

Adamczyk Dominik, Michna Michał, Ronkowski Mieczysław, Wilk Andrzej
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych

KONCEPCJA I MODELOWANIE SILNIKA O WIRUJĄCYM TWRNIKIEM ORAZ MAGNEŚNICY DO ZASTOSOWANIA W NAPĘDZIE MIEJSKIEGO SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO

CONCEPT AND MODELING OF ROTATING ARMATURE AND FIELD MAGNET MOTOR TO USE IN ELECTRICAL CITY CAR

Streszczenie: W artykule zaprezentowano koncepcję, model oraz prototyp silnika z wirującym twornikiem oraz magneśnicą. Opisano historię powstania i zastosowania tego typu silników w motoryzacji. Przedstawiono nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne i zastosowania we współczesnych samochodach elektrycznych i hybrydowych. Opracowano model silnika z wirującym twornikiem i magneśnicą oraz przedstawiono wybrane wyniki symulacji przeprowadzone w programie Synopsys Saber. Przedstawiono postęp pracy nad opracowaniem i wykonaniem stanowiska laboratoryjnego do badania tego typu silników.

Abstract: The purpose of this paper is to present a concept, modeling and prototype of a motor with rotating armature and field magnet. A history of the development and applications of these types of motors in the automotive industry is described. A new design solution and applications in modern electric and hybrid vehicles have been shown. The circuit model of the motor with rotating armature and field magnet has been developed and implemented into the Synopsys/Saber software using the modelling language MAST. The selected simulation results has been shown. The paper presents the progress of research work on the laboratory test bench with this type of motor.

Słowa kluczowe: silnik elektryczny, wirujący twornik i magneśnica, samochód elektryczny, czterokwadrantowa maszyna.

Keywords: electric motor, rotating armature and and filed magnet, four quadrant machine.

1. Wstęp

Sukces rynkowy pojazdów o napędzie elektrycznym i hybrydowym uzależniony jest między innymi od zmniejszenia kosztów produkcji i eksploatacji tego typu pojazdów. Istotnym czynnikiem jest optymalizacja układu napędowego obejmującego przetwornik elektromechaniczny (silnik elektryczny), układ przeniesienia napędu, układ sterowania i zasilania. W pracach badawczych i rozwojowych analizuje się zastosowanie różnego typu silników (asynchronicznych klatkowych, bezszczotkowych z magnesami trwałymi), układów przeniesienia napędu (bezpośrednie, z zastosowaniem przekładni, szeregowe, równoległe, itp.) oraz metod sterowania. Znalezienie rozwiązania optymalnego pozwoli na poprawę konkurencyjności pojazdów z napędem elektrycznym względem pojazdów o napędzie spalinowym. Istotnym czynnikiem, wpływającym np. na dynamikę i zasięg jazdy samochodu elektrycznego, jest jego masa. W

celu jej zmniejszenia integruje się ze sobą elementy napędu. Jednym z rozwiązań może być zastosowanie zintegrowanego przetwornika elektromechanicznego pełniącego jednocześnie funkcję silnika napędowego oraz dyferencjału elektromechanicznego. Takim przetwornikiem jest silnik z wirującym twornikiem i magneśnicą (SWTM). Celem prowadzonych obecnie prac jest:

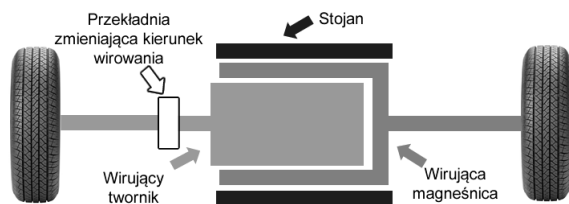
- przegląd nowoczesnych rozwiązań SWTM,
- rozszerzenie i pogłębienie wiedzy na temat zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych zachodzących w SWTM,
- rozwińnięcie metodologii modelowania za pomocą podejścia energetycznego,
- opracowanie modeli obwodowych adekwatnych do zastosowania w algorytmach sterowania i symulatorach obwodowych.

2. Początki zastosowania silnika z dwoma wirnikami w motoryzacji

Prekursorem stosowania silnika o wirującym tworniku oraz magneśnicy był Karol P. Steinmetz [1]. Jego prace ukierunkowane były na budowę prostego, a przez to taniego i niezawodnego samochodu elektrycznego. W jego przekonaniu taki pojazd mógłby konkurować z produkowanymi w tamtych czasach pojazdami benzynowymi (np. Fordem Model T). W jego wizji napęd elektryczny był mniej szkodliwy dla środowiska oraz tańszy w eksploatacji. W 1914 roku przedstawił swoją koncepcję na sympozjum „Electric Vehicle Association of America”, a następnie zwrócił się z prośbą do stowarzyszenia „National Electric Light Association”, aby określić wymagania dla infrastruktury stacji ładowania samochodów elektrycznych. Następnie zaprojektował silnik o wirującym tworniku i magneśnicy jako integralnej części tylnej osi napędu. W 1917 roku rozwiązanie to zastosowano w samochodzie terenowym firmy Dey. Waga pojazdu wynosiła zaledwie 635 kg, a cena pojazdu 1000 \$. Niestety, ze względu na małe zainteresowanie, produkcja trwała jedynie rok. K.P. Steinmetz założył firmę, w której powstawały kolejne prototypy pojazdów elektrycznych, jednak kolejne projekty zaniechano po jego śmierci (26.X.1923 r.). Karol P. Steinmetz jest autorem artykułu dotyczącego projektu samochodu o małym zasięgu z napędem elektrycznym pełniącym rolę dyferencjału, napisanego w 1920 roku a wydane dopiero w 2005 roku [1].

3. Przegląd konstrukcji silników z wirującym twornikiem i magneśnicą (SWTM)

Pierwotnie SWTM, ze względu na dostępny charakter źródła zasilania, były szczotkowymi silnikami prądu stałego. Energia elektryczna dostarczana była za pomocą pierścieni ślizgowych do magneśnicy a następnie za pomocą szczotek i komutatora do twornika.

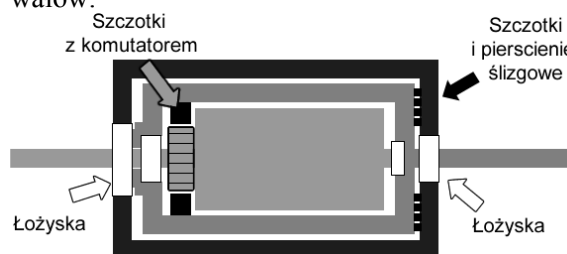


Rys. 1 Koncepcja napędu kół oparta o SWTM

Sterowanie prędkością obrotową odbywało się za pomocą odpowiednio łączonych rezystorów rozruchowych. W nowszych układach rezystory zastąpiono układami energoelektronicznymi.

3.1 Budowa oraz zasada działania SWTM jako dyferencjału elektromechanicznego

W odróżnieniu od klasycznych silników SWTM posiadają dwa niezależnie wirujące wały. Na jednym wale zamocowane jest uzwojenie twornika natomiast na drugim uzwojenie magneśnicy. Pod wpływem działania pola magnetycznego generowane są przeciwie skierowane do siebie siły działające na twornik i magneśnicę. Wynikiem działania przeciwie skierowanych momentów wał twornika i wał magneśnicy obracają się w przeciwnych kierunkach. Generowane w ten sposób przeciwie skierowane momenty, przenoszone przez wał oraz przekładnię na koła pojazdu, realizują funkcję dyferencjału elektromechanicznego. Przeniesienie napędu na koła samochodu wiąże się ze zmianą kierunku wirowania jednego z wirników, realizowane jest to przez przekładnię, której waga jest specjalnie dobrana w celu zniwelowania różnicy momentów bezwładności obu wirników – wynikających z różnej masy oraz średnicy wałów.



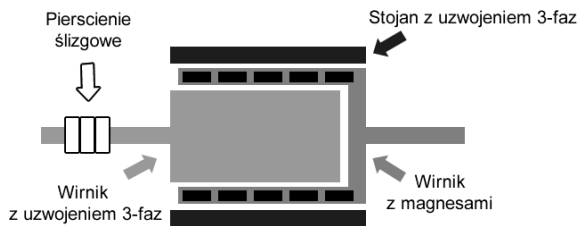
Rys. 2 Przykład wykonania SWTM jako szczotkowego silnika prądu stałego

Przepływ twornika jest nieruchomy względem przepływu magneśnicy, natomiast układ twornika oraz magneśnica jest ruchomy względem stojana.

3.2 Nowoczesne konstrukcje SWTM oraz ich zastosowanie

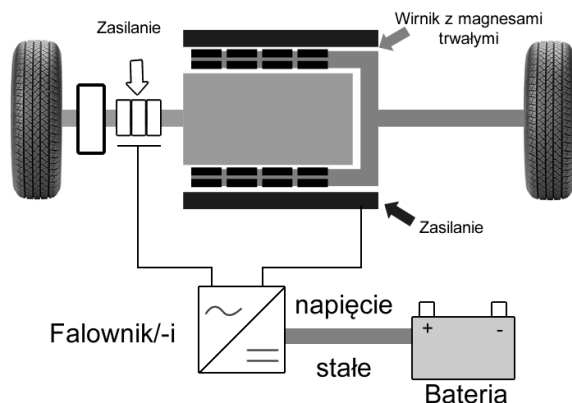
Obecnie, dzięki rozwojowi energoelektroniki, elektroniki (DSP) oraz nowym materiałom można uprościć budowę oraz zwiększyć sprawność SWTM. W nowoczesnych konstrukcjach SWTM stosuje się wysokoenergetyczne magnesy trwałe (neodymowe lub samarowo-kobaltowe). Eliminuje to konieczność doprowadzenia

energii do magnesyńcy oraz zwiększa sprawność układu. Energia do twornika doprowadzana jest poprzez pierścienie ślizgowe oraz szczotki, których zużycie jest nieporównywalnie mniejsze niż w przypadku zastosowania klasycznego komutatora. Do zasilania trójfazowego uzwojenia twornika wykorzystuje się komutację elektroniczną realizowaną przez falownik.



Rys. 3 Przykład nowoczesnego wykonania SWT M

Na rys. 3 przedstawiono czterokwadrantową (ang. 4QT) konstrukcję SWT M. Poprzez zastosowanie dodatkowego uzwojenia magnesującego na stojanie, maszyna może pracować jednocześnie w dwóch kwadrantach charakterystyki mechanicznej - jako silnik i prądnica. Uzwojenie twornika oraz uzwojenie stojana jest zasilane z dwóch osobnych falowników (rys. 4). Dodatkowe uzwojenie na stojanie, przy odpowiednim sterowaniu pozwala na realizację złożonych algorytmów trakcyjnych takich jak Limited Slip Differentia, ASR, ESP, ABS itd. bez konieczności użycia hamulców ciernych.



Rys. 4 Przykład napędu samochodu elektrycznego z nowoczesnym SWT M

Zaletami napędu SWT M spełniającego rolę dyferencjału elektromechanicznego są:

- kompaktowa budowa,
- zmniejszenie masy napędu dzięki zintegrowaniu silnika oraz dyferencjału,

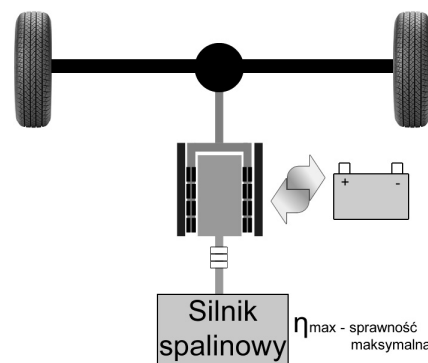
- zwiększenie niezawodności dzięki wyeliminowaniu dyferencjału mechanicznego,
- uproszczenie sterowania względem napędów z silnikami napędzającymi koła osobno – o funkcję dyferencjału elektronicznego,
- realizacja złożonych funkcji trakcyjnych.

SWT M znajduje także zastosowanie jako sprzęgło elektromagnetyczne o bardzo pożądanym właściwościach. Taki wariant został przedstawiony na rys.5.

Główne zalety SWT M działającego jako sprzęgło elektromechaniczne to:

- brak części ciernej,
- jednoczesnego przekazywania energii z silnika spalinowego na koła oraz ładowania akumulatorów,
- generacji dodatkowego momentu napędowego przy jednoczesnym przekazywaniu momentu z silnika spalinowego,
- jednoczesnego odzyskiwania energii z kół pojazdu i silnika spalinowego.

Takie rozwiązanie dedykowane jest do samochodów o napędzie hybrydowym – elektryczno-spalinowym. Umożliwia działanie silnika spalinowego w punkcie pracy o najwyższej sprawności. Rozwiązanie to obecnie stosowane jest jedynie w prototypach [4].

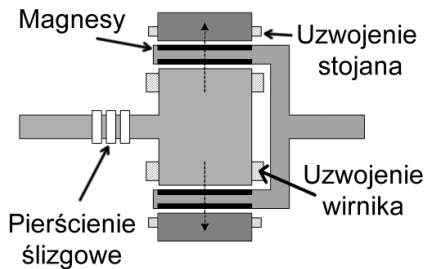


Rys. 5 Przykład zastosowania SWT M jako sprzęgła elektromagnetycznego

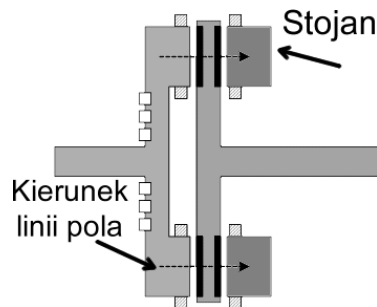
3.4 Rodzaje budowy SWT M jako maszyny czterokwadrantowej

Dostosowując SWT M do konkretnego zastosowania warto przeanalizować różne rodzaje budowy[2] takiego silnika. Na rys. 6 przedstawiona jest konstrukcja cylindryczno-cylindryczna nadająca się do pracy przy wysokich prędkościach. Jej wadą jest

utrudniony sposób chłodzenia wirnika wewnętrznego.



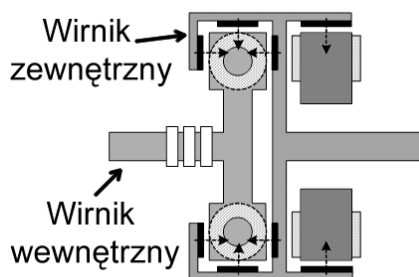
Rys. 6 Przykładowa konstrukcja cylindryczna SWTM z dodatkowym uzwojeniem na stojanie



Rys. 7 Przykładowa konstrukcja tarczowa SWTM z dodatkowym uzwojeniem na stojanie

Na rys. 7 przedstawiona jest SWTM o budowie tarczowo-tarczową charakteryzująca się dużą obciążalnością momentem oraz łatwiejszym odprowadzeniem ciepła.

Na rys.8 przedstawiona jest budowa osiowo-tarczowa. Posiada zalety obu poprzednich konstrukcji czyli łatwość chłodzenia przy zachowaniu dużej gęstości mocy.



Rys. 8 Przykładowa konstrukcja mieszana SWTM z dodatkowym uzwojeniem na stojanie

We wszystkich przedstawionych typach budowy SWTM zastosowano wirnik zewnętrzny z magnesami trwałymi.

4. Prototyp SWTM - „Błotniak”.

W ramach badań prowadzonych nad SWTM powstał prototyp silnika o nazwie „Błotniak”. Pierwotnie miał być wykorzystywany jako

napęd elektryczny łodzi podwodnej. Obecnie jednak trwają prace badawcze nad zastosowaniem go do napędu elektrycznego samochodu osobowego.

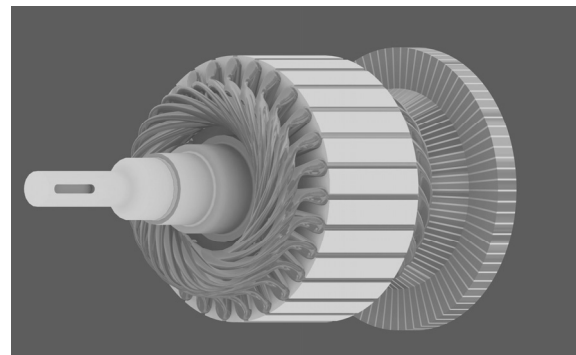
4.1 Budowa SWTM „Błotniak”.

„Błotniak” jest silnikiem prądu stałego, zaprojektowany został do pracy przy niskim napięciu zasilania – baterii trakcyjnych (tabela 1).

Tabela 1. Parametry SWTM „Błotniak”

| Nazwa parametru | Wartość |
|------------------------------|------------------|
| Moc znamionowa P_n | 1,9 [kW] |
| Prędkość znamionowa n_n | 2x800 [obr./min] |
| Napięcie twornika U_{an} | 54 [V] |
| Prąd twornika I_{an} | 44 [A] |
| Napięcie wzbudzenia U_{fn} | 27 [V] |
| Prąd wzbudzenia I_{fn} | 3,96 [A] |
| Sprawność η_n | 76 [%] |

Budowę silnika „Błotniak” przedstawiono na rys. 9. Silnik został zaprojektowany tak, aby był chłodzony opływającą go wodą. Na rys. 9 przedstawiony jest twornik z uzwojeniem i komutatorem. Na rys.10 przedstawiona jest magneśnica. Na magneśnicy znajdują się szczytko trzymacze twornika oraz cztery pierścienie ślizgowe – dwa do twornika oraz dwa do magneśnicy. Magneśnica posiada dwa uzwojenia – główne i komutacyjne. Magneśnica wykonana jest jak stelaż, aby zmniejszyć wagę silnika. Na pokrywie stojana znajdują się szczytko trzymacze doprowadzające energię do pierścieni ślizgowych umiejscowionych na ruchomej magneśnicy.



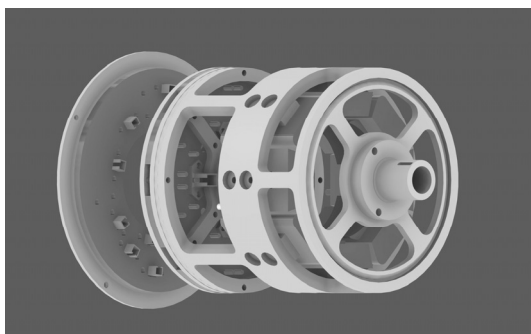
Rys. 9 Model twornika SWTM „Błotniak”

4.2 Stanowisko do badań SWTM

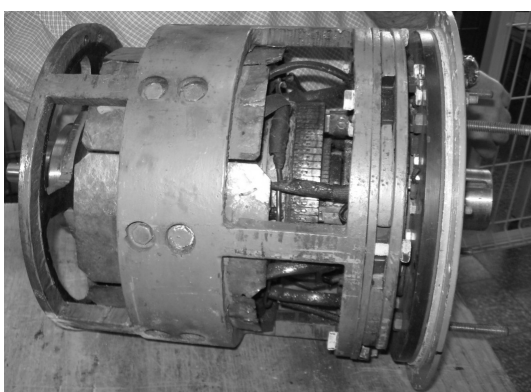
Obecnie trwają prace nad budową stanowiska do badania SWTM. Opracowano

trójwymiarowy model geometryczny stanowiska, który posłużył do weryfikacji koncepcji (rys. 12). Stanowisko pomiarowe (rys. 13) składa się z:

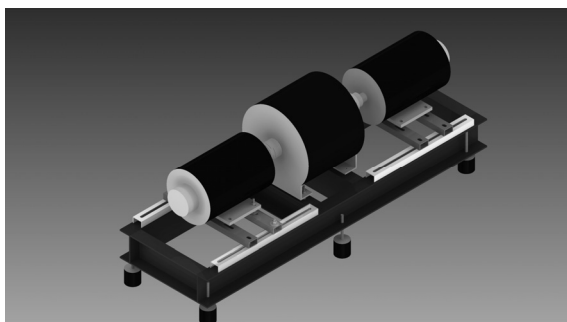
- amortyzowanej regulowanej podstawy,
- SWTM „błotniak”,
- dwóch silników indukcyjnych z enkoderami.



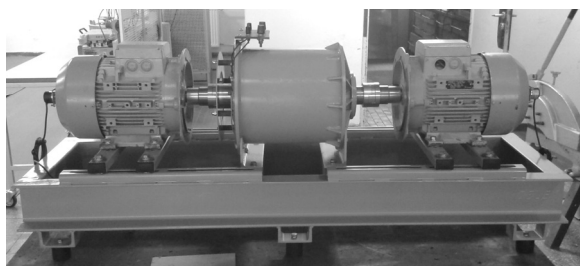
Rys. 10 Model magnetyczny SWTM „Błotniak”



Rys. 11 Zdjęcie „Błotniak”- bez obudowy



Rys. 12 Model stanowiska do badania SWTM



Rys. 13 Stanowisko do badania SWTM

Stanowisko ma posłużyć do badania SWTM w stanach dynamicznych oraz statycznych.

4. Model silnika prądu stałego z wirującym twornikiem i magnetyczną

SWTM można modelować i analizować jako zwykły silnik prądu stałego, przy założeniu zablokowania jednego z wałów. Takie rozwiązanie pozwala na implementację standardowych modeli służących do modelowania silników z pojedynczym wirnikiem. Jednak w celu analizy SWTM działającego jako dyferencjał w napędzie pojazdu należy użyć modelu rozszerzonego o dodatkowy wirnik.

$$U_a = I_a R_a + E_a \quad (1)$$

$$E_a = G_{af} I_f (\omega_{w1} - \omega_{w2}) \quad (2)$$

$$T_e = G_{af} I_f I_a \quad (3)$$

$$d(\omega_{w1})/dt = (1/J_{w1})(T_e - T_{m1} - B_{m1}\omega_{w1}) \quad (4)$$

$$d(\omega_{w2})/dt = (1/J_{w2})(-T_e - T_{m2} - B_{m2}\omega_{w2}) \quad (5)$$

gdzie:

U_a – napięcie twornika [V]

I_a – prąd twornika [A]

I_f – prąd magnetyczny [A]

R_a – rezystancja uzwojenia twornika [Ω]

E_a – SEM [V]

G_{af} – indukcyjność rotacji [H]

T_e – moment elektromagnetyczny [Nm]

T_{m1}, T_{m2} – moment obciążenia pierwszego oraz drugiego wału [Nm]

ω_{w1}, ω_{w2} – prędkość pierwszego oraz drugiego wału [rad/s]

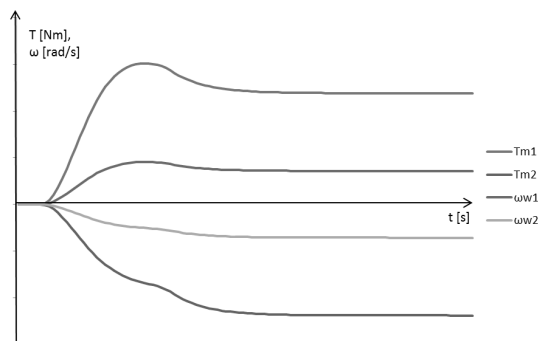
J_{w1}, J_{w2} – moment bezwładności pierwszego oraz drugiego wału [$\text{kg m}^2/\text{s}^2$].

B_{m1}, B_{m2} – współczynnik tarcia lepkiego [$\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s})$].

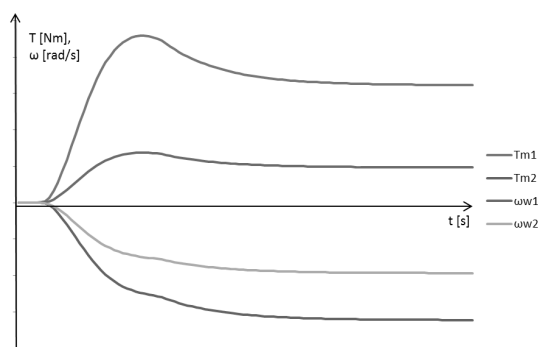
Jak widać w równaniu (2) wartość SEM zależna jest od różnicy prędkości twornika i magnetycznej, natomiast w równaniu (4) i (5) widać, że taki sam moment napędowy ale przeciwnie skierowany działa na oba wały. W rezultacie prędkość każdego z wałów jest zależna od obciążenia. Prędkość modelowana jest względem obserwatora umieszczonego na stojanie. Model został zaimplementowany do środowiska Saber Synopsys.

Na rys.14 przedstawiono wyniki symulacji rozruchu bezpośredniego SWTM. Przeprowadzono symulację, w których każdy z wirników posiada inny moment bezwładności,

pozostałe parametry są takie same dla obu wirników. (rys. 14).



Rys. 14 Rozruch SWTM przy nierównych wartościach momentów bezwładności obu wałów



Rys. 15 Rozruch SWTM przy nierównych wartościach obciążenia obu wałów

Na rys.15 przedstawiono wyniki symulacji dla takich samych momentów bezwładności ale różnych wartościach współczynnika tarcia lepkiego.

Jak widać na wykresach umieszczonych na rys.14 i 15 model działa poprawnie. W stanach statycznych taki sam moment przekazywany jest na oba wały. Natomiast wały różnią się prędkością obrotową - identycznie jak ma to miejsce w dyferencjale mechanicznym podczas jazdy prosto (rys.14) oraz po łuku (rys.15).

7. Wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników symulacji można stwierdzić, że opisany i użyty model pozwala na dość dokładną analizę dynamiki SWTM. Wyniki analizy będą stanowić punkt wyjścia do opracowania bardziej wydajnych sposobów przeniesienia napędu – SWTM wykonanym jako silnik synchroniczny z magnesami trwałymi. Założeniem autorów było przedstawienie przykładowego SWTM oraz opracowanie jego prostego modelu. Model

może stanowić punkt wyjścia do opracowania algorytmów trakcyjnych i metod sterowania SWTM jako napędu samochodu elektrycznego. Opracowanie w programie Synapsys/Saber pakietu do symulacji SWTM w napędzie samochodu elektrycznego, może stanowić wartościową ofertę dla projektantów i producentów samochodów elektrycznych.

7. Literatura

- [1]. Steinmetz Ch. P.: *Steinmetz's electric car: a legend speaks across the years*. Power and Energy Magazine, IEEE (Volume:3 , Issue: 5), Sept.-Oct. 2005, p. 70 – 77, ISSN: 1540-7977.
- [2]. Sture E., Sadarangani C.: *A Four-Quadrant HEV Drive System*. Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall, 2002 IEEE 56th (Volume:3), p. 1510 - 1514 vol.3, 2002, ISSN : 1090-3038.
- [3]. Nordlund E., Thelin P., Sadarangani. C.: *Four quadrant energy transducer for hybrid electric vehicles*. Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the (Volume:1), p. 390 - 397 vol.1, Oct 2002, ISSN : 0197-2618.
- [4]. Nordlund E.: *The Four-Quadrant Transducer System: for Hybrid Electric Vehicles*. Doctoral thesis, monograph. Stockholm, 2005.
- [5]. Nordlund E., Sadarangani C.: *Four-quadrant Energy Transducer for Hybrid Electrical Vehicles Simulations and System Description*, EVS19,2002, Busan, Korea.
- [6]. Ping Zheng, Qian Wu, Ranran Liu, Jing Zhao, Chengde Tong: *Design of a brushless compound-structure permanent-magnet synchronous machine for HEV propulsion system*. Power and Energy Magazine, IEEE (Volume:3 , Issue: 5) Sept.-Oct. 2005, p. 70 – 77, ISSN :1540-7977

Autorzy

mgr inż. Dominik Adamczyk, doktorant,
tel. 58 347 19 39, dadamc@ely.pg.gda.pl,
dr inż. Michał Michna, tel. 58 347 29 79,
michna@pg.gda.pl
dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski,
tel. 58 347 20 87 , m.ronkowski@ely.pg.gda.pl,
dr inż. Andrzej Wilk, tel. 58 347 10 87,
a.wilk@ely.pg.gda.pl
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki
i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233
Gdańsk.

Recenzent

prof. dr hab. inż. Piotr Gnaciński