkości obrotowej metodami niezwiększającymi znacznie strat energii, płynnej regulacji i w maksymalnym zakresie zmian. Docelowo możliwości regulacyjne silnika mają doprowadzić do redukcji skrzyni biegów i później do całkowitego jej wyeliminowania. Sposoby regulacji zależą od przyjętego rodzaju silnika. Spotkać można praktyczne rozwiązania pojazdów na silnikach o działaniu ciągłym i dyskretnym. Przy wyborze sposobu sterowania należy brać pod uwagę rodzaj silnika, wartości prądów w obwodzie regulacyjnym i dostępne metody regulacji

1. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ

Podstawową energią w pojeździe elektrycznym jest prąd stały wytwarzany w ogniwie chemicznym bądź przyszłościowo wodorowym. Przy zastosowaniu silników prądu stałego nie występują problemy przy przetwarzaniu energii DC/AC.

1.1. Silnik wykonawczy prądu stałego o działaniu ciągłym

W napędzie głównym pojazdu elektrycznego możliwe jest zastosowanie silnika obcowzbudnego, szeregowego, bocznikowego i szeregowo-bocznikowego. Charakterystyki mechaniczne tych silników wskazują na przewidywane obszary zastosowań, zależne od rodzaju obciążenia. Wybrany typ silnika rzutuje na możliwe sposoby regulacji prędkości obrotowej.

W silniku bocznikowym zmiany momentu obciążającego nie wpływają na wartość strumienia głównego, zatem występuje tu mała zależność prędkości obrotowej od momentu obciążenia. Przy obciążeniu tego silnika momentem znamionowym M_N , jego prędkość obrotowa n_N jest o 2-5% mniejsza niż prędkość przy biegu jałowym n_0 .

Silnik szeregowy charakteryzuje się znacznym momentem obrotowym, zwłaszcza przy niewielkiej prędkości obrotowej. Przy małym obciążeniu prędkość obrotowa może osiągać niebezpiecznie dużą wartość.

Prędkość obrotową silnika bocznikowego i obcowzbudnego możemy regulować przez:

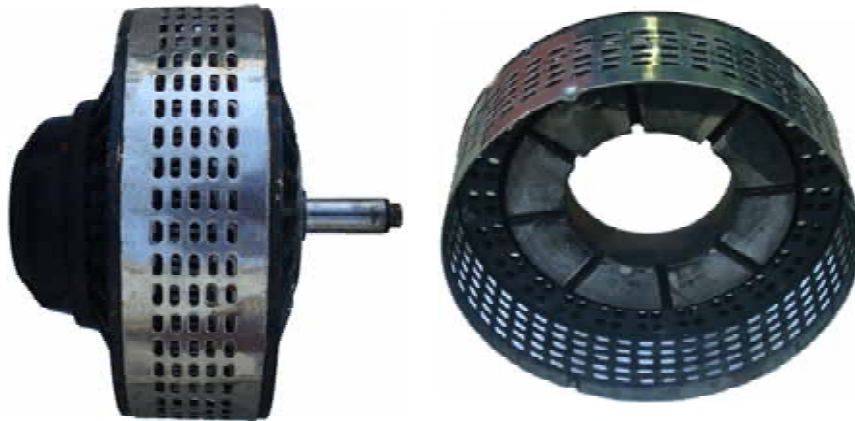
- zmianę strumienia Φ_{fa} – regulacja bocznikowa,
- zmianę rezystancji R_{ra} – regulacja szeregową,
- zmianę napięcia zasilającego U .

Przy stosowaniu regulacji szeregowej, sprawność układu napędowego maleje w miarę zmniejszania prędkości kątowej gdyż dodatkowa rezystancja zwiększa straty na ciepło. Ponadto rezystancje wprowadzone w obwód twornika przenoszą duże wartości prądu i powodują powstawanie przepięć łączeniowych.

Prąd magnesujący w obwodzie wzbudzenia jest mniejszy niż w obwodzie twornika. Straty w rezystorze regulacyjnym w metodzie bocznikowej są niewielkie, a sprawność regulacji jest wysoka. Wadą tej metody jest ograniczony zakres regulacji (regulacja w górę – prędkość kątowa rośnie przy zmniejszaniu strumienia). Niedopuszczalną wadą tej metody jest zjawisko rozbiegania się maszyny przy wprowadzeniu przerwy w obwód magneśnicy. Pojazd w trakcie awarii i uszkodzeniu obwodu sterującego strumieniem Φ_{fa} , zamiast zatrzymać się, zacząłby zwiększać prędkość. Komutacje w obwodzie magneśnicy charakteryzują się małą wartością prądu w obwodzie, lecz dużą wartością indukcyjności uzwojenia.

W silniku szeregowym prędkość kątową można regulować przez zbocznikowanie wirnika, zmianę napięcia zasilającego lub zmianę rezystancji szeregowej R_{ra} . Wszystkie metody regulacji w tym silniku wymagają ingerencji w obwód wysokoprądowy. Silnik szeregowy mając duży moment rozruchowy jest najbardziej optymalnym rozwiązaniem w pojeździe elektrycznym.

Rozwój technologii i poprawa własności eksploatacyjnych magnesów trwałych przyczynił się do opracowania silników wykorzystujących silne pole wytworzone w sprasowanym związku neodymu, żelaza i boru $Nd_2Fe_{14}B$ (magnes neodymowy) (rys. 1).



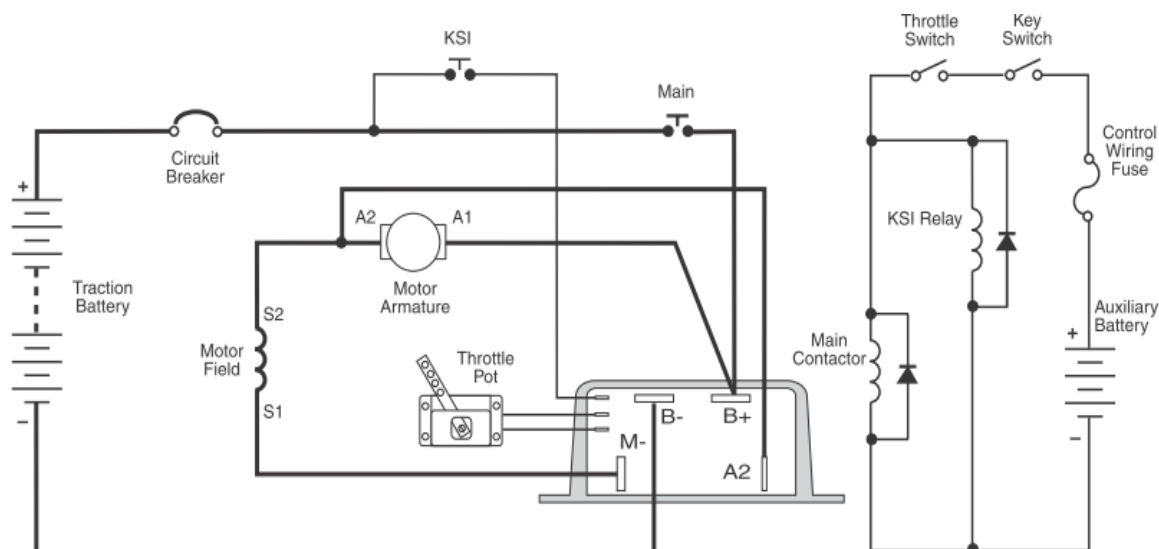
Rys. 1. Silnik LEMCO D-135 prądu stałego (14 kW, szczyt 30 kW, 84 V, waga 11 kg)

Metody zmiany wartości rezystancji w obwodzie wysokoprądowym oprócz problemów komutacyjnych, pogarszają sprawność regulacji. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie kluczowania ze zmianą współczynnika wypełnienia (PWM). Zwiększa się przez to sprawność regulacji lecz kosztem zwiększenia wpływu wyższych harmonicznnych. Przykładowo sterownik firmy Curtis (72-120 V, 550 A w impulsie, 375 A /5 min, 225 A /1 godz.) kluczuje w obwodzie wysokoprądowym silnika DC z częstotliwością do 15 kHz (rys. 2).

a)



b)

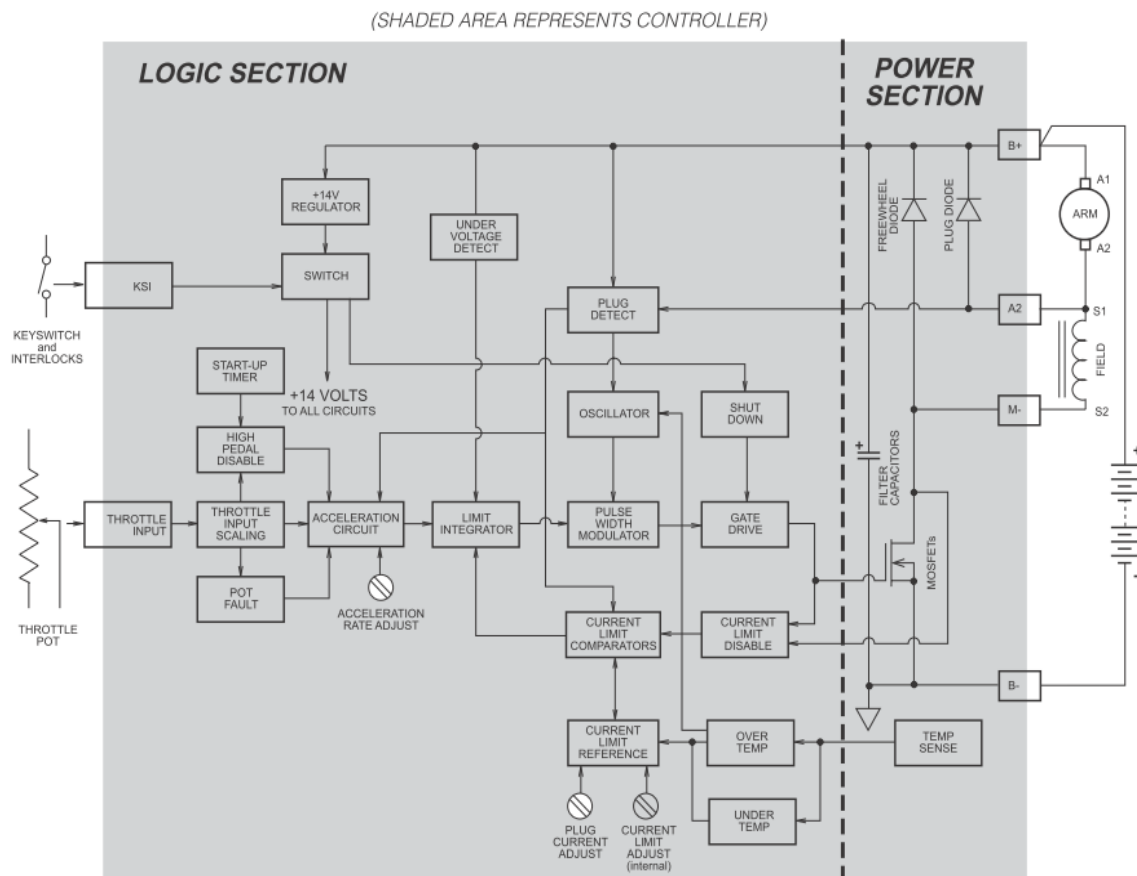


Rys. 2. Wygląd sterownika Curtis i schemat jego połączenia z silnikiem szeregowym DC [4]

Regulacja prędkości w silniku DC w samochodach elektrycznych wymaga komutacji w głównym obwodzie prądowym silnika. Dotyczy to zarówno metod opartych na zmianach wartości rezystancji, jak i PWM.

Regulator CURTIS PMC w obwodzie prądowym wykorzystuje tranzystor MOSFET (rys. 3).

Niektóre rozwiązania napędów w pojazdach elektrycznych wykorzystują silniki trójfazowe bezszczotkowe. Regulacja prędkości odbywa się w nich poprzez zmianę wartości prądu w obwodzie zasilania. Zmiana prędkości silnika w wyniku synchronicznego oddziaływania na czujniki położenia wału powoduje zmianę częstotliwości przebiegu napięcia zasilającego. Rozwiązanie takie umożliwia poprawę warunków regulacyjnych i zmniejszenie strat mocy. Zaletą jest tańszy i mniej awaryjny silnik, wadą natomiast konieczność stosowania falowników i układów współpracujących.



Rys. 3. Schemat blokowy kontrolera Curtis PMC 1204/1205 [4]

1.2. Silnik prądu przemiennego BLDC

Firma Impact Automotive Technologies zastosowała w pojeździe Re-Volt silnik prądu przemiennego (rys. 4). Przy zmianie prędkości kątowej, dla regulacji częstotliwościowej, silnik prądu przemiennego ma stały moment. Zatem takie rozwiązanie nie wymaga stosowania skrzyni biegów. Silnik dla Re-Volta przygotowała firma Komel. Jest to silnik synchroniczny z magnesami trwałymi sterowany wektorowo o mocy maksymalnej 11,6 kW [3]. Blok napędowy zawiera stałe przełożenie na tylne koło i nie posiada sprzęgła.



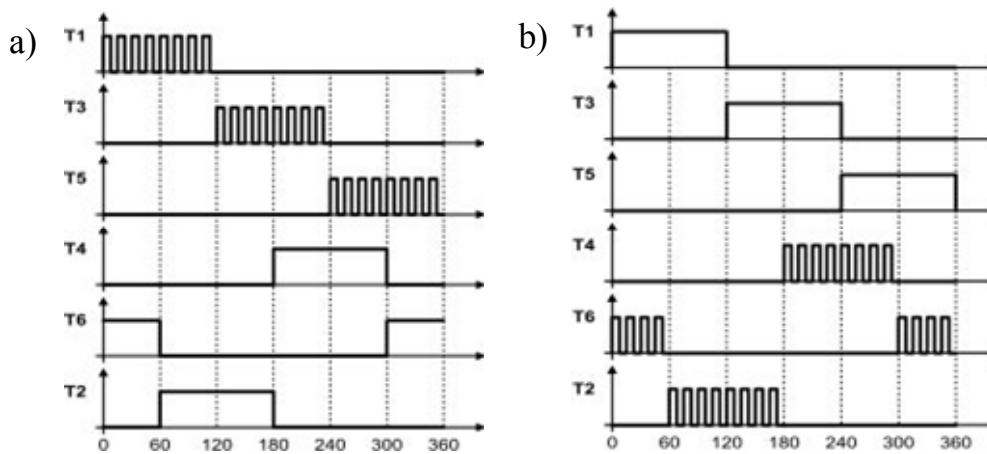
Rys. 4. Pojazd elektryczny Re-Volt firmy Impact Automotive Technologies i jego blok napędowy zespolony z tylną osią [3]

Falownik przekształca napięcie stałe na przemiennie. Możliwe jest to poprzez komutacje w tranzystorach stopnia mocy.

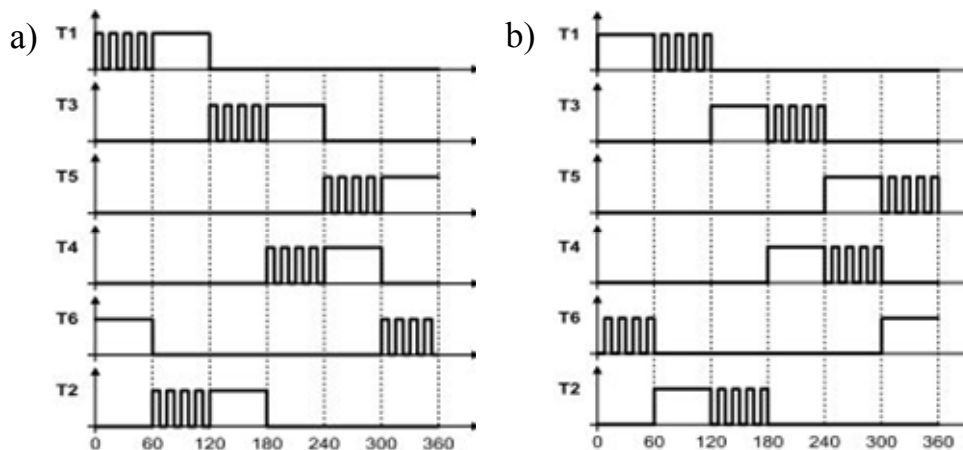
2. METODY STEROWANIA PRĘDKOŚCIĄ SILNIKA BLDC

Wymagane jest, aby strumień magnetyczny twornika w silniku BLDC przyjmował strategię trapezoidalną. Wielkość strumienia magnetycznego wpływa na prędkość wirowania silnika w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego [6]. Uzyskuje się to poprzez sterowanie PWM prądem w poszczególnych fazach. Wyróżnić tu można dwa sposoby sterowania. Metody prądowe (symbol C) bazują na zmianie prądów fazowych silnika. Metody napięciowe (symbol V) różnią się od prądowych tym, że wielkością regulowaną jest napięcie zasilające silnik.

Kolejny podział metod sterowania można przeprowadzić ze względu na kąt elektryczny pełnienia funkcji regulacyjnej przez poszczególne tranzystory. Symbol 120 oznacza, że kąt pełnienia funkcji regulacyjnej przez jeden z tranzystorów wynosi cały okres jego przewodzenia, czyli 120° elektrycznych (rys. 5). W drugim przypadku (symbol 60) każdy tranzystor pełni funkcję regulacyjną przez okres 60° elektrycznych – przez okres pozostałych 60° funkcję regulacyjną przejmuje zawór z grupy przeciwnej (rys. 6).



Rys. 5. Strategia sterowania a) C120Q+, b) C120Q-



Rys. 6. Strategia sterowania a) C60Q+, oraz b) C60Q-

Ze względu na to, która grupa tranzystorów realizuje funkcję sterowania PWM, strategię sterowania można podzielić na trzy przypadki. Gdy funkcję sterowania pełnią tylko tranzystory grupy dodatniej (przez pierwsze 60° okresu przewodzenia), wówczas metodę tą oznacza się symbolem Q+. Jeżeli funkcję sterowania pełnią tranzystory grupy ujemnej (przez ostatnie 60° okresu przewodzenia), wówczas metodę oznacza się symbolem Q-. Gdy funkcję sterowania

pełnią wszystkie aktywne tranzystory, metodę sterowania nazywa się bipolarną [2] a w pozostałych przypadkach unipolarną.

Przykładowo symbol C120Q+ oznacza, że funkcję regulacyjną pełnią tylko tranzystory grupy dodatniej. W tym czasie tranzystory grupy ujemnej pełnią rolę komutatorową.

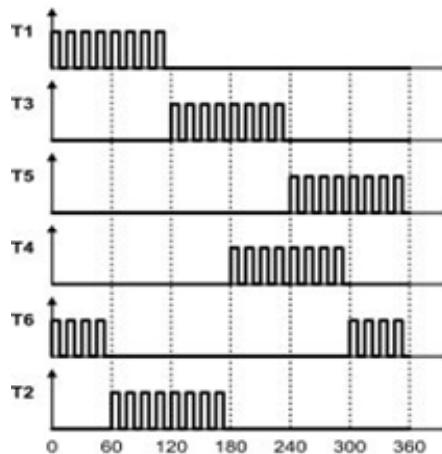
Analogicznie przy sterowaniu C120Q- funkcję regulacyjną pełnią jedynie tranzystory grupy ujemnej. Tranzystory grupy dodatniej spełniają rolę komutatorową.

W metodach C120Q+ i C120Q- funkcję sterowania PWM pełnią trzy tranzystory co upraszcza układ elektroniczny. Takie sterowanie niesie za sobą nierównomierne obciążenie tranzystorów i różne częstotliwości przełączeń.

W metodzie C60Q+ tranzystory przez pierwsze 60° okresu aktywacji pełnią funkcję sterowania PWM, a przez okres kolejnych 60° spełniają jedynie rolę komutatorową. Analogicznie w metodzie C60Q- tranzystory przez pierwsze 60° okresu aktywacji pełnią jedynie rolę komutatorową, a przez okres kolejnych 60° pełnią funkcję sterowania.

Zaletą metod C60Q+ i C60Q- jest równomierne wykorzystanie wszystkich tranzystorów. Wadą jest większa złożoność układu elektronicznego i nierównomierne częstotliwości przełączeń.

Przy sterowaniu bipolarnym przewodzące tranzystory obu grup pełnią równocześnie funkcje sterowniczą PWM oraz komutacyjną (rys. 7).



Rys. 7. Strategia sterowania w układzie bipolarnym

Zaletą tego sterowania jest równomierne obciążenie wszystkich tranzystorów i jednakowe częstotliwości przełączeń. Wadą natomiast są wyższe straty.

Aby zapewnić takie same warunki pracy silnika przy zastosowaniu sterowania bipolarnego jak przy sterowaniu unipolarnym, należy zwiększyć częstotliwość przełączeń tranzystorów.

BIBLIOGRAFIA

1. Dencer A., Glinka T., Jakubiec M., Polak A., *Bezszytkowy silnik prądu stałego – sposoby sterowania komutatorem elektronicznym*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne 2003, nr 65.
2. Domoracki A., Krykowski K., *Silniki BLDC – klasyczne metody sterowania*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne 2005, nr 72.
3. Materiały reklamowe pojazdu Re-Volt.
4. Instrukcja kontrolera Curtis PMC 1204/1205.
5. Zajkowski K., Duer S., *Sterowanie bezszzytkowym silnikiem prądu stałego*. Logistyka 2011, nr 6.

6. Zajkowski K., Duer S., *Diagnostyka silnika BLDC i układu sterowania*. Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 2012, nr 5.

CONTROL MODES ENGINE SPEED IN ELECTRIC CAR

Abstract

The article discusses possible methods of speed control electric motor in electric car. Describes the applicable solutions and possible methods to improve the controllability of the motor. Continuous and discrete methods of speed control of motors has been presented.

Key words: brushless motor, BLDC motor, PWM control.

Autorzy:

mgr inż. **Bartosz Zdunek** – Politechnika Gdańska, Kreator s.c. Gdańsk

dr inż. **Marek Augustyniak** – Politechnika Gdańska, Desart Gdynia

dr hab. inż. **Stanisław Taryma** – Politechnika Gdańska