

Laboratorium Robotyki, Fotowoltaiki i Lewitacji Magnetycznej – historia i tematyka badawcza

Adam Krzysztof Piłat , Łukasz Więckowski , Janusz Teneta ,
Maciej Garbacz , Wojciech Kreft , Bartłomiej Sikora ,
Hubert Milanowski , Rafał Bieszczad , Konrad Janczarski 

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków

Streszczenie: Praca przedstawia zagadnienia naukowo-badawcze realizowane w zespole Robotyki, Fotowoltaiki i Lewitacji Magnetycznej Katedry Automatyki i Robotyki AGH. Opracowywane koncepcje i projekty stanowią nowe rozwiązania z zakresu automatyki, robotyki i technologii lewitacji. Prowadzone badania są istotne z uwagi na aktualny wzrost liczby wdrożeń tych technologii spowodowany optymalizacją ich efektywności, diagnostyki i sposobu sterowania.

Słowa kluczowe: robotyka, fotowoltaika, aktywna lewitacja magnetyczna, modelowanie, identyfikacja, sterowanie

PHOTOVOLTAIC, ROBOTICS AND MAGNETIC LEVITATION LABORATORY – HISTORY AND RESEARCH TOPICS

Abstract: The work presents scientific and research issues implemented in the team of robotics, photovoltaics and magnetic levitation of the Department of Automatic Control and Robotics at AGH University of Krakow. The developed solutions constitute new solutions in the field of automation, robotics and levitation technology. Research in the field of photovoltaics is significant from the point of view of the current increase in the implementation of this technology.

Keywords: robotics, photovoltaics, active magnetic levitation, modeling, identification, control

https://doi.org/10.7494/978-83-67427-37-1_8

1. Wstęp

Historia zespołu sięga roku 1974, kiedy to dr hab. inż. Roman Górecki, prof. AGH (rys. 1), zorganizował Zakład Automatyki Przemysłowej i Konstrukcji Prototypów, a potem przekształcił go i nazwał Laboratorium Automatyki, Robotyki i Systemów Fotowoltaicznych. Od roku 2006 funkcję kierownika zespołu przejął dr hab. inż. Jerzy Chojnacki, prof. AGH (rys. 1), który był gorącym zwolennikiem rozwoju fotowoltaiki. Nagła śmierć profesora w 2011 roku nie zatrzymała jednak rozwoju laboratorium, a obowiązki kierownika przejął dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz, prof. AGH (rys. 1). Laboratorium Robotyki, Fotowoltaiki i Lewitacji Magnetycznej zostało utworzone decyzją ówczesnego kierownika katedry prof. Marka Gorgonia, który w roku 2019 powierzył kierowanie zespołem osób drowi hab. inż. A. Piłatowi, prof. AGH (rys. 1), zastępującemu obejmującego funkcję kierownika katedry dra hab. inż. Krzysztofa Oprzędkiewicza, prof. AGH.



Rys. 1. Kierownicy laboratorium, od lewej: Roman Górecki, Jerzy Chojnacki, Krzysztof Oprzędkiewicz, Adam Piłat
(fot. archiwum własne ww. osób)

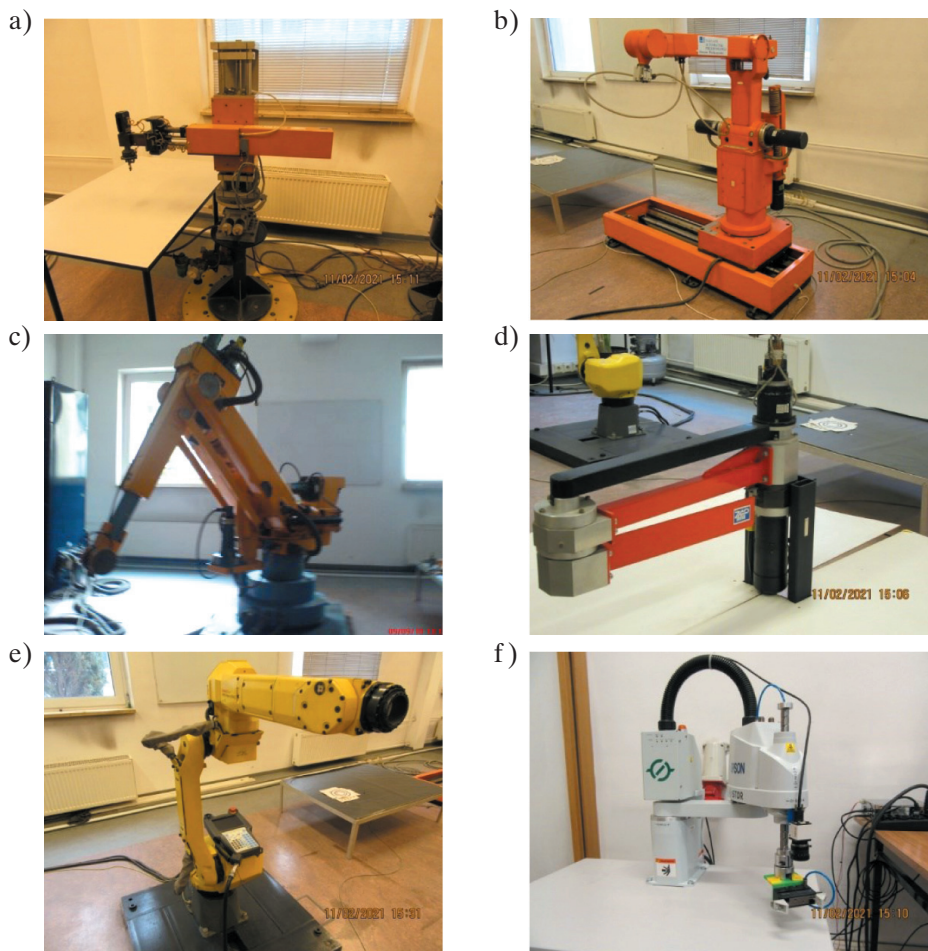
Obecnie w działalność naukową zespołu są czynnie zaangażowani czterej pełnoetatowi pracownicy naukowo-badawczy. Należy mieć nadzieję, że wraz z upływem czasu, rozwojem kompetencji, poszerzeniem składu zespołu i dalszymi awansami naukowymi aktualne wyzwania technologiczne sprawią, że tematyka badawcza oraz zainteresowania przyczynią się do dalszego rozwoju nauki i technologii w poszczególnych obszarach oraz w rozwiązaniach interdyscyplinarnych. Niestety, byt zespołu jest zagrożony ze względu na trudną sytuację finansową.

2. Robotyka

Historia laboratorium robotyki sięga roku 1989, kiedy to zakupiono pierwszego robota. Ówczesny lider zespołu dr inż. Mieczysław Zaczek, miłośnik i pasjonat robotyki, realizował konsekwentnie działania mające na celu opracowywanie metod sterowa-

nia robotami przemysłowymi. Sterowanie w czasie rzeczywistym z zastosowaniem platformy dSpace było wtedy rozwiązaniem pionierskim w AGH.

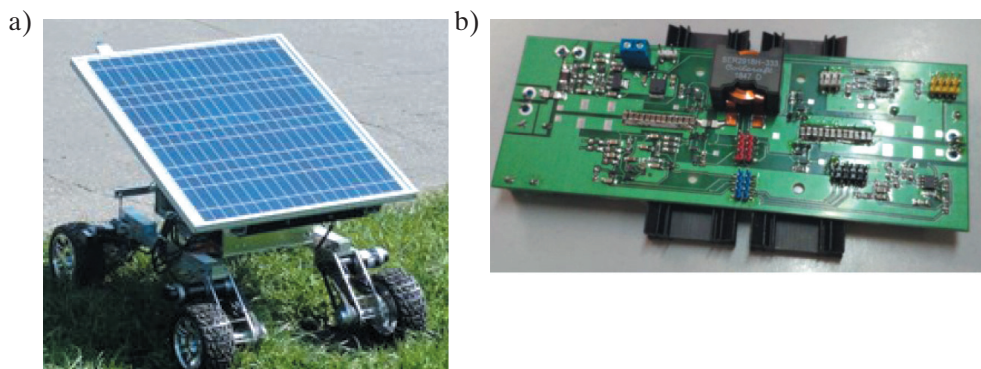
Sukcesywne inwestycje w laboratorium robotyki przyczyniły się do zbudowania – funkcjonującej do dzisiaj – bazy laboratoryjnej, świadczącej o rozwoju technologii w tym obszarze (rys. 2). W kolejnych latach inwestowano w następującą aparaturę badawczą: robot pneumatyczny PR-02 (1989); robot przemysłowy IRp-6 (1991); robot przemysłowy APR-20 (1994); robot dwuosiowy o strukturze SCARA (1998); sześcionożny robot kroczący HEXOR II (2006); roboty mobilne KHEPERA III (2007); robot przemysłowy FANUC ARC Mate 100iC (2011); robot przemysłowy SCARA EPSON T3 (2018); roboty mobilne KHEPERA IV (2019); robot UR3 (2020).



Rys. 2. Roboty przemysłowe: a) PR-02; b) IRP6; c) APR-20; d) robot typu SCARA; e) Fanuc 100iC; f) Epson T3
(fot. J. Teneta)

Obszar zainteresowań laboratorium robotyki obejmuje m.in. robotykę mobilną, w szczególności systemy sterowania i wspomagania decyzji, mające wpływ na kluczowe parametry i osiągi pracy robotów mobilnych. Obiecującym sposobem zwiększenia stopnia autonomii robotów mobilnych jest zastosowanie jako dodatkowego źródła energii odpowiednio dobranych ogniw fotowoltaicznych (PV). Mogą one dostarczać dodatkową energię zarówno do ładowania akumulatorów, jak i do bieżącego zasilania układów pomiarowych, sterujących i komunikacyjnych (Więckowski 2014).

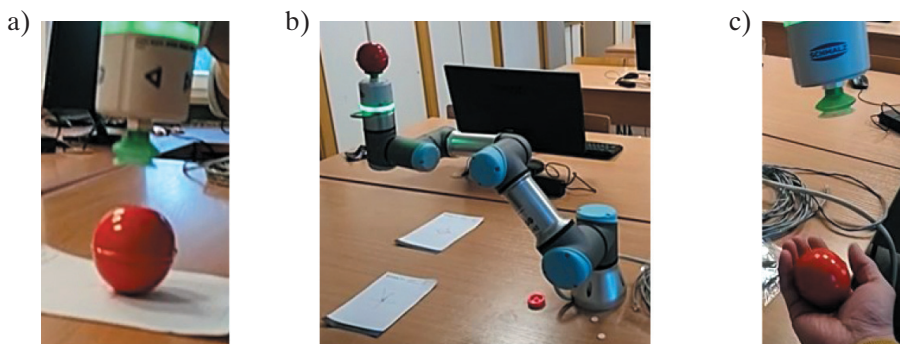
Roboty mobilne wymagają ponadto bardzo wydajnych magazynów energii oraz specjalistycznych przetworników elektroenergetycznych. Opracowane konstrukcje prototypowe stanowią know-how zespołu (Więckowski i Klimek 2020) (zob. rys. 3). Poprawa jakości i wydajności baterii jest kluczowym zagadnieniem dla systemu zasilania robota mobilnego. W konsekwencji powyższe zabiegi mogą zwiększyć autonomię energetyczną jednostek mobilnych nawet o 30%. Inne obszary badań laboratorium robotyki to sterowanie robotami z napędem różnicowym z wykorzystaniem platformy programistycznej ROS (*Robotic Operating System*) oraz prace symulacyjne w zakresie rozwoju algorytmów sterujących dla mobilnych manipulatorów robotycznych.



Rys. 3. Robot mobilny z systemem zasilania hybrydowego (a) oraz eksperymentalny moduł konwertera energetycznego dwukierunkowego typu *buck-boost* dla platformy robota mobilnego (b)

(fot. Ł. Więckowski)

Ostatnią inwestycją w rozwój robotyki przemysłowej jest robot UR3 przeznaczony do działań w obszarze Przemysłu 4.0. Aktualne prace badawcze skupiają się na analizie matematycznej (Kreft 2020) oraz badaniach symulacyjnych i testowych algorytmów sterowania robotem z wykorzystaniem systemów ROS i MATLAB/Simulink. Na rysunku 4 przedstawiono manipulator z chwytakiem pneumatycznym i obiektem w postaci sfery. Robot realizuje zadanie „pick and place”.



Rys. 4. Robot UR3 wyposażony w chwytak pneumatyczny w fazach: a) przed pochwyceniem; b) przenoszenia; c) po opuszczeniu sfery
(fot. A. Piłat)

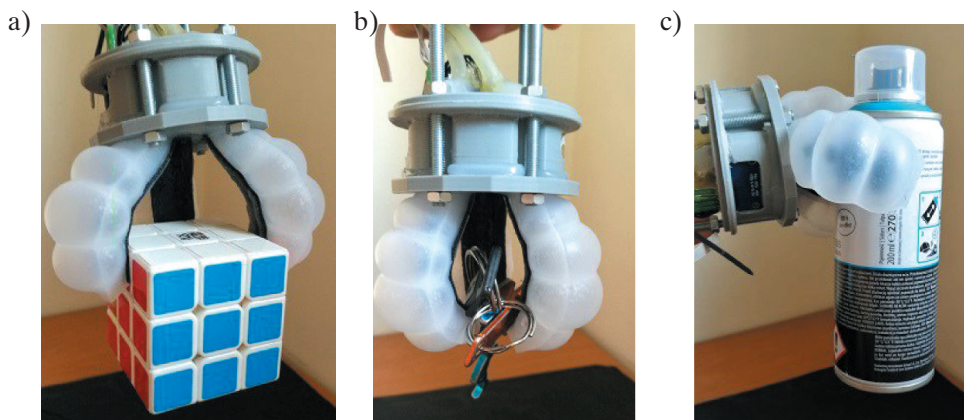
Stanowisko badawcze wyposażono w czujniki radiowe, które wraz z odpowiednim oprogramowaniem robota stanowią inteligentną barierę, zapewniającą bezpieczeństwo operatora przy naruszeniu przestrzeni roboczej przez automatyczne zatrzymanie robota (Bednorz i in. 2021). Układ automatyki podczas ciągłej pracy robota pozostaje pod nadzorem człowieka. W przypadku detekcji osoby w strefie niebezpiecznej praca manipulatora jest zatrzymywana do czasu opuszczenia strefy przez człowieka (zob. rys. 5). W obszarze robotyki przemysłowej badania są zorientowane na opracowanie nowych metod sterowania, w tym sterowania inteligentnego, które będą optymalizowane do współpracy z człowiekiem. Badania te wpisują się w aktualny trend kolejnej rewolucji przemysłowej – Przemysł 5.0 (Industry 5.0) (IFR 2019). Obecnie robotyka współpracująca jest ograniczona do koegzystencji maszyny i człowieka oraz sekwencyjnej współpracy. Proponowana przez środowiska naukowe i przemysłowe wizja rozwoju robotyki w kolejnych latach zakłada wyrafinowaną współpracę maszyny z człowiekiem (*human-machine interaction*). Tym samym niezbędne jest opracowanie metod identyfikacji i modelowania dynamiki robotów do celów sterowania ze szczególnym uwzględnieniem obustronnych oddziaływań między człowiekiem a maszyną. Dzięki wykorzystaniu metod matematycznych oraz platform obliczeniowych czasu rzeczywistego możliwe będzie wykonywanie zadań we wspólnym obszarze roboczym.

Prowadząc badania w zakresie robotyki współpracującej, wyposażono stanowisko badawcze z robotem UR3 w kamery stereoskopowe. Prace badawcze związane z detekcją obiektów, modelowaniem i sterowaniem robotem są w toku.

Ważnym obszarem prac badawczych w dziedzinie robotyki jest projektowanie chwytaków. W wyniku prac naukowo-badawczych zrealizowano dwa prototypy, do których opracowania wykorzystano autorskie koncepcje. W robotyce szczególne zastosowania ma chwytak miękki, gdyż pozwala na pochwytywanie obiektów o różnych kształtach (rys. 6.) (Widół 2019).



Rys. 5. Zintegrowany system pozycjonowania
z robotem współpracującym Universal Robotics UR3
(fot. H. Milanowski)

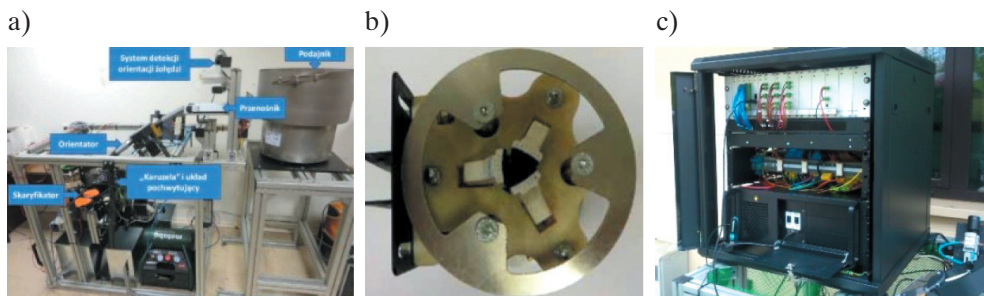


Rys. 6. Badanie pochwyty realizowanego przez chwytak miękkiej
(fot. Ł. Więckowski)

Chwytak elektromagnetyczny trójpalczysty jest przeznaczony do pochwytywania elementów z kontrolowaną siłą zacisku. Jest interesującym obiektem z uwagi na nieliniowość oddziaływania magnesu i elektromagnesu (Bieszczad 2021).

W ramach współpracy Katedry Automatyki i Robotyki AGH z Uniwersytetem Rolniczym w Krakowie i Przemysłowym Instytutem Maszyn Rolniczych w Poznaniu (PIMR)

został opracowany automat do skaryfikacji nasion dębu (Tadeusiewicz i in. 2017a, 2017b, Adamczyk i in. 2018) stanowiący kompletne rozwiązanie przemysłowe, które zintegrowało technologię robotyki – trójpalczasty chwytak nasion umieszczony na obrotowym ramieniu z układem detekcji wizyjnej i automatycznego podawania i sortowania nasion po skaryfikacji (rys. 7).



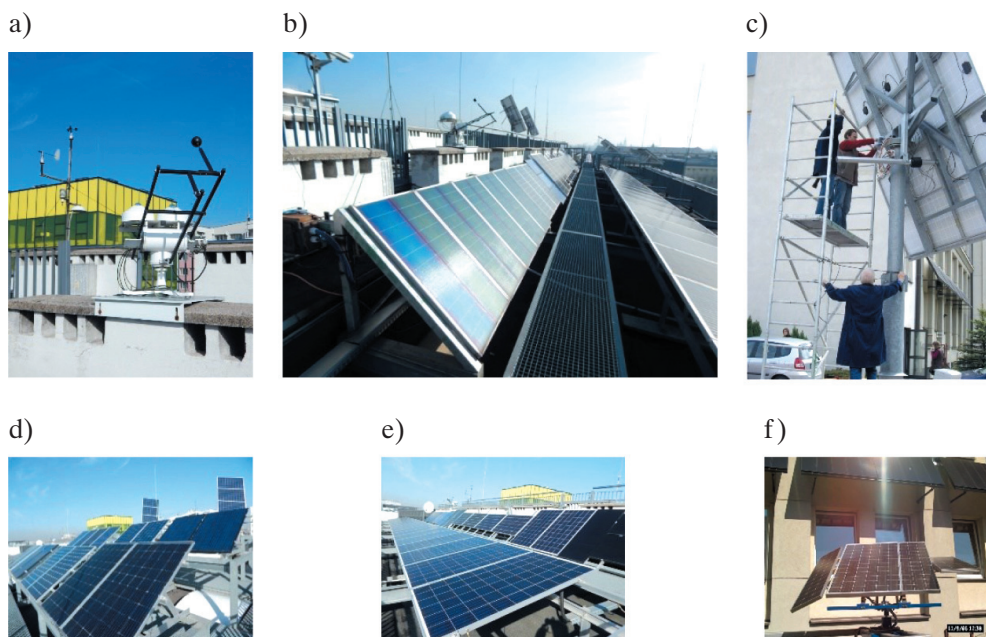
Rys. 7. Automat do skaryfikacji nasion dębu: a) widok automatu; b) chwytak – widok od strony szczęk; c) sterownik PAC wraz z komputerem do analizy obrazu
Źródło: fot. a – Tadeusiewicz i in. (2017b), fot. b – Tadeusiewicz i in. (2017a), fot. c – A. Piłat

Kolejnym obszarem zainteresowań laboratorium są maszyny kroczące (Milanowski i Piłat 2020). W te projekty zaangażowani są głównie studenci realizujący ambitne cele w ramach kół naukowych AGH „Dynamics” i „Focus”. Laboratorium badawcze robotyki mobilnej wyposażone w bieżnię oraz zawieszę jest przeznaczone do prowadzenia badań sterowania maszynami kroczącymi. Aktualne zagadnienia badawcze skupiają się na motoryce ruchu maszyny czworonożnej oraz stabilności ruchu dla maszyny dwunożnej.

3. Fotowoltaika

Pierwszy system fotowoltaiczny powstał w laboratorium w roku 1994 (fasada budynków B1 i B2). W roku 1995 uruchomiono pierwszy system nadążny (tracker PV). W latach 2003–2004 laboratorium uczestniczyło w europejskim programie SOLTRAIN dla państw kandydujących do Unii Europejskiej. W roku 2006 uruchomiono na fasadzie budynku C3 markizę fotowoltaiczną, będącą jednym z pierwszych tego typu systemów w Polsce. Dzięki staraniom zespołu laboratorium udało się pozyskać grant badawczy „Fotowoltaika i sensory w proekologicznym rozwoju Małopolski”, który był współfinansowany z funduszy Europejskiego Obszaru Gospodarczego i realizowany w latach 2007–2011. Kolejne lata to uruchamianie następnych systemów fotowoltaicznych (np. tracker PV o mocy 2,25 kW) oraz doposażanie laboratorium w niezbędne

urządzenia pomiarowe: stację pogodową, kamerę termowizyjną oraz miernik charakterystyk prądowo-napięciowych. Przełomem okazały się lata 2013–2016 – zmodernizowano wówczas dach pawilonu C3, na którym zbudowano badawczą i demonstracyjną instalację PV o mocy 12 kW, wykorzystywaną również podczas zajęć dydaktycznych (rys. 8). W laboratorium fotowoltaiki realizowanych jest wiele projektów i prac dyplomowych z obszaru pomiarów i sterowania w systemach fotowoltaicznych.



Rys. 8. Elementy laboratorium systemów fotowoltaicznych: a) stacja pogodowa na dachu budynku C3; b) najstarsze systemy PV na dachu budynku C3 uruchomione w 1998 roku; c) budowa trackera PV 2,25 kW; d) instalacje PV na dachu budynku C3 z modułami ustawionymi pod kątem 35°; e) instalacje PV na dachu budynku C3 z modułami ustawionymi pod kątami 15° i 45°; f) eksperymentalny tracker PV zbudowany w ramach pracy dyplomowej (fot. J. Teneta)

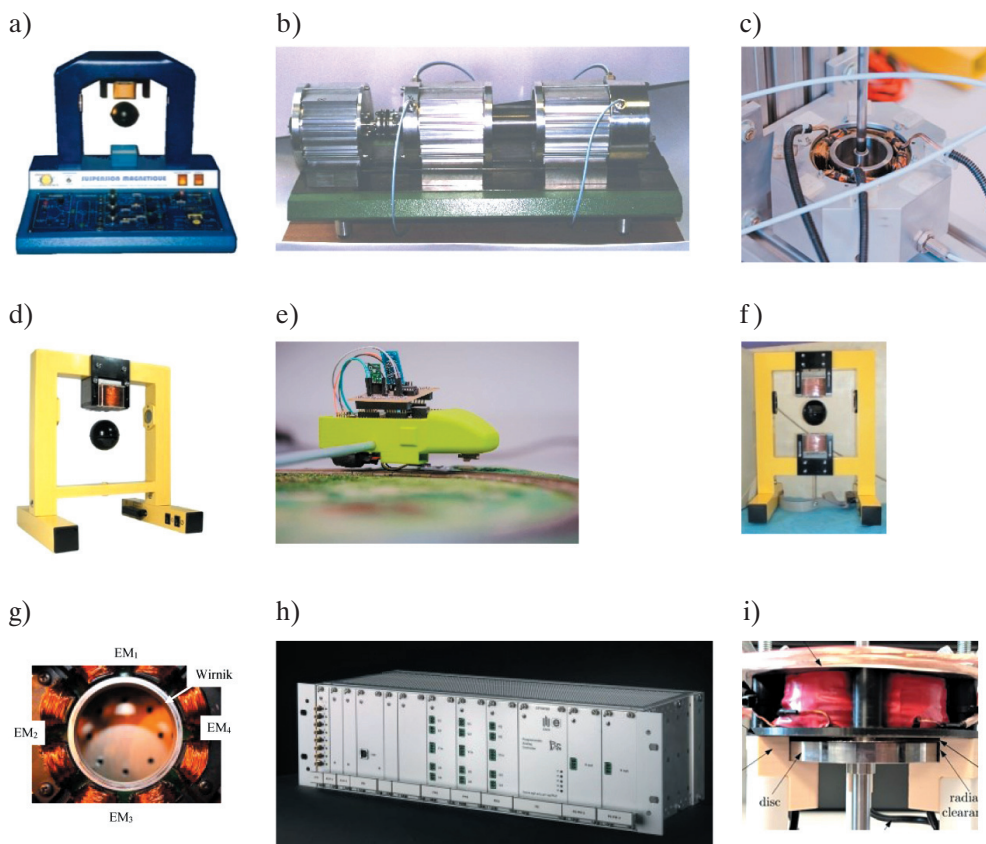
Laboratorium wielokrotnie gościło studentów z wymiany międzynarodowej (głównie w ramach programu Erasmus) oraz prowadziło badania zlecone przez zagraniczne podmioty przemysłowe.

Obecnie w laboratorium – we współpracy z innymi ośrodkami badawczymi – prowadzone są głównie zaawansowane prace nad wpływem zacienienia i zabrudzenia modułów fotowoltaicznych na generowaną przez nie energię elektryczną (Jaszczur i in. 2019, Styszko i in. 2019). Dodatkowo bada się wpływ temperatury (Jaszczur i in. 2021)

oraz efektu starzenia się modułów PV (Ceran i in. 2021) na wydajność systemów fotowoltaicznych. Dane pomiarowe uzyskane z posiadanej stacji pogodowej pomagają w matematycznym modelowaniu widma promieniowania słonecznego (Rodziewicz i in. 2021). Dzięki wieloletniemu doświadczeniu pracownicy laboratorium angażują się w konsultacje merytoryczne związane z wpływem fotowoltaiki na różne aspekty rozwoju gospodarczego i społecznego naszego kraju (Duda i in. 2022).

4. Lewitacja magnetyczna

Zainteresowania zagadnieniem lewitacji magnetycznej w Katedrze Automatyki i Robotyki sięgają roku 1999, kiedy to zakupiono w ramach projektu Tempus (kier. W. Grega) pierwszy na AGH system lewitacji magnetycznej sterowany analogowo. Jego modyfikacja pozwalająca na realizację zadań ze sterowania cyfrowego przyniosła wiele prac badawczych zorientowanych na identyfikację, modelowanie, syntezę sterowania oraz sterowanie w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem różnych rozwiązań sprzętowych. Badania w obszarze lewitacji zostały rozszerzone o sterowanie wirnikiem łożyskowanym magnetycznie (Piłat 2002). W kolejnych latach skupiono się na opracowaniu innowacyjnych autorskich rozwiązań konstrukcyjnych do celów badawczych. Rozwój technologii był możliwy dzięki wsparciu finansowemu prof. dra hab. inż. Ryszarda Tadeusiewicza. Kolejne lata badań skutkowały takimi rozwiązaniami, jak: łożysko magnetyczne o trzech siłownikach, cienkościenne łożysko magnetyczne, systemy edukacyjne lewitacji (MLS1EM i MLS2EM), wózek lewitujący i poruszany nad torem magnetycznym, specjalistyczny sterownik do systemów automatyki – w szczególności przeznaczony dla urządzeń do lewitacji magnetycznej z równoległym przetwarzaniem sygnałów (Piłat i Kłoczek 2013), łożysko magnetyczne o czterech siłownikach, łożysko magnetyczne osiowe jednobiegunowe czy osiowe łożysko magnetyczne z wieloma nabiegunnikami (Sikora i in. 2019) (rys. 9). W sterowaniu systemami lewitacji magnetycznej bardzo ważne było opracowanie sposobów akwizycji i sterowania oraz kompleksowego sterownika przeznaczonego dla urządzeń z tą technologią. Badanie układów sterowania, w tym inteligentnego, stanowi jeden z obszarów badawczych zorientowanych na aspekty funkcjonalne i efektywność opracowywanych urządzeń (Piłat i in. 2019a, 2019b). W prowadzonych badaniach są stosowane zaawansowane metody matematyczne pozwalające na interdyscyplinarne prototypowanie, modelowanie, syntezę sterowania i prowadzenie badań symulacyjnych na opracowanych wirtualnych prototypach (Piłat 2020). Umożliwia to uzyskanie optymalnych konfiguracji i analizę proponowanego sterowania już na etapie koncepcyjnym, dzięki czemu skraca się faza projektowania i prototypowania urządzenia.



Rys. 9. Wybrane rozwiązania technologiczne laboratorium lewitacji magnetycznej:

a) system analogowy; b) wirnik w łożyskach magnetycznych; c) prototyp aktywnego radialnego łożyska magnetycznego; d) system edukacyjno-badawczy MLS1EM; e) model laboratoryjny pociągu magnetycznego; f) system edukacyjno-badawczy MLS2EM; g) cienkościenne radialne aktywne łożysko magnetyczne; h) sterownik PAC do sterowania w czasie rzeczywistym;

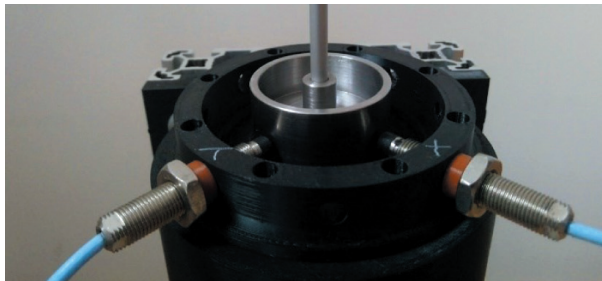
i) osiowe aktywne łożysko magnetyczne

(fot. a–h – A. Piłat, fot. i – B. Sikora)

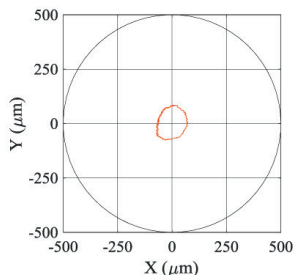
Ostatnie osiągnięcia badawcze są związane z poszerzeniem konfiguracji w kierunku precyzyjnego modelowania systemów lewitacji, inteligentnego sterowania zespołami napędowo-łożyskowymi oraz aplikacji w postaci zintegrowanego urządzenia z wirnikiem napędzanym i lewitującym w polu magnetycznym. Prowadzono prace badawcze na rzecz Fundacji Rozwoju Kardiochirurgii im. prof. Zbigniewa Religi z Zabrze w zakresie konfiguracji pompy wspomagającej pracę serca. Aktualnie finalizowana jest konstrukcja prototypu pompy powietrznej z wirnikiem łożyskowanym magnetycznie i napędem. Analizom poddawana jest konfiguracja zespołu lewitacji przeznaczona do badań interdyscyplinarnych poszerzonych o pomiary pola magnetycznego (rys. 10a).

Badania te są ukierunkowane na opracowanie sterowania nieliniowego. Rysunek 10b przedstawia przykładową orbitę wirnika w przestrzeni łożyskowej.

a)



b)



Rys. 10. Nowa konstrukcja zintegrowanego aktywnego łożyska magnetycznego sterowana ze sterownika ZYNQ
(fot. A. Piłat)

Informacje o działaniach w obszarze aktywnej lewitacji magnetycznej są dostępne na stronie internetowej zespołu pod adresem: www.maglev.agh.edu.pl.

5. Podsumowanie

Chociaż zakres prac badawczych Laboratorium Robotyki, Fotowoltaiki i Lewitacji Magnetycznej jest szeroki i świadczy o multidyscyplinarności tej jednostki, to jednak głównym obszarem pozostają badania w zakresie metod identyfikacji, modelowania dynamiki, projektowania i realizacji sterowania w czasie rzeczywistym robotami przemysłowymi, mobilnymi (w tym kołowymi i kroczącymi) oraz urządzeniami z technologią aktywnej lewitacji magnetycznej, w szczególności maszynami wirnikowymi łożyskowanymi i napędzanymi magnetycznie. W obszarze robotyki badania naukowe zorientowane są na modelowanie dynamiki, syntezę sterowania (w tym inteligentnego) dla rozwiązań przemysłowych i mobilnych. W obszarze fotowoltaiki badania naukowe skupiają się na analizie parametrów pracy ogniw fotowoltaicznych, optymalnej konfiguracji do określonych zastosowań oraz wpływu czynników zewnętrznych na ilość pozyskiwanej energii w danej porze roku. W obszarze lewitacji badania naukowe ukierunkowane są na projektowanie optymalnych konfiguracji urządzeń przy jednoczesnym uwzględnieniu aspektów konstrukcyjnych, wykonawczych i sterowania. Badania naukowe zorientowane na integrację technologii powinny przynieść nowatorskie rozwiązania zwłaszcza w obszarze rozwiązań autonomicznych urządzeń energetycznie wspieranych technologią fotowoltaiczną.

Literatura

- Adamczyk F., Frąckowiak P., Jabłoński M., Juliszewski T., Kielbasa P., Piłat A., Szaroleta M. i in., 2018, *Automat do skaryfikacji żołądźi wraz z identyfikacją zmian chorobowych*, Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań.
- Bednorz T., Milanowski H., Piłat A.K., 2021, *Moduł pozycjonowania dla robota współpracującego wspomagający zadanie Pick-and-Place*, sprawozdanie z grantu Acellor-Mittal, AGH, Koło Naukowe Focus, Kraków.
- Bieszczad R., 2021, *Electromagnetic gripper controller implemented in Zynq module*, AGH, Kraków [praca magisterska, promotor. A.K. Piłat].
- Ceran B., Mielcarek A., Hassan Q., Teneta J., Jaszczur M., 2021, *Aging effects on modelling and operation of a photovoltaic system with hydrogen storage*, Applied Energy, vol. 297, 117161. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117161>.
- Duda J., Kusa R., Pietruszko S., Smol M., Suder M., Teneta J., Wójtowicz T., Żdanowicz T., 2022, *Development of roadmap for photovoltaic solar technologies and market in Poland*, Energies, vol. 15(1), 174. <https://doi.org/10.3390/en15010174>.
- IFR (International Federation of Robotics), 2019, *Types of Human-Industrial Robot Collaboration*.
- Jaszczur M., Hassan Q., Styszko K., Teneta J., 2019, *Impact of dust and temperature on energy conversion process in photovoltaic module*, Thermal Science, vol. 23(4), s. 1199–1210. <https://doi.org/10.2298/TSCI19S4199J>.
- Jaszczur M., Teneta J., Hassan Q., Majewska E., Hanus R., 2021, *An experimental and numerical investigation of photovoltaic module temperature under varying environmental conditions*, Heat Transfer Engineering, vol. 42(3–4), s. 354–367. <https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1699306>.
- Kreft W., 2020, *Inverse kinematics determination and trajectory tracking algorithm development of a robot with 7 joints*, [w:] ICARCV 2020: the 16th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision: December 13–15, 2020, Shenzhen, China: conference guide, IEEE, Piscataway, s. 1001–1007. <https://doi.org/10.1109/ICARCV50220.2020.9305334>.
- Milanowski H., Piłat A.K., 2020, *Comparison of identified and SimScape model of human leg motion*, [w:] MSM'2020: Mechatronic Systems and Materials: 15th International Conference: 1–3 July 2020, Białystok, Poland, IEEE, Piscataway, s. 287–292. <https://doi.org/10.1109/MSM49833.2020.9201736>.
- Piłat A.K., 2002, *Sterowanie układami magnetycznej lewitacji*, AGH, Kraków [rozprawa doktorska, promotor W. Grega].
- Piłat A.K., 2020, *6 pole AMB as a drive of elliptic rotor – initial study supported by the virtual prototype*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 63(1), s. 153–170. <https://doi.org/10.3233/JAE-209006>.

- Piłat A., Klocek J., 2013, *Programmable analog hard real-time controller*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 89, nr 3a, s. 38–46.
- Piłat A.K., Sikora B., Żrebiec J., 2019a, *Investigation of lateral stiffness and damping in levitation system with opposite electromagnets*, [w:] *12th Asian Control Conference (ASCC): Kitakyushu-shi, Japan, June 9–12, 2019*, IEEE, Piscataway, s. 1210–1215.
- Piłat A.K., Żrebiec J., Sikora B., 2019b, *Neural velocity observer trained with experimental data supporting stabilization of magnetically levitating sphere*, [w:] *12th Asian Control Conference (ASCC): Kitakyushu-shi, Japan, June 9–12, 2019*, IEEE, Piscataway, s. 214–219.
- Rodziewicz T., Rajfur M., Teneta J., Świsłowski P., Waclawek M., 2021, *Modelling and analysis of the influence of solar spectrum on the efficiency of photovoltaic modules*, Energy Reports, vol. 7, s. 565–574. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.013>.
- Sikora B., Piłat A.K., 2019, *Numerical model of the axial magnetic bearing with six cylindrical poles*, Archives of Electrical Engineering, vol. 68, no. 1, s. 195–208. <https://doi.org/10.24425/aee.2019.125990>.
- Styszko K., Jaszczur M., Teneta J., Hassan Q., Burzyńska P., Marcinek E., Łopian N., Samek L., 2019, *An analysis of the dust deposition on solar photovoltaic modules*, Environmental Science and Pollution Research, vol. 26(9), s. 8393–8401. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1847-z>.
- Tadeusiewicz R., Jabłoński M., Piłat A., Szczepaniak J., Adamczyk F., Frąckowiak P., Tylek P. i in., 2017a, *Automat wspomagający uzyskanie większej liczby sadzonek dębu*, Wszechświat, t. 118, nr 7–9, s. 200–207.
- Tadeusiewicz R., Klocek J., Piłat A., Jabłoński M., Tylek P., Walczyk J., Adamczyk F., Szaroleta M., 2017b, *Sterowanie napędem zespołu chwytно-pozycjonującego w automacie skaryfikującym nasiona dębu*, Napędy i Sterowanie, R. 19, nr 11, s. 82–87.
- Wideł D., 2019, *Projekt oraz wykonanie prototypu miękkiego chwytaka do zastosowań w robotyce*, AGH, Kraków [praca magisterska, promotor Ł. Więckowski].
- Więckowski Ł., 2014, *Analysis of energy management strategies for autonomous mobile robot powered by solar cells*, AGH University of Science and Technology, Krakow [praca doktorska]. <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/rozprawy2/10870/full10870.pdf>.
- Więckowski Ł., Klimek K., 2020, *Development of a hybrid energy storage system for a mobile robot*, [w:] *MSM'2020: Mechatronic Systems and Materials: 15th International Conference: 1–3 July 2020, Białystok, Poland*, IEEE, Piscataway, s. 77–82. <https://doi.org/10.1109/MSM49833.2020.9201688>.