

**Mieczysław Ronkowski, Michał Michna, Grzegorz Kostro, Filip Kutt**  
**Politechnika Gdańska**

## **MASZyny ELEKTRYCZNE WOKÓŁ NAS. POSZUKIWANIE DRÓG DO NAUCZANIA NA KIERUNKU ELEKTROTECHNIKA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ**

### **ELECTRICAL MACHINES AROUND US. SEARCHING FOR TEACHING WAYS AT ELECTRICAL ENGINEERING OF THE GDANSK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Abstract:** This paper provides a summary of the didactic assumptions, goals and approach concerning the syllabus and description/modelling of electrical machines (EM) for teaching in the field of power electrical engineering at the Gdansk University of Technology. They have been used to write e-text book entitled “Electrical machines around us” that covered the lectures on electrical machines given for the second year undergraduate students. The main idea of the approach to modelling EM is based on an assumption that, in general, in an EM the two fundamental couplings can be distinguished – ideal/pattern transformer coupling and ideal/pattern electromechanical coupling. Using the circuit models (lumped parameter models) of the couplings as building blocs the models of basic EM can be easily developed. To improve the course effectiveness the laboratories are tightly integrated with the lectures to provide hands-on confirmation of the material presented in class.

#### **1. Wstęp**

„Misją Politechniki Gdańskiej jest służyć rozwojowi Polski, a w szczególności rozwojowi Pomorza, poprzez wykształcenie wysokiej klasy inżynierów. Jest rzeczą oczywistą, iż proces dydaktyczny na poziomie akademickim musi być prowadzony z jednoczesnym efektywnym prowadzeniem badań naukowych i realizowaniem prac rozwojowych podnoszących konkurencyjność gospodarki, w tym gospodarki województwa pomorskiego” [16].

Jesteśmy już członkami Unii Europejskiej i często w tym kontekście stawia się pytanie: „Jak uczyć, aby w Unii Europejskiej zachować tożsamość narodową, zarządzać kapitałem i technologią w naszym kraju i nie dać się zepchnąć do roli taniej siły roboczej?” [16].

„Uczestnicząc w dyskusjach na temat profilu naszego absolwenta (Politechniki Gdańskiej)<sup>1</sup>, bardzo często spotykam pytanie: „Czego właściwie powinniśmy uczyć naszych studentów?”. Zawsze odpowiadam: przede wszystkim powinniśmy uczyć samodzielnego myślenia i działania!” [16].

<sup>1</sup>Zamiast „Absolwent Politechniki Gdańskiej” powinno się używać „Inżynier Politechniki Gdańskiej”, – potwierdza to tożsamość umiejętności inżynierskich z Politechniką Gdańską oraz promocji zarówno zawodu inżyniera jak i PG w naszym kraju.

W ostatnim czasie rynek pracy, zarówno polski jak i europejski, wykazuje spore zainteresowanie dobrze wykształconymi technikami oraz inżynierami. W związku z tym, nasze Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego także wystąpiło z inicjatywą dotowania wybranych działów kształcenia, jako kierunków zamawianych. Wśród nich szczególnie ważne są takie dyscypliny, jak: matematyka, fizyka, chemia, informatyka oraz nauki techniczne.

Na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (Wydz. EiA PG), w ramach kierunku Elektrotechnika, realizowano projekt systemowy „Zamawianie kształcenia na kierunkach technicznych, matematycznych i przyrodniczych-pilotaż” – Priorytet IV PO KL „Szkolnictwo wyższe i nauka” – specjalność zamawiana: Technologie Informatyczne w Elektrotechnice. Jednym z elementów tego projektu było opracowanie e-skryptu pt. „Maszyny elektryczne wokół nas”, wspomagającego proces nauczania przedmiotu Maszyny elektryczne.

Celem artykułu jest przedstawienie: założeń, celów i metod realizacji dydaktyki przedmiotu Maszyny elektryczne na kierunku Elektrotechnika Wydz. EiA PG, które były podstawą do opracowania e-skryptu. Zawiera on wykłady z przedmiotu Maszyny elektryczne, które wygłosiliśmy w roku akad. 2009/2010 dla studentów na kierunku Elektrotechnika – studia

stacjonarne 1-szego stopnia (poziom inżynierski). Wykłady, realizowane na trzecim semestrze w wymiarze 30 godzin, są zintegrowane z laboratorium maszyn elektrycznych w wymiarze 30 godzin. E-skrypt nie zawiera tekstu dosłownego wykładów, lecz jest ich wersją opracowaną – czasem w większym, czasem w mniejszym stopniu. Wykłady stanowią tylko część pełnego procesu dydaktycznego. Dla ich wysłuchania 190 osobowa grupa studentów, podzielona na dwie części (w tym 31 osobowa grupa studentów specjalności Technologie Informatyczne w Elektrotechnice), zbierała się raz w tygodniu w wielkiej sali wykładowej, po czym w mniejszych grupach (12 osobowych) odbywały się ćwiczenia laboratoryjne.

## 2. Nauczanie maszyn elektrycznych: uwagi ogólne

W publikacji [20] prof. Janusza Turowskiego czytamy: *„Problem – doskonalenia treści i form kształcenia jest tak stary jak samo szkolnictwo i przypuszczalnie trudno byłoby znaleźć nauczyciela akademickiego, dla którego rzecz ta nie byłaby przedmiotem stałej troski i dążeń do ulepszeń. Gorzej jest z trafnym wyborem całościowej koncepcji kształcenia i nieustanne dyskusje potwierdzają tylko pogląd, że zadanie znalezienia idealnego modelu nauczania nie ma jednoznacznego i obiektywnego rozwiązania. Zbyt wiele występuje tu elementów subiektywnych i przypadkowych lub wręcz przeciwstawnych. Ostateczne decyzje zapadają zwykle na zasadzie mniej lub bardziej uzasadnionych kompromisów, w których nierzadko o przyznaniu przewagi tej czy innej zasadzie decyduje jakiś autorytet lub bardziej sugestywna argumentacja”*.

Od szeregu lat odbywają się międzynarodowe konferencje maszyn elektrycznych (ICEM), a w Polsce międzynarodowe sympozja maszyn elektrycznych (SME) (w roku 2009 odbyło się kolejne 45 sympozjum). Odbyły się także krajowe konferencje w zakresie nauczania maszyn elektrycznych organizowane przez ośrodki akademickie w Krakowie – Akademia Górniczo-Hutnicza [15], w Gdańsku – Politechnika Gdańska i w Łodzi – Politechnika Łódzka [22].

Wraz z rozwojem technologii informatycznych w dydaktyce przedmiotu maszyny elektryczne zaczęto stosować techniki multimedialne i internetowe (e-learning). Wzorowym

przykładem wykorzystania technik multimedialnych w nauczaniu maszyn elektrycznych prądu przemiennego jest moduł „AC Electrical Machines” [12], opracowany w ramach projektu INETELE [23]. Stanowi on pomoc dydaktyczną dla wykładowcy, umożliwiając zaprezentowanie i wyjaśnianie trudnych zjawisk elektromagnetycznych i zagadnień z teorii maszyn elektrycznych za pomocą elementów interaktywnych i animacji. Dzięki temu wykłady stają się bardziej atrakcyjne i zrozumiałe dla studentów. Część współautorów omawianego e-skryptu brała aktywny udział w powyższych konferencjach i sympozjach, prezentując swoje referaty i biorąc udział w dyskusjach [17,18, 21].

Zasadnicze wnioski wynikające z prezentowanych referatów i dyskusji, na powyższych konferencjach i sympozjach, można sformułować następująco:

- maszyna elektryczna nie koncentruje już w sobie wszystkich zagadnień elektrotechniki, tak jak to było w pierwszym okresie jej rozwoju;
- mimo to maszyna elektryczna nadal pozostaje członem kluczowym w systemach przetwarzania energii na drodze elektromechanicznej – systemach elektroenergetycznych i systemach napędowych.

Wynika to zarówno ze spełnianej przez maszynę elektryczną roli – podstawowego członu przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną lub odwrotnie, jak również ze względu na bogactwo zjawisk w niej zachodzących.

Wyraźne zmniejszenie udziału zagadnień maszynowych w całości problemów elektrotechniki wiąże się z powstaniem i dynamicznym rozwojem energoelektroniki. W systemach elektroenergetycznych i systemach napędowych energoelektronika przyjęła na siebie zarówno rolę medium sterującego jak i rolę czynnika przetwarzającego parametry energii elektrycznej generowanej przez maszynę elektryczną bądź też zasilającej maszynę elektryczną. W ostatnich latach ważną rolę w rozwoju układów sterowania maszyn elektrycznych zaczęła odgrywać także technika mikroprocesorowa.

Dalszym etapem rozwoju integracji układów energoelektronicznych, mikroprocesorowych

i mechanicznych z maszynami elektrycznymi są systemy o cechach synergicznych – systemy mechatroniki [8].

Rozwój energoelektroniki i techniki mikroprocesorowej umożliwił z jednej strony uproszczenie konstrukcji maszyny, a z drugiej strony nastąpiło zintegrowanie układów energoelektronicznych z obwodami maszyny. Wraz z rozwojem energoelektroniki i jej zastosowaniem w budowie systemów elektroenergetycznych i napędowych pojawiły się problemy inne niż maszynowe, ale i zarazem większe bogactwo zjawisk zachodzących w maszynach elektrycznych. Z jednej strony ograniczało to udział problemów maszynowych, a z drugiej strony wymuszało pogłębione badania zjawisk zachodzących w maszynach elektrycznych [22]. Aby sformułować cele nauczania maszyn elektrycznych należy przede wszystkim podać odpowiedź na pytanie dotyczące roli poznania maszyn w całości wykształcenia ogólnotechnicznego inżyniera elektryka [15, 20, 22]. Ogólnie rzecz biorąc, rola ta powinna odpowiadać roli maszyn elektrycznych w całości problemów elektrotechniki. Określa to także rolę przedmiotu Maszyny elektryczne w całości procesu kształcenia przyszłego inżyniera elektryka – przedmiotu obowiązującego wszystkich studentów wydziałów elektrycznych politechnik na kierunku Elektrotechnika.

Z obecnych doświadczeń wynika, że na kierunku Elektrotechnika dominują specjalności „układowe”, a tylko kilkanaście procent studentów wybiera specjalności konstrukcyjne. Wychodząc z tej podstawy można przyjąć, że zakres przedmiotu Maszyny elektryczne, obowiązkowego dla wszystkich studentów, narzucony jest przez specjalności „układowe” – elektroenergetykę, energoelektronikę i napęd elektryczny.

W wyniku procesu „bolońskiego” na studiach dziennych w politechnikach krajowych powszechne jest kształcenie na dwóch poziomach – inżynierskim i magisterskim.

Przystępując do opracowania wykładów warto także odnieść się do reprezentatywnej uczelni zagranicznej – wybrano Massachusetts Institute of Technology (MIT) [24]. W uzasadnieniu można przyjąć, że MIT nadal uznawany jest za uczelnię pionierską w wprowadzaniu nowych programów i metod nauczania systemów elektromechanicznego przetwarzania energii [4,

9, 10, 24]. Warto dodać, że także nauczanie fizyki w MIT, szczególnie elektromagnetyzmu, może być uznane za nowatorskie [25].

Interesująca jest koncepcja nauczania maszyn elektrycznych w uczelni INPT-ENSEEIH in Tuluzie, Francja [7, 26]. Podręcznik autorstwa prof. Bertranda Nogarede, mimo tytułu „Électrodynamique appliquée. Bases et principes physiques de l'électrotechnique”, obejmuje problematykę maszyn elektrycznych w ujęciu energetycznym i polowym, wykładaną na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki INPT-ENSEEIH. Warto zauważyć, że na tym Wydziale nie ma oddzielnych wykładów z Elektrodynamiki technicznej. Jest to zadanie dla praktyka – „maszynowca”.

Powyższe rozważania, występujące tendencje i nasze dotychczasowe doświadczenia dydaktyczne w kształceniu na uczelniach technicznych posłużyły za wskazówki do opracowywania programu, metod nauczania i e-skryptu z problematyki maszyn elektrycznych – elektromechanicznego przetwarzania energii – na kierunku Elektrotechnika (studia stacjonarne 1-szego stopnia) Wydz. EiA PG.

Uważamy, że program przedmiotu Maszyny elektryczne, obowiązkowego dla wszystkich studentów kierunku Elektrotechnika, jest narzucony przez specjalności „układowe” (Elektroenergetykę oraz Elektronikę i Informatykę Przemysłową). Ponadto, wydaje się, że „na dziś” w wykładzie podstawowym przedmiotu Maszyny elektryczne nadal powinno być stosowane ujęcie obwodowe opisu (modelowania) maszyn elektrycznych. Natomiast modelowanie w ujęciu polowym i energetycznym – zasadzie wariacyjnej Hamilton'a – powinno być stosowane dopiero na poziomie studiów drugiego stopnia (magisterskich).

Kolejna uwaga dotyczy posługiwania się w dydaktyce maszyn elektrycznych uogólnioną teorią obwodową maszyn, której istotnym elementem jest tzw. „maszyna uogólniona” [1]. Dotychczasowa praktyka dydaktyczna wykazała, że uogólniona teoria maszyn elektrycznych nie została powszechnie zaakceptowana w nauczaniu maszyn elektrycznych na kierunku Elektrotechnika [13].

### 3. Założenia, cele i efekty nauczania

Podstawowym założeniem dydaktyki przedmiotu Maszyny elektryczne było

zharmonizowanie wykładów i ćwiczeń laboratoryjnych. Tematyka wykładów i kolejność jej prezentacji zostały tak dobrane, aby zapewnić bezpośrednio po wykładzie przerabianie materiału wykładowego na ćwiczeniach laboratoryjnych w tym samym semestrze. Takie podejście do nauczania wymagało położenia większego nacisku na podstawowe zasady budowy, działania, modelowania i analizy stanów ustalonych pracy oraz charakterystyk ruchowych maszyn elektrycznych, niż na aktualne zagadnienia techniczne maszyn.

W programie studiów nie przewidziano ćwiczeń audytoryjnych – stanowiło to znaczne utrudnienie dla studentów w opracowaniu sprawozdań z ćwiczeń laboratoryjnych. Przerobienie kompletu zadań, które naświetlałyby niektóre zagadnienia z wykładów, jest jednym ze sposobów dopomożenia studentom. Zadania stwarzają dobrą okazję do uzupełnienia materiału wykładowego oraz sprawiają, że wyłożone zagadnienia stają się bardziej realne, pełniejsze i lepiej ugruntowane w umysłach.

Szczególnym celem, który wytyczyliśmy sobie przygotowując wykłady, było podtrzymanie zainteresowania elektromagnetyzmem studentów (trafiających ze szkół średnich do naszej uczelni), na przykładzie jego zastosowania do budowy maszyn elektrycznych. Ponadto, na wskazanie znaczenia maszyn elektrycznych (elektromechanicznych przetworników energii) we wszystkich dziedzinach gospodarki. Zwrócenie uwagi na rozszerzanie zasad ich działania i powstawanie nowych rodzajów maszyn [5, 14]. Przedstawienie złożonych zespołów zjawisk zachodzących w elektromechanicznych przetwornikach energii, w nawiązaniu do aktualnie realizowanych kierunków badawczych w ramach programów finansowanych z funduszy Unii Europejskiej. Podkreślanie, że problematyka maszyn elektrycznych jest jednym z podstawowych elementów wykształcenia inżyniera elektryka oraz jest rozszerzeniem elektrotechniki teoretycznej na systemy zawierające przetworniki energii [14].

Za tytuł e-skryptu przyjęliśmy „Maszyny elektryczne wokół mas”. Intencją użycia słów „wokół nas” w tytule było zwrócenie uwagi, że z maszynami elektrycznymi spotykamy się na co dzień: w domu, w czasie podróży, w pracy i

w czasie odpoczynku – często nie zdając sobie z tego sprawy.

Człowiek jest przede wszystkim istotą mechaniczną, która żyje w środowisku mechanicznym. Codzienne zwyczaje człowieka są głównie podyktowane przez zastanawianie się: jak szybko może się przemieszczać, nakarmić i utrzymać higienę osobistą i domową. Co więcej, jego standard życia jest w znacznym stopniu funkcją jego możliwości powiększenia siły swoich mięśni (muskulów), zarówno dla lepszego (sprawniejszego) transportu (komunikacji) jaki i do realizacji procesów przemysłowych i szeroko pojętych usług, niezbędnych w rozwiniętym społeczeństwie.

Należy podkreślać, że energię (moc) napędową w transporcie i w procesach przemysłowych uzyskuje się głównie poprzez konwersję/przetworzenie energii elektrycznej na mechaniczną – rolę tę spełniają silniki elektryczne. Dlatego na wykładach (także w e-skrypcie) zastosowania maszyn elektrycznych omówiliśmy na przykładzie ich aplikacji we współczesnych systemach transportowych (bardziej elektrycznego samolotu – „more electrical aircraft”, pociągu elektrycznego i roweru elektrycznego) oraz w systemach skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepłej w gospodarstwach domowych.

Zaczynając wykłady założyliśmy, że studenci wynieśli jakieś wiadomości ze szkoły średniej (znają podstawowe zjawiska/prawa elektromagnetyzmu) oraz znają podstawy teorii obwodów elektrycznych (wykłady na pierwszym roku studiów – kontynuacja na sem.3). Pewną niedogodnością były odbywające się równolegle wykłady z elektrodynamiki technicznej – brak pełnego „oswojenia” się z pojęciami teorii pola elektromagnetycznego na poziomie uniwersyteckim. Z drugiej strony, studenci w ramach tych wykładów na bieżąco poznawali prawa/zjawiska elektromagnetyzmu wykorzystane do budowy maszyn elektrycznych.

Nie widzieliśmy też powodu, by w wykładach trzymać się określonego porządku w tym sensie, że nie mielibyśmy prawa wspomnieć o czymś przed omówieniem tego szczegółowo. Bardzo często wspominaliśmy bez szczegółowego omówienia o problemach, które miały się dopiero pojawić. Omówienia bardziej szczegółowe następowały później, gdy słuchacze byli już lepiej przygotowani.

Przykładem może być potraktowanie zagadnienia elektromagnetycznego wzbudzenia pola o wirującym/wędrującym strumieniu magnetycznym, które to pojęcie przy omawianiu maszyny synchronicznej wprowadzono najpierw w sposób bardzo jakościowy, a pełniej rozwinięto dopiero potem – omawiając maszyny indukcyjne.

Zamierzone efekty kształcenia sformułowaliśmy następująco:

- kompetencje w dziedzinie elektrotechniki: znajomość budowy, działania, charakterystyk, rozpoznawania oraz rozwiązywania podstawowych problemów technicznych (inżynierskich) z zakresu urządzeń (maszyn) do elektromechanicznego przetwarzania energii;
- kompetencje ogólne: umiejętność wyrażania koncepcji i argumentacji słownej w sytuacjach formalnych i nieformalnych oraz umiejętność pracy w zespole.

#### 4. Zakres materiału e-skryptu

Zakres materiału zawarty w e-skrypcie odpowiada w zasadzie programowi wykładów przedmiotu Maszyny elektryczne obowiązującego na kierunku Elektrotechnika Wydz. EiA PG – studia stacjonarne 1-szego stopnia (poziom inżynierski). Materiał obejmuje podstawy budowy, działania, modelowania i podstawowe charakterystyki ruchowe współcześnie produkowanych i powszechnie stosowanych maszyn elektrycznych. Dodano materiał obejmujący elementy projektowania maszyn elektrycznych, mając na uwadze, że jednym z podstawowych umiejętności inżyniera elektryka powinno być projektowanie urządzeń elektrycznych, w szczególności maszyn elektrycznych.

W pewnym sensie e-skrypt ma charakter przewodnika. Nie omówiono części szczegółów z zakresu budowy maszyn elektrycznych (np. informacje o uzwojeniach, których zrozumienie dla większości studentów sprawia znaczne trudności, umieszczono w załączniku do e-skryptu). Podano odsyłacze do literatury przedmiotu, której obszerny wykaz załączono na końcu każdego rozdziału.

Zagadnienia obejmujące materiał ćwiczeń laboratoryjnych zawiera zestaw instrukcji dostępnych na stronie internetowej Katedry Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych.

## 5. Przyjęta metodyka nauczania

### 5.1. U źródeł maszyn elektrycznych

W toku procesu dydaktycznego zwracano uwagę na podstawy działania maszyn elektrycznych. Wielokrotnie przypomniano w ciągu semestru, że podstawą działania maszyn elektrycznych są dwa fundamentalne odkrycia: efektu magnetycznego prądu przez Hansa Oersteda (21 kwietnia 1820 r.) i zjawiska indukcji elektromagnetycznej przez Michała Faradaya (29 sierpnia 1831 r.). Odkrycia te oraz sformułowanie opisujących je praw fizycznych stało się znaczącą przyczyną rewolucji w nauce i technice – gwałtownego przyspieszenia postępu cywilizacyjnego [2, 14].

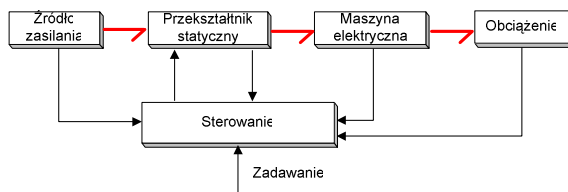
Wspominano celowo odkrycia H. Oersteda i M. Faradaya, gdyż ich doświadczenia są dzisiaj stosowane (permanently powtarzane) w większości urządzeń elektromagnetycznych (elektromechanicznych), użytkowanych na całym globie i nikt, na ogół, się nad tym nie zastanawia [22]. Doświadczenia te muszą jednak być ciągle przypomniane i demonstrowane na prostych modelach materialnych, gdyż ich znaczenie dydaktyczne jest fundamentalne.

Wśród historyków nauki powszechnie uważa się, że doświadczenia H. Oersteda należą do najbardziej pamiętnych eksperymentów w całej historii nauki, a prawo Faradaya jest kołem zamachowym gospodarki (ekonomii). Zatem, student nie powinien mieć wątpliwości – bez maszyn elektrycznych tak szybki postęp cywilizacyjny byłby niemożliwy.

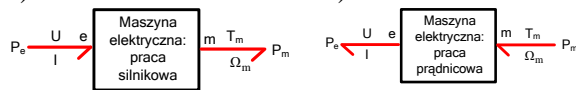
### 5.2. Modelowanie maszyn elektrycznych

Założyliśmy, że maszynę elektryczną należy traktować jako jeden (często najważniejszy i najbardziej skomplikowany) z elementów składowych systemu elektromechanicznego i odwzorowywać ją takimi metodami, które pozwalają włączyć maszynę w opis całego systemu. Skutecznym narzędziem takiego opisu są grafy wiązań [19] – przykład opisu systemu napędowego ilustruje rys. 1, a samej maszyny elektrycznej – rys. 2. Grafy wiązań pozwalają uniknąć problemu formułowania analogii elektrycznych w procesie modelowania obwodowego/sieciowego hybrydowych systemów przetwarzania energii, zachowując strukturę fizyczną systemu i wydzielając tory przepływu mocy (półstrzałki) i tory przepływu sygnałów sterujących (pełne strzałki).

W przypadku systemów klasycznych (systemy nie spełniające zasad synergii) maszyna elektryczna jest elementem skończonym, wydzielonym, stanowiącym odrębny wyrób przemysłu elektrotechnicznego. Występuje w niej szereg zjawisk fizycznych. Opisanie tych zjawisk, nawet z ograniczeniem do samej maszyny, prowadzi niejednokrotnie do skomplikowanego modelu (układu równań) – narzuca to konieczność traktowania maszyny jako wydzielonego elementu, celem ułatwienia poznania zachodzących w niej zjawisk fizycznych. Niejednokrotnie wygodniej jest przy tym posługiwać się opisem fizycznego przebiegu zjawiska niż stosować złożony opis matematyczny.



Rys. 1 Ogólna struktura systemu elektromechanicznego przetwarzania energii (funkcja napędowa) – opis w ujęciu grafów wiązań a)



Rys. 2 Ogólna struktura maszyny elektrycznej (kierunki procesu przetwarzania energii) – opis w ujęciu grafów wiązań: a) praca silnikowa, b) praca prądnicowa

W ramach wykładu położyliśmy szczególny nacisk na uproszczenie samej procedury formułowania modeli maszyn elektrycznych – dotyczy to w szczególności modelowania procesu przetwarzania energii w maszynie. Założono, że można tego dokonać w oparciu o koncepcję i modele dwóch sprzężeń podstawowych występujących w maszynach elektrycznych – tzw. wzorcowego sprzężenia transformatorowego i wzorcowego sprzężenia elektromechanicznego [17, 18]. Narzuca to następującą kolejność omawiania maszyn: transformatory, maszyny prądu stałego, maszyny synchroniczne i maszyny indukcyjne. Uzasadnieniem dla tej kolejności jest maszyna indukcyjna, która jest najbardziej ogólnym przetwornikiem elektromechanicznym.

Wzięliśmy pod uwagę, że istotną rolę w procesie dydaktycznym – przekazu informacji na płaszczyźnie wykładowca-student – odgrywa

wizualizacja przekazu [21]. Stąd założono, że ciąg logiczny budowa-działanie-model maszyny elektrycznej będzie miał przede wszystkim postać graficzną. Do jej opracowania wykorzystano pewne koncepcje zawarte w pracy Kron'a [6] – ograniczenie zapisu symbolicznego („równaniowego”) do niezbędnego minimum.

Istotą przyjętej koncepcji opisu/modelowania maszyn elektrycznych dla potrzeb dydaktyki jest bezpośrednie „tłumaczenie” struktury maszyny, zachodzących zjawisk fizycznych oraz mechanizmów działania maszyny na równoważny opis/model matematyczny o stałych skupionych – odwzorowany w formie obwodu elektrycznego (schematu zastępczego). Forma obwodu jest tak dobrana, aby do symulacji stanów pracy maszyn elektrycznych można było zastosować program PSpice [11].

Jak wiadomo, wielkością kluczową w maszynie elektrycznej jest użyteczny moment obrotowy. Najogólniej można przyjąć, że generacja momentu obrotowego jest efektem interakcji pól elektromagnetycznych stojana i wirnika. Fizyczną miarą efektu interakcji pól jest generowana siła Lorentz'a, która jest pomostem między układem elektromagnetycznym a układem mechanicznym maszyny. Innymi słowy jest tą wielkością, która sprzęga dwa układy o tak odmiennej naturze, jakimi są układ elektromagnetyczny i układ mechaniczny maszyny.

Na etapie omawiania warunków generacji momentu obrotowego przedstawiamy prymitywną maszynę prądu stałego z komutatorem mechanicznym<sup>2</sup>, a następnie demonstrujemy możliwości zbudowania układu alternatywnego – zastosowania komutatora energoelektronicznego dla przypadku maszyny „odwróconej”, której twornik jest na stojanie a wzbudzenie na wirniku. Podkreślamy jednocześnie, że aby maszyna ta posiadała takie same właściwości ruchowe – jak maszyna komutatorowa – konieczne jest sterowanie pracą elementów energoelektronicznych za pomocą kąta położenia wirnika. Obie te maszyny są prostym przykładem zasady pracy maszyn, jako układów o cyklicznie przełączanych uzwojeniach – charakterystycznych dla współczesnych systemów elektromechanicznego przetwarzania energii.

<sup>2</sup> Maszynę prymitywną budują studenci dobrowolnie.

### 5.3. Zakres wykładanego materiału

Znaczne uszczuplenie liczby godzin wykładowych (30 godzin) spowodowało, że wiele zagadnień zostało wyłączonych z programu. Inne zagadnienia zostały skrócone do postaci encyklopedycznej (np. zagadnienia materiałowe, praca równoległa i niesymetryczna transformatorów, autotransformator, uzwojenia maszyn prądu stałego i przemiennego).

Wykład z maszyn elektrycznych potraktowano także jako przygotowanie do przedmiotów o charakterze elektroenergetycznym i napędowym, ograniczając się do omawiania statycznych charakterystyk maszyn elektrycznych. Obecny wymiar godzin nie pozwala na rozwijanie teorii stanów nieustalonych tak istotnych w eksploatacji maszyn elektrycznych i transformatorów.

W ramach wykładu z teorii maszyn elektrycznych omawialiśmy następujące zagadnienia: podstawy fizyczne działania maszyn elektrycznych, przykłady zastosowań maszyn elektrycznych, transformatory, maszyny prądu stałego, maszyny synchroniczne, maszyny indukcyjne, maszyny specjalne, elementy projektowania maszyn elektrycznych (opcja).

### 6. Wnioski i uwagi końcowe

Wydaje się, że zalety przedstawionego podejścia do realizacji dydaktyki przedmiotu Maszyny elektryczne są następujące: przejrzysty obraz zachodzących zjawisk fizycznych, prostota formułowania modelu i łatwa interpretacja właściwości podstawowych typów maszyn elektrycznych.

Należy także zauważyć, że przedstawione podejście do opisu maszyn elektrycznych różni się od opisu „zaciskowego”, którego głównym celem jest odwzorowanie charakterystyk zaciskowych maszyn, a nie struktur i zjawisk fizycznych oraz mechanizmów działania maszyn.

Opracowany e-skrypt „Maszyny elektryczne wokół nas” może stanowić pomoc dydaktyczną zarówno dla wykładowcy jak i studentów.

Należy podkreślić, że prezentowany zarys programu i metod opisu maszyn elektrycznych dla potrzeb dydaktycznych na kierunku Elektrotechnika jest dyskusyjny. Wydają się jednak, że może on stanowić podstawę do opracowania wytycznych dla ogólnokrajowego, nowoczesnego podręcznika akademickiego do

nauczania przedmiotu Maszyny elektryczne. Z doświadczeń autorów, w czasie prac nad e-skryptem, wynika, że jest to zadanie dla zespołu, który jest bezpośrednio zaangażowany w proces dydaktyczny przedmiotu. Takim wzorem opracowania zespołowego podręcznika są „Feynmana wykłady z fizyki” [3], który różni się od formuły „pod redakcją”.

Ponad stuletnia tradycja nauczania maszyn elektrycznych zobowiązuje do opracowania podręcznika „.....wykłady z maszyn elektrycznych”.

W tym roku, w dniu 21 kwietnia minęła 190 rocznica odkrycia efektu magnetycznego prądu przez H. Oersteda. W przyszłym roku, w dniu 29 sierpnia, przypada 180 rocznica odkrycia zjawiska indukcji elektromagnetycznej przez M. Faradaya.

Celem mocnego zaakcentowania trwania „u źródeł maszyn elektrycznych”, środowisko „maszynowców” powinno ogłosić rok 2011 rokiem M. Faraday – odkrywcy prawa, które jest kołem zamachowym współczesnej ekonomii.

### Literatura

#### Książki/podręczniki/skrypty

- [1] Adkins B.: *The general theory of electrical machines*. Chapman and Hall, London, 1957.
- [2] Dąbrowski M.: *Początki rozwoju transformatorów*, wyd. 2, Poznań Ośrodek Wyd. Naukowych, PAN Oddział w Poznaniu 2008.
- [3] Feynman R.P., Leighton Robert B., Sands M.: *Feynmana wykłady z fizyki, t.1 i t.2, Elektryczność i magnetyzm. Elektrodynamika*, wyd. 6, WNT, Warszawa 2007.
- [4] Fitzgerald A. E.: Kingsley Ch., Jr., Umans. S. D.: *Electric Machinery*, 6th ed., McGraw-Hill, 2003.
- [5] Gieras J.F.: *Advancements in Electric Machines*, Heidelberg, Springer 2009.
- [6] Kron G., *Equivalent circuit of electric machinery*. John Wiley and Sons, 1951.
- [7] Nogarède B.: *Électrodynamique appliquée. Bases et principes physiques de l'électrotechnique*, Dynod, Paris 2005.
- [8] Turowski J.: *Podstawy mechatroniki*, Wyd. WSHE, Łodzi, 2008.
- [9] White D.C.: Woodson H.H. : *Electromechanical Energy Conversion*. J. Wiley, New York, 1959.
- [10] Woodson H.H., Melcher J.R.: *Electromechanical dynamics*. (Part1., Part2 & Part3). J. Wiley, New York, 1968.
- [11] Zimny P.: *SPICE. Klucz do elektrotechniki*. Wyd. Pol. Gdańskiej, Gdańsk, 1993.



**Artykuły**

- [12] Boboń A., Kudła J., Miksiewicz R.: *Wykorzystanie technik multimedialnych w nauczaniu maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Proc. of XLII nd Inter. Symp. on Electrical Machines SME 2006, Cracow, Poland s.371-374.
- [13] Cocks F.D.: *Why the generalized electrical machine theory not been universally accepted?* *Int. J. Elect. Eng. Educ.* vol. 4, 1966, pp 269-272.
- [14] Dąbrowski M.: *Kierunki rozwoju maszyn elektrycznych i transformatorów*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka, Nr 49, 2005, s. 61-77.
- [15] Materiały Konferencji Szkoleniowej „*Metodyka Badań i Nauczania Maszyn Elektrycznych*”, Kraków, 1977, Z. N. AGH nr 662, Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa, z. 99.
- [16] Rachoń J.: „...tylko edukacja publiczna zgodnych i dobrych robi obywatelów”. *Pismo PG*, nr 4, 2003, s. 4.
- [17] Ronkowski M.: Nieznański J., *Electrical machines modelling – teaching aspects*, Proc. Inter. Conf. on Electrical Machines. ICEM'2000. Helsinki, 2000, vol. 3, pp.1256-1260.
- [18] Ronkowski M.: *A unified approach to teaching the modelling of electrical machines for power electronics and electrical drives applications*, Inter. Symp. on Electrical Machines. SME 2003, Gdańsk – Jurata, 2003, Proc. - summaries, pp. 143-144, Proc. - CD-ROM pp. 1-13.
- [19] Ronkowski M.: *Modelowanie i symulacja maszyn elektrycznych metodą grafów wiązań*. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 80, nr 10, 2004, s. 944-947.
- [20] Turowski J.: *W kształceniu ważne jest trafne wyodrębnienie jego etapów*. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3, 1974, pp. 102-103.
- [21] Wilk A., Kostro G., Dobrowolski P, Michna M, Ronkowski M., Matulewicz M.: *Nauczanie maszyn elektrycznych z wykorzystaniem technik CAD*, Inter. Symp. on Electrical Machines. SME'2003, Gdańsk – Jurata, 2003, Proc. – sum., pp. 109, Proc. - CD-ROM pp. 1-5.
- [22] Zakrzewski K.: *Rola przedmiotu „Maszyny elektryczne” w kształceniu studentów na kierunku „elektrotechnika”*. Krajowa Konferencja Nauczanie w Zakresie Maszyn Elektrycznych, Inst. Maszyn Elektrycznych i Transformatorów, Pol. Łódzka, Łódź, października 1987, s.12-22.

**Adresy internetowe**

- [23] “Interactive E-learning in Electrical Engineering”, INETELE, The Leonardo da Vinci Project, No CZ/02/B/F/PP/134009, [www.tuke.sk/INETELE/](http://www.tuke.sk/INETELE/)
- [24] Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Electrical Eng. and Computer Science. <http://www.eecs.mit.edu/>

6.061/6.690 Introduction to Electric Power Systems (Undergraduate Courses/Graduate Courses);<http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-061Spring-2007/CourseHome/index.htm>

6.685 Electric Machines (Graduate Courses) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-685Fall-2005/CourseHome/index.htm>

[25] MIT. Dept. of Physics. <http://web.mit.edu/physics/>

8.02 Electricity and Magnetism (freshman physics class in electromagnetism, complete set of videotaped lectures) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-02Electricity-and-MagnetismSpring2002/CourseHome/index.htm>

8.02T Electricity and Magnetism (freshman-level course in electromagnetism, using the TEAL (Technology Enabled Active Learning)) <http://ocw.mit.edu/OcwWeb/Physics/8-02TSpring-2005/CourseHome/index.htm>

[26] INPT-ENSEEIH, <http://www.inp-toulouse.fr/http://www.enseeiht.fr>

**Podziękowania**

Praca została wykonana na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w ramach projektu systemowego „Zamawianie kształcenia na kierunkach technicznych, matematycznych i przyrodniczych-pilotaż” – Priorytet IV PO KL „Szkolnictwo wyższe i nauka” – specjalność zamawiana: Technologie Informatyczne w Elektrotechnice. Jednym z elementów tego projektu było opracowanie e-skryptu pt. „Maszyny elektryczne wokół nas”. Autorzy pragną wyrazić podziękowanie za środki przyznane na realizację tego projektu.

**Autorzy**

dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski, prof. PG, tel. +48 58 347 2087, e-mail: [m.ronkowski@ely.pg.gda.pl](mailto:m.ronkowski@ely.pg.gda.pl)  
 dr inż. Michał Michna, adj., Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych, tel. +48 58 347 2979, e-mail: [mmichna@ely.pg.gda.pl](mailto:mmichna@ely.pg.gda.pl)  
 dr inż. Grzegorz Kostro, tel. +48 58 347 1157, e-mail: [g.kostro@ely.pg.gda.pl](mailto:g.kostro@ely.pg.gda.pl)  
 mgr inż. Michał Michna, doktorant, tel. +48 58 347 1939, e-mail: [fkutt@ely.pg.gda.pl](mailto:fkutt@ely.pg.gda.pl)  
 Dla wszystkich autorów ten sam adres: Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk,

**Recenzent**

*Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka*