

30 lat nauczania studentów w zakresie napędów elektromechanicznych na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej

▶ Witold Jaszczuk

W artykule przedstawiono genezę powstania odrębnego przedmiotu wykładowego, dotyczącego napędów elektromechanicznych i ewolucję programów jego nauczania. Opisano zakres i treści merytoryczne wykładu oraz ćwiczeń laboratoryjnych z napędów elektromechanicznych urządzeń precyzyjnych. W zarysie przedstawiono zespół pracowników naukowo-dydaktycznych, zajmujących się zagadnieniami napędów. Wspomniano o praktycznym wykorzystywaniu wiedzy i umiejętności studentów w pracach przejściowych i dyplomowych.

Początki nauczania napędów na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej

Mija 30 lat od dnia, gdy jeden z założycieli Wydziału Mechaniki Precyzyjnej, nieżyjący już prof. Władysław Tryliński, uznał konieczność wyodrębnienia zagadnień związanych z napędami elektrycznymi ze swojego wykładu dla studentów czwartego roku specjalności „Konstrukcja Urządzeń Precyzyjnych”. Zdał sobie bowiem sprawę, że dziedzina ta w przyszłości będzie wymagała intensywnego rozwoju i stanie się jedną z najważniejszych w konstruowaniu urządzeń mechaniki precyzyjnej.

U podstaw tych przemyśleń były wieloletnie doświadczenia badawcze zdobyte przez dwa zespoły konstruktorów kierowane przez Profesora w 60. i 70. latach. Jeden z nich opracował dziurkarkę taśmy papierowej, drugi budował szybkie czytniki taśmy dziurkowanej – ówczesnego nośnika informacji w systemach komputerowych. Szybko działające napędy elektromechaniczne były najtrudniejsze do opracowania w obu tych urządzeniach i wymagały wielu nowatorskich, opatentowanych następnie rozwiązań konstrukcyjnych.

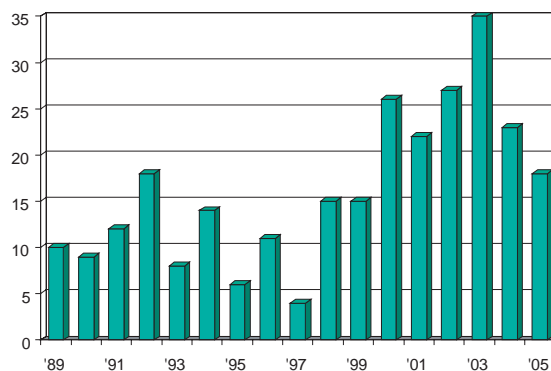
Przygotowanie oraz prowadzenie wykładu w wymiarze 15 godzin Profesor powierzył Witoldowi Jaszczukowi, kończącemu wówczas pracę doktorską z dziedziny elektromagnetycznych napędów szybkiego działania. Tak zaczęło się nauczanie studentów Wydziału Mechaniki Precyzyjnej w zakresie problematyki napędów elektromechanicznych.

Zakres merytoryczny wykładu obejmował elektromagnesy prądu stałego, sprzęgła elektromagnetyczne cierne, silniki skokowe, elektrodynamiczne silniki liniowe oraz silniki wirnikowe prądu stałego. Od po-

czątku istnienia przedmiotu nacisk położono na zapoznanie studentów ze zjawiskami fizycznymi opisującymi działanie napędów, budowę i zasady działania elektromagnesów, sprzęgieł, silników i siłowników, ich zasilanie oraz sterowanie. Już w pierwszym roku zostały przygotowane powielane drukiem preskrypty, rozdawane studentom. W Laboratorium Maszyn Liczących przygotowano też nowe ćwiczenia związane z badaniami napędów.

W 1979 roku w Instytucie obroniono dwie prace doktorskie z tej dziedziny. W poprzedzających latach powstały pierwsze publikacje, patenty i opracowania dla przemysłu. Liczba tych prac bardzo szybko rosła (rys. 1).

Liczba publikacji z zakresu napędów w kolejnych latach



Rys. 1. Liczba publikacji z zakresu napędów elektromechanicznych w latach 1989 – 2005, opracowanych przez zespół pracowników naukowo-dydaktycznych instytutu zajmujących się tą problematyką

Zacząto także nawiązywać kontakty zagraniczne, głównie z Technische Hochschule w Ilmenau, a osobiście z prof. Eberhardem Kallenbachem, znanym specjalistą w dziedzinie napędów.

W tym czasie problematyką napędów zajmowało się w zespole profesora Trylińskiego już kilka osób: dr inż. Witold Jaszczuk, dr inż. Jan Sołtyński, dr inż. Wies-

▶ dr inż. Witold Jaszczuk – Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej

ław Czerwiec, dr inż. Janusz Igielski, mgr inż. Grażyna Pindera, a parę lat później dołączyli absolwenci specjalności: mgr inż. Jakub Wierciak (dr od 1995 r.) i mgr inż. Maciej Bodnicki (dr od 1997 r.), mgr inż. Łukasz Dziubalski oraz mgr inż. Zdzisław Iwanejko. W kolejnych latach dołączali następni.

Przełomowym okresem rozwoju zespołu były ostatnie lata 80., gdy Pracownia Napędów otrzymała znaczący udział w Centralnym Programie Badań Podstawowych 02.20, kierowanym przez nieżyjącego już doc. dr. inż. Tadeusza Kalewskiego. Zespół zrealizował na zakończenie programu jeden z największych tematów, zatrudniając okresowo do 40 osób z wielu wiodących w kraju placówek badawczych. Powstały nowoczesne, sterowane komputerami stacje pomiarowe do diagnostyki silników skokowych i mikrosilników prądu stałego. W tym też czasie nawiązano współpracę m.in. z Wydziałem Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, z Instytutem Elektrotechniki w Międzyzlesiu, Instytutem Fizyki i innymi placówkami naukowo-badawczymi. Na szczególnie podkreślenie zasługuje ścisła współpraca zespołu z Zakładem Małych Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki, kierowanym przez doc. dr. inż. Jerzego Zadrożnego. Organizowane były wspólne spotkania i seminaria naukowe. Wspólnie konstruowane były urządzenia pomocnicze do trzech różnych stacji diagnostycznych mikromaszyn. Pracownicy naukowcy z Wydziału Mechaniki Precyzyjnej uczestniczyli we wszystkich Sympozjach „Mikromaszyny i Serwonapędy”.

Praca w Centralnym Programie Badań Podstawowych (CPBP 02.20) zaowocowała zbudowaniem trzech nowoczesnych stacji pomiarowych, wielu nowatorskich, opatentowanych następnie przetworników pomiarowych, opracowaniem kilkudziesięciu publikacji, dziesiątków referatów na konferencjach krajowych i zagranicznych oraz monografii napisanej przez zespół i wydanej na



Rys. 2. Okładka monografii wydanej przez PWN w 1991 r. „Mikrosilniki elektryczne. Badanie właściwości statycznych i dynamicznych”, pod redakcją dr. inż. Witolda Jaszczuka, recenzowanej przez prof. dr. inż. Ryszarda Sochockiego oraz dr. inż. Ryszarda Michalskiego

kładem PWN (rys. 2). Szczególnie podkreślić należy uznane osiągnięcia w budowie mierników momentu siły i przetworników kąta oraz położenia kąтового. Opracowano i wdrożono szereg oryginalnych metod badawczych, głównie bezdotykowych i nieinwazyjnych, dostosowanych do maszyn o małych wymiarach typowych dla mechaniki precyzyjnej.

Końcowym efektem programu było zorganizowanie w Pęcicach koło Warszawy, wspólnie z TU Ilmenu,

pierwszych polsko-niemieckich warsztatów naukowych, poświęconych problematyce napędów. Wzięli w nich udział liczni specjaliści z Polski i Niemiec, wówczas już zjednoczonych, ceniąc sobie zarówno poziom naukowy warsztatów, jak i ich organizację. Dzieło to jest kontynuowane. Spotkania odbywają się cyklicznie na przemian w Polsce i Niemczech. Ostatnie, piąte Warsztaty zorganizowano latem 2005 r. w Serocku k. Warszawy.

Programy nauczania od lat dziewięćdziesiątych do dziś

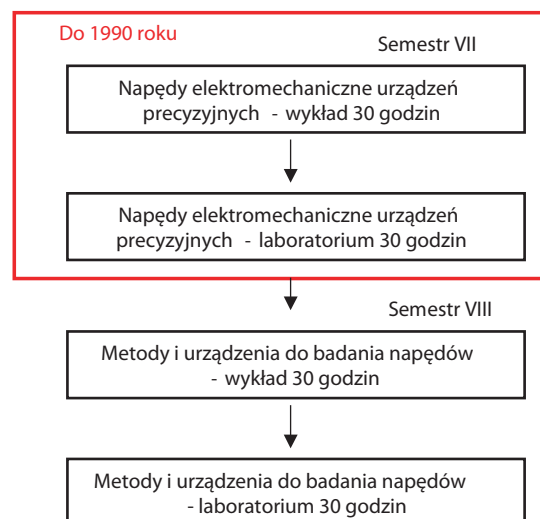
Wykłady z napędów elektromechanicznych ulegały stałym zmianom i modernizacji, uwzględniającym postęp techniki i wyniki własnych badań członków zespołu. Na początku lat 90. powstał nowy przedmiot: „Metody i urządzenia do badania napędów”, bazujący w dużej części na opracowanej monografii i doświadczeniach uzyskanych podczas realizacji tematu „Diagnostyka mikromaszyn elektrycznych” w CPBP 02.20.

W tym samym czasie pełnej krystalizacji uległ program wykładu i ćwiczeń laboratoryjnych z zakresu napędów elektromechanicznych. Ewoluowała także nazwa i od kilku lat brzmi „Napędy mechatroniczne” (dawniej: „Napędy elektromechaniczne urządzeń precyzyjnych”). Nazwa ta nie oddaje jednak zdaniem autora tego artykułu merytorycznych treści. Powstała po zmianie nazwy Wydziału, pod wpływem presji mody i ogólnego przeświadczenia, że wszystko co „mechatroniczne” jest nowoczesne.

Przedmiot prowadzony jest w wymiarze 30 godzin wykładu i 30 godzin ćwiczeń laboratoryjnych (rys. 3). Pozostało to do dziś bez zmian od około 20 lat.

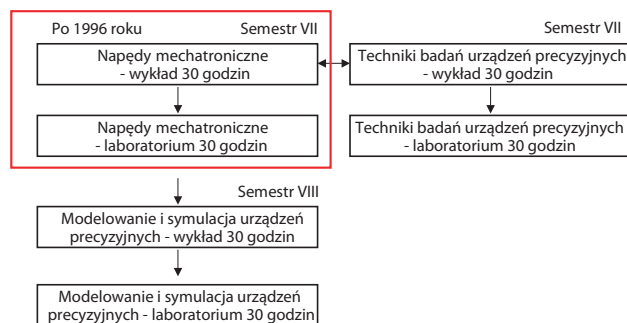
Po upływie kolejnych lat, w roku 1996 zmodernizowano plany studiów i programy wykładanych przedmiotów. Przy tej okazji powstał nowy przedmiot:

Lata: 1990 do 1996



Rys. 3. Poszerzenie treści nauczania w zakresie napędów elektromechanicznych w 1990 r. przez wprowadzenie nowego przedmiotu: „Metody i urządzenia do badania napędów”

„Techniki badań urządzeń precyzyjnych”. Przedmiot ten w wymiarze 30 godzin wykładu i 30 godzin laboratorium, znacząco wspiera merytorycznie nauczanie metod i opisywanie urządzeń do badania napędów. Jego powstanie odciążało metodykę badań i umożliwiło szerokie wprowadzenie nowoczesnej techniki badań symulacyjnych napędów. Skutkiem tego po roku 1996 przedmioty ściśle związane z problematyką napędów wykładane są przez 90 godzin i tyle też czasu poświęca się na ćwiczenia laboratoryjne. Daje to bardzo dobrą podstawę do przyszłej samodzielnej pracy absolwentów specjalizacji „Mikromechanika” (dawniej „Konstrukcja Urządzeń Precyzyjnych”) w zakresie badania i konstruowania takich napędów.



Rys. 4. Zmiana treści nauczania w zakresie napędów elektro-mechanicznych w roku 1996, po wprowadzeniu nowych przedmiotów: „Modelowanie i symulacja urządzeń precyzyjnych” oraz: „Techniki badań urządzeń precyzyjnych”

Na rys. 4 został przedstawiony ramowy plan zajęć dydaktycznych z zakresu napędów urządzeń precyzyjnych. Użyte nazewnictwo dotyczy roku 1996 – wprowadzenia zmodernizowanych programów kształcenia.

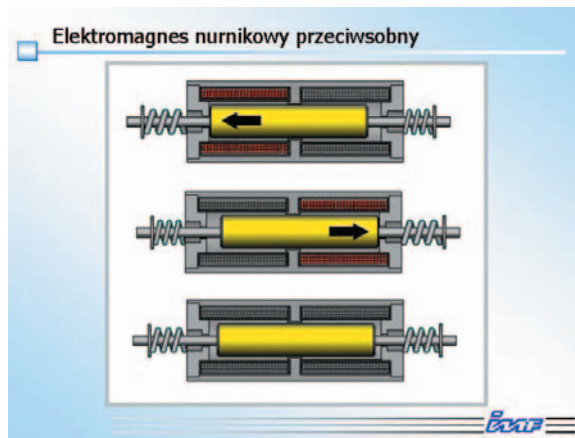
Program przedmiotu „Napędy mechatroniczne”

Na wstępie opracowania obecnej wersji programu kształcenia, przed rokiem 1990, podjęto decyzję, że wykład obejmować będzie tylko elektromechaniczne przetworniki energii prądu stałego oraz ich systemy sterowania i zasilania. W tym zakresie zastosowań znajdują się:

- sprzęt komputerowy i telekomunikacyjny
- sprzęt medyczny i rehabilitacyjny
- artykuły powszechnego użytku, głównie z zakresu audio-wideo
- automaty sprzedające produkty i usługi
- urządzenia pomiarowe i technologiczne
- roboty i manipulatory
- sprzęt wojskowy i kosmiczny oraz szereg innych.

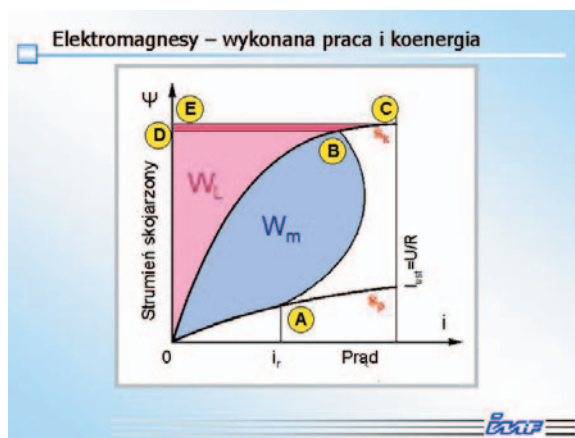
W urządzeniach tych dominuje zasilanie prądem stałym, najczęściej z przenośnych źródeł energii w postaci akumulatorów. Ograniczono więc świadomie problematykę zasilania i sterowania do stałoprądowego. Wyeliminowano także z zakresu wykładu omawianie innych urządzeń niż przetworniki energii, np. sprzęgiel elektromagnetycznych.

Wykład – po części wstępnej omawiającej ogólne zależności, np. skutki decentralizacji napędów i sterowania w urządzeniach – rozpoczyna się od szerokiego przedstawienia zagadnień budowy, działania, zasilania i sterowania, a także specjalistycznych badań elektromagnesów prądu stałego. Szczególny nacisk położono na grupę elektromagnesów szybko działających i specjalnych (rys. 5).



Rys. 5. Jeden z przykładowych rysunków do wykładu, ilustrujący budowę elektromagnesu przeciwsobnego

Omawiane są zarówno aspekty praktyczne: materiałowe, technologiczne, proces zużycia i zapobieganie przedwczesnemu zużyciu, jak i ściśle teoretyczne: opis matematyczny układu napędowego, jego sprawność i efektywność wykorzystania elektromagnesu. Prowadzona jest analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych i zasilania na działanie napędu na podstawie przebiegów magnesowania magnetowodu (rys. 6).



Rys. 6. Jeden z przykładowych rysunków do wykładu, ilustrujący wartość wykonanej pracy i koenergię zakumulowaną w polu magnetycznym przy zasilaniu elektromagnesu dłużej niż do końca ruchu zwory

Szerokie omówienie zagadnień związanych z elektromagnesami tworzy dobrą podstawę do przejścia do silników skokowych. Wywodzą się one wprost od elektromagnesów, a pierwsze z nich składały się z kilku elektromagnesów ze wspólną obrotową zworą. W silnikach skokowych aktualne pozostają rozważania nad bilansem energii strat, nad zjawiskami towarzyszącymi

przepływowi strumienia przez magnetowód i jego skutkami mechanicznymi, nad skutkami nagrzewania się maszyny. Dołączają oczywiście nowe zagadnienia, np. sprzężeń między pasmami uzwojeń, ale gruntowne podstawy przyswojone na przykładach elektromagnesów ułatwiają zrozumienie bardziej zawiłych problemów. W wykładzie omawiane są wszystkie podstawowe grupy silników skokowych, od prostych reluktancyjnych po najnowocześniejsze tarczowe z magnesami trwałymi w wirniku (rys. 7).



Rys. 7. Jedna z przykładowych animacji do wykładu, ilustrująca schemat budowy, a następnie zasadę działania skokowego silnika tarczowego

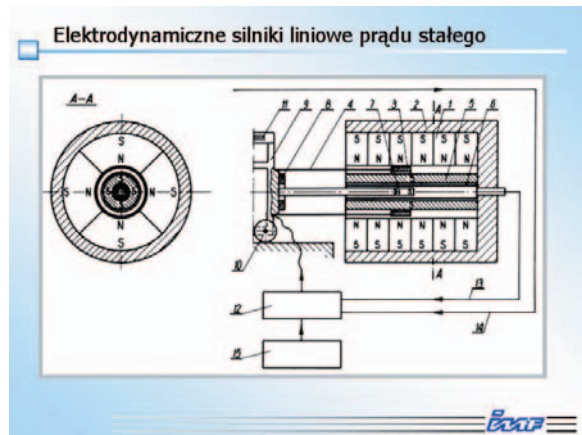
Wykład obejmuje cechy charakterystyczne i zastosowania silników skokowych, ich sterowniki, komutatory oraz algorytmy komutacji unipolarnej i bipolarnej. Omawiane są wielkości charakteryzujące silniki: wartość skoku, podział skoku na mikroskoki, charakterystyki kątowe momentu statycznego, charakterystyki częstotliwościowe i ich modyfikacje. Wiele czasu poświęca się na przedstawienie metod zapobiegania zjawiskom rezonansowym.

Omawiane są silniki reluktancyjne, o magnesach trwałych w wirniku: pazurkowe, tarczowe, a także bardzo rozpowszechnione – hybrydowe. Omawiane są również silniki nietypowe do zastosowań specjalnych, a wśród nich jednopasmowe. W podsumowaniu przedstawiany jest wpływ parametrów konstrukcyjnych napędów i specjalnych algorytmów komutacji na czas oraz dokładność pozycjonowania napędów skokowych w układach otwartych i ze sprzężeniami zwrotnymi.

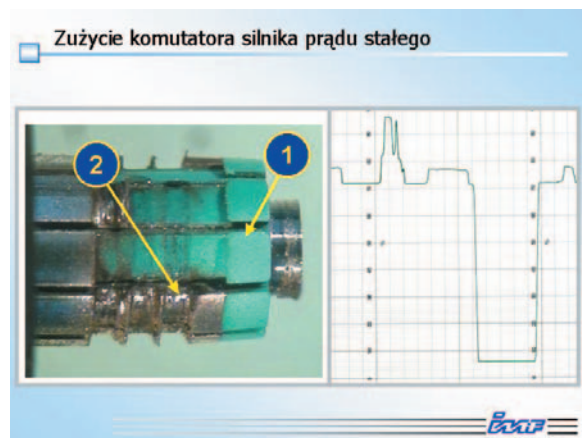
Kolejną grupą maszyn elektrycznych omawianych w wykładzie są elektrodynamiczne silniki prądu stałego w wersji liniowej i kątowej (rys. 8). Te ostatnie stosuje się obecnie masowo w pozycjonerach głowic pamięci dyskowych komputerów.

Silniki tej grupy należą do najprostszych w opisie matematycznym i komputerowej symulacji. Na wykładzie, oprócz licznych przykładów i działających modeli, pokazywane są wyniki badań symulacyjnych dynamiki napędu.

Ostatnią grupą omawianych maszyn są silniki prądu stałego o ciągłym ruchu wirnika. Silniki te zdominowały ilościowo napędy precyzyjne. Występują zarówno jako komutowane szczotkowo, jak i elektronicznie. Wykład



Rys. 8. Jeden z przykładowych rysunków do wykładu, ilustrujący schemat budowy elektrodynamicznego silnika liniowego typu „z krótką cewką i długą szczeliną”



Rys. 9. Jeden z przykładowych rysunków do wykładu, ilustrujący proces zużycia komutatora miniaturowego silnika prądu stałego

opisuje cechy charakterystyczne, zastosowania, budowę i działanie typowych odmian mikrosilników (tradycyjnych, bezżelazowych (w wirniku), tarczowych, specjalnych). Omawiane są ich charakterystyki elektromechaniczne, definiowane punkty znamionowe tych charakterystyk. Szczególny nacisk, podobnie jak w innych napędach, położono na skutki nagrzewania się maszyn i proces ich zużywania się (rys. 9) oraz dynamiki serwonapędów pozycjonujących z tymi silnikami.

Ćwiczenia laboratoryjne

Ćwiczenia laboratoryjne stanowią niezbędne, praktyczne uzupełnienie wykładu. Wykonywane są w małych zespołach, zwykle dwu- lub trzyosobowych. Każde z ćwiczeń trwa cztery godziny. Brak nadmiernego pośpiechu umożliwia dobry kontakt z prowadzącymi zajęcia, dodatkowe pokazy urządzeń, modeli silników i siłowników oraz dyskusje związane z badanymi obiektami. W laboratorium prowadzone są pomiary charakterystyk rzeczywistych obiektów fizycznych. Należy to podkreślić, gdyż w wielu przypadkach w laboratoriach studenckich ograniczany bywa dostęp studentów do



Rys. 10. Widok stanowiska do badań obciążeniowych charakterystyk mikrosilnika prądu stałego

rzeczywistych urządzeń, zastępowanych modelami matematycznymi w programach symulacyjnych (rys. 10).

W obecnie realizowanym programie jest sześć ćwiczeń. Zostały one opisane w skrypcie do zajęć (rys. 11), wraz z obszernymi wprowadzeniami teoretycznymi. Wprowadzenia do ćwiczeń rozwijają tematykę przekazywaną na wykładzie.

Tematyka kolejnych ćwiczeń jest następująca.

1. Wyznaczanie statycznych charakterystyk mechanicznych napędowych elektromagnesów prądu stałego
2. Badanie sprawności szybko działającego układu elektromechanicznego z elektromagnesem prądu stałego
3. Badanie dokładności pozycjonowania i wyznaczenie charakterystyki kątowej momentu statycznego silnika skokowego
4. Wyznaczanie obciążeniowych charakterystyk mikrosilnika prądu stałego
5. Badanie dynamicznych właściwości mikrosilników elektrycznych
6. Wyznaczanie cieplnych parametrów mikrosilnika prądu stałego.



Rys. 11. Okładka skryptu do ćwiczeń laboratoryjnych z napędów

Uwagi końcowe

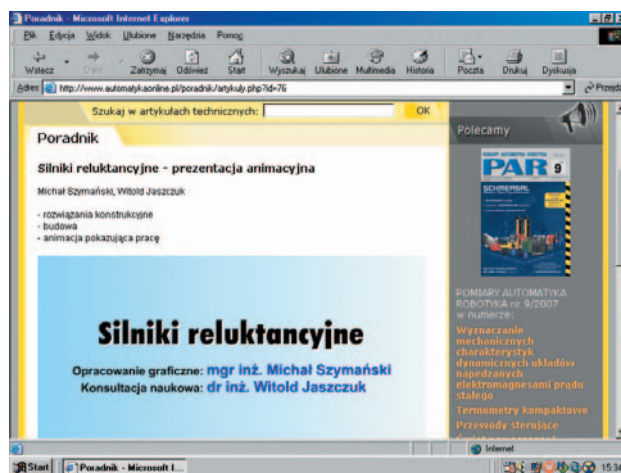
Przedmiot „Napędy mechatroniczne” postrzegany jest przez studentów jako trudny. Rzeczywiście ilość materiału, jaki należy przyswoić, jest duża, gdyż obejmuje zarówno teorię jak i szereg informacji praktycznych. Aby uatrakcyjnić i ułatwić nauczanie przygotowano wiele pomocy dydaktycznych.

Po pierwsze – pokazywane są na wykładzie liczne przykłady silników i całych napędów.

Po drugie – opracowane zostały barwne animacje komputerowe ukazujące budowę oraz ilustrujące działanie silników i elektromagnesów. (Większość tych animacji wykonał w ramach pracy przejściowej i dyplomowej mgr inż. Michał Szymański – absolwent Wydziału Mechatroniki.)

Po trzecie – przygotowano ok. 200 rysunków i fotografii, zwykle barwnych, powielanych przez studentów.

Po czwarte – wykorzystano ogólnodostępne medium jakim jest internet – zamieszczając w dziale poradnika portalu www.automatykaonline.pl szereg artykułów pisanych specjalnie jako materiały pomocnicze do wykładu (rys. 12). Artykuły te przeczytało już wiele tysięcy osób, co świadczy że są przydatne także na innych uczelniach.



Rys. 12. Internetowy poradnik z zakresu napędów elektromechanicznych na stronach portalu www.automatykaonline.pl

Po piąte – do wykładu i zajęć laboratoryjnych napisane zostały dostępne monografie, skrypty i preskrypty.

Od ponad dziesięciu lat, na koniec semestru studenci oceniają w anonimowej ankiecie przydatność treści wykładu i ćwiczeń, jakość opracowanych materiałów dydaktycznych, a także sposób prowadzenia zajęć. Wielką satysfakcją prowadzącego od 30 lat ten przedmiot jest ocena wyższa niż dobra.

Na zakończenie warto dodać, że praktyczne umiejętności studentów w zakresie konstruowania i badania napędów elektromechanicznych są przez nich bardzo często wykorzystywane w pracach przejściowych i dyplomowych.

Studenci pogłębiają swą wiedzę, współpracując z opiekunami naukowymi przy realizacji grantów i innych prac naukowo-badawczych. Korzyści bywają wtedy obustronne: studenci się uczą, konsultują swoje koncepcje z wykwalifikowaną kadrą, a pracownicy naukowi są odciążeni od wykonywania szeregu rutynowych czynności, szczególnie podczas długotrwałych badań laboratoryjnych. Wyniki zrealizowanych wspólnie badań wykorzystywane są następnie jako jedno ze źródeł informacji, na podstawie których modyfikuje się i stale unowocześnia treść zajęć dydaktycznych. ■