



## RECENZJA

### Rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława Gawrona „Prądnica synchroniczna ze wzbudzeniem hybrydowym”

#### 1. Tematyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych z konstrukcją nietypowych maszyn elektrycznych. W przypadku konstrukcji przedstawionej przez autora zakres zastosowań obejmuje m.in. małych wytwórców energii elektrycznej (tzw. prosumentów). Dzięki temu tematyka pracy może być uznana za bardzo aktualną gdyż ta forma wykorzystania generatorów niewielkiej mocy dopiero zyskuje popularność. Proponowana prądnica pozwala zaś na uzyskanie w pełni sterowalnego generatora o stosunkowo niskich kosztach instalacji w porównaniu z zastosowaniami klasycznymi zarówno w przypadku pracy samotnej jak i współpracy z siecią sztywną. Takie jej własności wynikają z realizacji celu pracy sformułowanego następująco (str.19):

*Opracowanie metodyki wyboru optymalnego rozwiązania konstrukcyjnego prądnic z podwójnym obwodem magnetycznym wzbudzenia i opracowanie modelu matematycznego oraz programu obliczeń optymalizacyjnych obwodów elektrycznego i magnetycznego prądnic. Teza pracy która została na tej podstawie sformułowana brzmi:*

*Dla prądnic ze wzbudzeniem hybrydowym równoległym, o mocy znamionowej  $P_N$ , istnieje stosunek strumieni magnetycznych  $\Phi_{PM} / \Phi_{EM}$  przy którym uzyskuje się stabilizację napięcia w założonym przedziale przy maksymalnej sprawności .*

Wykorzystana w pracy metodyka badań plasuje ją wśród tzw. metod obwodowo-polowych. Algorytm obliczeniowy opiera się bowiem na wykorzystaniu metod polowych, w tym przypadku metody elementów skończonych zarówno 2D jak i 3D, w celu wyznaczenia parametrów schematu zastępczego badanej prądnicy hybrydowej.

Istotną nowość wykorzystaną w pracy stanowi rezygnacja z tradycyjnego w przypadku maszyn synchronicznych modelu dwuosowego dq. W jego miejsce wprowadzono zależność kątową reaktancji synchronicznej  $X_s(\vartheta)$  od kąta  $\vartheta$  zawartego między osią d wirnika a osią przepływu uzwojenia twornika. Powinno to potencjalnie pozwolić na uwzględnienie niesinusoidalnego rozkładu pola oraz – przy większej niż wykorzystana rozdzielczość 5 deg – na uwzględnienie efektów zębokowych. Ta innowacja stanowi niewątpliwie wkład autora w metodykę projektowania maszyn synchronicznych, szczególnie w przypadku konstrukcji nowatorskich jak analizowana prądnica hybrydowa. Autor – ze względu na specyfikę maszyn z magnesami trwałymi umieszczonymi powierzchniowo – zrezygnował z uwzględnienia zjawiska nasycenia. Może to utrudnić uogólnienie otrzymanych wyników na inne rodzaje maszyn elektrycznych.

Najbardziej istotną cechą przedstawionej pracy jest dokonanie pełnej weryfikacji eksperymentalnej otrzymanych wyników symulacyjnych. Dokonano jej zarówno dla prądnicy hybrydowej jak i dla stanowiących jej składowe prądnice ze wzbudzeniem elektromagnetycznym (EM) oraz magnesami trwałymi (PM). Potencjalnie wyniki te mogą posłużyć do weryfikacji samych metod polowych gdyż stanowią bezpośrednią weryfikację wyników symulacji – wskazuje na to szczególnie porównanie wyników pomiarów z obliczeniami równocześnie 2D i 3D. Pewnym niedostatkiem w tym względzie jest brak dokładnych danych dotyczących modeli polowych (gęstości siatki, kształtu siatki w newralgicznych obszarach).

## 2. Metodyka badań

W celu wykazania słuszności tezy pracy autor zastosował przemysłany algorytm badań, ściśle odwzorowanych w strukturze pracy. Można go w formie skróconej przedstawić następująco:

- Wybór obiektu do badań oraz określenie celu i tezy pracy powiązane z przedstawieniem aktualnego stanu wiedzy dotyczącego maszyn z magnesami trwałymi oraz możliwości ich modyfikacji poprzez zastosowanie rozwiązań hybrydowych (rozdziały 1),

- Wykonanie modeli prądnic przewidzianych do realizacji prądnicy hybrydowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych 2D oraz analiza ich podstawowych charakterystyk (rozdział 2),
- Wykonanie modeli prądnic przewidzianych do realizacji prądnicy hybrydowej z wykorzystaniem metody elementów skończonych 3D oraz opracowanie algorytmu obliczeń ich parametrów (rozdział 3),
- Definicja metod pomiarowych służących do identyfikacji parametrów prądnic dla stanów ustalonych i nieustalonych (rozdział 4),
- Definicja modelu matematycznego prądnicy hybrydowej ukierunkowanego na stan ustalony, który posłużył do zdefiniowania algorytmu obliczeniowego będącego celem pracy (rozdział 5),
- Wykonanie modeli fizycznych analizowanych prądnic oraz identyfikacja eksperymentalna ich parametrów oraz charakterystyk (rozdział 6),
- Porównanie wyników symulacji i pomiarów (rozdział 7),

W całej pracy w bardzo przemyślany sposób autor posługuje się równocześnie modelami obwodowymi i polowymi oraz metodami eksperymentalnymi uzyskując wyniki potwierdzające w pełni postawioną tezę. Należy podkreślić iż autorowi udało się uzyskać ten efekt z wykorzystaniem stosunkowo prostego, iteracyjnego algorytmu optymalizacyjnego dzięki bardzo dobrze przemyślanemu procesowi obliczeniowemu korzystającemu z istniejących optymalnych rozwiązań dla maszyn z magnesami trwałymi oraz wzbudzeniem elektromagnetycznym. Dzięki temu nie było konieczne stosowanie bardziej złożonych metod optymalizacji.

Moim zdaniem w pracy można było pominąć tematykę dotyczącą parametrów dla stanów nieustalonych (rozdział 4). Całkowicie wystarczająca byłaby informacja dotycząca metody małego poślizgu oraz zaniku prądu stałego pod kątem wyznaczenia reaktancji synchronicznej. Wyniki analizowane w pracy dotyczą bowiem stanów ustalonych i nie wymagają danych dotyczących parametrów nieustalonych.

### 3. Uwagi merytoryczne

- a) W rozdziale 4.5 wskazane byłoby użycie rachunku operatorowego,
- b) Pominięcie w zależnościach 4.25 i 4.36 rezystancji uzwojenia twornika nie jest dopuszczalne w przypadku maszyn małej mocy (np. „Maszyny synchroniczne – badania i pomiary” pod red. W.Mizi),
- c) Str.82 - Błędne sformułowanie „Z przebiegu czasowego wartości skutecznej” ,
- d) Błąd jednostek w Tabeli 4.2 dotyczących parametrów podprzebieżowych – zamiast [s] powinny być [ms],
- e) Błędny schemat na rys.4.13 gdyż za jego pomocą można wyznaczyć reaktancję fazową a nie synchroniczną. Powinien zostać użyty np. schemat z połączeniem szeregowym 2 uzwojeń fazowych. Tradycyjnie służy on do wyznaczania parametrów w osi q dla modelu dwuosiowego (np. „Maszyny synchroniczne – badania i pomiary” pod red. W.Mizi, str.222, rys.23). Gwarantuje on znajomość kąta przepływu twornika co jest bardzo istotne dla realizacji pomiarów,
- f) Zależności 4.37 oraz 4.39 są zbędne i powinny być połączone odpowiednio z zależnościami 4.38 oraz 4.40,
- g) W zależnościach 5.1 i 5.2 powinna być wykorzystana pulsacja elektryczna a nie mechaniczna,
- h) Wzory 5.4 i 5.5 powinny zawierać kąt  $\alpha$  a nie  $\delta$  (nie zdefiniowany w pracy kąt mocy w teorii maszyn synchronicznych),
- i) Różne oznaczenia strumieni od magnesów oraz od wzbudzenia elektromagnetycznego we wzorach 5.1/5.2 oraz 5.13/5.14,
- j) Wzór 5.2 sugeruje uwzględnienie nasycenia pomijanego w pracy,
- k) W przypadku algorytmu obliczeniowego na str. 92, przedstawionego w postaci schematów blokowych na rys. 5.5 oraz 5.6, brak jednoznacznego matematycznego sformułowania minimalizowanego błędu. Byłoby to bardzo istotne ze względu na to iż ten algorytm jest podstawowym celem pracy (str.19, pierwsza linia),
- l) Wskazane byłoby przedstawienie przykładowych wyników pośrednich algorytmu optymalizacyjnego a nie jedynie wyniku końcowego (str.92),
- m) Błędne oznaczenia funkcji w schemacie blokowym na rys.5.6
- n) Niewłaściwie oznaczone napięcia na rys.6.8, str.102,
- o) Brak formalnej definicji funkcji celu w procesie optymalizacyjnym.

- p) Brak przykładowych wyników pośrednich procesu optymalizacji ani oceny kosztów tego procesu. Autor wspomina jedynie o czasie trwania symulacji 2D i 3D wykorzystywanych w czasie obliczeń (str.128),

#### 4. Pytania dyskusyjne

- a) Czy uwzględniono możliwość zmiany parametrów magnesów trwałych przy wzroście temperatury (rys.2.3) używając metod polowych czy też założono iż stan cieplny nie odbiega od maszyny modelowej ?
- b) Czy analizowano możliwość zastosowania np. algorytmu genetycznego w procesie optymalizacji ?. Pozwoliłoby to być może na większe odstępstwa się od konstrukcji modelowych.
- c) Czy możliwe byłoby uwzględnienie zjawiska nasycenia za pomocą przedstawionego algorytmu poprzez analizę funkcji  $X_s(\vartheta, I)$  zamiast  $X_s(\vartheta)$  ?. Mogłoby to rozszerzyć zakres metody na maszyny IPM (rys.1.4).
- d) Jakie siatki MES zastosowano w poszczególnych modelach ?. Chodzi o przykładowe obrazy siatki dla modeli 2D oraz 3D.
- e) Jaki układ stabilizacji napięcia został wykorzystany w prądnicy hybrydowej (rozd. 7.4) ?

Przedstawione pytania i uwagi mają charakter polemiczny i nie umniejszają wartości naukowej oraz znaczenia praktycznego przedstawionej rozprawy. Odpowiedź na nie powinna jedynie uzupełnić informacje przedstawione w pracy.

#### 5. Uwagi redakcyjne

Rozprawa doktorska składa się ze spisu oznaczeń, ośmiu rozdziałów merytorycznych, bibliografii oraz sześciu załączników. Rozprawa obejmuje 162 stron tekstu. Bibliografia obejmuje 84 pozycji. Wśród nich jest 8 prac autora rozprawy, w tym 4 samodzielne. Chciałbym nadmienić iż całkowity dorobek publikacyjny autora jest znacznie większy i obejmuje łącznie 36 publikacji w przeważającej mierze obejmujących zakres pokrewny do przedstawionego w pracy.

Redakcję rozprawy można uznać za bardzo dobrą. Zarówno tekst jak i elementy graficzne wykorzystane w pracy (rysunki, wzory matematyczne) wykonane są w większości



na wysokim poziomie edytorskim. Nieliczne zauważone błędy redakcyjne wymieniono poniżej:

- a) Po punkcie „rozd.1” powinien się pojawić punkt 1.1 (str. 10),
- b) Brak angielskich podpisów rysunków,
- c) Str.16 , 3/4 linijki : „przedstawiono na rysunki”,
- d) Zbyt długie zdania złożone (np. rozdz.1.3 – 1 paragraf; rozdz.2.3 – 1 paragraf),
- e) „Funkcja celu pracy została sformułowana ....” w pierwszej linii na str. 147,
- f) Podrozdział 1.5 nie istnieje – w pierwszej linii na str. 147 powinien być rozdz. 1.4.

## 6. Podsumowanie i ocena końcowa pracy

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi naturalną kontynuację prac dotyczących maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi prowadzonych pod kierunkiem promotora rozprawy Prof. Tadeusza GLINKI na Wydziale Elektrycznym Pol. Śląskiej oraz w BOBRME Komel.

Czytając tekst pracy można przekonać się, że autor bardzo dobrze orientuje się w zagadnieniach związanych z konstrukcją, projektowaniem i diagnostyką maszyn elektrycznych oraz zastosowaniem w tym zakresie numerycznych metod polowych, optymalizacji oraz pomiarów.

Uważam że przedstawiona rozprawa jest istotnym wkładem autora w szeroko rozumianą elektrotechnikę i teorię przetworników elektromechanicznych. Z przeprowadzonych przez autora pracy badań wynika, że możliwe jest zbudowanie na bazie istniejących konstrukcji prądnic synchronicznych (z magnesami trwałymi i wzbudzanych elektromagnetycznie) nowej hybrydowej konstrukcji spełniającej zadane w tezie pracy wymogi. W związku z powyższym autor uzyskał bardzo istotne wyniki, które są interesujące z punktu widzenia teoretycznego i praktycznego. Wykazał równocześnie słuszność tezy postawionej na początku pracy.

Biorąc pod uwagę, że mgr inż. Stanisław Gawron:

- wywiązał się z postawionych w rozprawie celów,
  - wykazał się umiejętnością formułowania i rozwiązywania trudnych problemów inżynierskich,
  - zaprezentował wysoki poziom wiedzy z elektrotechniki, informatyki i metrologii,
- uważam, że praca doktorska „Prądnica synchroniczna ze wzbudzeniem hybrydowym” **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim**, określone przez obowiązującą

ustawę o stopniach i tytułach naukowych i stawiam Wysokiej Radzie Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*W. Bunka*

