

Adres: Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, tel. 71 3202954, e-mail: jan.zawilak@pwr.edu.pl

W dniu 28 stycznia 2017 r. odszedł od nas na zawsze dr hab. inż. Ryszard Rut, profesor Politechniki Rzeszowskiej, wieloletni, bardzo ceniony dydaktyk, wybitny specjalista z maszyn elektrycznych. Nauką polską straciła wielką Osobowość, reprezentującą dyscyplinę naukową Elektrotechniką. Pamięć o Zmarłym Profesorze pozostanie na zawsze w pamięci Jego uczniów, kolegów i współpracowników.

Cześć Jego Pamięci

*Przewodniczący Sekcji Maszyn i Transformatorów Komitetu Elektrotechniki PAN
Prof. Marian Łukaniszyn*

ŚP. DR HAB. INŻ. RYSZARD RUT PROFESOR POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

1941 – 2017



Urodził się 8 lipca 1941 r. w Przeworsku, syn Mateusza i Stefanii. Szkołę podstawową ukończył w Przeworsku 1954 r., następnie Technikum Mechaniczno – Elektryczne w Bielsku – Białej. Studiował na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej w latach 1958 -63. W dniu 31 października 1963 r. obronił pracę magisterską i uzyskał dyplom magistra inżyniera elektryka. Od 1 listopada 1963 r. rozpoczął pracę jako nauczyciel akademicki na etacie asystenta w Katedrze Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej kierowanej przez prof. Zygmunta Gogolewskiego. Po roku został przeszerogowany na starszego asystenta. Od 1 października 1970 r. przenosi się do Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Rzeszowie (obecnie Politechnika Rzeszowska), za zgodą obydwóch Rektorów. W Pol. Rzeszowskie początkowo pracuje na etacie st. asystenta, a od 01.08.1971 na etacie wykładowcy. Stopień naukowy doktora uzyskał 25 czerwca 1974 r. Temat rozprawy doktorskiej „Działania elektrodynamiczne i termiczne prądu w pręcie klatki sil-

nika asynchronicznego głębokożłobkowego w stanie zwarcia.” Promotorem był prof. Władysław Latek z Pol. Warszawskiej, a recenzentami Prof. Władysław Paszek, prof. Bogdan Skalmierski i doc. Zygmunt Bajorek. Przewód przeprowadziła i stopień naukowy doktora nadała Mu Rada Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Od 01.07.1974 r. zostaje zaangażowany na etacie adiunkta, od 01.10.1978 r. na etacie starszego wykładowcy i ponownie od 01.10.1982 r. na etacie adiunkta, na którym pracuje do 30.06.2003 r. Stopień naukowy doktora habilitowanego uzyskał w 2002 r., na podstawie dorobku naukowego i monografii pt. „Analiza nieustalonych stanów termicznych uzwojeń silników indukcyjnych dużych mocy w trudnych warunkach ruchowych.” Przewód habilitacyjny przeprowadził Rada Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej zakończony kolokwium habilitacyjnym i nadaniem stopnia naukowego doktora habilitowanego. Ja byłem jednym z recenzentów przewodu habilitacyjnego. Z dniem 01.07.2003 został mianowany przez Rektora Pol. Rzeszowskiej na stanowisko profesora nadzwyczajnego na którym pracował do 27.07.2014 r. Od 01.10.2014 do 28.01.2017, to jest do dnia śmierci, był zatrudniony jako profesor nadzwyczajny Pol. Rzeszowskiej na umowę o dzieło.

W Pol. Rzeszowskiej pełnił funkcje organizacyjne:

- od 01.09.1978 do 31.08.1984 r. był Zastępcą Dyrektora Instytutu Elektrotechniki,
- od 01.10.1981 do 30.09.1982 r. Prodziekan Wydziału Elektrycznego,
- od 01.02.1982 do 31.08.1982 r. Kierownik Zakładu Konstrukcji Maszyn Elektrycznych,
- od 01.10.1984 do 30.08.1987 r. p.o. Kierownik Zakładu Konstrukcji Maszyn Elektrycznych,
- od 01.09.1987 do 28.02.1995 r. Kierownik Zakładu Konstrukcji Maszyn Elektrycznych.

Był Opiekunem Zespołu Pieśni i Tańca Pol. Rzeszowskiej „Połoniny” (01.10.1975-30.09.1979 r.). Przewodniczył Komitetowi Organizacyjnemu II Zjazdu Absolwentów z okazji XXV lecia Wydziału Elektrycznego Pol. Rzeszowskiej.

Działalność dydaktyczna obejmowała prowadzenie wszystkich rodzajów zajęć, to jest wykładów, seminariów i ćwiczeń: tablicowych, projektowych i laboratoryjnych z między innymi z przedmiotów: Maszyny elektryczne, Elektryczne układy napędowe, Awaryjność i diagnostyka układów elektromaszynowych, Energooszczędność w energetyce. Wypromował 173 inżynierów i magistrów inżynierów. Był recenzentem prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich. Był opiekunem naukowy 2 doktorantów na studiach III stopnia.

Ryszard Rut od początku pracy zawodowej już w Pol. Śląskiej, oprócz pracy dydaktycznej, włączył się do prac badawczych prowadzonych w przemyśle. Prowadził badania eksploatacyjne i diagnostyczne maszyn elektrycznych dużej mocy w hutach, kopalniach, koksowniach, elektrowniach i elektrociepłowniach. Większość tych prac prowadziliśmy wspólnie. Po przeniesieniu się do Rzeszowa zorganizował własny zespół badawczy i badania te kontynuował. Nawiązał współpracę z Branżowym Ośrodkiem Badawczo Rozwojowym Maszyn Elektrycznych (obecnie Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych Komel), dla którego prowadził badania prototypowych rozwiązań silników indukcyjnych klatkowych dużej mocy przeznaczonych dla energetyki. Dotyczyło to silników o długim czasie rozruchu i silników o dużej częstotliwości włączeń. Zorganizował w elektrowni Stalowa Wola specjalne stanowisko badawcze na którym realizował program badań konstruktorskich silników wysokonapięciowych, w szczególności w zakresie badań trwałościowych i badań cieplnych silników indukcyjnych dużej mocy. Wyniki tych badań były bezpośrednio wykorzystane przez KOMEL w projektach nowych rozwiązań silników. Były wykorzystane także do weryfikacji modeli matematycznych opracowanych w ramach prac doktorskich realizowanych przez Jego współpracowników oraz w Jego monografii habilitacyjnej. W działalności naukowej stworzył Rzeszowską Szkołę naukową maszyn elektrycznych. Szkoła ta zanotowała największe osiągnięcia w tematyce silników indukcyjnych klatkowych wysokiego napięcia. Jego współpracownicy rozszerzyli prowadzone badania na tematykę maszyn elektrycznych wysokoobrotowych reluktancyjnych przełączalnych. Zaowocowało to zrealizowanymi pracami doktorskimi i pracami habilitacyjnymi: Jana Mroza, Mariusza Korkosza i Jana Prokopa.

Wieloletnia owocna współpraca z BOBRME Komel była czynnikiem decydującym, że został wybrany do Rady Naukowej Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. Funkcje członka Rady pełnił w 3-ich kolejnych kadencjach w lata: 1999 – 2003, 2003 – 2007, 2007- 2011. Jego praca była aktywna, uczestniczył w posiedzeniach Rady, brał udział w dyskusji, doradzał dyrektorowi.



Podczas SME 2009 w zamku Krasieczynie

Profesor Ryszard Rut w 2009 r. przewodniczył Komitetowi Organizacyjnemu XLV Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych, w pięknym zamku w Krasieczynie. Na dziedzińcu zamkowym zorganizował zapamiętany przez uczestników koncert Chóru „Połoniny”.

Profesor Ryszard Rut zmarł nagle w sobotę 28 stycznia 2017 r. Kochał swoją pracę, w przeddzień śmierci, w piątek miał jeszcze konsultacje ze studentami. Jego śmierć pogrzyżała w żalobie: żonę Teresę, synów Tomasza i Marcina, Synowe oraz 4 Wnuków (Weronika, Julia, Zofia i Franciszek). Obydwaj synowie ukończyli Akademię Sztuk Pięknych im. Jana Matejki w Krakowie są artystami i pracują w swoich zawodach. Tomasz z Rodziną mieszka i pracuje w Szwecji, a Marcin mieszka w Rzeszowie, jest nauczycielem kowalstwa artystycznego w szkole średniej i ma swoją pracownię.

W Gazecie Politechniki Rzeszowskiej, koleżanki i koledzy z Zakładu Elektrodynamiki i Systemów Elektromagnetycznych, wspominając profesora Ryszarda Ruta, napisali:



„Był człowiekiem zasad i miał siłę i odwagę to manifestować w każdych czasach, w jakich przeszło mu żyć. Przyszłość i życzliwość uważał za przywilej i obowiązek człowieka. Był surowym i wymagającym nauczycielem akademickim. Kochał i znał swoją pracę, miał poczucie jej sensu i wartości. Miał niezwykłą ciekawość świata, jednak Jego pasją była Polska, jej historia, kultura i sztuka. Chciał żyć w kraju nowoczesnym, europejskim i demokratycznym. Uważał, że drogą w tym kierunku jest szeroko rozumiana edukacja, której poświęcił całe życie”.

Odszedł wybitny naukowiec, profesor i nauczyciel akademicki, wspaniały człowiek.

PROFESORZE będzie nam CIEBIE bardzo brakowało. Liczymy, że nadal będziesz nam pomagał, teraz patrząc na nas z GÓRY.

Opracował: prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka

Nagroda Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za osiągnięcia w opiece naukowej i dydaktycznej dla dr hab. inż. Mieczysław Ronkowskiego, profesora Politechniki Gdańskiej



Dnia 09 grudnia 2016 roku, z rąk Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego Jarosława Gowina, nagrodę za osiągnięcia w opiece naukowej i dydaktycznej otrzymał dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski, prof. nadzw. PG. Uroczystość odbyła się w Muzeum Historii Żydów Polskich POLIN w Warszawie, w obecności kilkudziesięciu wybitnych naukowców z całej Polski.

Prof. Mieczysław Ronkowski, który pracuje w Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki, podkreślił, iż bardzo ceni nagrodę za osiągnięcia w opiece naukowej i dydaktycznej.

„Można zaryzykować twierdzenie, że nasze osiągnięcia naukowe z czasem przeminą, stracą na znaczeniu, bo ciągle jesteśmy na początku poznawania świata. Natomiast nasze osiągnięcia jako nauczycieli i wychowawców mają szansę trwać wiecznie. Myślę, że dobrym przykładem jest na pewno słynny, kwantowy człowiek – Richard Feynman, którego osiągnięcia w dynamice kwantowej z czasem przeminą, ale nie przeminą jego osiągnięcia jako znakomitego nauczyciela akademickiego, znanego ze swoich słynnych wykładów z fizyki – mówi prof. Ronkowski”.



Działalność prof. Ronkowskiego ma wymiar międzynarodowy. Wypromował 7 doktorów. Dwie rozprawy doktorskie zrealizowane pod jego kierunkiem miały charakter projektów polsko-francuskich. Do tej pory był opiekunem ponad 50 prac dyplomowych magisterskich i inżynierskich, w tym wielu zrealizowanych za granicą lub we współpracy z zagranicznymi ośrodkami. W latach 1996, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002 i 2003 był profesorem wizytującym w Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT). Od roku 2001 jest pełnomocnikiem rektora PG ds. współpracy z INPT. W ramach tej współpracy realizowane są m.in. dwusemestralne studia w INPT dla magistrantów i doktorantów z Politechniki Gdańskiej, jak również staże wakacyjne na PG dla studentów z INPT oraz wspólne projekty doktorskie. Prof. Ronkowski był opiekunem ponad 15 dyplomantów, którzy otrzymali zarówno dyplomy INPT, jaki i PG. Większość prac była realizowana w ramach staży przemysłowych w przedsiębiorstwach francuskich. Od roku 2014

profesor współorganizuje współpracę dydaktyczną między naszą uczelnią a Purdue University Polytechnic Institute, West Lafayette, USA.



Wybitni polscy naukowcy są gwarantem budowy prawdziwie innowacyjnej gospodarki – powiedział wicepremier Jarosław Gowin, minister nauki i szkolnictwa wyższego podczas uroczystości wręczenia Nagród Ministra za 2016 rok.

Opracował: dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. P. Wr.

STOPNIE NAUKOWE

Dr inż. Łukasz Sienkiewicz – *Concept, implementation and analysis of the piezoelectric resonant sensor/actuator for measuring the aging process of human skin (Koncepcja, realizacja i analiza sensora/aktuatora piezoelektrycznego do pomiaru procesu starzenia się ludzkiej skóry).*

Promotorzy: dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski, prof. nadzw. PG

dr hab. inż. Jean-François Rouchon, prof. INPT

Promotorzy pomocniczy: dr inż. Grzegorz Kostro, adiunkt PG,

dr inż. François Pigache, adiunkt INPT

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, prof. zw. Politechniki Śląskiej

prof. dr hab. inż. Sławomir Wiak, prof. zw. Politechniki Łódzkiej

prof. Lionel Petit, prof. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA de Lyon)

Stopień doktora nauk technicznych (z wyróżnieniem) w Dyscyplinie Elektrotechnika nadała Rada Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w dniu 07 czerwca 2016 r.

Polsko-francuska Komisja przewodu doktorskiego podjęła decyzję, w dniu 07 czerwca 2016 r., o nadaniu mgr. inż. Łukaszowi Sienkiewiczowi stopnia doktora Institut National Polytechnique de Toulouse. Praca do wglądu w Bibliotece Głównej Politechniki Gdańskiej oraz w Institut National Polytechnique de Toulouse, Tuluza (Francja). Praca do wglądu w Bibliotece Głównej Politechniki Gdańskiej oraz w Institut National Polytechnique de Toulouse, Tuluza (Francja).

MAPA ROZWOJU DYSCYPLINY ELEKTROTECHNIKA - uzupełnienie

Nawiązując do informacji w biuletynie nr 74 ze stycznia 2015 r. zamieszczamy uzupełnienie dotyczące nowych osiągnięć badawczych w dziedzinie maszyn elektrycznych.

2.4. Maszyny Elektryczne i Transformatory

2.4.1. Maszyny elektryczne

2.4.1.1. Aktualne zadania badawcze

2.4.1.2. Osiągnięcia badawcze w dziedzinie maszyn elektrycznych

-wielofazowe maszyny synchroniczne o uzwojeniach ułamkowo-żłobkowych,

-maszyny o wzbudzeniu hybrydowym i barierami magnetycznymi,

-maszyny synchroniczne dużych mocy z magnesami trwałymi (LSPMSM),

-materiały inteligentne w przetwornikach i aktuatorach.

2.4.2. Transformatory energetyczne

2.4.2.1. Aktualne zagadnienia badawcze

2.4.2.2. Problematyka elektromagnetyczna w projektowaniu transformatorów

2.4.2.3. Diagnostyka eksploatacyjna transformatorów energetycznych

2.4.2.4. Proponowana tematyka badań w zakresie transformatorów

2.4. Maszyny Elektryczne i Transformatory

Redakcja naukowa: prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, Politechnika Śląska

prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski, Politechnika Łódzka

Wprowadzenie.

Maszyny elektryczne (turbogeneratory i hydrogeneratory) i transformatory blokowe stanowią główne elementy systemu elektroenergetycznego w obszarze wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej. Transformatory rozdzielcze odgrywają rolę pośredniczącą w systemach przesyłowych i dystrybucyjnych. Silniki wykonawcze o różnych zasadach działania i właściwościach są powszechnie stosowane w napędach: maszyn roboczych, pojazdów trakcyjnych, urządzeń gospodarczych itp. Nic nie wskazuje na to, aby dotychczasowa rola maszyn elektrycznych i transformatorów mogła ulec zmniejszeniu.

2.4.1. Maszyny elektryczne

Wstęp.

Polska jest znaczącym producentem maszyn elektrycznych. Fabryki maszyn elektrycznych pomyślnie przeżyły transformację gospodarczą w latach 90-ych XX wieku. Stało się tak, gdyż maszyny elektryczne produkowane w tych fabrykach spełniały standard światowy i mimo ograniczonej sprzedaży w Polsce i krajach Europy Wschodniej, to eksport maszyn elektrycznych do USA, Kanady i krajów Europy Zachodniej, zaowocował tym, że fabryki nie zbankrutowały. Maszyny elektryczne były projektowane w kraju i były produkowane według własnej technologii. Fabryki maszyn elektrycznych jako jedne z pierwszych zostały wszystkie sprywatyzowane.

Stan obecny jest następujący:

- generatory synchroniczne są produkowane i remontowane w fabryce EthosEnergy Poland SA. w Lublińcu (dawniej ENERGOSERWIS, a następnie TurboCare) i w firmie ALSTOM we Wrocławiu (dawniej DOLMEL),
- silniki indukcyjne w firmie Cantoni Motor S.A. do której należą fabryki: BESEL, INDUKTA, CELMA i EMIT oraz w fabryce TAMEL (BROOK CROMPTON ATB Technology in Motion. ATB Tameł S.A.).

W lipcu 2009 roku Komisja Europejska przyjęła Rozporządzenie Nr 640/2009 w sprawie wdrażania Dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczącej wymogów ekoprojektu dla silników elektrycznych. Oznacza to, że na terenie Unii Europejskiej wprowadzone zostały usankcjonowane prawnie wymogi dotyczące efektywności energetycznej 3-fazowych silników indukcyjnych 2, 4 i 6-biegunowych sprzedawanych na rynku unijnym. Klasyfikację i oznakowanie IE wprowadza norma IEC 60034-30. Nowy sposób klasyfikacji obowiązuje dla silników 2, 4 i 6-biegunowych o mocach od 0,75 do 375 kW i napięciu znamionowym do 1000 V. Od dnia 1 stycznia 2015 r. silniki indukcyjne (a od 01.01. 2017 r. wszystkie silniki) o mocy znamionowej w zakresie 7,5–375 kW muszą odpowiadać co najmniej klasie sprawności IE3 (najwyższy poziom sprawności - premium), lub odpowiadać klasie sprawności IE2 (silniki o podwyższonej sprawności - high efficiency), przy założeniu zastosowania ich w układzie napędowym o regulowanej prędkości obrotowej.

2.4.1.1. Aktualne zadania badawcze

Aktualne zagadnienia badawcze w zakresie generatorów synchronicznych powinny obejmować sferę projektowania, technologii, badań w fabryce i zabezpieczenie niezawodnej eksploatacji oraz diagnostykę. Od lat 60-ych XX wieku prowadzono badania w koncernach światowych, a także w Polsce, nad wykorzystaniem nadprzewodnictwa w obwodzie wzbudzenia. Jak dotychczas nadprzewodnictwo nie jest szerzej wykorzystywane w konstrukcji generatorów synchronicznych, gdyż koszty z tym związane są za duże. Postęp w inżynierii magnesów trwałych stworzył warunki do budowy generatorów synchronicznych ze wzbudzeniem hybrydowym. Obniży się w ten sposób straty mocy wzbudzenia, a więc uzyska się ten sam efekt, który oczekiwano uzyskać stosując nadprzewodnikowy układ wzbudzenia. Hybryda mogła by mieć około (80 – 90)% wzbudzenia magnesami trwałymi i około (20 – 10)% wzbudzenia elektromagnetycznego, które zapewniałoby wymagany zakres regulacji strumienia wzbudzenia.

Aktualne zagadnienia badawcze w silnikach i napędach elektrycznych powinny koncentrować się na energooszczędności [2], a więc na budowie maszyn o zmniejszonych stratach mocy, pracujących niezawodnie i nie wymagających częstych przeglądów i remontu. Z wieloletniego doświadczenia przemysłowego wiemy, że znaczna część pracujących w Polsce napędów jest zaprojektowana nieekonomicznie, maszyny elektryczne nie są poprawnie dobrane do wymagań układu napędowego. Dotyczy to przede wszystkim silników indukcyjnych wysokiego napięcia zasilanych bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej. Na przykład pompy chłodzące w hutach są uruchamiane kilkadziesiąt razy na dobę, a zastosowane silniki wytrzymują 3000 – 5000 rozruchów, wentylatory na szybach wentylacyjnych w kopalniach mają czasy rozruchu dochodzące do kilkadziesiątu sekund, a silniki mają dopuszczalny czas rozruch 20 sekund. W większości napędów stosuje się silniki przewymiarowane, co zmniejsza sprawność energetyczną napędu. W świetle tych przykładów podwyższona sprawność energetyczna silników elektrycznych nie determinuje kosztów eksploatacyjnych napędu, gdyż oszczędność energii w kosztach całkowitych eksploatowanego napędu stanowi znikomy procent. Jednak trendy światowe są takie aby produkować maszyny elektryczne o coraz wyższej sprawności. Na przykład w USA

i Kanadzie, już od roku 1997, jest prawnie zakazana sprzedaż silników indukcyjnych nie spełniających warunków sprawności podanych w standardzie NEMA.

W sposób znaczący można zwiększyć sprawności maszyn elektrycznych poprzez stosowanie w ich konstrukcji magnesów trwałych. Ponadto magnesy trwałe pozwalają zmniejszyć masę maszyny w stosunku do obecnie powszechnie stosowanych maszyn indukcyjnych [1]:

- w maszynach małej mocy (o mocy znamionowej do 10kW) sprawność można podwyższyć o około 8% i masę zmniejszyć o około 30%,
- w maszynach średniej mocy (o mocy znamionowej do 100kW) sprawność można podwyższyć o około 4% i masę zmniejszyć o około 20%,
- w maszynach dużej mocy sprawność można podwyższyć o około 2% i masę zmniejszyć o około 10%,
- w prądnicach synchronicznych ze wzbudzeniem hybrydowym można zmniejszyć straty wzbudzenia o około 80%.

Do napędów pracujących przy stałej prędkości obrotowej, mogą być stosowane silniki asynchroniczne synchronizowane polem magnetycznym magnesów trwałych zasilane bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej i z rozruchem asynchronicznym.

Do napędów pracujących przy zmiennej prędkości obrotowej, mogą być stosowane silniki [2]:

- bezszczotkowe prądu stałego BLDCPM, (Brush-Less Direct Current Motor) i BLSMPM (Brush-Less Permanent Magnet Synchronous Motor), które są zasilane napięciem stałym poprzez komutator energoelektroniczny (silniki BLDCPM mają jedną strefę regulacji prędkości obrotowej, przy stałym momencie, a regulacja prędkości obrotowej jest realizowana poprzez zmianę napięcia stałego, silniki BLSMPM mają dwie strefy regulacji prędkości obrotowej: przy stałym momencie poprzez zmianę napięcia stałego i przy stałej mocy poprzez odzwbudowanie smm twornika),
- synchroniczne LSPMSM (Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor), które w wirniku mają uzwojenie klatkowe i przystosowane są do rozruchu bezpośredniego (przez bezpośrednie przyłączenie do napięcia zasilającego),
- synchroniczne PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), które są zasilane z falowników, a regulacja prędkości obrotowej odbywa się poprzez zmianę częstotliwości napięcia falownika.

Prądnice synchroniczne ze wzbudzeniem magnesami trwałymi, plus falownik energoelektroniczny wydają się być ekonomicznym źródłem energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych i małych elektrowniach wodnych, umożliwiając pracę turbiny wiatrowej i wodnej ze zmienną prędkością obrotową dostosowaną do aktualnej mocy wiatru bądź wody. Zwiększa to, o kilka procent wykorzystanie energii wiatru i wody. Prądnice ze wzbudzeniem hybrydowym, nie wymagają falownika i mogą być stosowane w spalinowych agregatach prądotwórczych pracujących przy stałej prędkości obrotowej.

Ponadto aktualne zadania badawcze w tematyce przetworników elektromechanicznych powinny obejmować:

- maszyny o nowych strukturach obwodu elektromagnetycznego, o rdzeniach proszkowych, wzbudzeniu hybrydowym itp.,
- maszyny elektryczne dostosowane do napędu pojazdów zasilane ze źródeł solarnych,
- maszyny o ruchu złożonym i wielu stopniach swobody,
- przetworniki o ruchu liniowym,
- łożyska magnetyczne i układy lewitacji,
- przetworniki z cieczą magnetyczną,
- przetworniki magnetostrykcyjne,
- przetworniki piezoelektryczne,
- przetworniki wykorzystujące zjawiska sprzężone termiczno-elektromagnetyczne,
- silowniki elektromagnetyczne nowej generacji do awioniki i motoryzacji,
- materiały inteligentne w przetwornikach i aktuatorach.

W zakresie pomiarów i diagnostyki maszyn elektrycznych celowym byłoby opracowanie zbioru zunifikowanych parametrów kryterialnych i opracowanie skali oceny stanu technicznego maszyn elektrycznych (dla każdego rodzaju maszyn):

- opracowanie skutecznych metod monitoringu dużych turbogeneratorów (drżania, przegrzania lokalne, prądy łożyskowe itp.).
- określenie metody, opracowanie nowych czujników (np. wyładowań niezupełnych) i pozyskiwanie sygnałów diagnostycznych.
- uproszczenie metod diagnostycznych on-line poprzez zidentyfikowanie zależności między np. drżaniami węzłów łożyskowych i spektrum harmonicznych w prądzie i napięciu twornika,
- ocena stanu technicznego uzwojeń (np. klatki wirnika silnika indukcyjnego) i ocena stanu symetrii szczeliny powietrznej na podstawie przebiegu czasowego prądu maszyny [3],
- ocena on-line stanu technicznego izolacji głównej i zwojowej np. na podstawie analizy przebiegu składowej zerowej prądu, to jest prądu płynącego przez układ izolacyjny [3].

Tworzenie centrów diagnostycznych i archiwizacji danych eksploatacyjnych dla maszyn strategicznych (np. generatorów synchronicznych i transformatorów w elektrowniach), w tym:

- zdalna kontrola maszyn elektrycznych powierzonych nadzorowi,
- powiadamianie służb odpowiedzialnych za eksploatację maszyn o symptomach wystąpienia awarii,
- gromadzenie, archiwizacja danych pomiarowych w celu przeprowadzania analiz porównawczych i w celach poznawczych.

2.4.1.2. Osiągnięcia badawcze w dziedzinie maszyn elektrycznych

WIELOFAZOWE MASZYNY SYNCHRONICZNE O UZWOJENIACH UŁAMKOWO-ŻŁOBKOWYCH

Redakcja naukowa prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg, Politechnika Poznańska

W ostatnich latach magnetoelektryczne maszyny synchroniczne z uzwojeniami ułamkowo-żłobkowymi o cewkach skupionych są w centrum zainteresowań wielu zespołów badawczych i projektowych na świecie. Maszyny tego typu wyróżnia niższy koszt uzwojenia, krótsze połączenia czołowe, mniejsza rezystancja uzwojeń oraz mniejsze wartości indukcyjności rozproszenia i indukcyjności wzajemnej niż w klasycznych silnikach magnetoelektrycznych o cewkach rozłożonych. W rezultacie możliwe jest uzyskanie lepszych parametrów funkcjonalnych, w tym większej sprawności niż w maszynach o klasycznym uzwojeniu rozłożonym. Zalety maszyn z uzwojeniami ułamkowo-żłobkowymi o cewkach skupionych są szczególnie widoczne w maszynach wolnobieżnych o małej smukłości i dużych momentach obrotowych, stosowanych w przemysłowych napędach bezpośrednich, robotach, windach, napędach statków czy na generatory turbin wiatrowych. Wadą tego typu maszyn są stosunkowo duże tętnienia momentu elektromagnetycznego. Ponadto obserwuje się w nich wzrost strat dodatkowych. Jest on spowodowany obecnością w rozkładzie przestrzennym przepływu wytwarzanego przez uzwojenie, oprócz harmonicznej podstawowej, zarówno wyższych harmonicznych jak i subharmonicznych. Wytworzone przez te harmoniczne pola wirują względem wirnika z prędkością różną od synchronicznej generując dodatkowe straty mocy w magnesach, w elementach litych przewodzących oraz w rdzeniu wirnika. W celu minimalizacji wpływu tych negatywnych czynników na właściwości maszyny proponuje się stosować liczbę faz większą od 3. Z badań literaturowych i doświadczeń wynika, że maszyny wielofazowe mają wiele zalet w porównaniu z maszynami trójfazowymi. Można do nich zaliczyć mniejsze pulsacje momentu, niższe straty dodatkowe w magnesach i elementach litych obwodu wirnika oraz większy współczynnik uzwojenia. Z drugiej strony, zasilanie i sterowanie maszynami o 5, 7 czy 10 fazach wymaga opracowania specjalnych przekształtników i nowych strategii sterowania tego typu napędami. W celu minimalizowania kosztów opracowania nowych układów przekształtnikowych, proponuje się stosować maszyny wielofazowe o liczbie faz m równej wielokrotności liczby 3. Do zasilania takich maszyn można użyć $k=m/3$ przekształtników wykorzystujących typowe trójfazowe inteligentne moduły mocy (IPM ang. *intelligent power modules*). Trzeba zapewnić zadane przesunięcie fazowe pomiędzy trójfazowymi układami (gwiazdami) napięć/prądów na wyjściu przekształtników. Przy takim rozwiązaniu nie jest wymagane galwaniczne połączenie składowych układów trójfazowych. Wykorzystanie wieloprzekształtnikowego źródła zasilania ma wiele zalet. Wzrasta niezawodność napędu, zmniejsza się jego wrażliwość na zwarcia w układach składowych i pojawia się możliwość elastycznego dostosowania parametrów źródła zasilania do mocy silnika. Na przykład, jeśli potrzebny jest napęd o tak dużej mocy, że do jego zasilenia konieczne jest zbudowanie dedykowanego przekształtnika, to można zastosować o tej samej mocy silnik wielofazowy i zasilić go z układu k dostępnych modułowych przekształtników trójfazowych o mniejszej mocy. Takie rozwiązanie jest wielokrotnie tańsze niż opracowanie i zbudowanie nowego przekształtnika trójfazowego o odpowiednio dużej mocy. Oczywiście taki k modułowy układ przekształtnikowy można także wykorzystać do zasilania klasycznych silników trójfazowych o uzwojeniach fazowych złożonych z k gałęzi równoległych. Jednakże, z powodu dużych wartości indukcyjności wzajemnych między gałęziami równoległymi oraz między uzwojeniami fazowymi, układy napędowe z tego typu klasycznymi silnikami są bardziej wrażliwe na zwarcia niż układy z maszynami wielofazowymi.

Teoria uzwojeń maszyn wielofazowych o uzwojeniach ułamkowych skupionych jest w początkowej fazie rozwoju. Nie ma jeszcze algorytmów projektowania obwodów magnetycznych i uzwojeń tych maszyn w pełni uwzględniających stawiane przed nimi wymagania. W prowadzonych pracach, dąży się m.in. do określenia takiej liczby żłobków w rdzeniu stojana, struktury uzwojenia oraz liczby par biegunów i rozłożenia magnesów we wirniku, dla których uzyskuje się małe pulsacje momentu, małą zawartość wyższych harmonicznych w indukowanych siłach elektromotorycznych, równomierny rozkład sił promieniowych działających na wirnik, czy dużą wartość współczynnika uzwojenia. Prezentowane z tego zakresu w literaturze badania mają charakter przyczynkowy. Dotyczą zazwyczaj analizy maszyn o zadanej liczbie żłobków i zadanej strukturze uzwojenia. Brak jest ujęć umożliwiających w prosty sposób dobrać optymalną, przy danych wymaganiach i ograniczeniach, liczbę żłobków stojana oraz biegunów wirnika wielofazowej maszyny synchronicznej magnetoelektrycznej z uzwojeniem ułamkowym o cewkach skupionych.

Literatura

- [1] EL-Refaie A.M. (2010), "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, VOL. 57, NO. 1, pp. 107-121, Jan. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2030211.
- [2] Fan Wu, Ping Zheng, Yi Sui, Bin Yu, Pengfei Wang, (2014), "Design and Experimental Verification of a Short-Circuit Proof Six-Phase Permanent Magnet Machine for Safety Critical Applications", *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL. 50, NO.11, NOV. 2014 pp.1-4, doi: 10.1109/TMAG.2014.2320902.
- [3] Valavi M., Nysveen A., Nilssen R., Robert D. Lorenz R.D., (2014), Rølvåg T., "Influence of Pole and Slot Combinations on Magnetic Forces and Vibration in Low-Speed PM Wind Generators", *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL. 50, NO. 5, MAY 2014.
- [4] Jędrzycka C., Szelaż W., J. Piech, Multiphase permanent magnet synchronous motors with fractional slot windings. The future of low speed drives? COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 35 No. 6, 2016, pp. 1937-1948.

MASZYNY O WZBUDZENIU HYBRYDOWYM I BARIERAMI MAGNETYCZNYMI

Redakcja naukowa **prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny**

Dynamiczny rozwój rynku samochodów hybrydowych i czysto elektrycznych pociąga za sobą konieczność poszukiwania nowych, wysokosprawnych napędów dla tych pojazdów. Obecnie większość producentów samochodów posiada w swojej ofercie sprzedażowej samochody hybrydowe lub elektryczne, ale pomimo niezaprzeczalnych zalet tych rozwiązań (mniejsze zużycie energii pierwotnej i mniejsze koszty użytkowania), poziom sprzedaży jest wciąż marginalny. Wg Gazety Wyborczej z 20. lutego 2017. „w 2016 r. w Polsce zarejestrowano 114 sztuk samochodów całkowicie elektrycznych (dane od ACEA). Jednocześnie w zeszłym roku do Polski wwieziono ponad 1 mln używanych samochodów spalinowych”. Jak zamienić te proporcje i jak zwiększyć, zgodnie z planami rządowymi, liczbę aut elektrycznych w Polsce z około 500 sztuk dzisiaj do 1 mln sztuk już w 2025 r.?

Realizacja tego planu wymaga m.in. stworzenia nowej generacji wysokosprawnych i niezawodnych układów napędowych dla samochodów elektrycznych. Na sprawność i niezawodność pracy systemu napędowego mają wpływ wszystkie jego elementy składowe, najważniejszym jednak elementem tego systemu są maszyny elektryczne. Na niezawodność ich pracy wpływa prawidłowość konstrukcji, technologia produkcji, jakość zastosowanych materiałów itd. Współcześnie widoczny jest szybki rozwój niekonwencjonalnych maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi typu NdFeB, posiadających istotne zalety tj.: wysoką sprawność, dużą gęstość mocy, bezproblemowe sterowanie i regulację w szerokim zakresie prędkości obrotowej oraz duży moment obrotowy. Maszyny te są stale rozwijane oraz ulepszane, dzięki innowacyjnym technologiom w zakresie materiałów, obliczeń, projektowania, nowoczesnych układów sterowania czy zasilania. Specjalną grupę maszyn dedykowanych do napędu pojazdów elektrycznych stanowią maszyny o wzbudzeniu hybrydowym [1-4]. Cechą charakterystyczną tych maszyn jest możliwość osłabienia pola magnetycznego magnesów trwałych przy wysokich prędkościach obrotowych. Możliwość tę daje dodatkowy, umieszczony na stojanie maszyny, system cewek sterowanych prądem stałym. Cewki te zasilane są w ten sposób, że pole wzbudzenia w maszynie może zmieniać się od zera do wartości maksymalnej, limitowanej wyłącznie nasyceniem obwodu magnetycznego. Badania eksperymentalne potwierdziły korzystny wpływ dodatkowej cewki na stan wzbudzenia takich maszyn. Przez zmianę wartości i kierunku prądu cewki dodatkowej, możliwa jest regulacja momentu rozruchowego i napięć fazowych w szerokim zakresie oraz widoczna jest poprawa ich sprawności. Badania przeprowadzono zarówno dla maszyn z magnesami ułożonymi powierzchniowo na wirniku, jak również z magnesami zagnieżdżonymi. To drugie rozwiązanie daje dodatkową możliwość zastosowania w wirniku barier magnetycznych, co pozwala na konstrukcję maszyn o dużym stosunku indukcyjności w osi q do indukcyjności w osi d , niskiej wartości momentu zaczepowego oraz małych pulsacjach napięcia indukowanego i momentu elektromagnetycznego. Duża wartość stosunku indukcyjności w osi q i d silnika elektrycznym oznacza, że posiada on możliwość regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie, za pomocą prądu w osi d , co jest bardzo istotne w napędach trakcyjnych. Na podstawie analizy porównawczej wyników badań na modelach 3D, wykazano możliwość znacznego zmniejszenia momentu zaczepowego, masy magnesów trwałych oraz poziomu wyższych harmonicznych w napięciu indukowanym w uzwojeniach twornika takich maszyn. Opracowane już silniki charakteryzują się jednocześnie wysoką sprawnością (w szerokim zakresie prędkości obrotowej i momentu obciążenia), wysokim współczynnikiem mocy, dużą przeciążalnością momentem, a także możliwością pracy przy wysokich prędkościach obrotowych (w tym, z osłabianiem pola). Dzięki unikatowej konstrukcji silnika, osiągnąć można w nim większy moment obrotowy w zakresie niskich prędkości obrotowych oraz zwiększenie prędkości maksymalnej, bez użycia tradycyjnych (obniżających sprawność układu napędowego) technik osłabiania pola. Cechy te powodują, że może on być z powodzeniem zastosowany jako ekonomiczny napęd samochodów elektrycznych.

Podsumowując można stwierdzić, że możliwe jest otrzymanie lepszych parametrów trakcyjnych układów z wykorzystaniem proponowanych struktur maszyn ze wzbudzeniem hybrydowym oraz barierami magnetycznymi w stosunku do obecnych rozwiązań technicznych. Uzyskane wyniki pozwalają na wyznaczenie nowych kierunków badawczych rozwoju maszyn elektrycznych, spełniających wysokie wymagania techniczne i ekonomiczne.

Przebadanie różnych geometrii maszyn hybrydowych oraz sformułowanie rekomendacji projektowych przyczynią się do obniżenia ceny samochodów z napędem elektrycznym (wysoka cena jest główną barierą podczas zakupu), a przez to do powszechnego stosowania samochodów elektrycznych, a także do zwiększenia ich niezawodności, bezpieczeństwa użytkowania i bardziej efektywnego wykorzystania energii z akumulatorów, czyli w konsekwencji do zwiększenia ich zasięgu.

Literatura

- [1] Di Barba P., Mognaschi M. E., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S.: Design optimization of a permanent-magnet excited synchronous machine for electrical automobiles. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Volume 39, No 1-4/2012, pp. 889-895, DOI: 10.3233/JAE-2012-1556
- [2] Di Barba P., Bonisławski M., Pałka R., Paplicki P., and Wardach M.: Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, Jun. 2015, DOI: 10.1109/TMAG.2015.2424392
- [3] Paplicki P., Wardach M., Bonisławski M., Pałka R.: Simulation and experimental results of hybrid electric machine with a novel flux control strategy. *Archives of Electrical Engineering*, VOL. 64(1), pp. 37-51 (2015), DOI 10.1515/ae-2015-0005
- [4] Di Barba P., Mognaschi M.E., Bonisławski M., Pałka R., Paplicki P., Piotuch R., Wardach M.: Hybrid excited synchronous machine with flux control possibility. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 52 (2016) 1615–1622, DOI 10.3233/JAE-162190

MASZYNY SYNCHRONICZNE DUŻYCH MOCY Z MAGNESAMI TRWAŁYMI (LSPMSM)

Redakcja naukowa dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. Politechnika Wroclawska

Nieustająca tendencja do poszukiwania energooszczędnych rozwiązań przejawia się także w dziedzinie maszyn elektrycznych. Alternatywą stają się maszyny wzbudzone magnesami trwałymi, w tym te z możliwością uruchamiania przez bezpośrednie przyłączenie do sieci zasilającej (Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor). Przez wiele lat konstrukcje tego typu ograniczały się do mocy kilkunastu kilowatów. Z inicjatywy prof. dr hab. inż. Andrzeja Demenko powołano konsorcjum, które podjęło się wykonania badań oraz opracowania zagadnień nt. „*Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa*”.

Coraz lepsze rozpoznanie charakterystycznych zjawisk zachodzących w tego typu maszynach (szczególnie rozruchu i synchronizacji), umożliwiło zbudowanie maszyn o mocach większych od 1MW. Opracowane nowe struktury silników synchronicznych z magnesami trwałymi pozwalają na budowę energooszczędnych napędów o sprawności i niezawodności większej niż obecnie stosowane silniki indukcyjne, przystosowane do różnych warunków pracy pozwalające na racjonalizację zużycia energii. W silnikach tych przewidziano zastosowanie nowoczesnych materiałów magnetycznych (np. magnesów trwałych o zmiennych właściwościach). Opracowane struktury wysokosprawnych konstrukcji silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi przeznaczonych do rozruchu bezpośredniego wentylatorów i pomp o odpowiednich dla tych urządzeń charakterystykach rozruchowych i eksploatacyjnych zweryfikowano obliczeniowo (metodą polowo-obwodową) oraz eksperymentalnie. Opracowano konstrukcje dwubiegowych silników o przełączalnych uzwojeniach stojana, z magnesami trwałymi: silników jedno- i trójfazowych, oraz silników przełączanych z pracy trójfazowej na pracę jednofazową, które zapewniają dużą sprawność i odpowiedni moment rozruchowy dla obu prędkości obrotowych. Opracowano konstrukcje silników z magnesami trwałymi do zasilania z przekształtników energoelektronicznych. Opracowane rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe zapewniają łagodny rozruch i płynną regulację prędkości obrotowej. W opracowywanych konstrukcjach ograniczano straty mocy w silniku o regulowanej płynnie prędkości by z przekształtnikiem miał największą sprawność. Na podstawie wyników z polowych obliczeń projektowych i optymalizacyjnych opracowano technologie silników do napędu wentylatorów i pomp. Technologia ich wykonania uwzględnia specyficzne właściwości materiałów użytych do budowy i zapewnia, że właściwości materiałów (magnesów trwałych i blach elektrotechnicznych) nie ulegną pogorszeniu na skutek procesów technologicznych (laserowego wykrawania blach, odlewania aluminiowego uzwojenia klatkowego). Konstrukcja mechaniczna tych silników pozwala na instalowanie w miejsce silników indukcyjnych bez potrzeby zmiany płyty fundamentowej.

Opracowano konstrukcje silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi dla pełnego zakresu mocy znamionowych o bardzo dużej sprawności (ok. 88 % dla mocy ułamkowej do ok. 98,4 % dla mocy megawatowej) w pełni skompensowane (współczynnik mocy ok. 1). Zmniejszenie prądu pobieranego przez te silniki umożliwi również zmniejszenie strat energii elektrycznej w układach zasilających (linie przesyłowe, transformatory).

Literatura

- [1] Zawilak Tomasz, Zawilak Jan: *Silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi w napędach dużej mocy*. Przegląd Elektrotechniczny. 2017, R. 93, nr 2, s. 173-176.
- [2] Zawilak Tomasz, Zawilak Jan: *Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie młyna kulowego*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2016, nr 3, s. 169-173.
- [3] Zawilak Jan, Zawilak Tomasz: *Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności*. Przegląd Elektrotechniczny. 2014, R. 90, nr 1, s. 224-226.
- [4] Zawilak Tomasz: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*. Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 2b, s. 177-179

MATERIAŁY INTELIGENTNE W PRZETWORNIKACH I AKTUATORACH

Redakcja naukowa prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg, Politechnika Poznańska

Układy wykonawcze i przetworniki z materiałami inteligentnymi są coraz częściej stosowane w wielu dziedzinach techniki. Spowodowane jest to z jednej strony trudnościami w uzyskaniu postulowanych właściwości funkcjonalnych przy wykorzystaniu znanych struktur maszyn elektrycznych i przetworników elektromagnetycznych oraz zastosowaniu klasycznych materiałów elektrycznie i magnetycznie czynnych. Z drugiej natomiast dynamicznym rozwojem inżynierii materiałowej, opracowaniem efektywnych i tanich technologii produkcji materiałów inteligentnych oraz wzrastającym zapotrzebowaniem na złożone systemy mechatroniczne wykorzystujące przetworniki i układy o nietypowych właściwościach użytkowych.

Materiały inteligentne (*intelligent material, smart material*) zmieniają w sposób kontrolowany swoje właściwości fizyczne w odpowiedzi na bodziec zewnętrzny. Materiały tego typu są jednocześnie czujnikiem i aktuatorem. Takie właściwości mają m.in. materiały: piezoelektryczne, magnetokaloryczne, magnetostrykcyjne, termoelektryczne, polimery przewodzące, elastomery dielektryczne, materiały zmieniające swoją lepkość (cieczki magnetyczne, cieczki elektoreologiczne) oraz materiały z pamięcią kształtu (*thermal and magnetic shape-memory alloys*). W zależności od rodzaju materiału, czynnikiem aktywującym może być pole magnetyczne, pole elektryczne, temperatura lub naprężenia mechaniczne.

Na świecie i w Polsce prowadzone są intensywne badania nad wykorzystaniem materiałów inteligentnych w aktuatorach oraz w mikroukładach wytwarzania energii elektrycznej z łatwo dostępnych źródeł energii (wiatr, fale elektromagnetyczne, odpadowa energia cieplna, wibracje, strumień wody). Problematyka badawcza dotycząca systemów z materiałami inteligentnymi powinna obejmować:

- układy z cieczkami magnetycznymi, tj. elektrycznie sterowane hamulce, sprzęgła, tłumiki drgań, absorbery energii mechanicznej, układy przenoszenia mocy, zawory bez mechanicznych elementów ruchomych;
- ekologiczne, wysokosprawne agregaty chłodnicze lodówek bazujące na materiałach magnetokalorycznych;
- układy chłodzenia, nagrzewania i wytwarzania energii elektrycznej z ogniwami Peltiera;
- aktulatory i generatory energii elektrycznej z materiałami piezoelektrycznymi i magnetostrykcyjnymi;
- siłowniki, głośniki, pompy, zawory, „sztuczne mięśnie” zbudowane przy wykorzystaniu elastomerów elektroaktywnych i polimerów przewodzących.

Ponadto, dla potrzeb projektowania układów z materiałami inteligentnymi należy opracować wiarygodne obwodowo-polowe oraz polowe modele i algorytmy analizy zjawisk sprzężonych. Celowe jest również opracowanie i wyznaczenie parametrów modeli opisujący właściwości materiałów inteligentnych.

Literatura

- [1] Yanju Liu, Haiyang Du, Liwu Liu, Jinsong Leng, Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review, *Smart Mater. Struct.* 23 (2014), pp. 23.
- [2] Khaled S. Ramadan, D. Sameoto, S. Evoy, A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers, pp. 26.
- [3] Szeląg W.: *Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [4] Houssef Rafik, El-Hana Bouchekara, Mouaaz Nahas, *Magnetic Refrigeration Technology at Room Temperature, Trends in Electromagnetism - From Fundamentals to Applications*, Dr. Victor Barsan (Ed.), ISBN: 978-953-51-0267-0, InTech, 2012, Available from: <http://www.intechopen.com/books/trends-in-electromagnetism-from-fundamentals-to-applications/magnetic-refrigeration-technology-at-room-temperature>.
- [5] Twaha S., Zhu J., Yan Y., Li B., A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews - Elsevier*, Vol. 65, November 2016, p. 698–726.

2.4.2. Transformatory energetyczne

Redakcja naukowa: *prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, Politechnika Śląska*

prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski, Politechnika Łódzka

Wstęp.

W Polskim systemie przesyłowym pracuje ok. 200 sztuk transformatorów sieciowych o mocy 160 MVA i większej, górnym napięciu przewodowym 220 kV i 400 kV. Transformatory dużych mocy (grupy I i II) zainstalowane w energetyce krajowej zostały wyprodukowane przez fabryki w Żychlinie, Łodzi (ELTA, ABB), dawne Zakłady remontowe Energetyki w Lublińcu (obecnie EthosEnergy Poland S.A.), a transformatory mniejszej mocy w Łodzi-Janowie (POLIMEX, MOSTOSTAL ZREW). Pojedyncze jednostki blokowe i sieciowe pochodzą z Austrii (ELIN), Japonii (HITACHI), Ukrainy (ZAPOROŻTRANSFORMATOR), a ostatnio z Korei Południowej (HYUNDAI). Duża liczba transformatorów ma staż, po zainstalowaniu, dłuższy niż 30 lat. Polska ma dobre tradycje w produkcji transformatorów [4].

2.4.2.1 Aktualne zagadnienia badawcze

Aktualne zagadnienia badawcze, które dotyczą transformatorów powinny obejmować sferę projektowania, technologii, badań w wytwórni i niezwykle istotnej gospodarczo sfery eksploatacji. Podstawowe wymagania, które musi spełniać transformator w czasie pracy dotyczą wytrzymałości mechanicznej, elektrycznej i termicznej [6]. Na czoło wysuwają się zatem zjawiska elektromagnetyczne, będące przyczyną powstawania strat podstawowych i dodatkowych, sił zwarciovych w wyniku ewentualnych awarii, zagadnienia wytrzymałości dielektrycznej, związane z rozkładem pól potencjalnych i rozkładów powstających w wyniku elektryzacji strumieniowej, a także zjawiska związane z wyładowaniami niepełnymi. Zagadnienia nagrzewania i skutecznego chłodzenia transformatorów, a zwłaszcza właściwej obciążalności w różnych warunkach klimatycznych są przedmiotem ciągłych badań.

Szczególną rolę odgrywa diagnostyka transformatorów stosowana w zakresie zarządzania eksploatacją transformatorów [5]. Ten kierunek badań jest intensywnie rozwijany w sensie metodologicznym i narzędziowym. Należy podkreślić, że w Polsce zagadnienia monitoringu transformatorów, badań okresowych czystości i wytrzymałości oleju, łącznie z analizą chromatograficzną, badania przepustów wysokiego napięcia itp. są przedmiotem szczególnej troski [5]. Przytoczona w pracy literatura nie obejmuje wszystkich zagadnień, które zostały poruszone w tekście. W szczególności, przykładowe prace konferencyjne świadczą o aktualności naukowej i technicznej problematyki transformatorowej w Polsce.

2.4.2.2. Problematyka elektromagnetyczna w projektowaniu transformatorów

Współczesna technika komputerowa pozwala na przedstawienie poszczególnych elementów transformatora, lub części jego układów, a także widoku zewnętrznego w konwencji trójwymiarowej z możliwością obrotu i specjalnego podświetlenia obiektu. Do tego służą, między innymi, programy komercyjne AUTOCAD i AUTODESK. Transformator składa się z uzbrojonego rdzenia, uzwojeń, przełącznika zaczeń, zbioru przewodów łączeniowych i wyprowadzeń, które można odwzorować z dość dużą dokładnością pod względem proporcji wymiarowych.

Rdzeń transformatora składa się z ogromnej ilości blach magnetycznych, przeplatanych w narożach i węzłach, najczęściej tworzących rdzenie jedno-, a niekiedy wieloramowe. Każda warstwa blach stanowi wydzielony obwód magnetyczny. Trójwymiarowa analiza pola elektromagnetycznego z uwzględnieniem rozwiązań w poszczególnych warstwach przekracza możliwości obecnych programów obliczeniowych w rodzaju ANSYS, FLUXA, OPERY i innych. Modele traktujące rdzeń jako element jednolity, wymagają określenia zastępczych-równoważnych przenikalności i przewodności elektrycznych rdzenia, co jest obecnie przedmiotem prac badawczych. Szczególnym obszarem są naroża i węzły, w których zaplatane są blachy, gdzie zmiana kierunku strumienia powoduje zwiększone straty mocy.

Znacznie lepiej przedstawiają się możliwości obliczeniowe pól rozproszenia. Obszary rdzenia można traktować w przybliżeniu jako pozbawione prądów wirowych, o przenikalności magnetycznej dążącej do nieskończoności. Najczęściej wprowadza się do obliczeń fragmenty transformatora. Wynika to najczęściej z symetrii obiektu. Można także rozpatrywać węzły elektromagnetyczne w postaci wyizolowanej, zwłaszcza wtedy, gdy mają odmienne wyprowadzenia przewodów, inne odstępy od kadzi i pokrywy itp.

Spotyka się obecnie trójwymiarowe rozwiązania pól z wykorzystaniem pakietów komercyjnych dla potrzeb wyznaczania lokalnych strat w częściach konstrukcyjnych, ekranach, czy też określania rozkładu sił zwarciovych w uzwojeniach nieuszkodzonych i uszkodzonych [7].

Niezwykle ważne jest obliczenie na etapie projektowania rozkładów napięć i natężeń pola elektrycznego w układzie izolacyjnym transformatora, ze względu na kryteria wytrzymałości na przebicie. Obliczenia te, w konwencji trójwymiarowej, wykonuje się również dla istotnych fragmentów transformatora lub węzłów izolacyjnych w rodzaju wyprowadzeń z obszarów wysokiego napięcia. W wyniku obliczeń projektowych udaje się skonstruować uniwersalną izolację stałą, wyprowadzenia mocy na wysokim napięciu, czego przykładem może być modułowy układ izolacyjny odpływu 400 kV transformatora blokowego, czy też izolacja

ceramiczna przekładnika kombinowanego. Należy zwrócić uwagę na potrzebę aplikacji metod polowych do rozwiązywania rozkładów pól w dielektrykach stałych i ciekłych, w warunkach pola przepływowego, wywołanego przykładowo w transformatorach HVDC.

Metody komputerowe powinny rozwijać się w kierunku badania nie tylko możliwych, ale także dopuszczalnych uproszczeń geometrycznych obiektów, bez większego uszczerbku na dokładności obliczeń parametrów całkowych pola [7].

2.4.2.3. Diagnostyka eksploatacyjna transformatorów energetycznych

Transformatory stanowią jeden z droższych składników sieci elektroenergetycznych. Dbalność o ich zdolność eksploatacyjną wiąże się z nakładami finansowymi. Pod rozpowszechnionym pojęciem zarządzania eksploatacją transformatorów kryją się nowoczesne sposoby dyspozycji, nadzoru i sterowania tymi urządzeniami połączone z coraz doskonalszą diagnostyką techniczną.

W ramach Komitetu Studiów A2 CIGRE powołana została Grupa Robocza A2-20 "Aspekty ekonomiczne gospodarowania transformatorami". Doświadczenia polskie w tym zakresie są znaczące [5]. W wyniku prac wspomnianej Grupy powstał przewodnik przeznaczony dla personelu, który odpowiada za ekonomiczne aspekty zarządzania eksploatacją transformatorów. Obejmuje on cztery obszary:

- zarządzanie ryzykiem,
- wymagane warunki techniczne i zakupy,
- zagadnienia eksploatacyjne,
- procedury decyzyjne: naprawa, modernizacja, wymiana.

Zarządzanie eksploatacją w Polsce zasada się na przepisach zawartych w Ramowej Instrukcji Eksploatacji Transformatorów, modernizowanej co kilka lat. Chociaż nie jest ona dokumentem obligatoryjnym, to jest bardzo często wykorzystywana przy opracowaniu szczegółowych instrukcji eksploatacji.

Transformatory różnią się konstrukcją, wiekiem i stanem eksploatacji, dlatego trudno sporządzić dla nich instrukcję o charakterze uniwersalnym.

Transformatory w eksploatacji wykazują oznaki zesterzenia izolacji i tendencje do zawilgocenia. Jednakże, ze względu na przewymiarowaną izolację papierową i nie wykorzystanie ciepłne, uzasadniona jest ich dalsza eksploatacja.

W transformatorach projektowanych i wytwarzanych współcześnie najczęściej:

- rozwijają się uszkodzenia wewnętrzne z powodu przegrzań i wyładowań niezupełnych (wnz), a także zupełnych,
- ulegają uszkodzeniom przełączniki zaczeptów pod obciążeniem,
- następują uszkodzenia izolatorów przepustowych w transformatorach najwyższych napięć,
- powstają zagrożenia związane z obecnością cząstek stałych w oleju [5].

W pracach [5] można znaleźć najbardziej znane techniki pomiarowe, konwencjonalne i będące w stadium rozwoju, stosowane w diagnostyce transformatorów, obejmujące skutki zakłóceń mechanicznych, termicznych i dielektrycznych.

W problematyce badań diagnostycznych istnieją także długoletnie doświadczenia polskie, prezentowane szczególnie na krajowych konferencjach transformatorowych.

2.4.2.4. Proponowana tematyka badań w zakresie transformatorów

Proponowana tematyka powinna uwzględniać krajowe możliwości badań.

W zakresie problematyki projektowej nasuwają się następujące propozycje.

1. Doskonalenie metod w zakresie obliczeń elektromagnetycznych, cieplnych i wytrzymałościowych struktur transformatorowych, obejmujących:
 - a) straty w rdzeniach zaplatanych jedno- i wieloramowych konwencjonalnych,
 - b) straty mocy w rdzeniach amorficznych,
 - c) straty mocy wskutek strumienia rozproszenia poza uzwojeniami,
 - d) obliczenia termiczne w warunkach chłodzenia naturalnego i wymuszonego,
 - e) przestrzenne naprężenia mechaniczne wskutek sił zwarciovych,
 - f) rozkłady pól stacjonarnych i udarowych w strukturach uzwojeń.
2. W zakresie technologii proponuje się:
 - a) nowe technologie wytwarzania izolacji elektrycznej twardej i miękkiej transformatorów,
 - b) rozwój technologii w zakresie regeneracji olejów izolacyjnych oraz suszenia i impregnowania (zalewania) olejem części aktywnych transformatorów,
 - c) nowe technologie transformatorów żywicznych (mniejszej mocy),
 - d) technologie transformatorów wysokich częstotliwości dla energoelektroniki.
3. Proponowana problematyka eksploatacyjna nakierowana na monitoring:
 - a) identyfikacja miejsc wyładowań niezupełnych,
 - b) szybkie metody lokalizacji przegrzań rdzenia, uzwojeń i części konstrukcyjnych,
 - c) skuteczne metody monitoringu izolatorów przepustowych najwyższych napięć,
 - d) metody określenia dopuszczalnego zużycia elementów przełączników zaczeptów,

- e) monitoring drgań i hałasów wskazujących na uszkodzenia wewnętrzne transformatora,
- f) doskonalenie metod FRA (Frequency Response Analysis) pod względem czułości w badaniu wpływu zwarć na deformację uzwojeń,
- g) metody archiwizacji danych i korelacji zmian parametrów z poszczególnymi uszkodzeniami elementów transformatorów.

Literatura

- [1] BERNATT J.: *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, Wyd. BOBRME Komel. 2010r.
- [2] DE ALMEIDA A. T., FONSECA P.: *Characterisation of EU Motor Use Energy Efficiency Improvements on Electric Motors and Drives*, Springer 2000.
- [3] DRAK B., GLINKA T., KAPINOS J., MIKSIEWICZ R., ZIENTEK P.: *Awaryjność maszyn elektrycznych i transformatorów w energetyce*, Wyd. przez Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL. 2013r.
- [4] JEZIERSKI E., *Polskie osiągnięcia naukowo-techniczne w dziedzinie transformatorów w latach 1945-1963*, Przegląd Elektrotechniczny, RokXL (1964), nr 10, ss.421-425
- [5] KAŻMIERSKI M., OLECH W.: *Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów*. Wydawnictwo: Energopomiar-Elektryka Sp. z o. o., Gliwice 2013r.
- [6] METHA S. i inni, *Power transformers technology review and assessments*, Electra CIGRE February 2008(tłumaczenie na język polski w czasopiśmie Urządzenia dla energetyki Nr 4/2008, ss. 24-29)
- [7] ZAKRZEWSKI K., TOMCZUK B., KOTERAS D., *Simulation of forces and 3D field arising during power autotransformer fault due to electric arc in HV winding*, IEEE Transactions on magnetics, New York, USA, vol.38 No 2, March 2002, pp.1153-1156.