

*Prof. zw. dr hab. inż. Tadeusz J. Sobczyk*

Politechnika Krakowska,  
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej,  
Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii,  
31-155 Kraków, ul. Warszawska 24

Kraków 25.01.2017

## **OCENA**

**rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Aleksandra Leichta  
p.t. "Analiza stanów dynamicznych i ustalonych  
jednofazowego samowzbudnego generatora indukcyjnego"  
opracowana na zlecenie  
Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej**

### **Uwagi ogólne**

Rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandra Leichta podejmuje problem modelowania i badania jednofazowych generatorów asynchronicznych klatkowych. W dobie dużego zainteresowania energią ze źródeł odnawialnych jest to tematyka aktualna. Generatory takie, jako jednostki autonomiczne, mogą spełniać rolę niezależnych lub pomocniczych źródeł energii elektrycznej w jednofazowych instalacjach niskiego napięcia. Ich moce jednostkowe są nieduże, a podstawową zaletą jest prostota budowy. Na ogół takim źródłom nie są stawiane wysokie wymagania dla jakości energii. Nie wydaje się jednak aby znalazły one bardzo szerokie zastosowania. W dobie podejścia prosumenckiego większe znaczenie mogą mieć tego typu generatory współpracujące z komercyjną siecią niskich napięć, lecz takie aplikacje nie są w pracy rozpatrywane.

### **Ocena zawartości pracy**

Praca składa się z siedmiu rozdziałów oraz wykazu literatury. Sformułowanie celu, tezy oraz zakresu rozprawy poprzedza bardzo wnikliwa analiza literatury. Bardzo obszernie są komentowane prace z ostatnich dwóch dekad opublikowane w najpoważniejszych czasopiśmie oraz w materiałach ogólnościatowych konferencjach z zakresu inżynierii elektrycznej. Przywoływane są przy tym zarówno prace dotyczące samowzbudnych generatorów asynchronicznych trójfazowych jak i generatorów jednofazowych, wykazując że prac na temat samowzbudnych generatorów jednofazowych jest znacznie mniej, co w wystarczającym stopniu uzasadnia podjęcie tej tematyki w rozprawie. Omawiane są także prace opublikowane w kraju w ostatnich latach. Na ich tle wspólne publikacje Promotora i Autora rozprawy są znaczące. Uzupełniłbym te prace o rozprawę doktorską pt. „Analiza szczególnego przypadku pracy maszyny asynchronicznej samowzbudnej”, obronioną w roku 1987 w AGH przez Adama Warzechę oraz o późniejszą publikację tego autora „Study on

Excitation Process in Self-Excited Induction Generator” w materiałach konferencji EPNC w roku 1991. W tym przeglądzie literatury Autor, poza cytowaną pierwszą pracą o samowzbudnej pracy generatora asynchronicznego z lat 30. ubiegłego wieku, pomija okres do lat 90., a przecież w drugiej połowie XX wieku także dużo pisano na ten temat.

Ten przegląd literatury uznaję za wyjątkowo dobrze uzasadniający podjęcie tematyki samowzbudnych jednofazowych generatorów asynchronicznych. Za cel pracy Autor uznał analizę możliwości zastosowania jednofazowej maszyny asynchronicznej jako autonomicznego generatora oraz wskazał dwie tezy odnoszące się do kształtu żłobków wirnika wspomagających samowzbudzenia oraz rozkładu układu połączeń kondensatorów w fazach generatora. Jako pewną niezręczność uznaję podkreślanie, że rozważania dotyczą maszyny zaprojektowanej jako silnik, a wykorzystanej jako generator. Stwarza to wrażenie, że wyniki badań odnoszą się jedynie do tego przypadku, a w istocie wnioski sformułowane przez Autora mają znacznie ogólniejszy charakter. W Rozdziale 2 opisano szczegółowo maszynę, która posłużyła do badań modelowych oraz cztery warianty układu połączeń kondensatorów dla uzyskania Jednofazowego Samowzbudnego Generatora Indukcyjnego (JSGI). Opisano także laboratoryjne stanowisko badawcze wraz z układami pomiarowymi wykorzystującymi techniki cyfrowe. Zapewniają one dobry standard pomiarów zarówno dla stanów ustalonych jak i dynamicznych.

W podsumowaniu Rozdziału 1 Autor określił zadania, które pozwoliły osiągnąć cel i udowodnić główne tezy pracy. Odniosę się kolejno do tych zadań.

### *1. Implementacja dwuosioowego modelu 'd,q' do symulacji stanów dynamicznych pracy generatora.*

Autor wykorzystuje model generatora dwufazowego zaczerpnięty z literatury i przedstawia wyniki symulacji ilustrujących proces samowzbudzenia oraz obciążania generatora dla wspomnianych wcześniej układów wspomagających samowzbudzenie. Wnioski z tych badań potwierdzają, że przy zastosowaniu modelu 'd,q' można symulować proces samowzbudzenia i obciążania w różnych wariantach połączeń kondensatorów w układzie JSGI, co wydaje się oczywiste. Pozwoliły one Autorowi wskazać korzystne układy połączeń kondensatorów.

W moim odczuciu Autor nie do końca rozumie ideę uwzględniania nieliniowości w modelu 'd,q', o czym świadczy stwierdzenie (w górnym akapicie na stronie 36) że: „... mogą istnieć różnice pomiędzy krzywymi magnesowania w osiach 'd' i 'q', lecz zazwyczaj są one niewielkie i przy modelowaniu stanów przejściowych możliwe jest przyjęcie do obliczeń tej samej charakterystyki dla obydwu uzwojeń.”. W nieliniowym obwodzie magnetycznym maszyny o stanie jego nasycenia decydują wszystkie prądy i nie istnieją osobne drogi magnetyczne dla strumieni cewek w osiach 'd' i 'q'. Autor w spisie literatury umieścił moją książkę, lecz najwyraźniej niezbyt uważnie zapoznał się z ideą uproszczonego modelowania nieliniowości głównego obwodu magnetycznego maszyny, która prowadzi do modelu 'd,q' wykorzystanego w pracy.

### *2. Implementacja modelu na podstawie teorii pól wirujących do symulacji stanów ustalonych pracy generatora.*

Tak jak poprzednio, Autor wykorzystuje model maszyny dwufazowej zaczerpnięty z literatury. Posługuje się schematami zastępczymi maszyny dwufazowej o różnych

uzwojeniach głównym i pomocniczym dla stanów ustalonych, uwzględniając kondensatory dodane do uzwojeń aby otrzymać JSIG. Wybór takiego modelu uzasadnia wygodą rozwiązywania stanów ustalonych. Nie jest dla mnie jasne dlaczego Autor pisze w akapicie dolnym na stronie 33, że jest to model „...oparty na teorii dwóch pól wirujących”, nazywając go jednocześnie „... modelem opartym o metodę składowych symetrycznych”. Pierwsze stwierdzenie sugeruje, że użyty model powstaje w wyniku fizycznej interpretacji zjawisk w maszynie dwufazowej, w której uzwojenia stojana wzbudzają wirujący przepływ eliptyczny. Drugie stwierdzenie mówi, że jest to model powstały w wyniku zmiany zmiennych użytych do opisu maszyny, w którym zamiast rzeczywistych prądów i napięć faz stojana wprowadza się, zdefiniowane transformacją liniową, składowe symetryczne prądów i napięć, co jest operacją matematyczną. Nie jest dla mnie jasne w jaki sposób jest uwzględniana w takim modelu nieliniowość obwodu magnetycznego i w jakim stopniu jest on kompatybilny z modelem  $'d,q'$ . W schematach zastępczych na rysunkach 3.6 oraz 3.7 występują dwie indukcyjności magnesujące dla składowej zgodnej i przeciwnej, a przecież nasycenie obwodu magnetycznego zależy zarówno od prądów składowej zgodnej jak i przeciwnej. Efekty nasyceniowe w obwodzie magnesowanym przepływem eliptycznym są całkiem inne niż od przepływów kołowych o różnych amplitudach wirujących w przeciwnych kierunkach, działających niezależnie. W modelu prezentowanym przez Autora nieliniowość, konieczną do samowzbudzenia, wprowadza charakterystyka przedstawiona na rysunku 3.9, nazwana przez Autora charakterystyką magnesowania, co jest niezręcznością, gdyż tradycyjnie charakterystykę magnesowania uzależnia się od prądu magnesującego. W tym wypadku powinien to być zastępczy prąd magnesujący zależny od prądów wszystkich uzwojeń maszyny.

W oparciu o taki model Autor podał procedurę wyznaczania statycznych charakterystyk zewnętrznych JSIG, tj. zmienności napięcia na generatorze w funkcji mocy obciążenia, dla różnych układów połączeń kondensatorów. Ilustrują one dobrze wpływ układu połączeń kondensatorów na obciążalność JSIG.

### 3. Opracowanie modelu polowo-obwodowego JSIG w środowisku programu Flux2D

Jest to najważniejsze zadania zrealizowane przez Autora w rozprawie. Modele polowo-obwodowe stają się już dość powszechnie stosowanym narzędziem do analizy maszyn elektrycznych lecz wciąż jeszcze lokują się w strefie badawczej. Autor utworzył model polowo-obwodowy JSIG w środowisku komercyjnego pakietu Cedrat Flux2D wykorzystującego metodę elementów skończonych. Jest to model bazujący na obliczeniu rozkładu pola w dwuwymiarowym przekroju maszyny, w którym strefy czołowe są modelowane zastępczo przez skupione elementy R,L które pozwalają odwzorować strukturę połączeń uzwojeń stojana oraz klatki wirnika. Pozwoliło to Autorowi uwzględnić w modelu nieliniowość rdzenia zakładając jednoznaczność jego charakterystykę magnesowania lecz pomijając przewodność elektryczną oraz histerezę. Uwzględniono natomiast zjawisko wypierania prądów w prętach klatki. Model uwzględnia także jednostajny ruch obrotowy wirnika wykorzystując do powiązania siatek elementów skończonych stojana oraz wirnika tzw. powierzchnię ślizgową. Moment elektromagnetyczny może być wyznaczany w tym modelu na podstawie zmienności koenergii magnetycznej w funkcji kąta obrotu wirnika.

Model utworzony przez Autora odpowiada obecnym standardom w pracach badawczych z zakresu wykorzystywania metod polowych do modelowania maszyn elektrycznych.

#### *4. Analiza zjawiska samowzbudzenia JSIG przy wykorzystaniu modelu polowo-obwodowego oraz modelowanie zjawiska remanentu magnetycznego.*

W modelu polowo-obwodowym JSIG utworzonym przez Autora nie jest uwzględniana histereza magnetyczna materiału rdzenia, a w związku z tym Autor napotkał trudność wprowadzenia do modelu magnetyzmu szczątkowego, wymaganego dla zainicjowania procesu samowzbudzenia. Przeprowadził symulację samowzbudzenia przy użyciu modelu polowo-obwodowego porównując trzy sposoby modelowania strumienia remanentu magnetycznego: umieszczając magnesy trwale na wirniku lub warstwę prądową w szczelinie powietrznej oraz inicjując samowzbudzenie prądem rozładowania wstępnie naładowanego kondensatora w uzwojeniu pomocniczym. Ta trzecia droga została uznana przez Autora jako najbliższa pomierzonemu procesowi samowzbudzenia modelowanego JSIG i była stosowana w dalszych badaniach. Proces samowzbudzenia modelowano przy stałej prędkości w zakresie pracy prądnicowej przy poślizgu odpowiadającym wartości znamionowej przy pracy silnikowej. Autor zwraca przy tym uwagę, że komercyjne programy analizy pola elektromagnetycznego nie dają możliwości dokładnego uwzględniania zjawiska magnetyzmu szczątkowego i nie ma wiele prac na ten temat. Chciałbym przy tej okazji zwrócić uwagę Autora na monografię „Wyznaczania rozkładu pola magnetycznego w materiałach magnetycznie miękkich z uwzględnieniem histerezy i anizotropii” (W. Mazgaj, Monografia Politechniki Krakowskiej nr 379, seria Inżynieria Elektryczna i Komputerowa, 2010), która prezentuje podejście stwarzające takie możliwości.

Symulacje przeprowadzono dla różnych układów połączeń kondensatorów oraz różnych ich wartości. Wyniki wykazały korzystny wpływ kondensatora równoległego w uzwojeniu głównym, czego należało się spodziewać przez analogię do generatora trójfazowego. W porównaniu z wynikami procesu samowzbudzenia na stanowisku laboratoryjnym wyniki symulacji wypadają nieźle. Autor ocenia zgodność amplitudową na poziomie 10%. Nieco gorszą zgodność uzyskuje się dla czasów koniecznych do samowzbudzenia, lecz Autor nie podaje czy i jak zależy to od wartości początkowego naładowania kondensatora inicjującego samowzbudzenie.

#### *5. Wpływ otwarcia żłobka wirnika na proces samowzbudzenia.*

Bardzo ciekawym efektem opisanym przez Autora w pracy (oraz we wcześniejszych publikacjach z Promotorem) jest wskazanie trudności samowzbudzenia się maszyny o zamkniętych żłobkach w przypadkach gdy jest wykorzystywany remanent magnetyczny. Zmiana kształtu żłobków na półzamknięte zmienia rozkłady pola na tyle, że samowzbudzenie jest możliwe praktycznie w każdych warunkach. W rozprawie szczegółowo przeanalizowano to zjawisko prawidłowo interpretując wyniki analizy pola. Mogło ono być wyjaśnione jedynie przez model polowo-obwodowy. Modele obwodowe wymagałyby określenia nieliniowego charakteru zarówno indukcyjności głównej jak i indukcyjności rozprożeń, szczególnie przy małych prądach magnesujących, co nie byłoby zadaniem łatwym. Jest to istotny rezultat tej rozprawy.

Badanie procesu samowzbudzenia przy użyciu modelu połowo-obwodowego zostało bardzo obszernie podsumowane, dając praktyczne wskazówki do wyboru układu JS GI.

#### *6. Analiza połowo-obwodowa stanów ustalonych dla różnych układów połączeń kondensatorów w JS GI*

Analiza stanów ustalonych została przeprowadzona wykorzystując model połowo-obwodowy dla każdego z czterech układów połączeń kondensatorów w JS GI. Dla każdego przypadku wyznaczono rodziny charakterystyk statycznych wybranych wielkości charakteryzujących stan ustalony JS GI otrzymanych z modelu oraz zaznaczono na nich punkty z badań modelu laboratoryjnego. Wszystkie badania symulacyjne prowadzono przy założeniu stałej prędkości obrotowej, co praktycznie eliminuje wykorzystanie równania ruchu obrotowego i wpływ obciążenia na prędkość obrotową. Dane otrzymane z badań symulacyjnych aproksymowano liniami ciągłymi, gubiąc informacje dla których punktów pracy były one rzeczywiście obliczane. W niektórych wypadkach daje to pewną nieregularność krzywych. Może to oznaczać że dokładność obliczeń rozkładu pola jest dla różnych punktów różna.

Wyniki tych badań stanowią bardzo obszerny materiał, który uzupełnia studium poszukiwania najkorzystniejszej budowy uzwojenia pomocniczego dla ograniczenia jego napięcia oraz prądu, a także poprawę stabilności pracy JS GI oraz ograniczenie zmienności napięcia wyjściowego. Wyniki tych badań uważam za bardzo wartościowe, podkreślające bardzo dobre zrozumienie zjawisk oraz wymagań technicznych od JS GI. Szkoda że Autor nie podał czasochłonności oraz wymagań sprzętowych dla wykonania całego cyklu obliczeniowego charakterystyk statycznych dla jednego układu połączeń kondensatorów.

#### *7. Badanie stanu zwarcia na zaciskach JS GI przy pracy autonomicznej*

Badania te miały na celu rozpoznanie jakie zagrożenia stwarza zwarcie bezpośrednio na zaciskach wyjściowych JS GI. Do badań użyto model połowo-obwodowy, symulując zwarcia na zaciskach JS GI w stanie biegu jałowego dla wszystkich czterech układów połączeń kondensatorów, przy założeniu stałej prędkości obrotowej. Eksperymentalnie zweryfikowano jedynie przypadek zwarcia na wyjściu JS GI w układzie z kondensatorem w uzwojeniu pomocniczym. W tym przypadku, jak również w układzie z równoległe połączonym kondensatorem w uzwojeniu głównym, zagrożenie zwarcie nie występuje, gdyż następuje samoczynne rozmagnesowanie JS GI. Wykazano symulacyjnie, że przebiegi prądów i napięć zwarcia kształtują inaczej przy zwarciach na zaciskach generatora w układzie z szeregowym i równoległo-szeregowym połączeniem kondensatorów w uzwojeniu głównym. Zwarcia mogą wówczas stwarzać zagrożenia dla uzwojeń JS GI. Badanie stanów zwarcia stanowi dobre i ciekawe uzupełnienie informacji o właściwościach JS GI. Z obowiązku recenzenta pozwolę sobie jednak zauważyć, że po tak rozbudowanym modelu połowo-obwodowym należałoby się spodziewać lepszej zgodności wyników z badaniami eksperymentalnymi w zakresie procesów przejściowych. Bardzo duże rozbieżności występujące w przebiegach napięć i prądów przy zwarcie uzwojenia głównego w układzie z kondensatorem w uzwojeniu pomocniczym są zastanawiające i wymagają komentarza Autora na podczas publicznej obrony rozprawy.

### 3. Podsumowanie

Ocena zakresu i wyników wymienionych powyżej zadań cząstkowych pozwala mi jednoznacznie stwierdzić, że Autor osiągnął zamierzone cele i wykazał postawione tezy rozprawy. Osiągnął to dzięki modelowi polowo-obwodowemu utworzonemu na bazie komercyjnego oprogramowania. Jeżeli nawet utworzenie modelu wymagało jedynie opanowania techniki posługiwania się pakietem Flux 2D, to przeprowadzenie tak szerokich i dobrze zaprojektowanych badań wymagało bardzo dobrej znajomości i świadomości zjawisk w samowzbudnych maszynach indukcyjnych, co nadaje im rangę pracy badawczej. Na tle modelu polowo-obwodowego, który uwzględnia rzeczywiste kształty obwodu magnetycznego i rozkładu uzwojeń zwojeń oraz w miarę rzeczywiste właściwości materiałów czynnych, modele obwodowe przytoczone przez Autora w pracy prezentują się bardzo skromnie. Obowiązują one przy założeniu mono-harmoniczności przepływów, zastępczej reprezentacji klatki, liniowości obwodów magnetycznych strumieni rozproszenia i uproszczonego modelowania nieliniowości głównego obwodu magnetycznego. Są to założenia znacznie ograniczające ich kompatybilność z modelem polowo-obwodowym. Jako recenzent chciałbym postawić Autorowi pytanie. W jakim celu przytacza modele obwodowe i przeprowadza w oparciu o nie badania właściwości JSJI, skoro w dalszej części rozprawy nigdzie tych wyników nie wykorzystuje? Wyniki badań laboratoryjnych JSJI porównuje bowiem jedynie z wynikami z modelu polowo-obwodowego. Nie przedstawia też porównania wyników obliczeń z modeli obwodowych z wynikami otrzymanymi z modelu polowo-obwodowego ani wyników otrzymanych z modeli obwodowych między sobą. Nie dyskutuje problemu ich przydatności i poprawności przy badaniu właściwości SJGI. A przecież każdy z tych trzech modeli ma różne założenia upraszczające, różne możliwości oraz różną uciążliwość przygotowania danych oraz czasochłonność obliczeń. Skłania mnie to do wniosku, że przywołanie w tej rozprawie modeli obwodowych JSJI jest zbędne. Tym bardziej, że w moim odczuciu wiedza Autora w zakresie modeli obwodowych badanej maszyny dwufazowej jest pobieżna. Można to zauważyć szczególnie przy komentarzach do uwzględnianiu nieliniowości głównego obwodu magnetycznego w modelach obwodowych prezentowanych w rozprawie. Proponuję, aby Autor ustosunkował się do powyższych uwag podczas publicznej obrony rozprawy.

### Wniosek końcowy

Reasumując, wyrażam opinię, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Aleksandra Leichta p.t. "Analiza stanów dynamicznych i ustalonych jednofazowego samowzbudnego generatora indukcyjnego" spełnia wymogi Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.), w brzmieniu ustalonym Ustawą z dnia 18 marca 2011 r. (Dz. U. Nr 84, poz. 455 z późn. zm.). Proponuję Radzie Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej jej przyjęcie i dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

