

*silniki prądu stałego, zjawisko komutacji,
modelowanie stanów pracy, model numeryczny MES*

Paweł IDZIAK*, Krzysztof KOWALSKI*

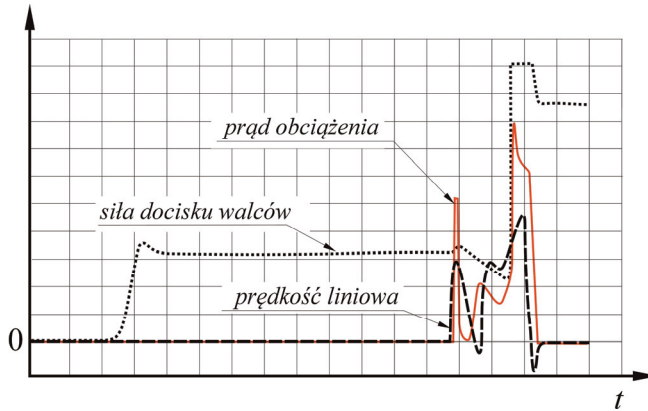
NUMERYCZNE MODELOWANIE WPŁYWU ASYMETRII PRZEPIYU UZWOJEN KOMPENSACYJNYCH NA ROZKŁAD POLA MAGNETYCZNEGO

W pracy przedstawiono numeryczny model maszyny prądu stałego z uzwojeniami kompensacyjnymi i komutacyjnymi. W rozpatrywanej maszynie uzwojenia kompensacyjne i komutacyjne połączone zostały w gałęzie równoległe. Przeanalizowano wpływ niesymetrii rozpiywu prądów w równoległych gałęziach uzwojeń kompensacyjnych na komutację. Do wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego zastosowano metodę elementów skończonych. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń numerycznych.

1. WPROWADZENIE

Stosowane powszechnie w przemyśle napędy z silnikami asynchronicznymi czy synchronicznymi nie w pełni spełniają oczekiwania użytkownika w przypadkach wymagających dużej stabilności prędkości obrotowej przy równoczesnym występowaniu udarowych przeciążeń maszyny [1]. W takich warunkach pracuje większość maszyn walcowniczych. Dobrze w tych warunkach zachowują się napędy z silnikami prądu stałego. Pracują one nawrotnie; doprowadzane często do stanów zwarcia (zablokowanie walców przez surowiec). Oprócz wspomnianych przeciążeń często dochodzi też do głębokiego odwzbudzenia maszyny (prąd wzbudzenia znacznie mniejszy od znamionowego). Podstawową trudnością w eksploatacji tych układów pozostają procesy komutacyjne. Usterki w zespole węzła zestyku ślizgowego pozostają jedną z podstawowych przyczyn awarii tych maszyn.

* Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, pawel.idziak @put.poznan.pl



Rys. 1. Poglądowe przebiegi czasowe: prądu, siły docisku i prędkości liniowej walców maszyny walcowniczej

Fig. 1. Illustrative time waveforms: current, the load force and line speed roller mill machine

2. KOMUTACJA W MASZYNIE PRĄDU STAŁEGO

Komutacją nazywamy zespół zjawisk związanych ze zmianą kierunku prądu w zewoju zwartym przez szczotki. Proces ten zachodzi, gdy zewój ten jest przełączany z jednej gałęzi twornika do drugiej w związku z obrotem wirnika. W przypadku idealnym zmiana prądu w cewce komutującej w funkcji czasu zależy tylko od rezystancji przejścia pomiędzy szczotką a sąsiednimi wycinkami komutatora i wyraża się zależnością [2]:

$$i(t) = \frac{I}{2} \left(1 - 2 \frac{t}{T} \right), \quad (1)$$

przy czym T – całkowity czas komutacji.

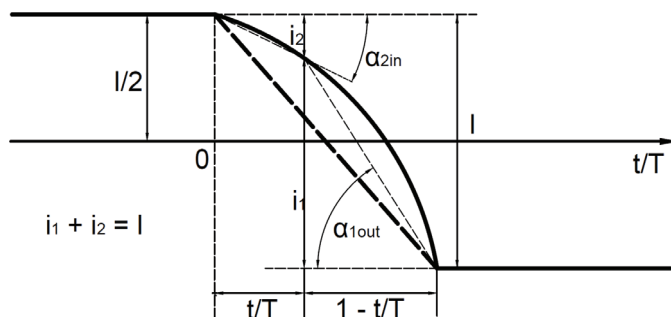
Gęstość prądu jest podczas całego okresu komutacji w obu częściach szczotki stała i równa średniej gęstości wyrażonej zależnością:

$$j = \frac{I}{S_{szcz}}, \quad (2)$$

gdzie: I – prąd dopływający do szczotki, S_{szcz} – suma przekrojów szczotek na jednym sworzniu.

Największy wpływ na przebieg komutacji mają siły elektromotoryczne SEM wzbudzone w cewce komutującej przez pola własne i pola obce. SEM wzbudzona przez pole własne cewki nosi nazwę SEM samoindukcji i wyraża się zależnością:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (3)$$



Rys. 2. Geometryczna interpretacja zmian gęstości prądu komutowanego:
I – prąd dopływający do szczotki, *i*₁, *i*₂ – odpowiednio prądy w poszczególnych częściach
 szczotki płynące przez krawędź nabiegającą i zbiegającą

Fig. 2. Geometric interpretation of current density changes under the brush:
I – total commutation current, *i*₁ and *i*₂ – respectively the currents in particular brush parts,
 flowing through the mounting and descending brush edge

Siła ta prowadzi do opóźnienia zmian prądu w cewce komutującej i powoduje zwiększenie gęstości prądu przy zejściu szczotki z wycinka (komutacja opóźniona – rys. 2). Efektem jest iskrzenie za szczotką – w skrajnym przypadku powstaje tzw. ogień okrężny na komutatorze.

W poprawnie eksploatowanej maszynie szczotki powinny być umieszczone w tzw. strefie geometrycznie obojętnej to znaczy takiej, w której indukcja w stanie jałowym jest równa zero. W stanie obciążenia pod wpływem zjawisk zachodzących w maszynie ta strefa przesuwa się – w dotychczasowej strefie neutralnej pojawia się indukcja. Pod wpływem oddziaływania twornika indukuje ona w cewce komutującej SEM rotacji o kierunku zgodnym z SEM samoindukcji.

W maszynach dużej mocy w celu zbliżenia komutacji do prostoliniowej stosuje się dodatkowe uzwojenia połączone w szereg z twornikiem:

- komutacyjne – umieszczone na dodatkowych biegunach komutacyjnych,
- kompensacyjne – umieszczone w nabiegownikach biegunów głównych.

Opis matematyczny zjawisk komutacji jest bardzo trudny. Szczotka zwiera zwykle 3 do 4 wycinków komutatora. Cewki połączone z tymi wycinkami są umieszczone w różnych żłóbkach. Uzwojenie jest zwykle skrócone co dodatkowo zwiększa strefę komutacji.

Rozkład indukcji pod biegunem komutacyjnym powinien być taki, aby z minimalną nadwyżką we wszystkich cewkach komutujących skompensować SEM samoindukcji.

Wymagany przepływ biegunów komutacyjnych wyraża się zależnością [2]:

$$\theta_k = A \tau (1 + \mathcal{G}), \quad (4)$$

\mathcal{G} – współczynnik empiryczny 0,1–0,2,

A – obciążenie liniowe powierzchni twornika,

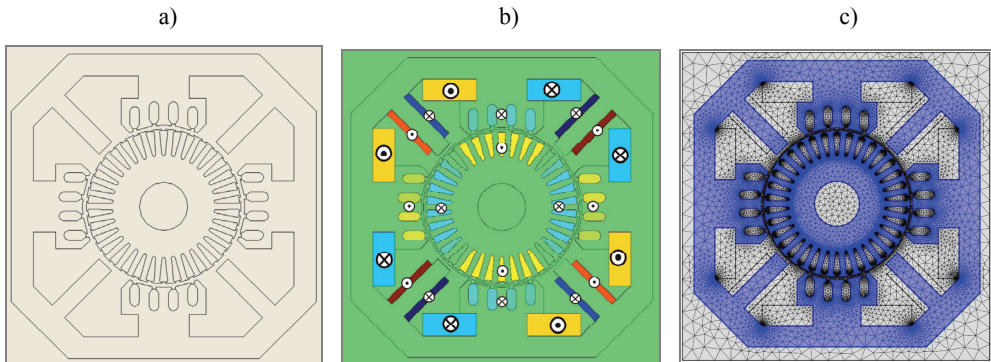
τ – podziałka biegunowa.

W maszynie z uzwojeniem kompensacyjnym uzwojenie komutacyjne może mieć znacznie mniejszy przepływ. Musi kompensować ono tylko część oddziaływania twornika.

Moce maszyn prądu stałego, szczególnie wolnobieżnych jak np. silników walcowniczych sięgają megawatów. Prądy znamionowe są rzędu tysięcy amperów. Nawet przy stosowaniu jednozwojnych cewek w uzwojeniu kompensacyjnym koniecznością jest stosowanie gałęzi równoległych w uzwojeniu kompensacyjno-komutacyjnym. Rezystancja gałęzi w tym uzwojeniu jest rzędu $m\Omega$ i z tego powodu asymetrie w prądach gałęziowych są nieuniknione.

3. OPIS BADANEGO MODELU

W niniejszej pracy podjęto próbę numerycznego wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego (rozkład indukcji magnetycznej oraz rozkład linii sił pola) w wielobiegunowej maszynie prądu stałego posiadającej uzwojenia kompensacyjno-komutacyjne połączone w dwie gałęzie równoległe (układ typowy dla napędów walców). Dla uproszczenia obliczeń przyjęto jako model maszynę czterobiegunową z uzwojeniami kompensacyjno-komutacyjnymi połączonymi w dwie gałęzie równoległe.



Rys. 3. Przekrój obwodu elektromagnetycznego maszyny (a), kierunki przepływu prądu w poszczególnych uzwojeniach (b) model węzłowy (c)

Fig. 3. Sectional view of the electromagnetic circuit of the machine (a), direction of currents in particular windings (b), nodal model (c)

Obwód magnetyczny maszyny przedstawiono na rys. 3. Obliczenie rozkładu pola przeprowadzono w układzie 2D. W obliczeniach uwzględniono zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego (nieliniowa charakterystyka magnesowania).

Polowy model zjawisk elektromagnetycznych w przetwornikach elektromechanicznych jest opisany równaniami pola magnetycznego [3]:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (5)$$

oraz równaniami pola przepływowego prądu elektrycznego:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt}, \quad \operatorname{div} \mathbf{J} = 0, \quad (6)$$

przy czym: \mathbf{H} – wektor natężenia pola magnetycznego, \mathbf{J} – wektor gęstości prądu, \mathbf{B} – wektor indukcji magnetycznej. Równania różniczkowe 5–8 opisujące rozkład pola dodatkowo uzupełniane są zależnościami materiałowymi:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad \mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}, \quad (7)$$

gdzie: μ – przenikalność magnetyczna, γ – przewodność elektryczna.

W przypadku gdy pole magnetyczne analizowane jest w środowisku nieliniowym, niejednorodnym i anizotropowym do rozwiązania równań różniczkowych korzystne jest zastosowanie metody wektorowego potencjału magnetycznego \mathbf{A} . W metodzie tej stosowane jest podstawienie:

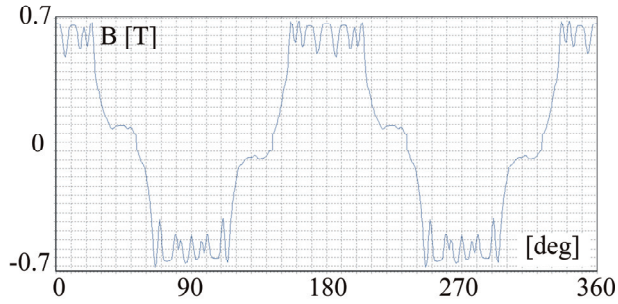
$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}. \quad (8)$$

Do numerycznego rozwiązania równań polowych może być zastosowana metoda elementów skończonych [3]. W analizowanym obwodzie magnetycznym maszyny prądu stałego przyjęto założenie, że rozkład pola magnetycznego nie zmienia się wzdłuż osi wału (kierunek z), zatem może być rozpatrywany model dwuwymiarowy. Przy tym założeniu wektorowy potencjał magnetyczny posiada tylko jedną składową A_z . Liczba niewiadomych w równaniach różnicowych metody elementów skończonych równa jest więc liczbie węzłów siatki dyskretyzacyjnej, w których nie jest zadany warunek brzegowy.

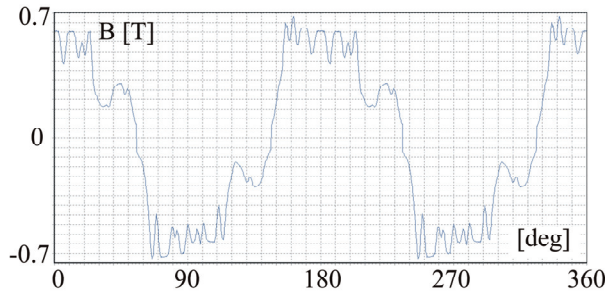
Układ równań opisujący rozważane zagadnienie rozwiązywany jest metodami iteracyjnymi [3]. Do zamodelowania układu równań oraz wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego wykorzystany został specjalistyczny pakiet oprogramowania.

4. WYNIKI OBLICZEŃ

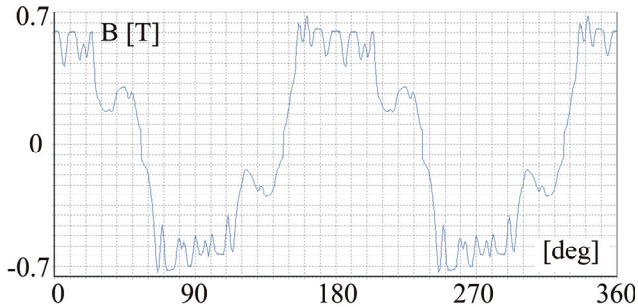
Eksperyment obliczeniowy polegał przede wszystkim na symulowaniu różnych rozptyłów prądu w gałęziach równoległych uzwojeń komutacyjno-kompensacyjnych. Otrzymane wartości składowej promieniowej indukcji w szczeliny powietrznej maszyny w funkcji podziałki kątowej przedstawiono na rys. 4–7.



Rys. 4. Rozkład składowej promieniowej indukcji w szczelinie dla $I_f = I_{fm}$, $I = I_n$ – symetria obwodów
 Fig. 4. Distribution of the radial component of induction in air gap for $I_f = I_{fm}$, $I = I_n$ – circuit symmetry

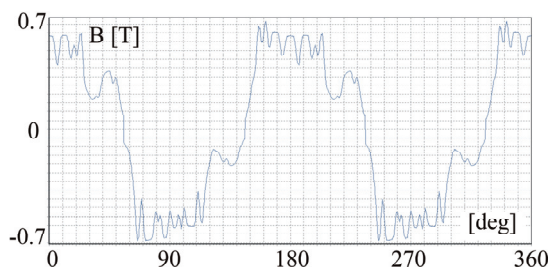


Rys. 5. Rozkład składowej promieniowej indukcji w szczelinie wzdłuż obwodu twornika dla $I_f = 0.3I_{fm}$, $I = I_n$ – symetria obwodów
 Fig. 5. Distribution of the radial component of induction in air gap for $I_f = 0.3I_{fm}$, $I = I_n$ – circuit symmetry



Rys. 6. Rozkład składowej promieniowej indukcji w szczelinie wzdłuż obwodu twornika dla $I_f = 0.3I_{fm}$, $I = I_n$; asymetria rozplywu prądów w gałęziach równoległych obwodów komutacyjno-kompensacyjnych $\pm 5\% I_n$

Fig. 6. Distribution of the radial component of induction in air gap for $I_f = 0.3I_{fm}$, $I = I_n$, circuit asymmetry of currents in limbs of parallel commutation/compensation circuits $\pm 5\%$



Rys. 7. Rozkład składowej promieniowej indukcji w szczelinie wzdłuż obwodu twornika dla $I_f = 0.3I_{fn}$, $I = I_n$; asymetria rozplywu prądów w gałęziach równoległych obwodów komutacyjno-kompensacyjnych $\pm 20\% I_n$

Fig. 7. Distribution of the radial component of induction in air gap for $I_f = 0.3I_{fn}$, $I = I_n$, circuit asymmetry of currents in limbs of parallel commutation/compensation circuits $\pm 20\%$

Tabela 1. Wartości maksymalne składowej promieniowej indukcji pod biegunem komutacyjnym
Table 1. The maximum values of the radial component of the flux density under the commutation pole

Prąd w uzwojeniach [A]	B^+ [T]	B^- [T]
$I_i^- = I_N$, $I_w = I_{wn}$, $I_k^+ = I_k^- = I_{kn}$	0,1	-0,1
$I_i^- = I_N$, $I_w = 0,37I_{wn}$, $I_k^+ = I_k^- = I_{kn}$	0,115	-0,1
$I_i^- = I_N$, $I_w = 0,37I_{wn}$, $I_k^+ = 1,05I_{kn}$, $I_k^- = 0,95 I_{kn}$	0,117	-0,1
$I_i^- = I_N$, $I_w = 0,37I_{wn}$, $I_k^+ = 1,2I_{kn}$, $I_k^- = 0,8I_{kn}$	0,13	-0,085

5. PODSUMOWANIE

W rozważaniach przyjęto, że rozpatrywany silnik pracuje z bardzo silnym od-wzbudzeniem w tzw. drugiej strefie (odpowiada to rzeczywistym warunkom pracy maszyn walcowniczych – prąd wzbudzenia jest w nich zmniejszany nawet do 17% I_f). W połączeniu z prądem twornika zwiększonym w tych stanach nawet do 200% I_N prowadzi to do skrajnie trudnych warunków komutacji. Asymetria w rozplywie prądów w gałęziach równoległych uzwojenia komutacyjno-kompensacyjnego może prowadzić do powstania tzw. ognia okrężnego na komutatorze. W warunkach rzeczywistych maszyna pracuje nawrotnie. Charakter komutacji przy asymetrii prądów może być różny – np. może to być w danej chwili komutacja przyspieszona na szczotkach dodatnich i opóźniona na szczotkach ujemnych. Ponieważ komutacja silnie opóźniona powoduje ciągnięcie łuku za szczotką może prowadzić to do zniszczeń.

LITERATURA

- [1] GIERAS, J.F. and GIERAS, I.A., *Electrical Energy Utilization*, Wydawnictwo A. Marszałek, Toruń 1988.

- [2] MUSZALSKI Z., *Teoria i fizyka komutacji maszyn elektrycznych*, PWN, Warszawa 1997.
- [3] NOWAK L., *Modele polowe przetworników elektromechanicznych w stanach nieustalonych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.

NUMERICAL MODELLING OF INFLUENCE OF THE ASYMMETRY OF
THE MMF COMPENSATION WINDINGS ON MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION

A numerical model of a DC machine with compensation and commutation windings connected into parallel circuit limbs was presented in this paper. The influence of the current distribution asymmetry in above mentioned limbs on the commutation process was analysed. Selected results of numerical calculations were presented.