

## Autoreferat\*

1) Imię i Nazwisko:

**Krzysztof Ludwinek**

2) Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania.

**Dyplom magistra inżyniera elektryka:** Politechnika Świętokrzyska - Kielce, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, specjalność: Automatyka i Metrologia Elektryczna, 04.10.1991 r., Praca dyplomowa pt.: „*Klucz tranzystorowy do 3-fazowego falownika w układzie napędowym z silnikiem prądu przemiennego*”. Promotor: prof. dr hab. inż. Eugeniusz Popławski.

**Stopień doktora nauk technicznych** w dyscyplinie Elektrotechnika: Politechnika Świętokrzyska - Kielce, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki, 02.07.2002 r., Rozprawa doktorska pt.: *Analiza współpracy generatora synchronicznego z siecią o napięciu odkształconym i niesymetrycznym z uwzględnieniem rzeczywistej struktury wirnika*. Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Nadolski, Recenzenci: prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, prof. dr inż. Henryk Tunia, prof. dr hab. inż. Kazimierz Mikołajuk.

3) Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

**2002-(...)** Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki (Adiunkt),

**1991-2002** Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki (Asystent).

4) Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) w okresie po uzyskaniu stopnia doktora

a) tytuł osiągnięcia naukowego

*Analiza i badania wpływu kształtu napięcia i prądu wzbudzenia w generatorze synchronicznym wydawnobiegunowym na zawartość wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana przy uwzględnieniu układu sterowania gwarantującego ochronę przeciwporażeniową*

Osiągnięcie naukowe obejmuje **monografię** oraz **cykl złożony z 6 publikacji powiązanych tematycznie**, których łączny Impact Factor wynosi **IF = 2,053**.

- b) Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego (po uzyskaniu stopnia doktora)

**Monografia:**

[M1] Ludwinek K.: *Wpływ kształtu napięcia i prądu wzbudzenia na zawartość wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana generatora synchronicznego wydatnobiegunowego*, Monografia M75, Seria Elektryka, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2016, ISSN: 9788-3637, ISBN: 1897-2691,

w której przedstawiłem nowe niepublikowane dotąd zagadnienia dotyczące analizy wpływu kształtu napięcia i prądu wzbudzenia na zawartość wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana generatora synchronicznego wydatnobiegunowego. Analiza ta została zweryfikowana w licznych badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych, których wyniki były przedmiotem artykułów naukowych. Ponadto, analiza ta była pomocna przy opracowaniu zgłoszenia wynalazku.

**Cykl złożony z 6 publikacji powiązanych tematycznie:**

- [1] **Ludwinek K.**, Szczepanik J., Sułowicz M.: Experimental Analysis of Assessing of the Tripping Effectiveness of Miniature Circuit Breakers in an Electrical Installation Fed from a Synchronous Generator Set. **Electric Power Systems Research**, Vol. 142, 2017, pp. 341–350. ISSN 0378-7796, **IF 1,809, 35 pkt.**
- [2] **Ludwinek K.**: Practical application of a linear Hall-effect sensor in contactless measuring of current temporary values. **International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)**, Vol. 8, No. 5, 2013, pp. 1631-1640, ISSN 1827-6679, **10 pkt.** W chwili opublikowania w 2013 r. czasopismo IREE było na liście A wg MNiSW poz. 4803 - 25 pkt.
- [3] **Ludwinek K.**: Measurement of momentary currents by Hall linear sensor. **Przegląd Elektrotechniczny**, Vol. 85, No. 10, 2009, pp. 182-187, ISSN 0033-2097, 6 pkt.
- [4] **Ludwinek K.**: Influence of DC voltage and current of field winding on induced stator voltages of a salient pole synchronous generator. **International Review of Electrical Engineering (IREE)**, Vol. 9, No. 1, 2014, pp. 62-72, ISSN 1827-6679, **10 pkt.** W chwili przyjęcia tego artykułu do druku w 2013 r. czasopismo IREE było na liście A wg MNiSW poz. 4803 - 25 pkt.
- [5] **Ludwinek K.**, Ludwinek P.: Sposób oraz układ sterowania prądem wzbudzenia generatorów synchronicznych. **Zgłoszenie wynalazku A1 409790 2014-10-14**, 2 pkt.
- [6] **Ludwinek K.**, Staszak J.: Possibility of graphical environment applications for evaluating of equivalent circuit parameters and time constants, **Przegląd Elektrotechniczny**. Vol. 87, No 12A. 2011, pp. 195 - 200, ISSN 0033-2097, **IF 0,244, 15 pkt.**

W pracy [1] porównano wpływ chwili włączenia napięcia fazowego generatora synchronicznego w stanie biegu jałowego na czas utrzymywania się niebezpiecznego napięcia dotykowego w stanie zwarcia jednofazowego w zależności od rodzaju i wartości prądu znamionowego wyłączników instalacyjnych nadmiarowo-prądowych z charakterystykami B i C. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych w stanie zwarcia jednofazowego generatora synchronicznego o mocy 5,5 kVA określono zakres stosowania wyłączników instalacyjnych nadmiarowo-prądowych gwarantujących skuteczność zadziałania w czasie poniżej 0,4 s, tj. mogących jednocześnie pełnić zabezpieczenie od przeciążeń i stanowiących ochronę przeciwporażeniową. Dla przypadków, w których wymagane jest obciążenie generatora synchronicznego większą mocą (niż wynika to z dobranych wyłączników instalacyjnych nadmiarowo-prądowych gwarantujących skuteczność zadziałania w czasie poniżej 0,4 s) opracowałem koncepcję badań, projektu i wykonania nowatorskiego układu sterowania gwarantującego pewne odłączenie sekcji, w której wystąpiło zwarcie niezależnie od odległości (zwarcia) od zacisków generatora synchronicznego. Mój udział w artykule szacuję na 40%.

Ważnym zagadaniem budowanych układów sterowania jest odpowiedni pomiar napięć i prądów. Dlatego do realizacji tego celu, do pomiaru chwilowych wartości napięć i prądów postanowiłem opracować własne rozwiązania przetworników z rdzeniami ferrytowymi, które można dobierać w szerokim zakresie mierzonych częstotliwości napięć oraz prądów (w zależności od potrzeb od miliamperów do kiloamperów). Badania symulacyjne i eksperymentalne oraz praktyczne zastosowanie opracowanych rozwiązań przetworników przedstawiłem w pracach [2, 3]. Na bazie opracowanych przetworników do pomiaru prądu zbudowałem przetworniki do pomiaru napięcia.

W pracy [2] przedstawiłem projekt układu oraz koncepcję bezdotykowego pomiaru wartości chwilowej prądu z wykorzystaniem liniowego czujnika Halla A3515LUA. Na podstawie zależności na indukcję pola magnetycznego wokół przewodu określiłem wartość mierzonego prądu w funkcji odległości od przewodu. Poprawność przeprowadzonych rozważań potwierdziłem na podstawie badań symulacyjnych w programie do obliczeń rozkładu pola magnetycznego FEM, w środowisku Matlab/Simulink oraz podczas badań eksperymentalnych bezpośredniego rozruchu silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 500 kW. Ponadto z wykorzystaniem układu TZW-4000A przeprowadziłem badania eksperymentalne zaprojektowanego i zbudowanego układu do bezdotykowego pomiaru wartości chwilowej prądu w zakresie 10 A - 1997 A. Na podstawie badań określiłem różnice występujące w pomiarze prądu: bocznikiem, sondą A621 (Tektronix) i zbudowanym układem do bezdotykowego pomiaru wartości chwilowej prądu. Zaproponowany w pracy układ szczególnie nadaje się do pomiaru prądów powyżej kilkudziesięciu amperów np. prądów zwarciovych generatorów synchronicznych pracujących w agregatach prądotwórczych.

W pracy [3] przedstawiłem koncepcję dwóch rozwiązań układów do pomiaru wartości chwilowej prądu z wykorzystaniem liniowego czujnika Halla A3515LUA umieszczonym w szczelinie powietrznej rdzenia, pracujące bez sprzężenia oraz ze sprzężeniem zwrotnym. Dla czujnika Halla A3515LUA umieszczonego w szczelinie powietrznej rdzenia, określiłem zależności łączące indukcję pola magnetycznego, liczbę zwojów uzwojenia pomiarowego

oraz wartość mierzonego prądu. W pracy przedstawiłem wyniki badań eksperymentalnych pomiaru kąta przesunięcia fazowego pomiędzy rzeczywistym przebiegiem prądu a przebiegami zarejestrowanymi poprzez zbudowane przetworniki pracujące bez sprzężenia oraz ze sprzężeniem zwrotnym. Badania przeprowadziłem w zalecany przez producenta zakresie częstotliwości pracy zastosowanego czujnika Halla A3515LUA, tj. 0 - 30 kHz.

Oprócz pomiaru chwilowych wartości napięć i prądów ważnym zagadaniem dotyczącym projektowanych i budowanych układów sterowania jest dobór odpowiedniego kształtu napięcia i prądu zasilającego obwód wzbudzenia generatora synchronicznego wydatnobiegunowego. Badania symulacyjne i eksperymentalne wpływu kształtu napięcia i prądu zasilania obwód wzbudzenia na kształt indukowanych napięć w uzwojeniach fazowych stojana przedstawiono w pracy [4], natomiast układ sterowania przedstawiono w pracy [5] oraz w [M1].

W pracy [4] dla modelu generatora synchronicznego z wirnikiem bez klatki tłumiącej z liniowym obwodem magnetycznym przedstawiłem porównanie wpływu zasilania obwodu wzbudzenia przy  $U_f = \text{const}$  i  $I_f = \text{const}$  na kształt indukowanych napięć. W opracowanym modelu matematycznym, przy zasilaniu obwodu wzbudzenia  $U_f = \text{const}$  i  $I_f = \text{const}$  wyodrębniłem składniki odpowiedzialne za napięcia rotacji i transformacji. **Wykazałem kompensacyjny wpływ wyższych harmonicznych napięć transformacji na napięcia rotacji.**

W pracy [5] przedstawiono koncepcję nowatorskiego układu sterowania prądem wzbudzenia generatora synchronicznego wydatnobiegunowego, który umożliwia ograniczanie zawartości wyższych harmonicznych w indukowanym napięciu fazowym uzwojenia stojana. Mój wkład w zgłoszenie wynalazku polegał: na opracowaniu koncepcji sterowania, projektu i wykonaniu układu sterowania prądem wzbudzenia oraz na opracowaniu koncepcji modelowania matematycznego generatora synchronicznego wydatnobiegunowego uwzględniającego wpływ kształtu prądu wzbudzenia na kształt indukowanego napięcia oraz na opracowaniu metodyki badań symulacyjnych. Mój udział w zgłoszeniu wynalazku wynosi 80%.

Jednym z ważnych zagadnień związanych z modelowaniem generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych jest określanie parametrów schematu zastępczego. W tym celu w pracy [6] przedstawiono nowe możliwości wykorzystania środowiska graficznego LabView do manualnego określania i wizualizacji wpływu parametrów obwodowych generatora synchronicznego na kształtowanie charakterystyk częstotliwościowych oraz stałych czasowych. Mój wkład w powstanie tej pracy polegał: na opracowaniu koncepcji i sposobu wykorzystania środowiska graficznego LabView (przy zastosowaniu którego, możliwa jest identyfikacja parametrów schematu zastępczego modelu generatora synchronicznego na podstawie badań eksperymentalnych polegających na wyznaczeniu wartości impedancji badanego generatora synchronicznego wydatnobiegunowego) dla różnych częstotliwości napięcia zasilania przy użyciu zaprojektowanego i zbudowanego autorskiego wzmacniacza mocy. Mój udział w artykule szacuję na 50%.

c) omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

#### c.1. Wprowadzenie uzasadniające cel naukowy prac i ewentualne ich wykorzystanie

Układy sterowania napięciem lub prądem w obwodach wzbudzenia generatorów synchronicznych dużej mocy pracujących w systemie elektroenergetycznym są przedmiotem licznych publikacji. Jednak niewiele prac dotyczy sterowania obwodem wzbudzenia generatorów synchronicznych pracujących autonomicznie lub jako rezerwowe źródło zasilania małej mocy (do kilkudziesięciu kVA). Od źródeł zasilania obowiązujące przepisy (PN-EN 60364-7-717:2010, PN-HD 60364-4-41:2009) wymagają, aby w chwili uszkodzenia izolacji podstawowej:

- była zapewniona ochrona dodatkowa (ochrona przy uszkodzeniu),
- był spełniony warunek dopuszczalnego czasu samoczynnego wyłączenia zasilania uszkodzonego obwodu.

Jeszcze mniej prac przedstawia sposób sterowania obwodem wzbudzenia generatorów synchronicznych pracujących autonomicznie lub jako rezerwowe źródło zasilania małej mocy oraz ich wpływ, np. na:

- zawartość wyższych harmoniczných napięć indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana,
- problem sterowania prądem lub napięciem wzbudzenia tak, aby ograniczyć zawartość wyższych harmoniczných napięć i prądów w uzwojeniach stojana, aby dopuszczalna zawartość wyższych harmoniczných nie została przekroczona np.  $HVF \leq 2\%$  (PN-EN 60034-1),
- problem sterowania napięciem lub prądem wzbudzenia, aby w chwili uszkodzenia izolacji podstawowej była zapewniona ochrona dodatkowa (ochrona przy uszkodzeniu).

Tak więc, nadrzędnym zadaniem budowanych przeze mnie układów było opracowanie takiego sterowania, które oprócz wpływu na zawartość wyższych harmoniczných, również w przypadku uszkodzenia izolacji maszyn i urządzeń elektrycznych i ewentualnego przerzutu niebezpiecznego napięcia na obudowę zapewniałoby ochroną przeciwporażeniową (oprócz zabezpieczeń nadprądowych i urządzeń RCD). Skuteczność ochrony przeciwporażeniowej w tych układach polegała na wyłączeniu zasilania uszkodzonej sekcji, jeśli czas utrzymywania się niebezpiecznego napięcia na chronionych obudowach przekraczał 0,4 s (maksymalny dopuszczalny czas wyłączenia dla napięć fazowych 230 V), co jest niewątpliwie nowatorskim rozwiązaniem w tego typu układach sterowania i zasilania. Pierwsze badania nad opracowaniem układów zapewniających jak najmniejszą zawartość  $THDu$  w indukowanych napięciach oraz jednocześnie zapewniającym skuteczność ochrony przeciwporażeniowej realizowałem na synchronicznych agregatach prądotwórczych. Z przeprowadzonych badań z pracownikami Towarzystwa Gospodarki Energetycznej i Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie, wynika, że w przypadku utraty zasilania (z sieci elektroenergetycznej) i przejściu na zasilanie z rezerwowego źródła (jakim najczęściej jest synchroniczny agregat prądotwórczy) w przypadku zwarć, skuteczność zadziałania zabezpieczeń w badanych instalacjach elektrycznych jest przypadkowa. Przyczyny tego problemu opisane są w pracy [1].

Podczas prowadzonych badań, okazało się, że ważnym zagadaniem budowanych układów sterowania jest odpowiedni pomiar napięć i prądów. Dlatego do realizacji tego celu, do pomiaru chwilowych wartości napięć i prądów postanowiłem opracować własne rozwiązania przetworników z rdzeniami ferrytowymi, które można by było dobierać w szerokim zakresie mierzonych częstotliwości napięć oraz prądów (w zależności od potrzeb od miliamperów do kiloamperów) [2, 3]. W wyniku prowadzonych badań nad

przetwornikami do pomiaru napięć i prądów opracowano nową konstrukcję rdzeni ferrytowych (w odniesieniu do tradycyjnych ferrytowych), która umożliwi zmniejszenie masy rdzenia oraz poprawia równomierność rozkładu pola magnetycznego w rdzeniu i w szczelnie powietrznej zarówno w przypadku pomiaru prądu stałego jak i prądu przemiennego.

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że zasilanie z rezerwowego źródła (tj. z synchronicznego agregatu prądotwórczego) takich odbiorników jak: komputery PC, laptopy, UPS-y, kompaktowe lampy fluorescencyjne, różnego typu sprzęt AV itp. powoduje, że w zależności od budowy generatora (obecność klatki tłumiącej, skosu wirnika, rodzaju uzwojenia stojana i sposobu zasilania obwodu wzbudzenia) prądy tych samych odbiorników są mniej lub bardziej odkształcone. Prądy odbiorników posiadają mniejszą zawartość wyższych harmonicznych, jeśli indukowane napięcia fazowe uzwojenia stojana w stanie biegu jałowego są mniej odkształcone (tzn. w których jest mniejsza zawartość wyższych harmonicznych określanych współczynnikami np. *THDu*, *IHDu*, *HVF* itp.).

Doświadczenia zdobyte w budowaniu programowalnych układów sterowania, przyczyniły się:

- do stwierdzenia, że nawet dla tego samego generatora synchronicznego wydatnobiegunowego zmienia się kształt indukowanych napięć, jeśli zmienia się kształt napięć i prądów zasilania obwód wzbudzenia [4],
- do podjęcia próby opracowania modeli matematycznych dla generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych, które uwzględniałyby również wpływ kształtu napięcia i prądu wzbudzenia na zawartość wyższych harmonicznych w indukowanych napięciach fazowych uzwojenia stojana [4],
- do opracowania takiego sposobu i układu sterowania, który umożliwia ograniczenie wybranych wyższych harmonicznych (szczególnie niższego rzędu) w indukowanych napięciach fazowych uzwojenia stojana [5].

Niezawodność zasilania z jednoczesnym zapewnianiem skuteczności ochrony przeciwporażeniowej oraz wymogami dotyczącymi odpowiedniej jakości indukowanych napięć fazowych, powoduje, że problematyka dotycząca rezerwowych źródeł zasilania (opartych przede wszystkim na synchronicznych agregatach prądotwórczych) jest w obecnych czasach zagadnieniem bardzo ważnym i aktualnym. Podejmując się próby rozwiązania powyższego zadania założyłem, że modele matematyczne generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych, powinny być opisane takimi równaniami, które w zależności od różnego kształtu napięcia i prądu zasilania obwód wzbudzenia pozwoliłyby w łatwy sposób uzyskać rozwiązania kształtu indukowanych napięć.

Z przeprowadzonej w monografii [M1] analizy opisów modeli matematycznych generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych wynika, że najbardziej do tej klasy zagadnień nadają się te (modele), których parametry określone są w naturalnym układzie osi współrzędnych tj. dla stojana (parametry) związane z osiami współrzędnych stojana, natomiast dla wirnika (parametry) związane z osiami współrzędnych wirnika. Jeśli w opisie indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń stojana uwzględni się, jedynie drugie harmoniczne, to przekształcenie Parka powoduje, że w układzie osi  $dq0$  indukcyjności własne nie zależą od położenia wirnika. Dlatego, jeśli obliczenia dotyczą tylko składowej podstawowej napięć i prądów, takie modele generatorów synchronicznych są powszechnie stosowane. Uwzględnienie w funkcjach indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń fazowych stojana tylko różnych wartości drugich harmonicznych powoduje, że w układzie osi  $dq0$  indukcyjności własne  $L_d, L_q, L_0$  nadal nie zależą od kąta położenia wirnika, ale indukcyjności wzajemne są już zależne od kąta położenia wirnika. Uwzględnienie szerszego spektrum wyższych harmonicznych w funkcjach indukcyjności własnych i wzajemnych uzwojeń fazowych stojana powoduje, że macierz indukcyjności w osi współrzędnych  $dq0$  zależy od kąta położenia wirnika. Przekształcenie Parka przy uwzględnieniu szerszego

spektrum wyższych harmonicznycy nie eliminuje kąta położenia wirnika i nawet dla modeli z liniowym obwodem magnetycznym wprowadza jedynie dodatkowe niepotrzebne obliczenia. Dlatego, jeśli w funkcjach indukcyjności uwzględnieni się wyższe harmoniczne, obliczenia kształtu indukowanych napięć w uzwojeniach fazowych stojana lub w prętach klatki tłumiącej najlepiej przeprowadza się, w ich naturalnych układach współrzędnych odniesienia stojana i wirnika [M1, 4].

W szczelinie powietrznej generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych opis analityczny rozkładu strumienia magnetycznego pomiędzy stojanem i wirnikiem jest bardzo złożony. Dlatego, do opisu funkcji indukcyjności własnych i wzajemnych w modelach generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych bez klatki tłumiącej (model A) oraz z klatką tłumiącą (model B), z obwodem magnetycznym liniowym i nieliniowym, bez skosu oraz ze skosem wirnika, zastosowałem programy Flux 2D Skew oraz FEMM wykorzystujące do obliczeń metody elementów skończonych. Programy te przy geometrii utworzonej na podstawie danych konstrukcyjno-materiałowych, umożliwiają bardzo dokładne obliczanie rozkładu pola magnetycznego. Dzięki zastosowaniu programów Flux 2D Skew oraz FEMM, odwzorowanie funkcji indukcyjności własnych i wzajemnych jakie przyjąłem w modelach A i B jest bardzo dokładne.

Podjmując się próby przeprowadzenia analizy wpływu kształtu napięcia i prądu wzbudzenia na zawartość wyższych harmonicznycy w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana założyłem, że model analityczny generatora synchronicznego wydatnobiegunowego powinien zapewnić możliwie prosty sposób rozwiązywania równań przy jednoczesnym bardzo dobrym odwzorowaniu funkcji indukcyjności własnych i wzajemnych oraz ich pochodnych. W przedstawionych w monografii [M1] modelach matematycznych generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych (bez klatki oraz z klatką tłumiącą, bez skosu oraz ze skosem wirnika, dla liniowego i nieliniowego obwodu magnetycznego) pracujących w stanie biegu jałowego, uwzględniłem wpływ różnego kształtu napięcia i prądu wzbudzenia. Modele te, w zależności od sposobu zasilania obwodu wzbudzenia, umożliwiają określenie kształtu indukowanych napięć fazowych w uzwojeniu stojana oraz umożliwiają obliczanie zawartości wyższych harmonicznycy określanych współczynnikami np. *THD*, *IHD*, *HVF* itp. Opracowane modele matematyczne generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych pozwoliły stwierdzić, że obwód wzbudzenia można zasilac (oprócz  $U_f = \text{const}$ ) również z dodatkową zawartością wyższych harmonicznycy, które umożliwiają znacząco obniżyć zawartość wyższych harmonicznycy niższego rzędu w indukowanych napięciach fazowych uzwojenia stojana. Taki sposób zasilania obwodu wzbudzenia pozwala szczególnie ograniczyć najbardziej znaczącą 3. harmoniczną, którą trudno jest ograniczyć przy klasycznym napięciowym lub prądowym zasilaniu obwodu wzbudzenia.

Przedstawione w monografii [M1] informacje są ważne, i można je wykorzystać podczas projektowania generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, aby w ten sposób przyczynić się do uzyskania lepszego kształtu indukowanych napięć. Ponadto, zastosowanie rozwiązania układu sterowania przedstawionego w [1] (który spełnienia warunek dopuszczalnego czasu samoczynnego wyłączenia zasilania uszkodzonego obwodu niezależnie od miejsca zwarcia od zacisków generatora synchronicznego) zapewnia skuteczność ochrony przeciwporażeniowej synchronicznych zespołów prądowórczych jako rezerwowych źródeł zasilania.

W okresie około 8 lat po doktoracie oprócz analizy zawartości wyższych harmonicznycy w napięciach i prądach maszyn i urządzeń elektrycznych, zajmowałem się również problematyką dotyczącą konfiguracji i programowaniem układów sterowania głównie opartych na przemysłowych modułowych lub kompaktowych sterownikach PLC. Budowane układy sterowania stosowałem zarówno do maszyn elektrycznych prądu przemiennego, jak

i stałego, w tym również z magnesami trwałymi. Opanowanie techniki konfiguracji i programowania paneli operatorskich, modułów komunikacyjnych sterowników PLC w połączeniu z układami energoelektronicznymi pozwoliło mi zbudować autorskie nowoczesne Komputerowe Laboratorium Maszyn Elektrycznych i Systemów Mechatronicznych, którego od początku powstania jestem kierownikiem. W tym laboratorium, dzięki wykorzystaniu programów opracowanych w środowisku graficznym LabView [6] oraz zaprojektowanych i zbudowanych przetwornikach napięciowych i prądowych [2, 3] istnieje możliwość śledzenia kształtu napięć, prądów i mocy chwilowych badanych maszyn elektrycznych z jednoczesną analizą zawartości wyższych harmonicznnych.

## c.2. Omówienie metodycznych aspektów prac oraz osiągniętych wyników

W monografii przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych oraz analizę wpływu kształtu napięcia i prądu wzbudzenia na zawartość wyższych harmonicznnych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana generatora synchronicznego wydatnobiegunowego pracującego autonomicznie w stanie biegu jałowego. Zakres badań obejmuje:

- opracowanie modeli obwodowych generatora synchronicznego wydatnobiegunowego z obecnością klatki tłumiącej (model A) i bez obecności klatki tłumiącej (model B), ze skosem i bez skosu wirnika oraz z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości obwodu magnetycznego,
- wyznaczenie funkcji indukcyjności własnych i wzajemnych występujących w modelach A i B na podstawie obliczeń rozkładu pola magnetycznego z wykorzystaniem metody elementów skończonych,
- wyznaczenie funkcji pochodnych indukcyjności własnych i wzajemnych w funkcji kąta położenia wirnika,
- analizę zawartości wyższych harmonicznnych napięć indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana dla przyjętych modeli w zależności od kształtu prądu i napięcia wzbudzenia, tj. przy wymuszeniu:
  - $I_f = const$ ,
  - $U_f = const$  oraz  $I_f = const$  uzyskanym poprzez wprowadzenie do obwodu wzbudzenia dodatkowego napięcia  $u_{fd}$ ,
  - ze stabilizowanego źródła napięcia stałego  $U_f = const$ ,
  - poprzez prostownik sześciopulsowy i układ dwóch transformatorów prądowego i napięciowego połączonych szeregowo-równolegle względem uzwojenia stojana,
  - poprzez autorski układ sterowania umożliwiający wzmocnienie lub ograniczenie zawartości wyższych harmonicznnych (w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana),
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych w zbudowanym stanowisku, w skład którego wchodzi mi. in. dwa generatory synchroniczne z następującymi wirnikami:
  - model A bez skosu wirnika,
  - model B bez skosu i ze skosem wirnika.

W modelowaniu maszyn elektrycznych dla  $\mathbf{i}$  – wektora prądów w uzwojeniach stojana i wirnika oraz elektrycznego kąta położenia osi podłużnej wirnika względem nieruchomej osi fazy  $a$  uzwojenia stojana  $\theta$ , macierzową formułą określającą funkcje pochodnych strumieni skojarzonych z uzwojeniami stojana i wirnika  $\Psi(\theta, \mathbf{i})$  można zapisać następująco:

$$\frac{d\Psi(\theta, \mathbf{i})}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \frac{\partial \Psi(\theta, \mathbf{i})}{\partial \theta} + \frac{d\Psi(\theta, \mathbf{i})}{d\mathbf{i}} \frac{d\mathbf{i}}{dt} \quad (1)$$



Przy czym, dla prądu  $i_k$  płynącego w  $k$ -tym uzwojeniu, elementy macierzy indukcyjności dynamicznych uzwojeń  $\frac{\partial \Psi(\theta, \mathbf{i})}{\partial \mathbf{i}} = \mathbf{L}^d(\theta, \mathbf{i})$  określone są, jako  $L_{n,k}^d(\theta, i_k) = \frac{d\Psi_n(\theta, i_k)}{di_k}$ .

Podczas opracowywania modeli matematycznych A i B, jednym z ważnych zagadnień jest sposób opisu funkcji indukcyjności dynamicznych. Z uwagi na złożoność obwodu magnetycznego generatora synchronicznego wydatnobiegunowego (wynikającą m. in. z nierównomiernej szczeliny powietrznej oraz z nierównomiernego rozmieszczenia obwodów klatki tłumiącej), sposób wyznaczania funkcji indukcyjności dynamicznych wymaga przyjęcia dodatkowych założeń upraszczających. Kluczowym uproszczeniem obliczeń było przyjęcie założenia, że  $\Psi(\theta, \mathbf{i}) = \mathbf{L}(\theta, \mathbf{i})\mathbf{i}$ , które oznacza, że dla nieliniowego obwodu magnetycznego, indukcyjności statyczne (występujące we wzorze  $\Psi(\theta, \mathbf{i}) = \mathbf{L}(\theta, \mathbf{i})\mathbf{i}$ ) są związane z indukcyjnościami dynamicznymi zależnościami, które tylko dla pojedynczego uzwojenia można zapisać w prostszej postaci  $L^d(\theta, i) = \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial i}i + L(\theta, i) \leq L(\theta, i)$ .

W przedstawionej monografii, przyjęto, że w przypadku ustalonego stanu biegu jałowego generatora synchronicznego wydatnobiegunowego z obwodami i bez obwodów klatki tłumiącej, o stanie nasycenia obwodu magnetycznego decyduje prąd w uzwojeniu wzbudzenia. W przypadku analizowanego generatora synchronicznego wydatnobiegunowego o mocy 5,5 kVA z wirnikiem z obwodami klatki tłumiącej, założenie takie można przyjąć, gdyż wyższe harmoniczne prądów w prętach klatki tłumiącej nie przekraczają wartości 2 A. Prądy te w poszczególnych pojedynczych prętach klatki tłumiącej (w porównaniu do prądu płynącego w kilkuset zwojowym uzwojeniu wzbudzenia) mają pomijalnie mały wpływ na stan nasycenia obwodu magnetycznego. Przy takim założeniu, dla analizowanych modeli generatora synchronicznego wydatnobiegunowego z obwodami i bez obwodów klatki tłumiącej przyjęto, że różnica pomiędzy indukcyjnościami statycznymi i dynamicznymi uzwojeń będzie zależała tylko od prądu wzbudzenia. Dlatego, dla stałej średniej wartości prądu wzbudzenia biegu jałowego wystarczające jest posługiwanie się modelem korzystającym ze zlinearyzowanej charakterystyki magnesowania. Zastosowanie zlinearyzowanej charakterystyki magnesowania powoduje, że nieliniowe indukcyjności dynamiczne i statyczne stają się równe i w zakresie małych nasyceń pochodne strumieni skojarzonych mogą być obliczane na podstawie uproszczonej zależności

$$\frac{d\Psi(\theta)}{dt} = \omega \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i} + \mathbf{L}(\theta) \frac{di_f}{dt} \quad (2)$$

Zatem, w przedstawionych w monografii [M1] obliczeniach, w modelach generatora synchronicznego wydatnobiegunowego w miejsce funkcji indukcyjności dynamicznych wystąpią statyczne nasycone funkcje indukcyjności, które dla ustalonego prądu biegu jałowego będą tylko zależne od elektrycznego kąta położenia wirnika  $\theta$ . W rozdziale drugim monografii [M1] dla ustalonego prądu biegu jałowego funkcje indukcyjności własnych i wzajemnych dla wszystkich modeli zostały wyznaczone na podstawie obliczeń w programach Flux 2D Skew oraz FEMM bazujących na metodzie elementów skończonych [4]. W monografii [M1], funkcje indukcyjności własnych i wzajemnych wyznaczono dla modeli generatora synchronicznego wydatnobiegunowego o danych znamionowych:  $S_N = 5,5$  kVA,  $U_N = 400$  V (Y),  $n_N = 3000$  obr/min,  $I_N = 7,9$  A,  $\cos\varphi_N = 0,8$ ,  $Q_s = 24$  (liczba żłobków stojana, w których ułożone jest fabrycznie jednowarstwowe uzwojenie),  $p_b = 1$  (liczba par biegunów), wirnik:

- bez skosu oraz ze skosem wirnika  $\alpha_q = 15^\circ$  (równym jednej podziałce żłobkowej stojana),
- bez klatki tłumiącej oraz z klatką tłumiącą zawierającą 10 prętów aluminiowych zwartych obustronnie segmentami pierścieni.

Otrzymane z programów Flux 2D Skew oraz FEMM funkcje indukcyjności własnych i wzajemnych powiększono o obliczone w sposób analityczny indukcyjności połączeń czołowych.

W rozdziale trzecim monografii [M1] przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dla modeli A i B. W modelu A przy stałej prędkości wirowania wirnika, analiza zawartości wyższych harmonicznyc w indukowanych napięciach fazowych  $u_a$ ,  $u_b$  i  $u_c$  jest możliwa poprzez określenie dwóch składników [4]:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= \omega \frac{\partial L_{af}(\theta, i_f)}{\partial \theta} i_f + L_{af}(\theta, i_f) \frac{di_f}{dt} \\ u_b &= \omega \frac{\partial L_{bf}(\theta, i_f)}{\partial \theta} i_f + L_{bf}(\theta, i_f) \frac{di_f}{dt} \\ u_c &= \omega \frac{\partial L_{cf}(\theta, i_f)}{\partial \theta} i_f + L_{cf}(\theta, i_f) \frac{di_f}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Pierwszy składnik w napięciach fazowych (3) określony jest, jako napięcie rotacji (zależy od elektrycznej prędkości kątowej, pochodnej funkcji indukcyjności wzajemnych pomiędzy dyskretnie rozłożonymi uzwojeniami fazowymi stojana a skupionym uzwojeniem wzbudzenia oraz wartości prądu wzbudzenia). Drugi składnik, określony jest, jako napięcie transformacji (zależy od pochodnej prądu wzbudzenia i od funkcji indukcyjności wzajemnych pomiędzy uzwojeniami fazowymi stojana a uzwojeniem wzbudzenia). W zależnościach (3) kluczowym jest przyjęcie odpowiedniego kształtu prądu wzbudzenia, który przede wszystkim wynika z rodzaju zastosowania źródła zasilania i układu sterowania. Od kształtu prądu wzbudzenia, zależy kształt pochodnej prądu wzbudzenia:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{u_f}{L_f(\theta, i_f)} - \left( \frac{\omega}{L_f(\theta, i_f)} \frac{\partial L_f(\theta, i_f)}{\partial \theta} + \frac{R_f}{L_f(\theta, i_f)} \right) i_f \quad (4)$$

Jeśli w zależności (4) uwzględni się wyższe harmoniczne przestrzenne występujące w funkcji indukcyjności wzbudzenia  $L_f(\theta, i_f)$  oraz jeśli dokona się istotnych przekształceń, to pochodna prądu wzbudzenia określona jest jako:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{u_f}{L_{f0}} + \left( \omega \frac{1}{L_{f0}} \sum_{n=1}^n n Q_s L_{fmv} \sin(n Q_s \theta) - \frac{R_f}{L_{f0}} \right) i_f \quad (5)$$

Z zależności (3) - (5) wynikają bardzo ważne wnioski:

- w indukowanych napięciach (3) pochodna prądu wzbudzenia (5) jest źródłem wyższych harmonicznyc czasowych będących wielokrotnością  $nQ_s$  (wprowadzanych przez uzłobkowanie stojana  $Q_s$ ,  $n$  – jest liczbą naturalną),
- z rozważanych w monografii [M1] klasycznych kształtów napięć i prądu zasilania obwód wzbudzenia ( $I_f = const$ ,  $U_f = const$  oraz  $I_f = const$ ,  $U_f = const$  oraz poprzez prostownik sześciopulsowy i układ dwóch transformatorów prądowego i napięciowego) najmniejszą zawartość wyższych harmonicznyc w indukowanych napięciach i w pochodnej prądu wzbudzenia uzyska się poprzez zastosowanie zasilania  $U_f = const$ , natomiast największa zawartość wyższych harmonicznyc występuje przy  $I_f = const$ ,
- w przypadku generatorów synchronicznych o małej mocy do kilkudziesięciu kVA, (z uwagi na małą długość szczeliny powietrznej i dużą wartość indukcyjności własnej uzwojenia wzbudzenia) włączenie dodatkowej indukcyjności w obwód wzbudzenia (jak to ma np. miejsce w układzie z prostownikiem sześciopulsowym i układem dwóch transformatorów prądowego i napięciowego) będzie powodować zmniejszenie wpływu napięć transformacji, co spowoduje zwiększenie odkształcenia indukowanych napięć fazowych (3) poprzez wzrost udziału wyższych harmonicznyc w napięciach rotacji,

- duże wartości indukcyjności własnej uzwojenia wzbudzenia będą ograniczać uzyskanie szybszych zmian pochodnej prądu wzbudzenia oraz będą ograniczać udział napięć transformacji w relacji oraz w przeciwfazie do napięć rotacji,
- przy stałej wartości rezystancji wzbudzenia  $R_f = const$  zwiększenie wpływu napięć transformacji (3) można uzyskać poprzez szybsze zmiany pochodnej prądu wzbudzenia (np. zwiększając wartość napięcia zasilania  $u_f$  i wprowadzając do obwodu wzbudzenia układ energoelektroniczny z modulacją PWM tzw. układ AVR),
- zasilanie obwodu wzbudzenia przy  $u_f = var$  spowoduje, że pochodna prądu wzbudzenia będzie źródłem nie tylko wyższych harmonicznym  $nQ_s$ , ale również i harmonicznym wynikających ze sposobu zasilania  $u_f$ ,
- w przypadku odpowiednio ukształtowanego napięcia zasilania  $u_f = var$  można uzyskać zwiększenie lub ograniczenie zawartości wyższych harmonicznym w pochodnej prądu wzbudzenia oraz w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana.

Na podstawie przeprowadzonej analizy na przykładzie modelu A wynika, że kształt prądu wzbudzenia (i pochodna prądu wzbudzenia) ma znaczny wpływ na kształt indukowanych napięć. Ponieważ o składowej podstawowej napięcia decyduje napięcie rotacji, to wpływ obecności napięcia transformacji (będącego w przeciwfazie do napięcia rotacji) będzie wpływał na zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznym w indukowanych napięciach pochodzących od napięć rotacji. Próba wymuszenia prądu stałego w obwodzie wzbudzenia będzie zawsze skutkowałą wzrostem zawartości wyższych harmonicznym w indukowanych napięciach w uzwojeniach fazowych stojana. Z analizy wynika, że poprzez odpowiedni dobór kształtu prądu płynącego w obwodzie wzbudzenia istnieje możliwość zwiększania lub ograniczania występowania wyższych harmonicznym w indukowanych napięciach. Ten sposób sterowania kształtem prądu w obwodzie wzbudzenia został przedstawiony w dalszej części rozdziału 3 na przykładzie napięcia o odpowiednio dobranej  $U_{fmk}$  - amplitudzie  $k$ -tej harmonicznym i  $\gamma$  fazie (w monografii [M1] rozważono wpływ amplitudy drugiej harmonicznym  $U_{fm2}$  i fazy  $\gamma = 0^\circ$ )

$$u_{fk} = U_{f0} + U_{fmk} \sin(k\omega t + \gamma) = U_{f0} + U_{fmk} \sin(k\theta + \gamma) \quad (6)$$

W ten sposób uzyskuje się nowe wyrażenie na pochodną prądu wzbudzenia (5), którą można zapisać, jako

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{U_{f0}}{L_{f0}} + \frac{U_{fmk} \sin(k\theta + \gamma)}{L_{f0}} + \left( \omega \frac{1}{L_{f0}} \sum_{n=1}^n vQ_s L_{fmv} \sin(nQ_s \theta) - \frac{R_f}{L_{f0}} \right) i_f \quad (7)$$

Uwzględnienie (7) w zależności (3) pozwala określić wpływ  $k$ -tej harmonicznym i fazy  $\gamma$  występujących w napięciu (6) na kształt indukowanych napięć fazowych uzwojenia stojana. Z przeprowadzonej w monografii [M1] analizy wynika, że:

- napięcie  $u_{fk}$  zasilające obwód wzbudzenia jest źródłem dodatkowych wyższych harmonicznym czasowych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana,
- odpowiedni dobór rzędu harmonicznym czasowej  $k$ , wartości amplitudy napięcia  $U_{fmk}$  oraz fazy  $\gamma$  umożliwia wprowadzenie zmian amplitud wyższych harmonicznym w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana,
- jeśli w napięciu  $u_{fk}$  (6) kąt:  $\gamma = 0$  (ważny z punktu widzenia ograniczania wyższych harmonicznym w napięciu  $u_a$ ),  $\gamma = -2/3\pi$  (ważny z punktu widzenia ograniczania wyższych harmonicznym w napięciu  $u_b$ ) lub  $\gamma = 2/3\pi$  (ważny z punktu widzenia ograniczania wyższych harmonicznym w napięciu  $u_c$ ), to można wprowadzać do indukowanych napięć fazowych dodatkowe harmoniczne, które pozwalają znacząco

ograniczać udział wybranej harmonicznej, odpowiednio w indukowanych napięciach fazowych  $u_a$ ,  $u_b$  lub w  $u_c$ ,

- informacja o napięciu  $u_{fk}$  i kącie  $\gamma$  może być szczególnie przydatna w przypadku zasilania obwodu wzbudzenia z układów AVR z modulacją PWM podczas zasilania odbiornika jednofazowego z generatora synchronicznego jedno- lub trójfazowego, gdzie największy udział w odkształcaniu napięć fazowych indukowanych w uzwojeniach stojana mają harmoniczne niższego rzędu, a szczególnie 3. harmoniczna [4].

Jak wykazano w monografii [M1] zasilanie obwodu wzbudzenia napięciem stałym z dodatkowo wprowadzonym napięciem zawierającym drugą harmoniczną o amplitudzie 280 V pozwala prawie na całkowite ograniczenie trzeciej harmonicznej w indukowanym napięciu. Podczas badań eksperymentalnych uzyskano 3,9% wartości początkowej 3. harmonicznej, przy zachowaniu takiej samej amplitudy składowej podstawowej, przy jednoczesnym ograniczeniu 5. i 7. harmonicznej. Dzięki tej metodzie sterowania uzyskano wymagany dla źródeł zasilania napięcia przemiennego współczynnik *HVF* znacznie poniżej 2% (PN-EN 60034-1). Należy podkreślić, że uzyskanie dla napięć fazowych wartości  $HVF \leq 2\%$  nie jest możliwe w żadnym z innych analizowanych w monografii [M1] klasycznych sposobów sterowania prądem i napięciem wzbudzenia dla badanego generatora synchronicznego. Ograniczenie 3. harmonicznej do 3,9% wartości początkowej było możliwe przy amplitudzie 2. harmonicznej napięcia  $U_{fm2} = 280$  V. Wydaje się to zbyt duża wartość napięcia w odniesieniu do składowej stałej  $U_f = 18$  V. Jednak, z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że w przypadku tego samego generatora synchronicznego o mocy 5,5 kVA ale przy zasilaniu obwodu wzbudzenia poprzez fabryczny układ AVR (z PWM) przy dużej indukcyjności własnej obwodu wzbudzenia (ok. 5 H) aby uzyskać szybkie zmiany prądu, napięcie zasilania w tym obwodzie wynosi 450 V.

Przedstawiony sposób sterowania (poprzez wprowadzenie do obwodu wzbudzenia dodatkowej harmonicznej napięcia  $u_{fk}$ ) w przypadku jednofazowych generatorów synchronicznych (lub trójfazowych generatorów synchronicznych ale pracujących na jednofazowe obciążenie) ma niewątpliwie duże zalety. Jednak wadą rozważanej metody sterowania napięciem jest fakt, że wprowadzenie do obwodu wzbudzenia dodatkowego napięcia  $u_{fk}$  (6) w zależności od kąta  $\gamma$  pozwala na ograniczenie zawartości wyższych harmonicznych tylko w jednym napięciu fazowym uzwojenia stojana.

W monografii [M1] przeanalizowany został również często stosowany w agregatach prądotwórczych przypadek zasilania obwodu wzbudzenia poprzez prostownik sześciopulsowy i układ dwóch transformatorów prądowego i napięciowego połączonych szeregowo-równolegle względem uzwojenia stojana generatora synchronicznego. Ten przypadek zasilania obwodu wzbudzenia jest o tyle ciekawy, że pomimo tego, iż całkowita zawartość wyższych harmonicznych w napięciu zasilania obwód wzbudzenia wynosi z pomiarów  $THDu_{f-pom} = 172\%$  oraz z symulacji  $THDu_{f-pom} = 166,3\%$  (liczonego względem składowej stałej  $U_{f0}$  w obu przypadkach przy dużych stromościach i zmianie kierunku napięcia zasilania), to zawartość wyższych harmonicznych w napięciach fazowych uzwojenia stojana dla badanych modeli jest bardzo podobna jak dla przypadku zasilania  $U_f = \text{const}$ . Z przeprowadzonych badań wynika, że napięciowy charakter zasilania obwodu wzbudzenia i występowanie nawet niewielkich zmian prądu wzbudzenia ma wpływ na jej pochodną, która powoduje, że udział wyższych harmonicznych od napięć rotacji jest ograniczany przez wpływ wyższych harmonicznych napięć transformacji (przypadek  $U_f = \text{const}$  omawiany już wcześniej). Dlatego agregaty prądotwórcze z tym sposobem zasilania obwodu wzbudzenia są chętnie stosowane jako rezerwowe źródło zasilania. Ponadto, jak przekonałem się doświadczalnie, układ dwóch transformatorów prądowego i napięciowego połączonych szeregowo-równolegle względem uzwojenia stojana generatora synchronicznego jest bardziej

odporny na przepięcia i przetężenia niż agregaty prądotwórcze ze wzbudzeniem zasilanym przez układy AVR.

Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań symulacyjnych dla modeli generatora synchronicznego wydatnobięgunowego bez klatki tłumiącej stały się podstawą do dokonania analizy dla modeli z klatką tłumiącą dla przypadków  $U_f = \text{const}$  i  $I_f = \text{const}$ . Zależności określające kształt indukowanych napięć fazowych w uzwojeniach stojana oraz pochodnych prądów w obwodzie wzbudzenia i w prętach klatki tłumiącej (z uwzględnieniem wyższych harmonicznych przestrzennych w funkcjach indukcyjności wzajemnych i w ich pochodnych) z uwagi na ich złożony zapis podane są w pełnej formie w monografii [M1]. Poniżej, dla modeli generatora synchronicznego z klatką tłumiącą podano uproszczony zapis zależności określających indukowane napięcia fazowe rotacji  $u_{a-rot}$ ,  $u_{b-rot}$  i  $u_{c-rot}$  oraz transformacji  $u_{a-tran}$ ,  $u_{b-tran}$  i  $u_{c-tran}$

$$\begin{bmatrix} u_{a-rot} \\ u_{b-rot} \\ u_{c-rot} \end{bmatrix} = \omega \frac{\partial}{\partial \theta} \begin{bmatrix} L_{af}(\theta, i_f) & L_{ar(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{ar(k)}(\theta, i_f) \\ L_{bf}(\theta, i_f) & L_{br(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{br(k)}(\theta, i_f) \\ L_{cf}(\theta, i_f) & L_{cr(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{cr(k)}(\theta, i_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_{r(1)} \\ \dots \\ i_{r(k)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} u_{a-tran} \\ u_{b-tran} \\ u_{c-tran} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{af}(\theta, i_f) & L_{ar(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{ar(k)}(\theta, i_f) \\ L_{bf}(\theta, i_f) & L_{br(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{br(k)}(\theta, i_f) \\ L_{cf}(\theta, i_f) & L_{cr(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{cr(k)}(\theta, i_f) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_f \\ i_{r(1)} \\ \dots \\ i_{r(k)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

W wyrażeniach (8) i (9)  $\begin{bmatrix} L_{af}(\theta, i_f) & L_{ar(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{ar(k)}(\theta, i_f) \\ L_{bf}(\theta, i_f) & L_{br(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{br(k)}(\theta, i_f) \\ L_{cf}(\theta, i_f) & L_{cr(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{cr(k)}(\theta, i_f) \end{bmatrix}$  jest macierzą indukcyjności wzajemnych uzwojenia stojana z uzwojeniem wzbudzenia i z prętami klatki tłumiącej. Ponadto,  $\mathbf{i}_{fr} = [i_f, i_{r(1)}, \dots, i_{r(k)}]^T$  jest wektorem prądu wzbudzenia oraz prądów w  $k$  - prętach klatki tłumiącej. Pochodna tej macierzy określona jest jako

$$\frac{d\mathbf{i}_{fr}}{dt} = \mathbf{L}_{fr}^{-1}(\theta, i_f) \left[ \mathbf{u}_{fr} - \left( \omega \frac{\partial \mathbf{L}_{fr}(\theta, i_f)}{\partial \theta} + \mathbf{R}_{fr} \right) \mathbf{i}_{fr} \right] \quad (10)$$

gdzie:  $\mathbf{L}_{fr}(\theta, i_f) = \begin{bmatrix} L_f(\theta, i_f) + L_{ef} & L_{fr(1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{fr(10)}(\theta, i_f) \\ L_{r(1)f}(\theta, i_f) & L_{r(1)}(\theta, i_f) + L'_{er} & \dots & L_{r(1,10)}(\theta, i_f) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ L_{r(10)f}(\theta, i_f) & L_{r(10,1)}(\theta, i_f) & \dots & L_{r(10)}(\theta, i_f) + L'_{er} \end{bmatrix}$  jest macierzą

indukcyjności wzajemnych uzwojenia wzbudzenia z 10. prętami klatki tłumiącej powiększonych o indukcyjności rozproszon połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia  $L_{ef}$

oraz segmentów pierścieni  $L'_{er}$ ,  $\mathbf{R}_{fr} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{r(1)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & R_{r(10)} \end{bmatrix}$  jest macierzą rezystancji

wzbudzenia oraz 10 zastępczych prętów klatki tłumiącej,  $\mathbf{u}_{fr}$  jest wektorem napięć zasilania obwodu wzbudzenia i zwartych prętów klatki tłumiącej  $\mathbf{u}_{fr} = [u_f, u_{r(1)}, \dots, u_{r(10)}]^T = [u_f, 0, \dots, 0]^T$ .

Zależność (10) otrzymano poprzez zastąpienie klasycznego oczkowego sposobu modelowania obwodów tłumiących (najczęściej stosowany) schematem elektrycznym zastępczym, który utworzono poprzez obustronne szeregowe sprowadzanie rezystancji

i indukcyjności reprezentujących segmenty pierścieni do zastępczych pojedynczych faz z prętami klatki tłumiącej [M1]. Dla tak utworzonego modelu można np. w sposób bardzo łatwy sprawdzić obecność indukowanych napięć w pojedynczych rozwartych prętach klatki tłumiącej, które dla  $i_{r(k)} = 0$  wynoszą

$$\frac{d\psi_{r(k)}\{\theta, i_f\}}{dt} = u_{r(k)} \quad (11)$$

Metoda elementów skończonych z wykorzystaniem programu FEMM (do obliczeń rozkładu pola magnetycznego) pozwala w sposób bezpośredni określić wartość strumienia sprzęgniętego z  $k$ -tym prętem. W monografii [M1] indukowane napięcia w pojedynczych rozwartych prętach klatki tłumiącej określiłem na podstawie zależności, w której występują napięcia rotacji (związane z pochodnymi funkcji indukcyjności wzajemnych uzwojenia wzbudzenia z prętami klatki tłumiącej i z prądem wzbudzenia) i transformacji (związane z funkcjami indukcyjności wzajemnych uzwojenia wzbudzenia z prętami klatki tłumiącej i z pochodnymi prądu wzbudzenia)

$$\left. \begin{aligned} u_{r(1)} &= \omega \frac{\partial L_{r(1)f}(\theta, i_f)}{\partial \theta} i_f + L_{r(1)f}(\theta, i_f) \frac{di_f}{dt} \\ &\dots \\ u_{r(10)} &= \omega \frac{\partial L_{r(10)f}(\theta, i_f)}{\partial \theta} i_f + L_{r(10)f}(\theta, i_f) \frac{di_f}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Jeśli wymuszeniem jest  $I_f = const$ , to w rozwartych prętach klatki tłumiącej będą indukować się tylko napięcia rotacji. Kształt napięć rotacji będzie wprost proporcjonalny do kształtu pochodnych funkcji indukcyjności wzajemnych pomiędzy uzwojeniem wzbudzenia i prętami klatki tłumiącej.

Wprowadzenie do wirnika  $Q_r = 10$  prętów aluminiowych klatki tłumiącej dla obwodu magnetycznego liniowego i nieliniowego powoduje:

- zmniejszenie wartości składowej stałej indukcyjności własnych uzwojenia wzbudzenia, odpowiednio o 0,5% oraz 3,6%,
- zmniejszenie wartości amplitudy składowej podstawowej indukcyjności wzajemnych uzwojeń fazowych stojana i wzbudzenia, odpowiednio o 0,4% oraz 2,8%,
- powstanie harmonicznnych żłobkowych wirnika stanowiących wielokrotność liczby  $mQ_r \pm 1$ ,  $m$  jest liczbą całkowitą, czyli  $mQ_r \pm 1 \in \{9. \text{ i } 11., 19. \text{ i } 21., 29. \text{ i } 31. \text{ itd}\}$  w funkcjach określających indukcyjności: wzajemne uzwojeń stojana i uzwojenia wzbudzenia, uzwojeń stojana z prętami klatki tłumiącej, uzwojenia wzbudzenia z prętami klatki tłumiącej oraz w pochodnych tych funkcji.

Jeśli znane są składowe stałe funkcji indukcyjności prętów klatki tłumiącej leżące w osi podłużnej wirnika (dla badanego generatora są to pręty 3 i 8 [M1]), to można wyprowadzić zależność, która pozwala określić składowe stałe funkcji indukcyjności własnych  $k$ -tego przestrzennie położonego pręta klatki tłumiącej, jako

$$L_{r(k)0} = L_{r(3)0} \cos(\alpha_{r(k)}) \left( 1 + \frac{\delta_0}{\cos(\alpha_{r(k)})} - \delta_0 \right) \frac{1}{K_s} \quad (13)$$

gdzie:  $\alpha_{r(k)}$  – kąt elektryczny zawarty pomiędzy osią  $k$ -tego pręta względem środka wirnika i osią podłużną,  $\delta_0$  – początkowa długość szczeliny powietrznej w osi podłużnej,  $K_s$  – współczynnik nasycenia.

W badanych modelach w stanie biegu jałowego, różnica w zasilaniu obwodu wzbudzenia przy  $U_f = const$  oraz  $I_f = const$  polega na zerowaniu tylko pochodnej prądu wzbudzenia (jeśli  $I_f = const$ ). Na skutek indukowanych w prętach klatki tłumiącej odkształconych napięć o harmonicznnych rzędu  $\nu Q_s$ , pochodne prądów w prętach klatki tłumiącej dla obwodu magnetycznego nieliniowego (o amplitudach ok. 1 A w prętach w osi

podłużnej oraz ok. 2 A w prętach najbardziej oddalonych od osi podłużnej) osiągają odpowiednio wartości 8 kA/s i 13 kA/s. Takie wartości pochodnych prądów w prętach klatki tłumiącej są wynikiem dużych stromości prądów harmoniczných rzędu  $\nu Q_s$ . W przypadku liniowego obwodu magnetycznego wyższe harmoniczne prądów w prętach klatki tłumiącej są 8 razy bardziej tłumione, co jest wynikiem większej przenikalności obwodu magnetycznego liniowego i w konsekwencji większymi wartościami indukcyjności własnych prętów klatki tłumiącej. Przy czym, najmniejsze wartości prądów występują w prętach klatki tłumiącej dla modelu z liniowym obwodem magnetycznym ze skosem wirnika. W pochodnych prądu wzbudzenia i w pochodnych prądów w prętach klatki tłumiącej występuje ten sam rząd harmoniczných, jaki występuje w prądzie wzbudzenia dla modeli generatora synchronicznego bez klatki tłumiącej.

Jak już wspomniano, omawiając modele A przy  $U_f = const$ , od wartości pochodnej prądu wzbudzenia zależy jej wpływ na zmniejszenie zawartości wyższych harmoniczných napięć indukowaných w uzwojeniach fazowych stojana. Tak też będzie i w przypadku modeli B. Jednak, w przypadku modeli B, duży wpływ pochodnych prądów (w przestrzennie rozłożonych prętach klatki tłumiącej w nabiegownikach) ma znacznie większy wpływ na udział napięć transformacji, co w konsekwencji będzie dla tych modeli przyczyną znacznego odkształcenia napięć indukowaných w uzwojeniach fazowych stojana.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, informacja o wyborze sposobu sterowania prądem lub napięciem w obwodzie wzbudzenia w odniesieniu do zawartości wyższych harmoniczných w indukowaných napięciach jest bardzo ważna. Mając na uwadze świadomy wybór układu sterowania gwarantujący najmniejsze odkształcenie indukowaných napięć fazowych w uzwojeniu stojana generatora synchronicznego należy również pamiętać o bardzo ważnej funkcji, jaką powinien spełnić układ sterowania, a mianowicie powinien również gwarantować ochronę przeciwporażeniową. W przypadku, gdy tradycyjne urządzenia zabezpieczające (RCD, bezpieczniki czy wyłączniki instalacyjne nadprądowe) zostaną źle dobrane lub staną się zawodne (tzn. nie wyłączą uszkodzonego obwodu w wymaganym przepisami dopuszczalnym czasie podczas utrzymywania się niebezpieczno napięcia dotykowego na chronionych obudowach) uzupełnieniem instalacji elektrycznej zasilanej z generatora synchronicznego może być układ gwarantujący skuteczność ochrony przeciwporażeniowej w postaci układu sterowania napięciem i prądem wzbudzenia lub zewnętrznego układu sterowania z oddzielnie dobranymi zabezpieczeniami sekcyjnymi [1]. Wyniki badań eksperymentalnych układu sterowania dla zasilania instalacji elektrycznej z generatorem synchronicznym wydatnobiegunowym z zabezpieczeniami typu wyłączniki instalacyjne nadprądowe przedstawiono w pracy [1]. Z przedstawionych badań eksperymentalnych jednoznacznie wynika, że zbudowany układ sterowania w przypadku wadliwie dobranych lub wadliwie działających urządzeń zabezpieczających gwarantuje skuteczność ochrony przeciwporażeniowej instalacji zasilanej z synchronicznych agregatów prądotwórczych niezależnie od wartości prądu zwarcioowego i miejsca zwarcia [1].

Poprawność przedstawionych w monografii [M1] badań symulacyjnych modeli generatora synchronicznego wydatnobiegunowego została zweryfikowana eksperymentalnie dla następujących przypadków zasilania obwodu wzbudzenia:

- $U_f = const$  (zasilanie ze stabilizowanego źródła napięcia stałego),
- poprzez prostownik sześciopulsowy i układ dwóch transformatorów prądowego i napięciowego połączonych szeregowo-równolegle względem uzwojenia stojana,
- poprzez autorski układ sterowania, który umożliwia wzmocnienie lub ograniczenie zawartości wyższych harmoniczných w napięciach indukowaných w uzwojeniach fazowych stojana.

Aby przeprowadzić badania eksperymentalne zaprojektowałem i zbudowałem stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi dwa zestawy maszyn elektrycznych

z generatorami synchronicznymi wydatnobiegunowymi o mocy 5,5 kVA. Do tych zestawów zaprojektowałem i wykonałem wirniki wydatnobiegunowe bez skosu oraz ze skosem  $\alpha = 15^\circ$  (równy jednej podziałce żłobkowej stojana) bez klatki jak i z klatką tłumiącą umieszczoną w dwóch nabiegunnikach w zamkniętych żłobkach. Przy czym, klatka tłumiąca składa się z 10 prętów aluminiowych zwartych obustronnie segmentami pierścieni aluminiowych. Dzięki specjalnie zaprojektowanym wirnikom o wałach dłuższych niż fabrycznie i zamontowanym dodatkowym dwóm zestawom po 5 pierścieni z każdej strony wału, po zdjęciu pierścieni zwierających, istnieje możliwość rejestracji indukowanych napięć w pojedynczych prętach klatki tłumiącej (ze skosem i bez skosu wirnika). Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych jednoznacznie wynika, że w pojedynczych prętach klatki tłumiącej indukują się napięcia określone zależnością (12).

W stanowisku badawczym w obwodach stojana i wirnika zamontowano zaprojektowane i zbudowane dwa zestawy autorskich przetworników do pomiaru chwilowych wartości napięć oraz prądów (w zakresach od miliamperów do kiloamperów). Zbudowane zestawy przetworników (Dodatek D.2), które wchodzi w skład układu pomiarowego oraz układu sterowania kształtem napięcia i prądu wzbudzenia opisane zostały w [2, 3].

Ponadto, w układzie sterowania napięciem i prądem wzbudzenia zastosowano zbudowane zestawy trójkanałowych filtrów dolnoprzepustowych Bessela 2. rzędu (szczegóły w Dodatku D.1), które wykorzystałem do pomiaru składowej podstawowej napięć indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana oraz do pomiaru składowej stałej prądu i napięcia wzbudzenia.

### c.3. Podsumowanie

Monografia [M1] przedstawia wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych wpływu kształtu napięcia i prądu wzbudzenia na zawartość wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana generatora synchronicznego wydatnobiegunowego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym w ustalonym stanie biegu jałowego. W monografii [M1]:

- na podstawie danych konstrukcyjno-materiałowych generatora synchronicznego wydatnobiegunowego o mocy 5,5 kVA utworzono geometrię obwodu magnetycznego stojana i wirnika w programach Flux 2D Skew oraz FEMM i wyznaczono funkcje indukcyjności własnych i wzajemnych występujące w modelach obwodowych generatora synchronicznego wydatnobiegunowego z wirnikiem z obecnością i bez obecności klatki tłumiącej, ze skosem i bez skosu wirnika oraz z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości rdzenia,
- opracowano model obwodowy generatora synchronicznego wydatnobiegunowego z wirnikiem z obecnością i bez obecności klatki tłumiącej, ze skosem i bez skosu wirnika oraz z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości rdzenia,
- dla modeli z klatką tłumiącą z liniowym i nieliniowym obwodem magnetycznym z uwzględnieniem nierównomiernej długości szczeliny powietrznej na podstawie znanej indukcyjności pręta leżącego w osi podłużnej określono zależności pozwalające na wyznaczenie składowych stałych indukcyjności własnych  $k$ -tego pręta tłumiącego,
- na podstawie opracowanych modeli obwodowych bez klatki tłumiącej oraz z klatką tłumiącą dokonano analizy wpływu kształtu przebiegu napięcia i prądu wzbudzenia na zawartość wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana. Dla modeli obwodowych bez klatki tłumiącej badania symulacyjne przeprowadzono dla następujących przypadków:
  - $U_f = const, I_f = const$  oraz  $U_f = const$  i  $I_f = const$  przy dodatkowo wprowadzonym do obwodu wzbudzenia napięciu  $u_{fd}$ ,



- przy zasilaniu obwodu wzbudzenia poprzez prostownik i szeregowo-równoległy układ dwóch transformatorów prądowego i napięciowego względem uzwojeń stojana,
- poprzez autorski układ sterowania, który po doprowadzeniu do obwodu wzbudzenia dodatkowego napięcia umożliwia zmianę zawartości wyższych harmonicznych w pochodnej prądu wzbudzenia oraz w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana.

Dla modeli obwodowych z klatką tłumiącą badania symulacyjne przeprowadzono dla przypadków  $U_f = const$  oraz  $I_f = const$ .

- do przeprowadzenia weryfikacji eksperymentalnej zbudowałem stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi dwa zestawy maszyn elektrycznych z generatorami synchronicznymi wydatnobiegunowymi o mocy 5,5 kVA napędzane silnikiem prądu stałego i silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika napięcia. Do tych generatorów synchronicznych o mocy 5,5 kVA wykonałem trzy wirniki zbudowane z blach elektrotechnicznych:
  - bez skosu wirnika i bez klatki tłumiącej,
  - bez skosu wirnika i z klatką tłumiącą,
  - ze skosem wirnika i z klatką tłumiącą.

W monografii [M1] została przedstawiona metodologia wyznaczania zawartości wyższych harmonicznych w indukowanych napięciach fazowych generatora synchronicznego wydatnobiegunowego z uwzględnieniem i bez uwzględnienia nieliniowości obwodu magnetycznego z wirnikami: z obecnością i bez obecności klatki tłumiącej, ze skosem i bez skosu. W modelowaniu generatora synchronicznego wydatnobiegunowego szczególną uwagę zwrócono na dokładny opis funkcji indukcyjności własnych i wzajemnych oraz ich pochodnych. Z przeprowadzonych badań wynika, że w analizie zawartości wyższych harmonicznych w indukowanych napięciach fazowych stojana bardzo ważnym jest dokładne określenie prądu wzbudzenia, który poprzez pochodną wprowadza wyższe harmoniczne napięcie transformacji będące w przeciwfazie do wyższych harmonicznych napięć rotacji. Zjawisko to jest najbardziej widoczne przy porównaniu zasilania obwodu wzbudzenia przy  $I_f = const$  i  $U_f = const$ . Próba ograniczania wpływu pochodnej prądu wzbudzenia będzie zawsze skutkowałą:

- wzrostem zawartości wyższych harmonicznych (pochodzących od napięć rotacji  $\omega(\partial L_{af}(\theta, i_f)/\partial \theta)i_f$ ,  $\omega(\partial L_{bf}(\theta, i_f)/\partial \theta)i_f$ ,  $\omega(\partial L_{cf}(\theta, i_f)/\partial \theta)i_f$ ) w relacji do składowej podstawowej napięć fazowych uzwojenia stojana,
- wzrostem indukowanego napięcia w obwodzie wzbudzenia (pochodzącego od napięć rotacji  $\omega(\partial L_f(\theta, i_f)/\partial \theta)i_f$ ), mogącego przykładowo dla obwodu magnetycznego liniowego dla prądu znamionowego wzbudzenia 4,7 A osiągnąć wartości ok. 1 kV.

Z przedstawionych w monografii [M1] badań symulacyjnych i eksperymentalnych wynika, że w przypadku klasycznych sposobów zasilania obwodu wzbudzenia:

- najmniejszą zawartość wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana mają generatory synchroniczne wydatnobiegunowe pracujące przy  $U_f = const$ . Przy czym generatory synchroniczne wydatnobiegunowe ze skosem wirnika: bez obecności klatki tłumiącej posiadają  $THDu = 8,41\%$  (eksperyment) i  $THDu = 7,37\%$  (symulacja), natomiast w przypadku obecności klatki tłumiącej odpowiednio  $THDu = 8,29\%$  (eksperyment) i  $THDu = 8,40\%$  (symulacja).
- największą zawartość wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana mają generatory synchroniczne wydatnobiegunowe bez skosu wirnika z obecnością klatki tłumiącej  $THDu = 14,91\%$  (eksperyment) i  $THDu = 13,79\%$  (symulacja).

Wprowadzenie zamkniętych zębów z klatką tłumiącą w nabiegownikach tylko w przypadku braku nasycenia poprawia rozkład pola magnetycznego w szczelinie powietrznej. Z przeprowadzonych badań wynika, że powstające nasycenie obwodu magnetycznego wirnika powoduje, że zamknięte zębki z klatką tłumiącą (w niniejszej monografii liczba prętów klatki tłumiącej  $Q_r = 10$ , po 5 na każdy nabiegownik) robią się początkowo częściowo otwarte, a przy wzroście nasycenia robią się już całkowicie otwarte. W indukowanych napięciach widoczne jest to zwiększonymi wartościami harmonicznymi zębów wirnika  $kQ_r \pm 1 \in (11., 21., 49., 51., 71. \text{ itp.})$ . Wprowadzony skos wirnika  $\alpha_q = 15^\circ$  (równy jednej podziałce zębów stojana zastosowany do ograniczania harmonicznymi  $kQ_s \pm 1$ ) w znacznym stopniu ogranicza również harmoniczne  $kQ_r \pm 1$ . Całkowite ograniczenie harmonicznymi  $kQ_r \pm 1$  uzyskano by, gdyby skos wirnika wyniósł  $18^\circ$  (jednak wprowadzenie skosu wirnika  $18^\circ$  wpłynęłoby na zwiększenie udziału harmonicznymi  $kQ_s \pm 1$ ).

Znaczna niesymetria obwodu magnetycznego wirnika powoduje, że generatory synchroniczne wydatnobiegunowe nawet dla obwodu magnetycznego liniowego mają znaczny udział 3. harmonicznymi (a wprowadzenie do obwodu wirnika zębów klatki tłumiącej jeszcze bardziej powoduje wzrost udziału 3. harmonicznymi). Ze względu na znaczny udział 3. harmonicznymi, żaden z badanych modeli generatora synchronicznego wydatnobiegunowego przy klasycznym zasilaniu obwodu wzbudzenia nawet przy  $U_f = \text{const}$  oraz dla wirnika ze skosem i bez klatki tłumiącej nie spełnia wymogu stawianego źródłom napięcia przemiennego, aby  $HVF \leq 2\%$  (niemożliwym jest również bez ograniczenia wpływu 3. harmonicznymi uzyskanie  $THDu_a$  poniżej 5%).

Uzyskanie wartości  $HVF \leq 2\%$  w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana stało się dopiero możliwe poprzez znaczne ograniczenie 3. harmonicznymi. W monografii [M1] uzyskano  $HVF \leq 2\%$  na przykładzie napięcia fazowego  $u_a$  poprzez zasilanie obwodu wzbudzenia napięciem  $u_f = U_{f0} + U_{f2} \sin(2\omega t + \gamma)$  przy  $\gamma = 0$  (czyli napięciem zawierającym składową stałą i 2. harmoniczną).

Wadą metody zasilania uzwojenia wzbudzenia  $u_f = U_{f0} + U_{f2} \sin(2\omega t + \gamma)$  jest to, iż ta metoda może być stosowana tylko do pracy jednofazowej trójfazowych generatorów synchronicznych lub generatorów synchronicznych jednofazowych.

### **Za najważniejsze osiągnięcia poznawcze oraz najbardziej istotne rezultaty wykonanych prac uważam:**

- opracowanie modeli matematycznych generatorów synchronicznych wydatnobiegunowych o różnym poziomie uszczegółowienia parametrów konstrukcyjnych wirnika (bez klatki oraz z klatką tłumiącą, bez skosu oraz ze skosem wirnika) z uwzględnieniem liniowości i nieliniowości obwodu magnetycznego,
- opracowanie metodologii analitycznego opisu modelowania kształtu indukowanych napięć w uzwojeniach fazowych stojana generatora synchronicznego wydatnobiegunowego w stanie biegu jałowego przy różnym kształcie napięcia i prądu wzbudzenia,
- opracowanie koncepcji określenia funkcji indukcyjności własnych i wzajemnych oraz ich pochodnych w funkcji położenia wirnika oraz z uwzględnieniem liniowości i nieliniowości obwodu magnetycznego,
- opracowanie koncepcji i sposobu sterowania oraz zbudowanie układu sterowania, który umożliwia zmianę zawartości wyższych harmonicznymi w pochodnej prądu wzbudzenia oraz w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana,

- przeprowadzenie analizy wpływu kształtu przebiegu napięcia i prądu wzbudzenia na zawartość wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana dla następujących przypadków:
  - $U_f = const$ ,
  - $I_f = const$ ,
  - $U_f = const$  i  $I_f = const$  przy dodatkowo wprowadzonym do obwodu wzbudzenia napięciu  $u_{fd}$ ,
  - przy zasilaniu obwodu wzbudzenia poprzez prostownik i szeregowo-równoległy układ dwóch transformatorów prądowego i napięciowego,
  - poprzez układ sterowania, który po doprowadzeniu do obwodu wzbudzenia dodatkowego napięcia umożliwi zmianę zawartości wyższych harmonicznych w pochodnej prądu wzbudzenia oraz w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana,
- opracowanie koncepcji i projektu stanowiska badawczego, w skład którego wchodzi dwa zestawy maszyn elektrycznych z generatorami synchronicznymi wydatnobiegunowymi o mocy 5,5 kVA, z możliwością pomiaru napięć indukowanych w poszczególnych rozwartych prętach klatki tłumiącej,
- opracowanie koncepcji, projektu i sposobu wykonania wirników wydatnobiegunowych (z blach elektrotechnicznych 0,5 mm) bez skosu oraz ze skosem ( $\alpha = 15^\circ$  równej jednej podziałce żłobkowej stojana) z klatką, jak i bez klatki tłumiącej, przy czym w zaprojektowanej konstrukcji wirników z klatką tłumiącą istnieje możliwość pomiaru napięć indukowanych w pojedynczych prętach klatki tłumiącej,
- opracowanie metodologii prowadzenia badań eksperymentalnych, które potwierdzają zbieżność wyników otrzymanych z badań symulacyjnych,
- opracowanie koncepcji, sposobu i wykonania przetworników do pomiaru chwilowej wartości napięć i prądów,
- opracowanie koncepcji, projektu i wykonania układu sterowania gwarantującego ochronę przeciwporażeniową w synchronicznych zespołach prądotwórczych pracujących jako rezerwowe źródła zasilania.

Niniejsza praca nie wyczerpuje obszernego zagadnienia związanego z modelowaniem generatora synchronicznego wydatnobiegunowego z wirnikiem bez klatki, jak i z klatką tłumiącą. Jednak, na podstawie przedstawionych wyników rozważań teoretycznych, dokonanej analizy oraz metodologii przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych można wytyczyć dalsze kierunki badań, a mianowicie:

- przeprowadzenie analizy wpływu odpowiednio ukształtowanego napięcia  $u_f = U_{f0} + u_{fk}$  na ograniczenie wybranych wyższych harmonicznych napięć indukowanych w uzwojeniach stojana dla modeli z klatką tłumiącą (podobnie jak dla modeli bez klatki tłumiącej),
- przeprowadzenie analizy wpływu napięcia  $u_f = u_{fPWM}$  na kształt indukowanych napięć stojana dla przypadku, gdy obwód wzbudzenia zasilony jest ze źródła napięcia stałego o wartości kilkuset woltów poprzez układ energoelektroniczny z regulacją szerokości impulsu (PWM) dla modeli bez klatki jak i z klatką tłumiącą,
- przeprowadzenie analizy kompensacyjnego wpływu obecności klatki tłumiącej na zawartość wyższych harmonicznych i kształt napięć indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana (np. poprzez jej różne kształty lub ułożenie prętów w nabiegunnikach względem żłobków stojana) oraz wpływ nowej konstrukcji klatki na pracę generatora w stanach obciążenia w systemie energetycznym oraz przy pracy autonomicznej,
- w przypadku wyłącznie pracy autonomicznej generatora synchronicznego wydatnobiegunowego mając na uwadze mniejszą zawartość wyższych harmonicznych

w napięciach indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana - przeprowadzenie analizy ekonomicznej sensu obecności klatki tłumiącej.

## 5) Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (okres po uzyskaniu stopnia naukowego doktora)

Główne obszary moich pozostałych zainteresowań naukowych obejmują trzy podstawowe kierunki:

- 1. Modelowanie układów sterowania silnikami BLDC w pojazdach z napędem elektrycznym**
- 2. Modelowanie elementów i układów mechanicznych w aspekcie przetwarzania energii**
- 3. Ocena skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych zasilanych z indukcyjnych i synchronicznych agregatów prądowców**

### **Ad. 1. Modelowanie układów sterowania silnikami BLDC w pojazdach z napędem elektrycznym**

Tematyka modelowania wybranych układów sterowania silnikami elektrycznymi z magnesami trwałymi w tym BLDC, PMSM i SRM w układach mechatronicznych, wynika z ciągłego poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych źródeł zasilania silników elektrycznych o magnesach trwałych oraz ich układów sterowania. Dobrze zaprojektowany i wykonany układ mechatroniczny wymaga ciągłych poszukiwań nie tylko rozwiązań dotyczących układów sterowania, ale i rozwiązań dotyczących prawidłowego doboru źródeł zasilania, układu energoelektronicznego konstrukcji użytych materiałów i elementów mechanicznych i elektrycznych. Współczesne układy sterowania maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi wymagają znajomości konfiguracji i programowania kart AC/CA, układów z procesorami sygnałowymi DSP, sterownikami PLC, przetworników pomiarowych napięciowych i prądowych itp. Układy te stosuje się między innymi po to, aby:

- dobrać optymalny kształt sygnału sterującego pozwalający odpowiednio kształtować charakterystyki elektromechaniczne silników BLDC, SRM i PMSM zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych,
- ograniczać straty mocy na drodze źródło zasilania - układ sterowania - obwody końcowe mocy - silnik elektryczny z magnesami trwałymi, które polepszają sprawność całego układu,
- ograniczyć pulsacje prędkości obrotowej spowodowane wpływem momentu zaczepowego.

Szczególnie ważne jest ograniczenie strat mocy, które w pojazdach z napędem elektrycznym pozwala na zwiększenie zasięgu jazdy. Z próbą rozwiązania tej problematyki związane są prace naukowo-badawcze realizowane pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Romana Nadolskiego, realizowane jako statutowe i własne oraz jako projekt KBN zał. 5-pkt. II-J [5]. „**Napęd bezpośredni pojazdów lekkich z wykorzystaniem bezszczotkowych silników tarczowych**”. Umowa 8 T10A 030 20 projekt własny KBN. Umowa na kwotę 260.800 zł. Mój udział w w/w projekcie jako pracownika pomocniczego polegał na opracowaniu układu sterowania silnikiem BLDC, który w zastosowaniu do roweru z napędem elektrycznym (z silnikiem BLDC zamocowanym w przedniej piaście koła) umożliwia odzyskiwanie energii

elektrycznej do ładowania baterii akumulatorów podczas hamowania, czy zjazdu ze wzniesienia. Wynikiem prowadzonych badań są prace, które były przedstawione na konferencjach międzynarodowych ICEM, ISEF, REM, PPEE, WZEE za granicą i w Polsce oraz w czasopiśmie naukowych. Wykaz publikacji - załącznik nr 5 – pkt. II-E [24] oraz pkt. II-F [1, 16, 22, 23, 28, 31].

## **Ad. 2. Modelowanie elementów i układów mechanicznych w aspekcie przetwarzania energii**

Tematyka modelowania elementów i układów mechanicznych wynika z ciągłego poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych układów (mechanicznych) służących do przetwarzania jednego rodzaju energii w inny, do opracowywania takich rozwiązań, które są bardziej: energooszczędne, bezpieczne i rozwojowe. Wraz z rozwojem, nawet dobrze zaprojektowany i wykonany układ mechaniczny wymaga ulepszeń, ciągłych poszukiwań nie tylko rozwiązań dotyczących prawidłowego doboru technologii, wykonania i użytych materiałów, konstrukcji mechanicznej, ale i układów zabezpieczeń i sterowania. Z próbą rozwiązania tej problematyki związane są prace w dwóch projektach badawczych (opisane poniżej w pozycji od najnowszej) zał. 5-pkt. II-J [1, 2], w pracy zał. 5-pkt. II-A [1], uzyskanych dwóch patentach zał. 5-pkt. II-C [2, 3] oraz w opracowanych 10 opiniach o innowacyjności zał. 5-pkt. III-M [1-10].

**Projekt 1. „Innowacyjny układ do rozproszonego przetwarzania odnawialnej energii”.** Projekt finansowany w ramach działania 1.4 POIG 2007-2013. Politechnika Świętokrzyska jest podwykonawcą prac (oznaczenie umowy RCOW/01/2014 z dnia 10 października 2014 roku na kwotę 1.000.000 zł.). W projekcie tym uczestniczę wraz z pracownikami Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn, Wydziału Elektrotechniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Świętokrzyskiej oraz Firmy Fluid S.A. Od początku do chwili obecnej biorę udział, jako **wykonawca oraz kierownik zadania nr 3**. W projekcie podjęto próbę opracowania nowego modelu matematycznego oraz nowatorskiego rozwiązania prototypu silnika Stirlinga. Prowadzone prace dotyczą badań mających na celu wdrożenia do przemysłu patentu **PL 212854 B1** autorstwa Sadkowski W., **Ludwinek K.**: Silnik cieplny Stirlinga zał. 5-pkt. II-C [4]. W chwili obecnej na podstawie modelowania matematycznego (w tym również z wykorzystaniem programów do obliczeń rozkładu pola temperatur z wykorzystaniem metody elementów skończonych FEM) oraz przeprowadzonej weryfikacji eksperymentalnej i pomiarowej, określono kierunki doboru materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych poszczególnych elementów dla trzech prototypów silnika Stirlinga. Dokonano oceny własności zbudowanych do tej pory rozwiązań konstrukcyjnych silnika Stirlinga oraz określono kierunki dalszych prac i badań. Ponieważ badania nad opracowaniem docelowej konstrukcji silnika Stirlinga i doboru materiałów trwają nadal, a otrzymane wyniki badań i rozwiązań konstrukcyjnych mają znamiona wynalazku, to zgodnie z umową są własnością Firmy Fluid S. A. Dlatego do chwili obecnej tylko niewiele wyników prac (dotyczących jedynie modelowania matematycznego) zostało przedstawione w formie publikacji. Od początku realizacji tego projektu uczestniczę we wszystkich pracach realizowanych na etapie modelowania (w tym również w FEM), projektowania i badań eksperymentalnych.

**Projekt 2. „Zintegrowany dobór właściwości mocowania fotela, pasa oraz energochłonnych cech fotela i zagłówka”.** INNOTECH/IN1/37/152593/NCBR/12. (Umowa na kwotę 1.614.000 zł, Kierownik projektu dr inż. Marek Jaśkiewicz). W projekcie tym wraz z pracownikami Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, Przemysłowego Instytutu Motoryzacji (PIMOT) oraz INTAP Tobik Spółka Jawna **brałem udział, jako wykonawca**. Celem projektu było przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych mających na celu opracowanie skojarzonego systemu

ochrony osób w pojazdach. Badania dotyczyły rozwiązań konstrukcyjnych zestawu: fotel, jego układu mocowania, pasów bezpieczeństwa i zagłówka. Moje zadanie w niniejszym projekcie polegało na opracowaniu (wspólnie z dr hab. inż. Janem Staszakiem z Politechniki Świętokrzyskiej) modeli symulacyjnych do badań wytrzymałościowych zestawu: fotel, jego układu mocowania, pasów bezpieczeństwa i zagłówka wraz z układem kinematycznym pasażera. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowany został również model symulacyjny rozbudowany na kilka szeregowo oddziaływujących na siebie w/w zestawów (np. przypadek uderzenia w przeszkodę pojazdu z pasażerami siedzącymi jeden za drugim).

W pracy zał. 5-pkt. II-A [1] (**IF 2,728**) przedstawiono technologię wytwarzania i podstawowe parametry geometryczne oraz koncepcję i sposób realizacji graficznego modelowania przy użyciu środowiska Blender nowej porowatej struktury metalicznej otrzymywanej w postaci spieku na bazie proszku żelaza. Taka opracowana nowa porowata struktura metaliczna o otwartych komórkach wykazuje bardzo dobre własności w procesach i technologiach energetycznych (wymieniki ciepła) oraz dysypacji energii. (np. związanych z pochłanianiem i rozpraszaniem dużej ilości energii). Dotychczasowy sposób modelowania porowatych struktur metalicznych (przedstawiony w literaturze) głównie oparty na matematycznych modelach był bardzo prosty, a otrzymane wyniki modelowania otwartych komórek posiadały jedynie zarys zbliżony do rzeczywistego kształtu. W przedstawionej pracy, zastosowano oryginalny sposób modelowania oparty na technice tworzenia obiektów typu metaball i wykorzystaniu środowiska graficznego Blender do odwzorowania 3D i renderowania uzyskanych modeli komórek. Tak otrzymany model 3D struktury porowatej jest bardzo zbliżony morfologicznie do rzeczywistej struktury porowatej. Praca ta stwarza możliwości dalszego rozwoju koncepcji i podjęcia próby zastosowania tak wytworzonego modelu materiału w analizach MES (FEM). Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji opisu sposobu modelowania oraz graficznego przedstawienia wyników.

### **Ad. 3. Ocena skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych zasilanych z indukcyjnych i synchronicznych agregatów prądotwórczych**

Problematyka badań instalacji elektrycznej zasilanej poprzez indukcyjne i synchroniczne zespoły prądotwórcze pracujące autonomicznie lub jako rezerwowe źródło zasilania wynika ze współpracy pracowników naszego Zakładu z pracownikami Towarzystwa Gospodarki Energetycznej (TGE) i Uniwersytetu Przyrodniczego (UP) w Lublinie. W ramach tej współpracy podjęto próbę opracowania nowoczesnej metody umożliwiającej ocenę skuteczności ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych zasilanych z indukcyjnych i synchronicznych agregatów prądotwórczych. Tematyka tych badań wynika z odmienności zachowania się przebiegów prądów zwarciovych w instalacjach elektrycznych zasilanych z sieci elektroenergetycznej oraz w tych samych instalacjach elektrycznych, ale zasilonych z rezerwowych źródeł zasilania, jakimi najczęściej są indukcyjne i synchroniczne agregaty prądotwórcze. Powszechnie stosowana ochrona przeciwporażeniowa realizowana w układach zasilania niskiego napięcia za pośrednictwem samoczynnego wyłączenia, w przypadku uszkodzenia izolacji narzuca dopuszczalny czas wyłączenia (urządzeń zabezpieczających) w zależności od rodzaju i wartości źródła napięcia zasilania. Samoczynne wyłączenie realizowane jest najczęściej poprzez urządzenia RCD współpracujące z bezpiecznikami topikowymi lub wyłącznikami instalacyjnymi nadprądowymi. Czas wyłączenia urządzeń zabezpieczających określono w normach PN-HD-60364-4-41 oraz PN-IEC-364-4-481 i dla instalacji elektrycznych o napięciu znamionowym 230/400 V czas ten wynosi 0,4 s. Od 2011 roku z pracownikami naszego Zakładu oraz z pracownikami TGE i UP w Lublinie prowadzę badania mające na celu opracowanie metody badań instalacji elektrycznych zasilanych z indukcyjnych i synchronicznych agregatów prądotwórczych, która

pozwoiliaby na dokladne okrelenie doboru zabezpieczeń nadprądowych w zakresie dopuszczalnych obciażeń i skuteczności ochrony przeciwporażeniowej.

Stan zwarcia w instalacjach elektroenergetycznych skutkuje niewielkimi zmianami wartości impedancji pętli zwarciowej, co pozwala na dokonanie oceny skuteczności ochrony przeciwporażeniowej poprzez pomiar impedancji pętli zwarciowej. W przypadku zwarcia w instalacji elektrycznej zasilanej z generatora synchronicznego (należącego do zespołu prądowórczego) występuje znacznie odmienna sytuacja. Stan zwarcia w takiej instalacji elektrycznej skutkuje dużymi zmianami wartości impedancji pętli zwarciowej (szczególnie blisko generatora synchronicznego) spowodowanej znacznymi zmianami reaktancji oraz bardzo krótką tj. prawie natychmiastową reakcją układów regulacji napięcia i prądu wzbudzenia (najczęściej z wykorzystaniem układów AVR lub szeregowo-równoległego układu połączeń transformatorów prądowego i napięciowego względem uzwojenia stojana).

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych w instalacjach elektrycznych zasilonych z asynchronicznych zespołów prądowórczych o mocach do kilkudziesięciu kVA wynika, że: w przypadku zwarcia w pobliżu zacisków czas utrzymywania się niebezpiecznego napięcia dotykowego (w uszkodzonym obwodzie) jest krótki i nie przekracza 0,4 s, natomiast w przypadku zwarcia odległego, wartość napięcia w miejscu zwarcia oraz czas utrzymywania się niebezpiecznego napięcia dotykowego uzależniony jest od impedancji występującej w obwodzie zwarcia.

W wyniku prowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych opracowano metodę pomiarową (polegającą na pomiarze całki Joule'a) oraz zbudowano urządzenie, które pozwala na przeprowadzenie kontrolowanych badań eksperymentalnych i jednoznaczną ocenę skuteczności zadziałania urządzeń zabezpieczających (RCD, wyłączników nadprądowych i bezpieczników).

Wykaz publikacji wyjaśniających problem przypadkowego zadziałania zabezpieczeń w instalacjach zasilonych poprzez indukcyjne i synchroniczne zespoły prądowórcze pracujące autonomicznie lub jako rezerwowe źródło zasilania przedstawia załącznik nr 5 – pkt. I-A [1], pkt. II-F [4, 15] oraz pkt. II-L [4, 12].

**Podsumowanie informacji nt. dorobku** (szczegółowe informacje dotyczące mojego dorobku naukowego i dydaktycznego zawiera załącznik nr 5, opracowany wg punktów zamieszczonych we wzorze Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów):

Podsumowując mój dorobek po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, wynika, że:

- jestem autorem jednej monografii,
- jestem współautorem 3 rozdziałów w 2 monografiach,
- jestem autorem 17 publikacji naukowych w czasopismach,
- jestem współautorem 20 publikacji naukowych w czasopismach i 19 publikacji naukowych w materiałach konferencyjnych,
- jestem współautorem 4 patentów krajowych, w tym podpisanej umowy o wdrożeniu patentu do przemysłu, umowa pomiędzy firmą Fluid S. A. a Politechniką Świętokrzyską,
- jestem współautorem 7 zgłoszeń wynalazków,
- jestem współautorem 10 opinii o innowacyjności zgłaszanych rozwiązań technologicznych do przemysłu, sporządzonych na podstawie umowy,
- jestem współautorem 5 niepublikowanych prac naukowo-badawczych realizowanych poprzez tzw. prace statutowe oraz autorem 1 pracy naukowo-badawczej realizowanej poprzez badania własne, których wyniki badań przedstawione zostały w czasopismach naukowych i w materiałach konferencyjnych,

- uczestniczyłem i prezentowałem artykuły na 2 międzynarodowych konferencjach za granicą, na 12 międzynarodowych konferencjach w Polsce oraz jednej krajowej konferencji naukowo-technicznej,
- uczestniczyłem jako główny wykonawca w 4 projektach badawczych oraz w jednym jako pracownik pomocniczy, umowy:
  1. RCOW/01/2014 z dnia 10 października 2014 roku na kwotę 1 000 000,00 zł,
  2. INNOTECH/IN1/37/152593/NCBR/12 na kwotę 1 614 000,00 zł,
  3. UDA - POIG 02.02.00-26-023/08 zawarta 19.05.2009 r. na kwotę 8 505 681,81 zł,
  4. 132/02/E-368/S/2006-1 projekt KBN realizowany w ramach pracy statutowej 3.23/7.12 na kwotę 380 000,00 zł.
  5. 8 T10A 030 20 projekt KBN na kwotę 260 800,00 zł.
- Łączna liczba cytowań wszystkich publikacji według:
  1. Publish or Perish: **106**,
  2. Google Scholar: **90**,
  3. Scopus: **16**, (**24** w zakładce Secondary Documents),
  4. IEEE Xplore: **1** (w zakładce Basic Search), **11** (w zakładce Advanced Search),
  5. Web of Science: **8** (Core Collection).
- Indeks Hirscha według:
  1. Publish or Perish: **5**,
  2. Google Scholar: **5**,
  3. Scopus: **2**,
  4. IEEE Xplore: **1**,
  5. Web of Science: **2** Core Collection.
- Sumaryczny Impact Factor wg roku **5,269**.
- Sumaryczna ilość punktów z publikacji wg MNiSW (wg roku oraz z uwzględnieniem podziału punktów) wynosi **472,72 pkt** (<http://www.dorobek.tu.kielce.pl/autorzy/>).
- Posiadam następujące odznaczenia państwowe:
  1. Brązowy Krzyż Zasługi - 2004 r.
  2. Srebrny Krzyż Zasługi - 2011 r.
  3. Medal Komisji Edukacji Narodowej - 2012 r.

Krzysztof Suchwiniecki