

# POLITECHNIKA POZNAŃSKA

---

## Załącznik nr 3 – Autoreferat

---

**Autoreferat** przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych, w szczególności określonych w art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 r.

Jakub Kołota

**Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki**  
**Instytut Automatyki i Robotyki**

27 lipca 2020

## Spis treści

1. Imię i nazwisko .....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe .....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych .....	4
4. Omówienie osiągnięć naukowych, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 r.....	5
4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego.....	5
4.2 Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z ich ewentualnym wykorzystaniem.....	6
4.2.1 Wprowadzenie.....	6
4.2.2 Modelowanie, identyfikacja i sterowanie siłownikami IPMC .....	9
4.2.3 Modelowanie, identyfikacja i sterowanie siłownikami DEAP .....	25
4.2.4 Przykładowe zastosowanie elektroaktywnych polimerów IPMC oraz DEAP...	35
4.2.5 Podsumowanie .....	41
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub w szczególności zagranicznej.....	46
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.....	47
7. Inne informacje dotyczące kariery zawodowej .....	54

## 1. Imię i nazwisko

**Jakub Kołota**

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

### POLITECHNIKA POZNAŃSKA [2010 – 2012]

- » studia podyplomowe „Kompetencje Edukacyjne w Obszarze Przedmiotów Politechnicznych”

### POLITECHNIKA POZNAŃSKA [2009]

- » uzyskany 22 września 2009 r. stopień naukowy **doktor**
- » wydział: Informatyki i Zarządzania, dziedzina: Nauki Techniczne, dyscyplin naukowa: Automatyka i Robotyka; specjalność: Automatyka
- » praca doktorska „Dynamika reluktancyjnego silnika krokowego”
- » uzyskany grant doktorski Komitetu Badań Naukowych poparty recenzjami pracy w kryterium oceny wyróżniającej

### POLITECHNIKA POZNAŃSKA [2003 – 2005]

- » uzyskany 22 czerwca 2005 r. tytuł zawodowy **magister inżynier**
- » wydział: Informatyki i Zarządzania, kierunek: Informatyka, tryb studiów: dzienne, specjalność: Systemy Informatyczne w Zarządzaniu
- » praca dyplomowa: „Opracowanie aplikacji do tworzenia drzew genealogicznych z wykorzystaniem bazodanowych i internetowych technologii programistycznych”
- » 09.06.2005r. przyznane miejsce w Księdze Wyróżniających się Studentów Wydziału Informatyki i Zarządzania

### POLITECHNIKA POZNAŃSKA [1999 – 2004]

- » uzyskany 21 maja 2004 r. tytuł zawodowy **magister inżynier**
- » wydział: Elektryczny, kierunek: Elektrotechnika, tryb studiów: dzienne, specjalność: Urządzenia Elektryczne i Elektroniczne Pojazdów
- » praca dyplomowa: „Projektowanie, konfiguracja i administrowanie sieciami komputerowymi”
- » studia ukończone z wyróżnieniem

### POLITECHNIKA POZNAŃSKA [2000 – 2003]

- » wydział: Elektryczny, kierunek: Informatyka, tryb studiów: dzienne,
- » uzyskany 30 września 2003 r. tytuł zawodowy **inżynier**
- » praca dyplomowa: „Oprogramowanie modelu grupowego ruchu pojazdów w sieciach ulic”

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

---

<b>data zatrudnienia</b>	<b>miejsce zatrudnienia, jednostka, stanowisko, wymiar pracy</b>
od 01.XI.2019	Politechnika Poznańska Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki, Instytut Automatyki i Robotyki <i>stanowisko</i> : adiunkt <i>wymiar pracy</i> : pełen etat
od 01.X.2017	Politechnika Poznańska Wydział Informatyki, Instytut Automatyki i Robotyki <i>stanowisko</i> : starszy wykładowca <i>wymiar pracy</i> : pełen etat
od 01.X.2016	Politechnika Poznańska Wydział Informatyki, Katedra Inżynierii Komputerowej <i>stanowisko</i> : starszy wykładowca <i>wymiar pracy</i> : pełen etat
od 01.X.2009	Politechnika Poznańska Wydział Informatyki, Katedra Inżynierii Komputerowej <i>stanowisko</i> : adiunkt <i>wymiar pracy</i> : pełen etat
od 01.X.2005	Politechnika Poznańska Wydział Informatyki, Katedra Inżynierii Komputerowej <i>stanowisko</i> : asystent <i>wymiar pracy</i> : pełen etat
od 01.X.2004	Politechnika Poznańska Wydział elektryczny, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej <i>stanowisko</i> : asystent <i>wymiar pracy</i> : pełen etat

---

#### 4. Omówienie osiągnięć naukowych, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 r.

##### 4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

###### **„Identyfikacja, modelowanie i sterowanie elektroaktywnych polimerów”**

Osiągnięcie habilitacyjne stanowi cykl ośmiu połączonych tematycznie prac zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 roku opublikowanych w ostatnich czterech latach:

- [JK1] Jakub Bernat, Jakub Kołota, “Sensorless position estimator applied to nonlinear IPMC model”, *Smart Materials and Structures*, 2016, volume 25, number 11, pp. 115037-1-115037-11, doi: 10.1088/0964-1726/25/11/115037  
*IF: 2.909, Punkty MNiSW: 40*
- [JK2] Jakub Bernat, Jakub Kołota, Sławomir Stępień, ”SDRE controller considering Multi Observer applied to nonlinear IPMC model”, *Smart Structures and Systems*, 2017, volume 20, issue 1, pp. 1-10, doi:10.12989/sss.2017.20.1.001  
*IF: 2.231, Punkty MNiSW: 30*
- [JK3] Jakub Bernat, Jakub Kołota, “Adaptive Observer-based Control for an IPMC Actuator Under Varying Humidity Conditions”, *Smart Materials and Structures*, 2018, volume 27, Number 5, pp. 055004-1-055004-12, doi:10.1088/1361-665x/aab56e  
*IF: 3.543, Punkty MNiSW: 40*
- [JK4] Jakub Bernat, Jakub Kołota, “Integral multiple models online identifier applied to ionic polymer-metal composite actuator”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, volume 29, issue 14, pp. 2863-2873, doi:10.1177/1045389X18781027  
*IF: 2.582, Punkty MNiSW: 35*
- [JK5] Jakub Kołota, “Design, modelling and analysis of a new type of IPMC motor”, *Smart Structures and Systems*, 2019, volume 24, issue 2, pp. 223-231, doi:10.12989/sss.2019.24.2.223  
*IF: 3.622, Punkty MNiSW: 70*
- [JK6] Jakub Bernat, Jakub Kołota, “Adaptive Observer for State and Load Force Estimation for Dielectric Electro-Active Polymer Actuator”, *IFAC MECHATRONICS & NOLCOS, IFAC-PapersOnLine*, Volume 52, Issue 16, 2019, ISSN 2405-8963, pp. 448-453, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.002  
*Punkty MNiSW: 20*
- [JK7] Jakub Kołota, “The FEM Model of the Pump Made of Dielectric Electroactive Polymer Membrane”, *Applied Science*, 2020, volume 10, number 7, pp. 2283, doi:10.3390/app10072283  
*IF: 2.474, Punkty MNiSW: 70*

[JK8] Jakub Bernat, Damian Cieślak, Jakub Kołota, “Reset Strategy for Output Feedback Multiple Models MRAC Applied to DEAP”, IEEE Access, 2020, volume 8, pp. 120905-120915, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3006315  
*IF: 4.098, Punkty MNiSW: 100*

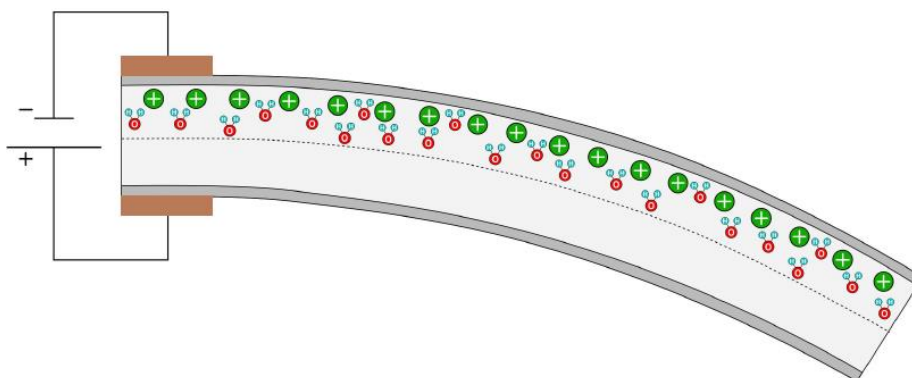
## 4.2 Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z ich ewentualnym wykorzystaniem

### 4.2.1 Wprowadzenie

Wraz z dynamicznym rozwojem technologicznym opracowywane są nowe elektrochemiczne materiały, które cechuje wiele własności pożądanych w zaawansowanych systemach automatyki i robotyki. Jedną z bardzo ciekawych grup takich materiałów stanowią polimery elektroaktywne (ang. Electroactive Polymers), które wykazują zmianę wybranych własności podczas stymulowania ich polem elektrycznym. Ich elastyczna struktura pozwala uzyskiwać dużą deformację w stosunku do klasycznych siłowników wykonanych z materiałów piezoelektrycznych. Możliwość silnej deformacji przy jednoczesnej małej masie, dużej odporności na spękania oraz cichej pracy stanowią o ogromnym potencjale możliwych zastosowań elektroaktywnych polimerów. Materiały te dzięki swym własnościom klasyfikowane są w literaturze jako „materiały inteligentne” (ang. smart materials), których definicja określa możliwość kontrolowania zmiany własności w reakcji na bodźce otoczenia. Materiał taki łączy w ramach jednej struktury własności czujnika z własnościami aktuatora [1-6, 13-16, 18].

Przedstawione osiągnięcie habilitacyjne składa się z ośmiu publikacji powiązanych tematycznie dziedziną elektroaktywnych polimerów. Pięć prac [JK1]-[JK5] dotyczy polimerów jonowych, które pracują zwykle w środowisku wilgotnym i wymuszane są niskimi napięciami na poziomie 1-5 V. Elektroaktywny polimer jonowy IPMC (ang. Ionic Polymer Metal Composite) jest rodzajem elastycznego przetwornika, który może być używany zarówno jako czujnik jak i siłownik. Kiedy materiał jest uwodniony, kationy dyfundują pod wpływem pola elektrycznego w kierunku elektrody naniesionej na zewnętrzną powierzchnię membrany wykonanej najczęściej z Nafionu®. Wewnątrz struktury polimeru aniony są ze sobą połączone w klastry zapewniające kanały dla przepływu kationów. Koncentracja jonów przy elektrodzie ujemnej powoduje naprężenia mechaniczne oraz elektrostatyczne, co

przekłada się ostatecznie na odkształcenie siłownika IPMC, co zaprezentowano na rysunku 1. [10-12].



Rysunek 1. Reakcja polimeru IPMC na przyłożony potencjał

Prace [JK6]–[JK8] prezentowanego cyklu naukowego obejmują tematyką polimery dielektryczne DEAP (ang. Dielectric Electroactive Polymer), które sterowane są napięciem rzędu kilku kilowoltów. W publikacjach tych szczegółowo przeanalizowano siłownik wyprodukowany przez habilitanta, który wykonany został z cienkiej, naciągniętej wstępnie elastycznej membrany polimerowej obustronnie pokrytej elektrodami. Przyłożony potencjał przekłada się na siłę elektrostatyczną powodującą kompresję membrany i zmianę jej parametrów, co w efekcie powoduje odkształcenie membrany siłownika [17, 18, 21].

Polimery elektroaktywne stanowią ciekawe uzupełnienie standardowych rozwiązań w dziedzinie siłowników stosowanych w automatyce, robotyce czy elektrotechnice. Zaobserwowany w ostatnich latach rozwój literatury światowej, której przedmiotem są polimery jonowe oraz dielektryczne potwierdza dużą dynamikę trendu rozwoju i zainteresowania w świecie nauki. Fakt ten skłonił habilitanta do podjęcia wysiłku pozyskania oraz wytworzenia prototypów badawczych i przeprowadzenia szeregu prac naukowych będących omawianym w tym autoreferacie osiągnięciem habilitacyjnym.

Główne nurty przeprowadzonych nad elektroaktywnymi polimerami badań oraz problemów badawczych obejmują zagadnienia modelowania, identyfikacji oraz ich sterowania. Procesy modelowania zjawisk zachodzących w elektroaktywnych polimerach należą do stosunkowo złożonych albowiem membrany polimerowe oferują zdolność konwersji energii między zjawiskami chemicznymi, elektrycznymi i mechanicznymi. Ta różnorodność konwersji energii umożliwiła szerokie spektrum zastosowań w układach sensorycznych [1, 2, 6, 18]. Habilitant podjął wysiłek stosowania IPMC oraz DEAP jako elementy wykonawcze (siłowniki). Wówczas ich właściwości i mechanizmy transformacji

energii muszą być wnikliwie rozpoznane i z niezbędną, pożądaną dokładnością zamodelowane [6]. Badania eksperymentalne opisane w publikacjach przedstawionych w autoreferacie służyły poszerzeniu dotychczasowej wiedzy na temat modelowania, identyfikacji oraz sterowania polimerowych siłowników elektroaktywnych. Są to badania bardzo aktualne na tle literatury światowej. Habilitant zaprezentował znaczące osiągnięcie w zakresie modelowania definiując pierwszy na świecie model IPMC zależny od wilgotności. Rozszerzył również model DEAP prezentowany w pracy [3] o zjawiska tarcia wiskotycznego. Modele IPMC odzwierciedlają złożone, nieliniowe procesy dyfuzyjne, opisujące transport jonów oraz własności hydratacyjne Nafionowej® membrany. W następstwie złożoności tychże zjawisk, identyfikacja odgrywa zasadniczą rolę w odniesieniu do elektroaktywnych polimerów i procesów ich regulacji, umożliwiając poprawne nastrojenie układu regulacji automatycznej. W czasie identyfikacji określone są bowiem wartości parametrów modeli siłowników, które są parametrami niemierzalnymi, a wykorzystywanymi w procesie sterowania rzeczywistym obiektem. Osiągnięcia badawcze prezentowane w cyklu prac naukowych niniejszego autoreferatu szczegółowo prezentują metodologię identyfikacji statycznej oraz dynamicznej dla siłowników elektroaktywnych IPMC oraz DEAP.

Procesy chemiczne zachodzące wewnątrz membran polimerowych silnie uzależnione są od warunków środowiskowych pracy (temperatura, wilgotność, dodatkowe obciążenie, itp.). Skłoniło to habilitanta do stosowania obserwatorów stanu oraz algorytmów sterowania adaptacyjnego, w których regulator dopasowuje parametry ulegające zmianie w trakcie procesu sterowania. Habilitant rozwinął dziedzinę sterowania adaptacyjnego poprzez opracowanie autorskiej koncepcji zintegrowanego odwzorowania, służącego strojeniu wielu modeli. Zwieńczeniem prac nad modelami polimerowych siłowników elektroaktywnych są autorskie projekty układów wykonawczych silnika krokowego oraz dwumembranowej pompy DAEP zamodelowane w FEM (ANSYS). Warto podkreślić dużą użyteczność przeprowadzonych eksperymentów oraz ich analiz, które mogą stanowić solidny fundament dla przyszłych badań nad elektroaktywnymi siłownikami polimerowymi realizowanymi w dyscyplinach automatyki, robotyki czy elektrotechniki.

Wszystkie wymienione wyżej zagadnienia zaprezentowane zostały w dalszej części autoreferatu wraz z omówieniem głównych wyników poszczególnych prac oraz stosowanej metodyki badawczej. W kolejnych podrozdziałach autoreferatu omówiono osiągnięcia habilitacyjne z podziałem na elektroaktywne polimery IPMC oraz DEAP. Każdy podrozdział wieńczy tabela, w której zestawiono wkład merytoryczny oraz procentowy habilitanta w

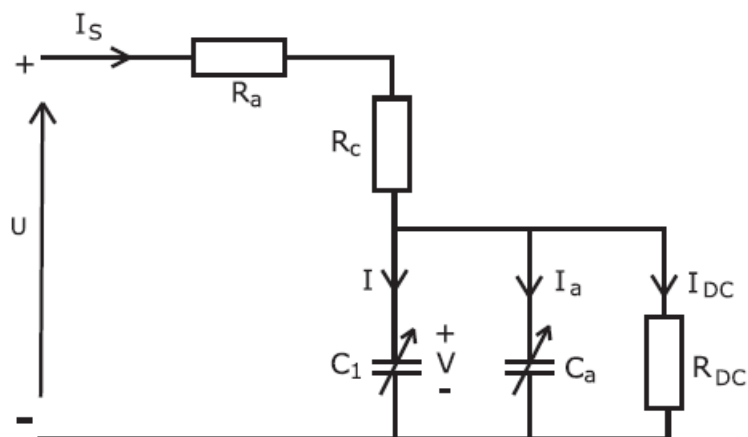


powstaniu każdej pracy. W części podsumowującej zestawiono najważniejsze oryginalne wyniki, które habilitant zrealizował w ramach przedstawionego osiągnięcia habilitacyjnego.

#### 4.2.2 Modelowanie, identyfikacja i sterowanie siłownikami IPMC

Jonowe polimery elektroaktywne IPMC stanowią złożoną strukturę chemiczną nawodnionej membrany Nafionu® pokrytej obustronnie elektrodami a proces ich wytworzenia jest bardzo skomplikowany. Liderem na świecie w zakresie wytwarzania IPMC jest firma Environmental Robots Incorporated (USA), od której habilitant zakupił zestaw kilku siłowników różnych wymiarów. Wytworzenie IPMC składa się z kilku bardzo precyzyjnych i skomplikowanych chemicznie etapów. Membrana Nafionu jest nasączona roztworem soli metalu  $Pt(NH_3)_4Cl_2$  w celu wymiany jonowej z metalem szlachetnym i tak przygotowana próbka zanurzona zostaje w roztworze odpowiedniego chemicznego reduktora (np. borowodorek sodu) [1, 10, 11]. Habilitant nawiązał współpracę z pracownikami Zakładu Polimerów na Wydziale Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej. Ta współpraca z naukowcami wydziału chemicznego wciąż trwa i jej wynikiem są autorskie siłowniki IPMC, które podlegają wspólnym badaniom i optymalizacji. Przy owej współpracy habilitant wykonał między innymi zdjęcie mikroskopem elektronowym oraz przebadał widmo chemiczne powierzchni elektrody siłownika pozyskanego od Environmental Robots Inc. Efekty badań zaprezentowano w pracy [JK1].

Wnikliwe poznanie struktury elektroaktywnego polimeru jonowego pozwoliło dokonać trafnego przeglądu literatury w celu opracowania wiernego modelu do dalszych badań. Zdecydowano się na implementację modelu prezentowanego w pracy [3], którego schemat zastępczy przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Schemat zastępczy modelu IPMC

Model ten opisuje zjawiska fizyczne precyzyjnie określając nieliniową pojemność  $C_1(V)$ , wirtualną pojemność  $C_a(V)$ , która odzwierciedla proces elektrochemicznej absorpcji na styku powierzchni polimeru z metalem, rezystancję dyfuzji jonów  $R_c$ , rezystancję elektrod  $R_a$  oraz nieliniową rezystancję DC polimeru wyrażoną jako relacja prąd-napięcie  $Y(V)$ . Model IPMC zdefiniowany został następującymi równaniami elektrochemicznymi :

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{U(t) - V(t)}{(R_a + R_c)(C_1(V) + C_a(V))} - \frac{1}{C_1(V) + C_a(V)} Y(V(t)) \quad (1)$$

gdzie  $U(t)$  jest napięciem wejściowym,  $V(t)$  jest potencjałem elektrycznym. Zależność prąd-napięcie może zostać zaproksymowana serią funkcji wielomianowych  $Y(V(t))$ :

$$Y(V(t)) = \text{sign}(V(t)) [Y_1 |V(t)| + Y_2 |V(t)|^2 + Y_3 |V(t)|^3] \quad (2)$$

gdzie współczynniki  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  mogą zostać zidentyfikowane poprzez badania eksperymentalne. Moment zginający generowany przez siłownik IPMC wynosi:

$$M(V(t)) = W \alpha_0 \kappa_e \left( \text{sign}(V(t)) 2h \sqrt{2\Gamma(|V(t)|)} - V(t) \right) \quad (3)$$

gdzie  $\kappa_e$  jest stałą dielektryczną,  $h$  jest grubością a  $W$  szerokością siłownika. Natomiast  $\alpha_0$  definiuje stałą sprzężenia pomiędzy indukowanym naprężeniem a gęstością ładunku [5]. Funkcja  $\Gamma(V(t))$  jest dana wzorem:

$$\Gamma(V(t)) = \frac{b}{a^2} \left( \frac{aV(t)}{e^{aV(t)} - 1} - \ln \left( \frac{aV(t)}{e^{aV(t)} - 1} \right) - 1 \right) \quad (4)$$

gdzie  $a$  i  $b$  są stałymi zdefiniowanymi w pracy [3]:

$$a = \frac{F(1-C^- \Delta V)}{RT}, \quad b = \frac{F^2 C^- (1-C^- \Delta V)}{RT \kappa_e} \quad (5)$$

$F$  jest stałą Faradaya,  $C^-$  reprezentuje koncentrację anionów,  $R$  jest stałą gazową a  $T$  oznacza temperaturę. Nieliniową pojemność  $C_1(V)$  określa formuła:

$$C_1(V) = \frac{dQ}{dV} = S \kappa_e \frac{\Gamma'(V)}{\sqrt{2\Gamma(V)}} \quad (6)$$

gdzie  $S = WL$  stanowi pole powierzchni siłownika IPMC ( $L$  to jego długość). Wirtualną pojemność  $C_a(V_a)$  definiującą proces absorpcji reprezentuje poniższy wzór:

$$C_a(V) = \frac{q_1 SF}{RT} \frac{K_1 c^{H^+} e^{-\frac{VF}{RT}}}{\left(K_1 c^{H^+} + e^{-\frac{VF}{RT}}\right)^2} \quad (7)$$

gdzie:  $q_1$  jest stałą fizyczną,  $K_1$  jest współczynnikiem chemicznym dla procesów zachodzących na powierzchni elektrochemicznej,  $C^{H^+}$  opisuje koncentrację jonów  $H^+$ .

Ruch siłownika określa krzywizna wychylenia  $y(t)$ , która jest proporcjonalna do momentu zginającego  $M(V(t))$ :

$$y(t) = \frac{M(V(t))}{Y_e J} \quad (8)$$

gdzie:  $J = 2/3Wh^3$  stanowi moment bezwładności i  $Y_e$  jest modułem Younga siłownika IPMC. Prąd wejściowy jest wyznaczany na podstawie poniższego równania:

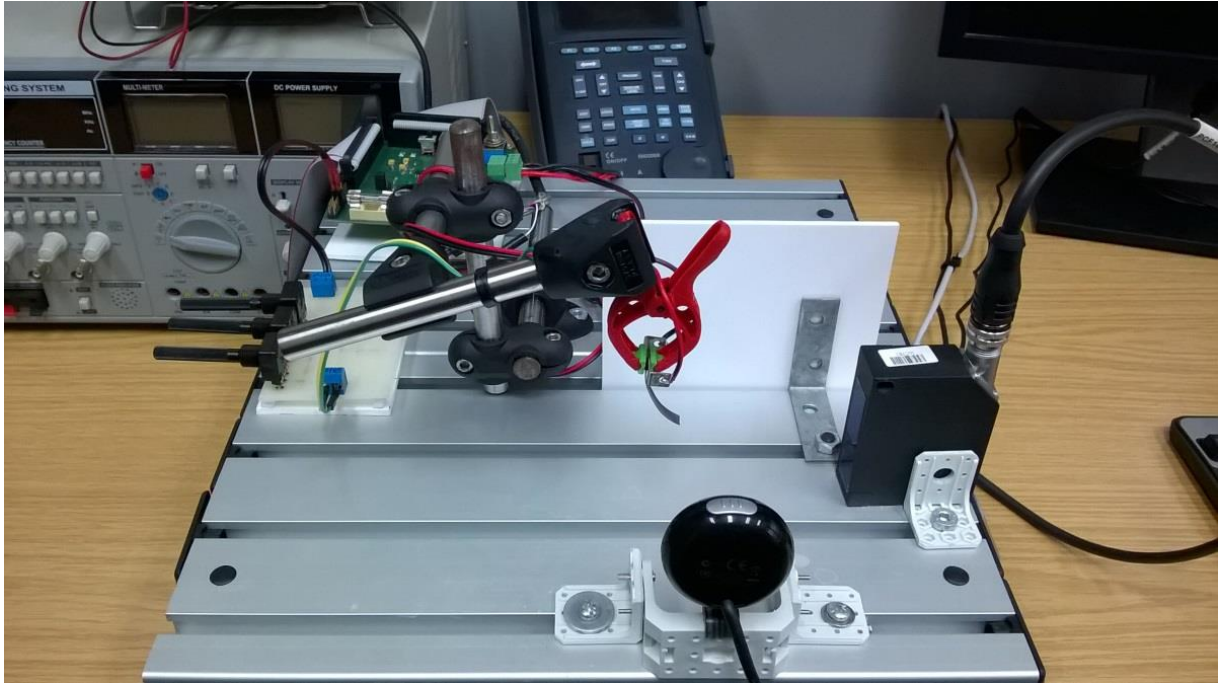
$$I_s(t) = \frac{U(t) - V(t)}{R} \quad (9)$$

Krzywizna wychylenia  $y$  siłownika polimerowego została aproksymowana opisem krzywizny koła, i została zdefiniowana jako odwrotność promienia:

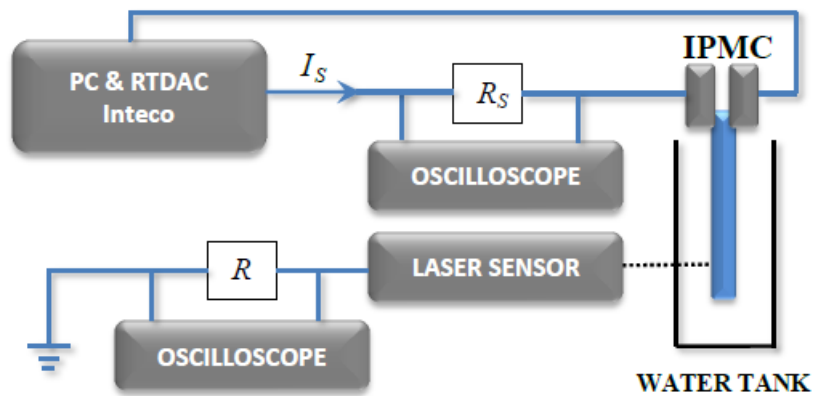
$$\left(x - \frac{1}{y}\right)^2 + L^2 = \left(\frac{1}{y}\right)^2 \quad (10)$$

gdzie  $x$  stanowi odległość zmierzoną przez laser,  $L$  oznacza długość siłownika polimerowego.

Habilitant opracował stanowisko badań eksperymentalnych nad siłownikami IPMC zaprezentowane na rysunku 3. Polimerowy siłownik wymuszany był sygnałem napięciowym generowanym poprzez komputerową kartę czasu rzeczywistego (RTDAC Inteco). Z wykorzystaniem czujnika laserowego (micro-epsilon optoNCDT 1302) dokonano pomiaru przemieszczenia  $x$ . Dodatkowo wprowadzono szeregowo do obwodu pomiarową rezystancję  $R_s = 1\Omega$  w celu wyznaczenia prądu  $I_s$  ze spadku napięcia  $V_s$ . Poglądowy schemat stanowiska reprezentuje rysunek 4.

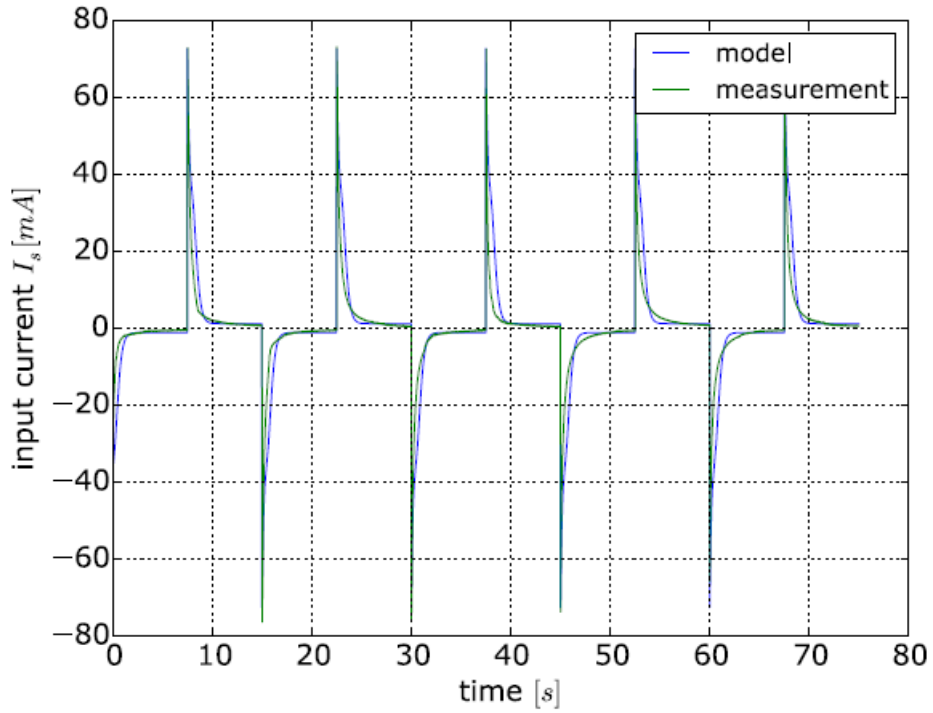


Rysunek 3. Stanowisko eksperymentalne do pomiaru krzywizny odchylenia siłownika IPMC

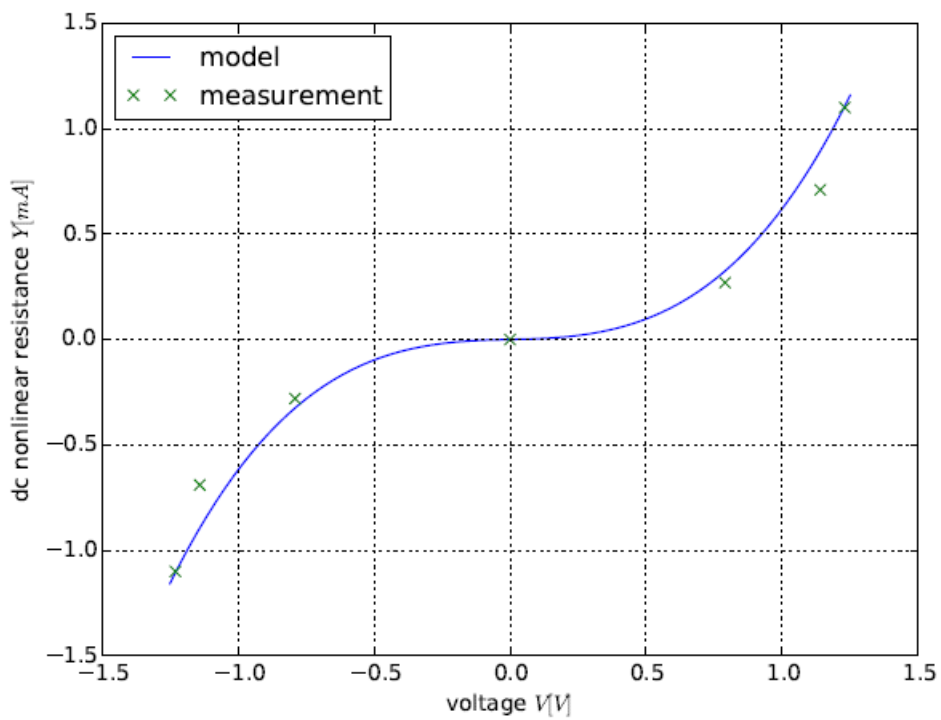


Rysunek 4. Poglądowy schemat pomiarowy stanowiska eksperymentalnego

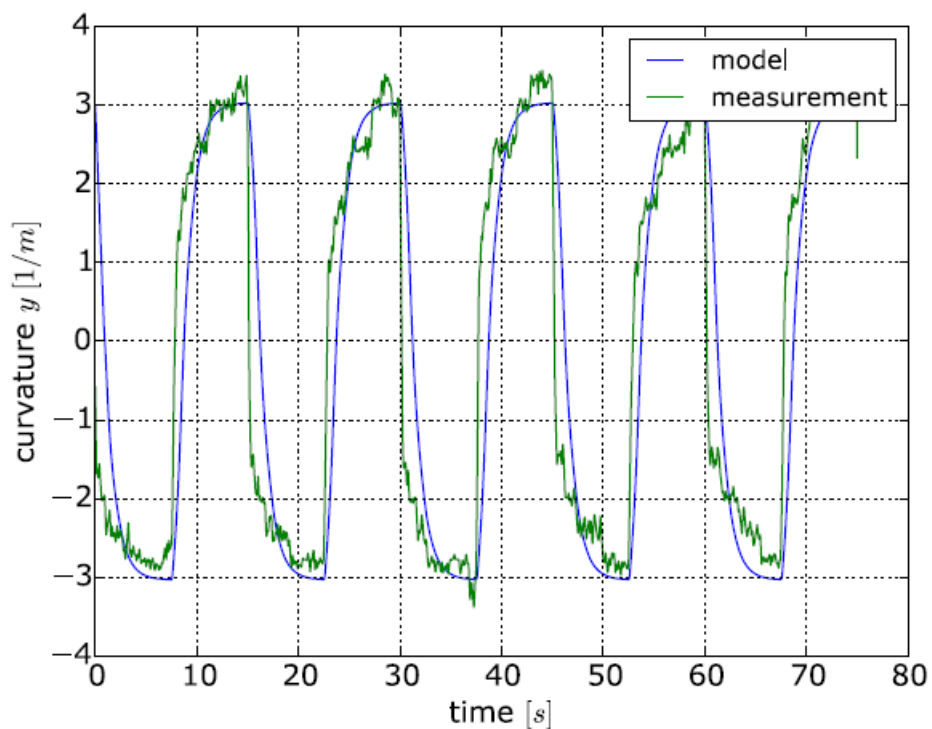
Proces identyfikacji parametrów  $R_a$  oraz  $R_c$  zostały wyznaczone z relacji  $I_{S0}$  do  $U$ . Kiedy płynie prąd początkowy  $I_{S0}$ , kondensatory  $C_1$  oraz  $C_a$  powodują zwarcie. Stąd rezystancja dynamiczna  $R_{DC}$  polimeru wynosi 0 z punktu widzenia impedancji wejściowej. Dalszym wyzwaniem procesu identyfikacji parametrów było wyznaczenie współczynników  $Y_1$ ,  $Y_2$  oraz  $Y_3$ . W tym celu wykorzystano stan ustalony odpowiedzi prądowej siłownika IPMC wskutek wymuszenia skokowym napięciem 1.25V (rysunek 5). Szczegółowe wyniki aproksymacji  $Y(V)$  przedstawiono w pracy [JK1]. Na rysunkach 6 oraz 7 pokazano otrzymaną zgodność modelu z pomiarami.



Rysunek 5. Odpowiedź prądowa przy wymuszeniu skokowym napięciem 1.25 V



Rysunek 6. Przebieg upływu prądu w zależności od potencjału



Rysunek 7. Wychylenie siłownika IPMC przy wymuszeniu skokowym napięciem

W celu eksperymentalnego wyznaczenia wartości modułu Younga habilitant opracował stanowisko pomiarowe zaprezentowane na rysunku 8.



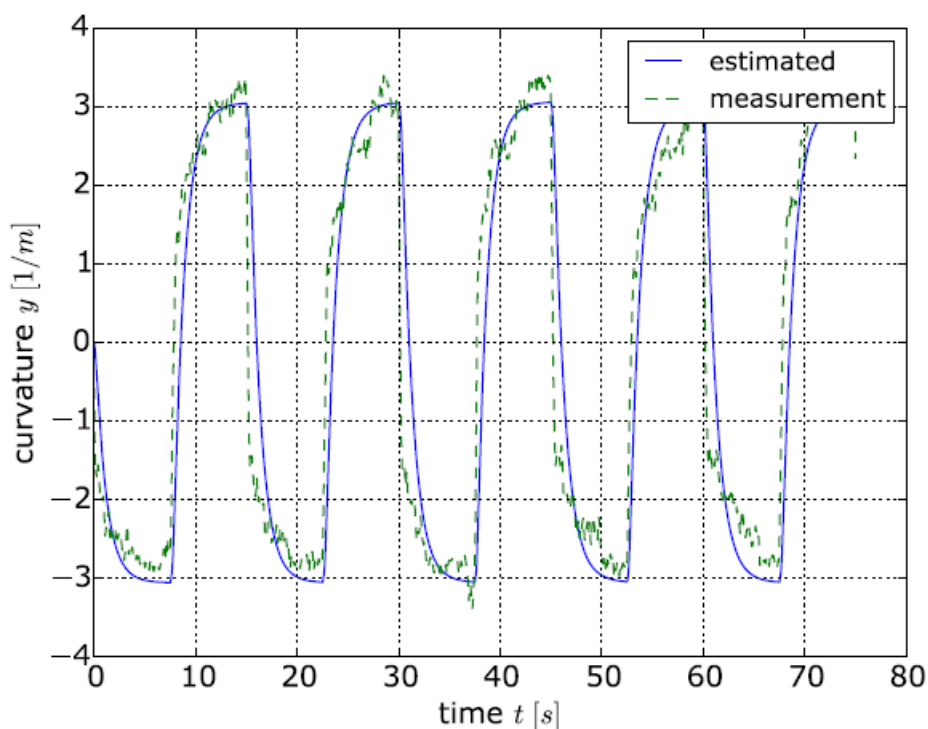
Rysunek 8. Stanowisko do pomiaru siły i przemieszczenia (wyznaczenie modułu Younga)

Pomiar siły oraz przemieszczenia przeprowadzony został dla trzech różnych siłowników IPMC. Wartości modułu Younga wyznaczone zgodnie ze wzorem:

$$Y = \frac{4FL^3}{Wdh^3} \quad (11)$$

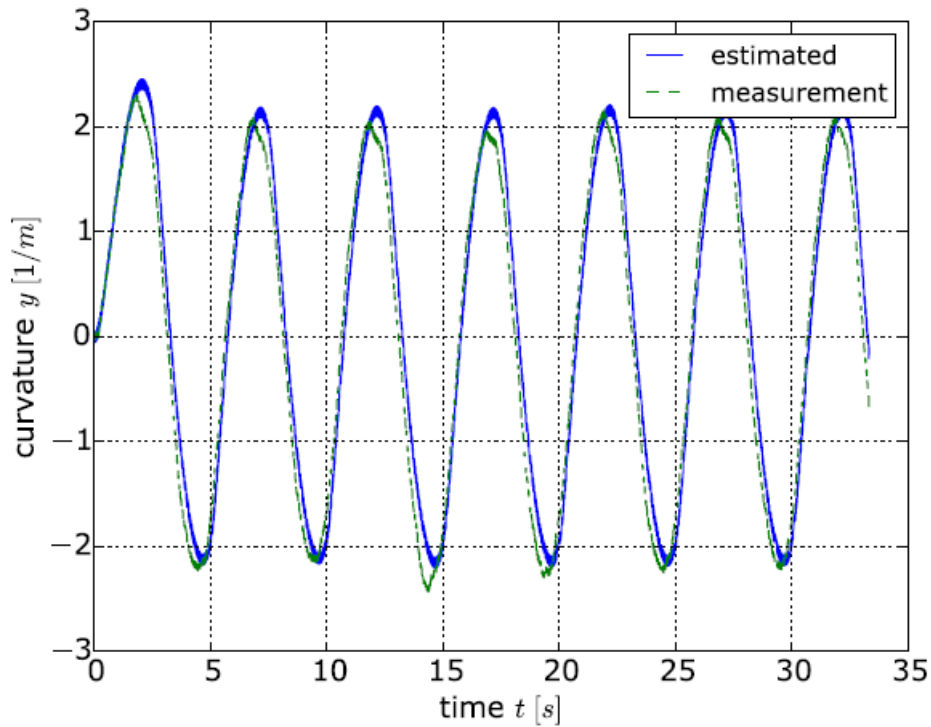
where  $F$  is the measured force,  $d$  measured distance,  $W$  width,  $L$  length and  $h$  IPMC cylinder thickness. W dalszej części pracy [JK1] wykorzystując zweryfikowane pomiarami eksperymentalnymi nieliniowy model IPMC zdefiniowano obserwator pozycji z prądowym sygnałem sprzężenia zwrotnego. Stabilność układu zamkniętego analizowano odwołując się do teorii *Input to State Stability* a następnie zaimplementowano dwa algorytmy obserwacji (z wykorzystaniem funkcji Lapunowa oraz z wykorzystaniem metod ślizgowych). Wyniki estymacji krzywizny przemieszczenia zweryfikowano eksperymentalnie dla przebiegów wymuszenia napięciowego prostokątnego oraz sinusoidalnie zmiennego (rysunek 9 oraz rysunek 10).

Przedstawione w pracy [JK1] sposoby modelowania oraz identyfikacji parametrów siłowników IPMC otworzyły perspektywy dalszych prac naukowych w kontekście weryfikacji metod ich sterowania. Istotną zaletą merytoryczną pracy jest pokazanie możliwości stosowania estymatorów pozycji w trybie bezczujnikowego sprzężenia zwrotnego. Praca [JK1] stanowi kompleksowe kompendium opisujące proces modelowania, identyfikacji parametrów oraz definiowania obserwatorów przemieszczenia w trybie bez sensorów sprzężenia zwrotnego dla jonowych polimerów elektroaktywnych IPMC.



Rysunek 9. Porównanie estymowanej i pomierzonej krzywizny odchylenia IPMC dla wymuszenia napięciem prostokątnym dla nieliniowego obserwatora pozycji.





Rysunek 10. Porównanie estymowanej i pomierzonej krzywizny odchylenia IPMC przy wymuszeniu napięciem sinusoidalnym dla obserwatora określonego algorytmem ślizgowym.

Dokładne informacje o właściwościach i metodach sterowania materiałów EAP mają kluczowe znaczenie dla projektantów, którzy rozważają budowę mechanizmów lub urządzeń wykorzystujących te materiały. Chociaż niektóre z EAP są dobrze znane, IPMC nadal wymagają nowych precyzyjnych modeli i metod sterowania, ponieważ mają skomplikowaną strukturę chemiczną w której zachodzą złożone, nieliniowe procesy migracji kationów na poziomie mikroskopowym [4-6,10,11]. W pracach [4] oraz [6] ukazano, że reakcja mechaniczna jest osłabiona w zakresie wyższych częstotliwości co związane jest ze zjawiskiem wiskoelastyczności. W pracy [JK2] habilitant zmodyfikował część mechaniczną nieliniowego modelu IPMC, która powiązana została z sygnałami prędkości i przyspieszenia siłownika. Zaproponowany został następujący opis, który rozszerzył model prezentowany w pracy [3]:

$$\frac{1}{\alpha_{\xi}^2 + \omega_{\xi}^2} \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{2\alpha_{\xi}}{\alpha_{\xi}^2 + \omega_{\xi}^2} \frac{dy(t)}{dt} = \frac{M(V(t))}{Y_e J} \quad (12)$$

gdzie stałe współczynniki  $\alpha_{\xi}$  i  $\omega_{\xi}$  definiują charakter zależności pomiędzy krzywizną odkształcenia siłownika a momentem zginającym.

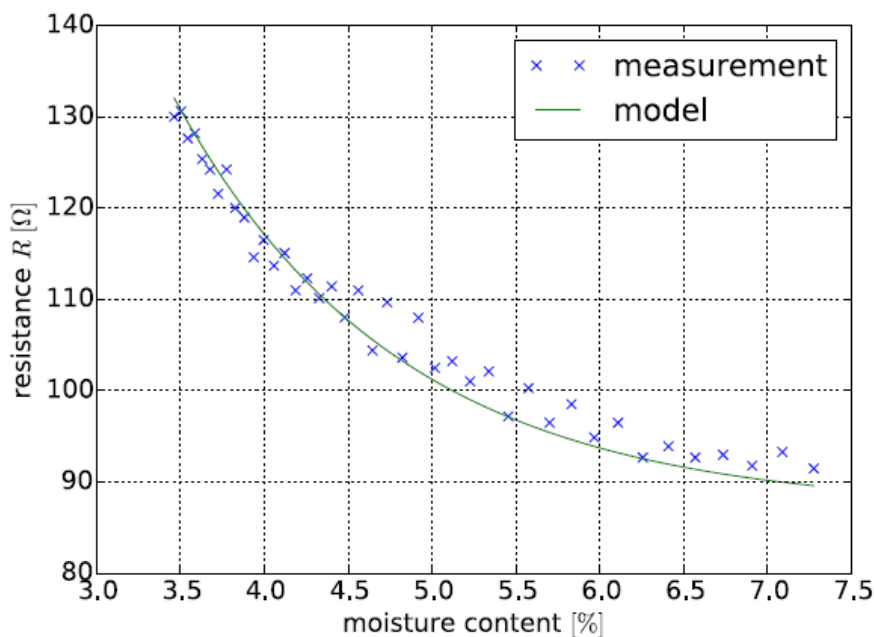


Sporządzony został opis modelu w przestrzeni stanu, który stanowił punkt wyjścia do nieliniowego kwadratowego suboptymalnego sterowania w oparciu o metodę SDRE (ang. *State Dependent Riccati Equation*) [22, 23]. W związku z tym, że wymaga ona w sprzężeniu zwrotnym znajomości stanu układu zaprojektowano algorytm obserwacji z wieloma obserwatorami umożliwiającą redukcję przeregulowania błędu estymacji. Otrzymane sygnały zostały porównane z pomiarami i zaprezentowane graficznie w pracy dowodząc prawidłowości przeprowadzonych badań.

Właściwym środowiskiem pracy polimerów jonowych jest środowisko o dużej wilgotności. Zawartość wody w membranie siłowników IPMC odgrywa bardzo istotną rolę w transporcie jonów [1, 2, 4, 11]. Tematem tym habilitant zajął się w pracach [JK3] oraz [JK4], które zaowocowały zdefiniowaniem nieopisanego dotychczas w literaturze modelu dynamiki IPMC zależnego od zmiennej wilgotności. Zawartość wody w membranie IPMC określono na podstawie równania:

$$\sigma = \frac{m_W}{m} \cdot 100\% \quad (13)$$

gdzie  $m_W$  stanowi masę siłownika z nawodnioną membraną, natomiast  $m$  to masa siłownika wyschniętego, po jednodniowym okresie wysychania swobodnego. W pracach [JK3] oraz [JK4] wnikliwie przeanalizowano zjawisko wysychania membrany dla różnych siłowników, w różnych warunkach pracy, wykazując eksperymentalnie zależność rezystancji membrany IPMC od jej wilgotności (rysunek 11).



Rysunek 11. Porównanie zmiany rezystancji membrany w procesie wysychania siłownika IPMC.

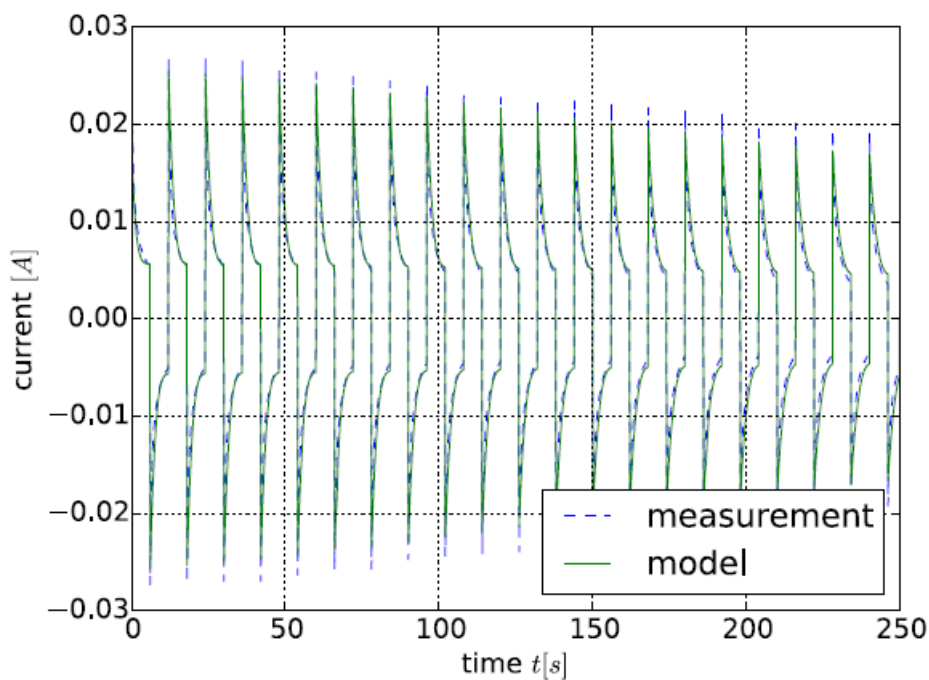
Seria eksperymentów identyfikacji procesów wysychania pozwoliła zdefiniować relację:

$$R(\sigma) = R_{wet} \left( 1 + \left( \frac{R_{dry} - R_{wet}}{R_{wet}} \right) e^{-\gamma(\sigma - \sigma_0)} \right) \quad (14)$$

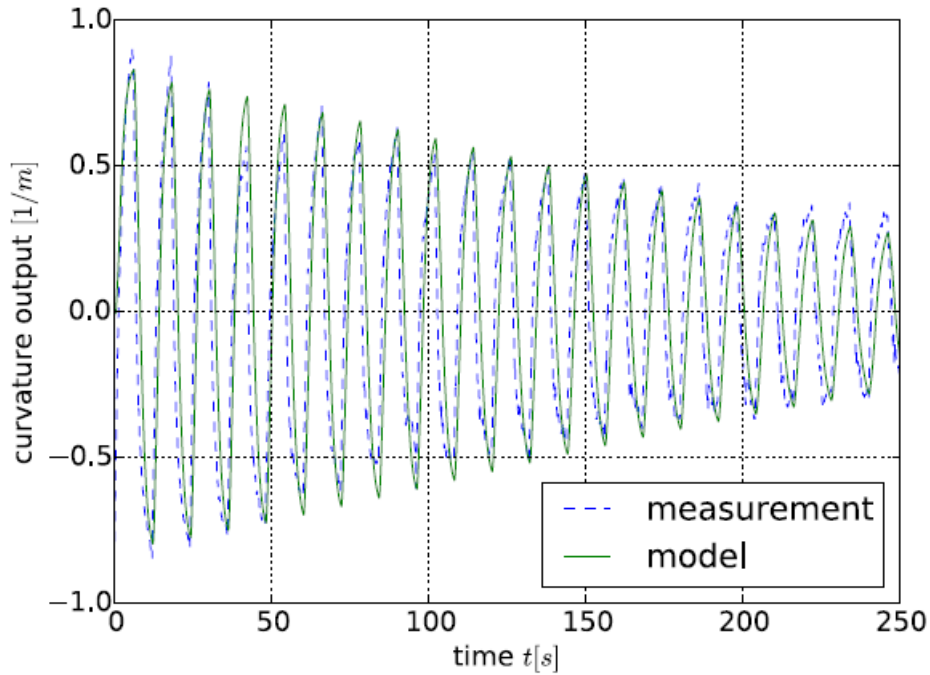
gdzie  $R_{dry}$  oznacza rezystancję siłownika wysychającego,  $R_{wet}$  natomiast rezystancję paska w pełni nawodnionego,  $\sigma_0$  to zawartość wilgoci w wyschniętym siłowniku IPMC a  $\gamma$  określa współczynnik wysychania. Zmiana nawodnienia membrany siłownika wpływa w sposób analogiczny na wartość modułu Younga a to bezpośrednio przekłada się na efektywność mechaniczną:

$$Y_e(\sigma) = Y_{e,wet} \left( 1 + \left( \frac{Y_{e,dry} - Y_{e,wet}}{Y_{e,wet}} \right) e^{-\gamma(\sigma - \sigma_0)} \right) \quad (15)$$

Habilitant ukazał wpływ zmiany wilgotności membrany siłownika na przebieg prądu w czasie wysychania membrany. Zjawisko zaprezentowano na rysunku 12 oraz rysunku 13 a szczegółowo opisano w pracach [JK3] oraz [JK4].



Rysunek 12. Porównanie przebiegów prądu siłownika IPMC w czasie procesu wysychania dla wymuszenia prostokątnego o amplitudzie 1.25 V



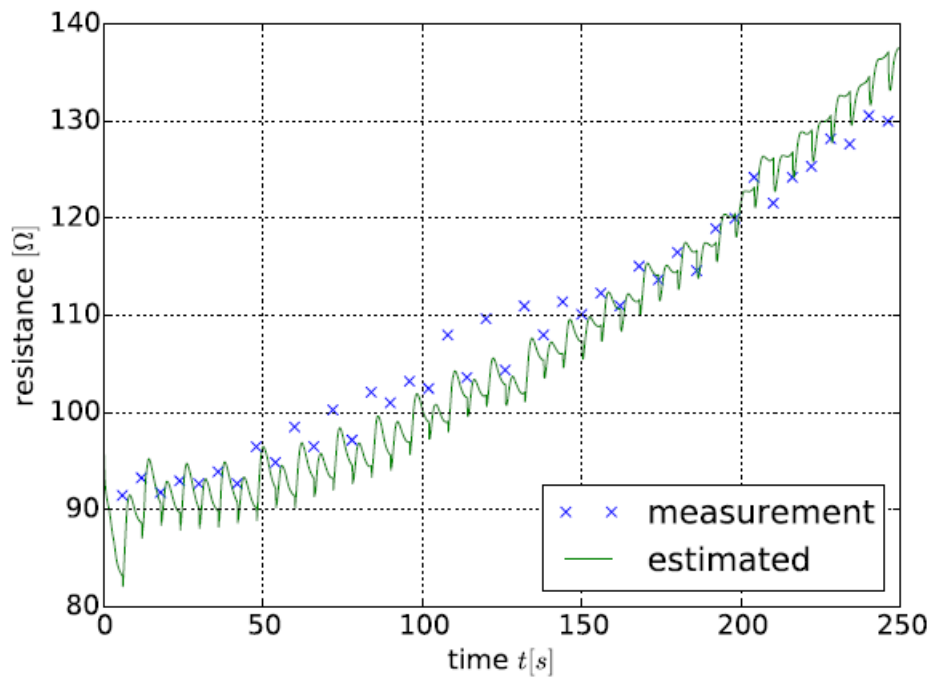
Rysunek 13. Porównanie przebiegów przemieszczenia siłownika IPMC w czasie procesu wysychania dla wymuszenia prostokątnego o amplitudzie 1.25 V

W następstwie poczynionych zmian równania stanu modelu IPMC przyjęły postać:

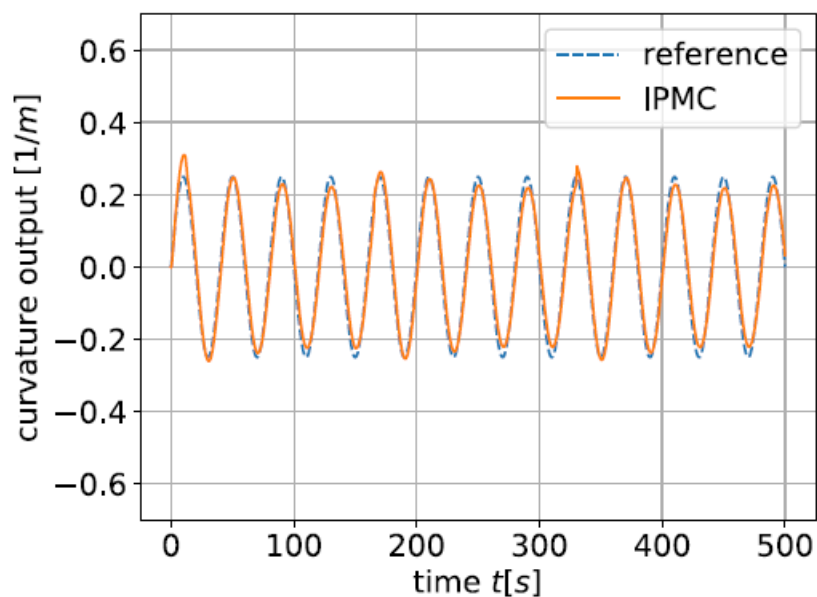
$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= -\frac{1}{R(\sigma)C}V(t) - \frac{1}{C}Y(V(t)) + \frac{1}{R(\sigma)C}U(t) \\ \frac{dy(t)}{dt} &= -\frac{1}{T_m}y(t) + \frac{1}{T_m} \frac{M(V(t))}{Y_e(\sigma)J} \end{aligned} \quad (16)$$

W dalszej części pracy [JK3] model ten został przekształcony tak, aby prąd  $I_s$  stanowił sygnał wejściowy, a następnie zaprojektowano metodę adaptacyjnego obserwatora, estymującego rezystancję membrany (rysunek 14).

Wyniki prac zwieńczone zostały implementacją sterowania backstepping (rysunek 15) w celu znaczącej poprawy stanu przejściowego przemieszczenia. Badania opublikowane w [JK3] dowodzą, iż możliwa jest skuteczna ocena zawartości wilgotności membrany siłownika IPMC bez sprzężenia układem sensorycznym czego do tej pory nie prezentowano w literaturze światowej. Warto podkreślić fakt, iż praca [JK3] została doceniona i zacytowana przez Pana Profesora Alvo Aabloo z Uniwersytetu w Tartu (Estonia) będącego niekwestionowanym autorytetem w dziedzinie stosowania materiałów polimerowych w automatyce i robotyce [28].

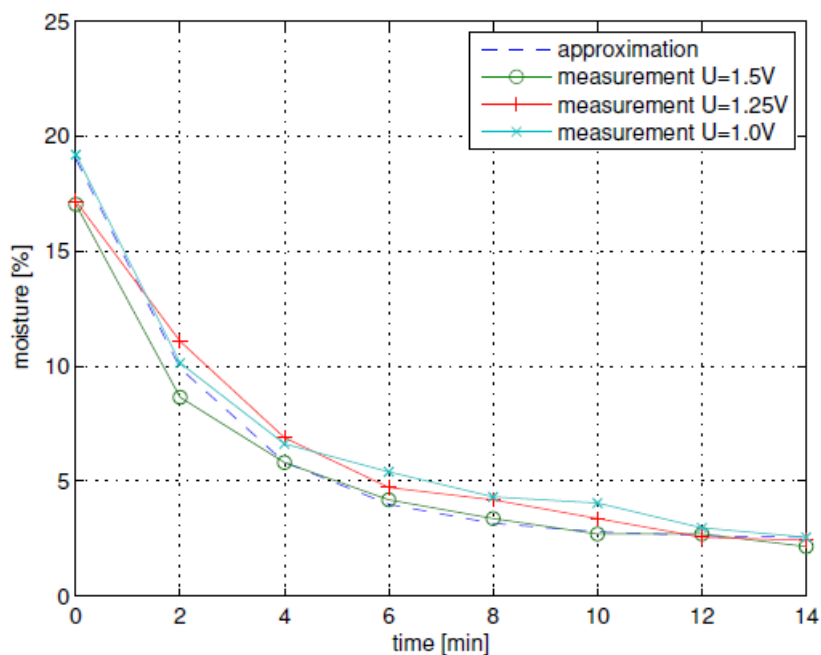


Rysunek 14. Estymowana wartość rezystancji siłownika IPMC w procesie obserwacji

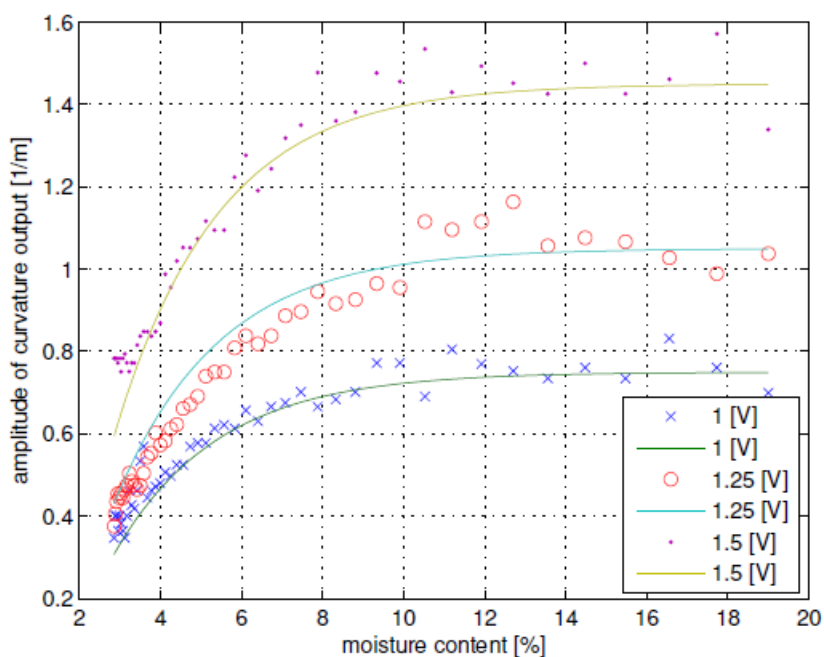


Rysunek 15. Przeszczenie siłownika IPMC sterowanego algorytmem backstepping z adaptacyjnym obserwatorem i sinusoidalnym sygnałem referencyjnym

Praca [JK4] obejmuje dalszą część badań nad uwzględnieniem zmian wilgotności w sterowaniu adaptacyjnym. Dokonano szeregu eksperymentów dla siłownika IPMC dokonując pomiarów zmiany wilgotności w czasie (rysunek 16) oraz amplitudy krzywizny odgięcia (rysunek 17) dla różnych poziomów skokowego wymuszenia napięciowego.



Rysunek 16. Zmiana wilgotności w trakcie procesu wysychania membrany siłownika IPMC dla różnego poziomu napięcia zasilania



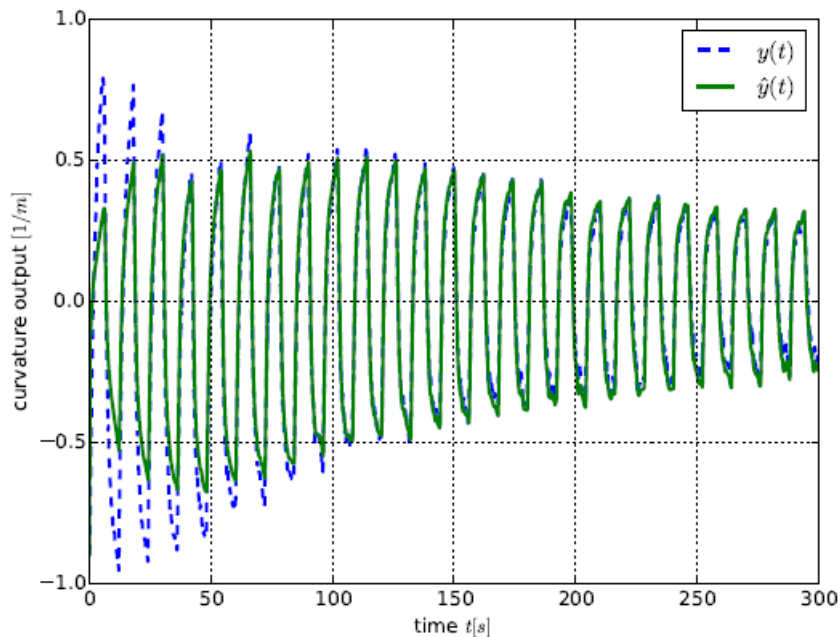
Rysunek 17. Zmiana krzywizny wychylenia siłownika IPMC w trakcie procesu wysychania membrany siłownika IPMC dla różnego poziomu napięcia zasilania.

Uwzględnienie przez habilitanta procesu wysychania stanowi dominujący czynnik w stosunku do nieliniowego charakteru pojemnościowego analizowanego modelu IPMC podczas pracy ze zmieniającą się wilgotnością membrany. W pracy [JK4] dokonano zatem

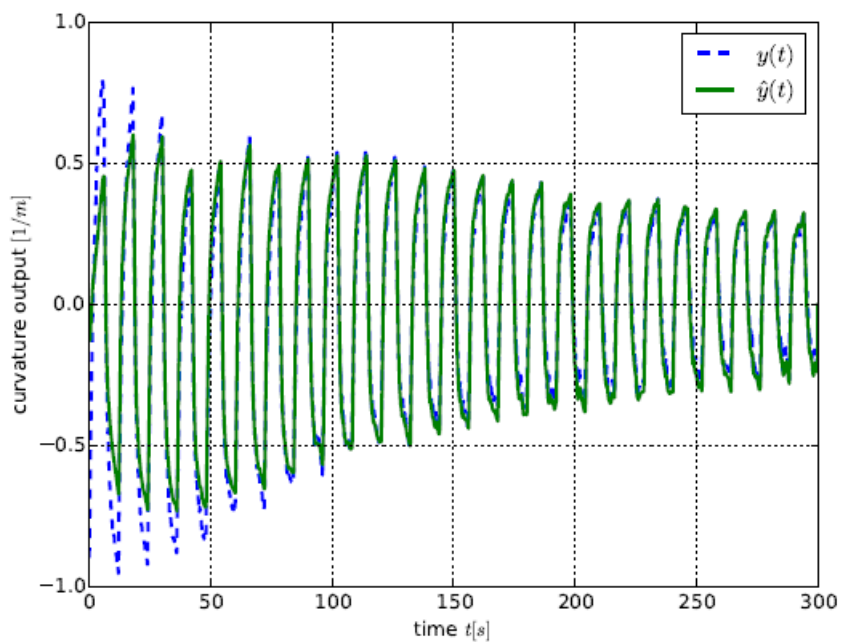
linearyzacji modelu przy zachowaniu nieliniowej zmiany wilgotności. Następnie opracowano ogólną postać równania z regresorem:

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta(\vartheta), \quad (17)$$

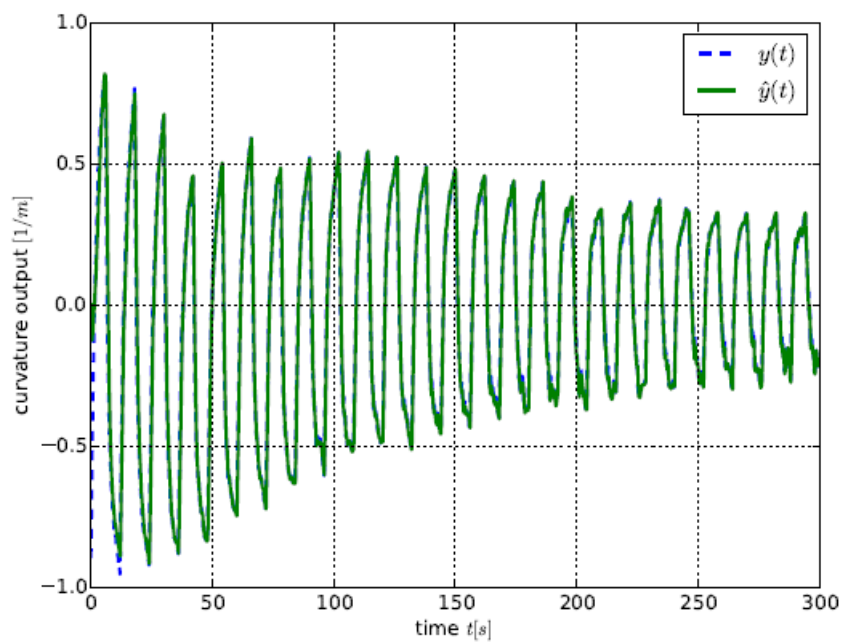
gdzie  $\varphi \in R^{p \times 1}$ ,  $\theta \in R^{p \times 1}$ ,  $p$  to liczba nieznanymi parametrów, natomiast  $\vartheta$  oznacza zmienną wilgotność. Równanie (17) posłużyło w kolejnych etapach pracy do opracowania sterowania adaptacyjnego. Przetestowano algorytmy adaptacji wielomodelowej opracowane i zaprezentowane w pracy [9]. W dalszej części badań autorzy zaproponowali autorski rozszerzony algorytm wielomodelowy. Zaimplementowano w nim algorytm odwracalności mapowania między parametrami a mierzalnymi sygnałami, eliminując konieczność wyznaczania wartości pochodnych po czasie sygnałów, co z kolei zwiększyło odporność na szumy środowiskowe. Otrzymane przebiegi dla różnych trybów pracy algorytmu adaptacyjnego zaprezentowano na rysunkach 18 (a-c). Wymuszenie stanowił sygnał prostokątny o amplitudzie 1.25 V i okresie równym 12.5 s. Wyniki pokazują poprawę wydajności dla podejścia wielomodelowego, co ma kluczowe znaczenie dla rzeczywistej aplikacji. Analiza zbieżności została przeprowadzona dla wszystkich regulowanych parametrów oraz sygnału błędu śledzenia [JK4]. Należy podkreślić fakt, iż cel osiągnięto w trybie adaptacji wejście-wyście przy niedostępnym pomiarowo pełnym stanie procesu.



(a)



(b)



(c)

Rysunek 18. Porównanie przebiegów przemieszczenia siłownika IPMC zmierzonego eksperymentalnie oraz estymowanego przez algorytm adaptacyjny z jednym modelem (a), wielomodelowy (b) oraz rozszerzony o mapowanie parametrów (c)

Proponowany identyfikator online został porównany z pomiarami eksperymentalnymi a algorytm może być stosowany w różnych aplikacjach IPMC wymagających precyzyjnego sterowania.

Poniższa tabela podsumowuje wkład merytoryczny oraz udział procentowy habilitanta w poszczególnych pracach związanych z modelowaniem, identyfikacją i sterowaniem IPMC.

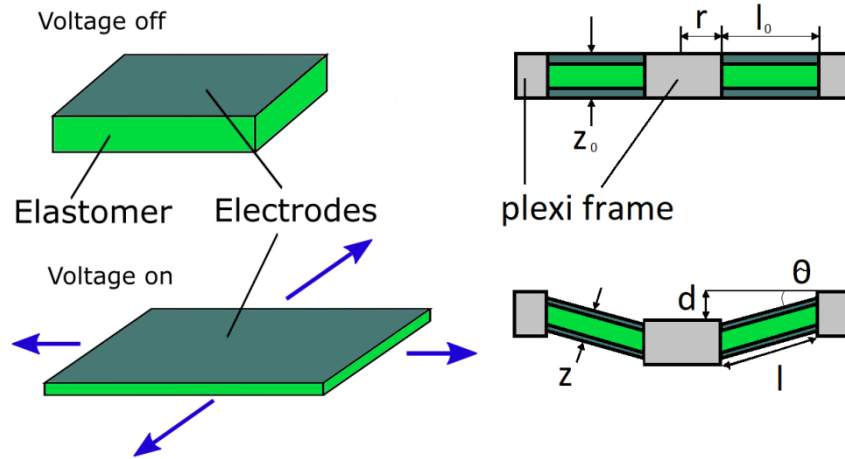
<b>symbol pracy</b>	<b>wkład merytoryczny habilitanta w powstaniu pracy</b>	<b>udział % habilitanta</b>
<b>[JK1]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy;</li> <li>➤ opracowanie widma chemicznego powierzchni siłownika IPMC przy współpracy z Wydziałem Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej;</li> <li>➤ zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego;</li> <li>➤ opracowanie i implementacja modelu IPMC;</li> <li>➤ przeprowadzenie badań eksperymentalnych;</li> <li>➤ opracowanie estymatorów pozycji w trybie bezczujnikowego sprzężenia zwrotnego;</li> <li>➤ opracowanie wyników badań i przeprowadzenie ich analizy;</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	50%
<b>[JK2]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego;</li> <li>➤ opracowanie oraz implementacja modelu IPMC z uwzględnieniem zjawiska wiskoelastyczności;</li> <li>➤ przeprowadzenie badań eksperymentalnych;</li> <li>➤ opracowanie wyników badań i przeprowadzenie ich analizy;</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	50%
<b>[JK3]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy;</li> <li>➤ wykonanie serii pomiarowych zmiany masy w trakcie wysychania membrany IPMC;</li> <li>➤ przeprowadzenie badań eksperymentalnych w procesie identyfikacji parametrów;</li> <li>➤ opracowanie oraz implementacja modelu IPMC z uwzględnieniem zmiany wilgotności membrany IPMC;</li> <li>➤ opracowanie wyników badań i przeprowadzenie ich analizy;</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	50%
<b>[JK4]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy;</li> <li>➤ przeprowadzenie procesów identyfikacji;</li> <li>➤ opracowanie oraz implementacja modelu IPMC z rezystancją zależną od wilgotności membrany;</li> <li>➤ opracowanie koncepcji zintegrowanego mapowania do strojenia wielu modeli;</li> <li>➤ przeprowadzenie badań eksperymentalnych;</li> <li>➤ opracowanie wyników badań i przeprowadzenie ich analizy;</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	60%



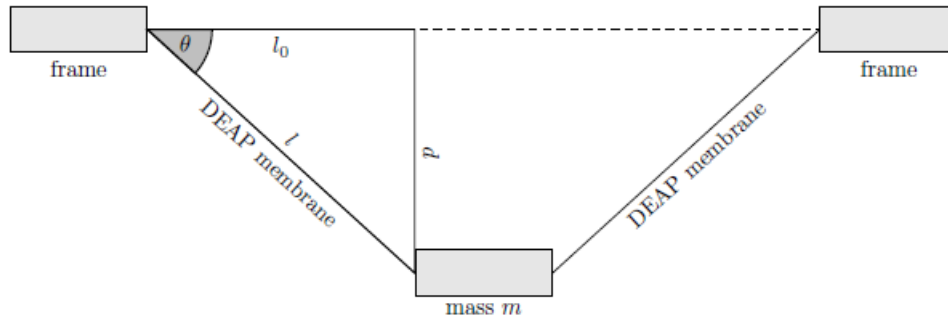
[JK5]	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie nowatorskiej konstrukcji napędu krokowego wykorzystującego elektroaktywne polimery jonowe;</li> <li>➤ opracowanie oraz implementacja modelu FEM (ang. <i>Finite Element Method</i>) w środowisku ANSYS;</li> <li>➤ przeprowadzenie symulacji oraz opracowanie wyników badań i przeprowadzenie ich analizy;</li> <li>➤ opracowanie i zamodelowanie przykładowych rozwiązań przeniesienia napędu w silniku IPMC;</li> <li>➤ opracowanie i zaprezentowanie koncepcji zwiększenia generowanej siły poprzez budowę wielowarstwową;</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	100%
-------	--	------

### 4.2.3 Modelowanie, identyfikacja i sterowanie siłownikami DEAP

W pracy [JK6] zaprezentowany został nieliniowy model obwodu elektrycznego okrągłego siłownika DEAP sprzęgnięty ze zjawiskami mechanicznymi oraz wiskoelastycznymi. Membrana DEAP jest wykonana z silikonowej membrany, która jest wstępnie rozciągana podczas procesu produkcyjnego. Następnie nanoszone są na niej obustronnie elektrody węglowe (rysunek 19). Zasadniczo siłowniki DEAP są podobne do elastycznych kondensatorów a przyłożenie napięcia rzędu kilku kilowoltów prowadzi do ściskania elastomeru, co powoduje wychylenie membrany oraz zmianę jej pojemności. Celem pracy [JK6] było rozszerzenie badań nad modelowaniem DEAP prezentowanych w pracy [21] poprzez przedstawienie zmodyfikowanego modelu siłownika uwzględniającego obciążenie go dodatkowym ciężarem (rysunek 20). Habilitant rozszerzył model o reprezentację tarcia wiskotycznego zaobserwowanego w trakcie eksperymentów, co wydatnie poprawiło proces identyfikacji parametrów badanego DEAP.



Rysunek 19. Zasada działania dielektrycznego elektroaktywnego siłownika polimerowego



Rysunek 20. Schemat siłownika DEAP w pozycji odchylonej podczas obciążenia membrany DEAP dodatkową masą.

Dla geometrii kołowej ugięcie membrany DEAP jest opisane przez rozciąganie promieniowe  $\lambda_r$  rozciąganie obwodowe  $\lambda_c$  oraz rozciąganie grubości  $\lambda_z$  [21]:

$$\lambda_r \lambda_c \lambda_z = 1 \quad \lambda_r = \frac{l}{l_0} = \frac{\sqrt{l_0^2 + d^2}}{l_0} \quad \lambda_z = \frac{z}{z_0} \quad \lambda_c = const \quad (18)$$

$$z = z_0 \frac{l_0}{l} = z_0 \frac{l_0}{\sqrt{l_0^2 + d^2}} \quad \sin(\theta) = \frac{d}{\sqrt{l_0^2 + d^2}} \quad (19)$$

Habilitant zaproponował w pracy [JK6] model złożony z zestawu nieliniowych równań różniczkowych definiujący dynamiczną zależność między napięciem wejściowym  $u$  a przemieszczeniem wyjściowym elementu wykonawczego  $d$ .

$$m\ddot{d} = mg + F_L - \sin(\theta)(F_M + F_h + F_f) \quad (20)$$

gdzie  $\theta$  oznacza kąt wychylenia,  $m$  to masa obciążenia początkowego,  $g$  oznacza przyspieszenie ziemskie, natomiast  $F_L$  definiuje obciążenie zewnętrzne.

Sprężenie elektromechaniczne osiągnięte jest przez siłę Maxwella, która powoduje ściskanie membrany, gdy napięcie  $U$  jest przyłożone do siłownika DEAP. Ściskanie grubości membrany DEAP przy zachowaniu stałej objętości siłownika powoduje zmianę rozciągnięcia promieniowego  $y_r$ . Wartość siły  $F_M$  jest równa:

$$F_M \sin(\theta) = \bar{c}_1 c_2 d u^2 \quad (21)$$

$$\bar{c}_1 = \frac{2\pi r z_0}{l_0}, \quad c_2 = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{z_0^2} \quad (22)$$

gdzie  $\epsilon_0$  to przenikalność próżni, a  $\epsilon_r$  to przenikalność względna membrany polimerowej. Parametry  $z_0$ ,  $l_0$  oraz  $r$  opisują geometrię siłownika DEAP a ich wartości zostały zdefiniowane w pracy [JK6]. Siła  $F_h$  uwzględnia zjawisko wiskoelastyczności zgodnie ze wzorem:

$$F_h \sin(\theta) = \bar{c}_1 d \sigma_e \left( \frac{l_0^2}{l_0^2 + d^2} \right) \quad (23)$$

$$\sigma_e = -k_e \epsilon_e + k_e (\lambda_r - 1) + \underline{\sigma}_e \quad (24)$$

$$\dot{\epsilon}_e = -\frac{k_e}{\eta_e} \epsilon_e + \frac{k_e}{\eta_e} (\lambda_r - 1) \quad (25)$$

Istnieje wiele modeli definiujących funkcje gęstości energii naprężeń hiperelastycznych (Yeoh, Ogden, Arruda-Boyce, itp). Habilitant zastosował model Odgena publikowany w pracy [24] oraz zdefiniował dwa parametry  $\beta_i$  oraz  $\gamma_i$  aby uzyskać wyrażenie definiujące wartość w stanie ustalonym naprężenia hiperelastycznego  $\sigma_e$  dla stałego wymuszenia:

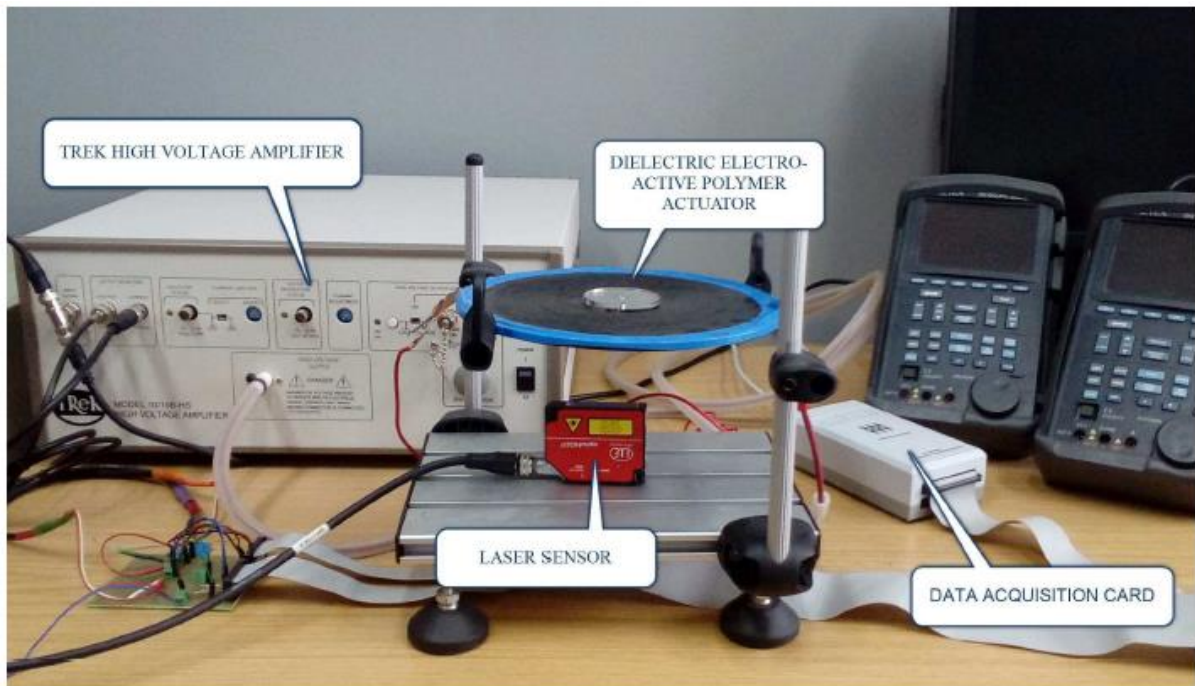
$$\underline{\sigma}_e = \sum_{i=1}^3 (\beta_i \lambda_r^{\alpha_i} - \gamma_i \lambda_r^{-\alpha_i}) \quad (26)$$

gdzie  $\alpha_i$  to stałe wartości zdefiniowane w pracy [JK7]. Tarcie wiskotyczne zostało zamodelowane zgodnie ze wzorem:

$$F_f \sin(\theta) = b \dot{\lambda}_r \sin(\theta) = \frac{b \dot{d} d^2}{l_0^3 + l_0 d^2} \quad (27)$$

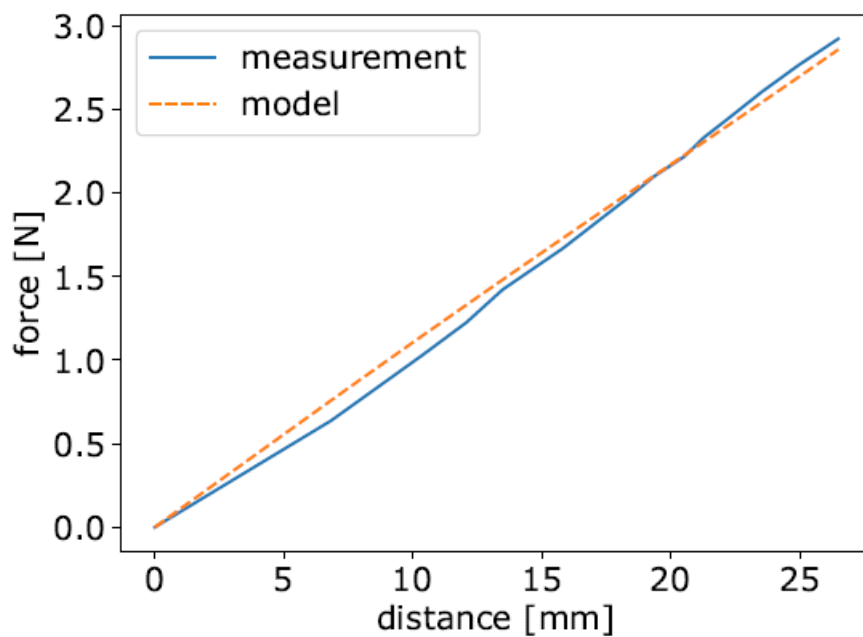
gdzie  $b$  stanowi współczynnik tarcia.

W pracy [JK6] proces identyfikacji obejmował przeprowadzenie serii pomiarów odpowiedzi statycznych oraz dynamicznych siłownika DEAP wykorzystując w tym celu stanowisko opracowane przez habilitanta i zaprezentowane na rysunku 21.



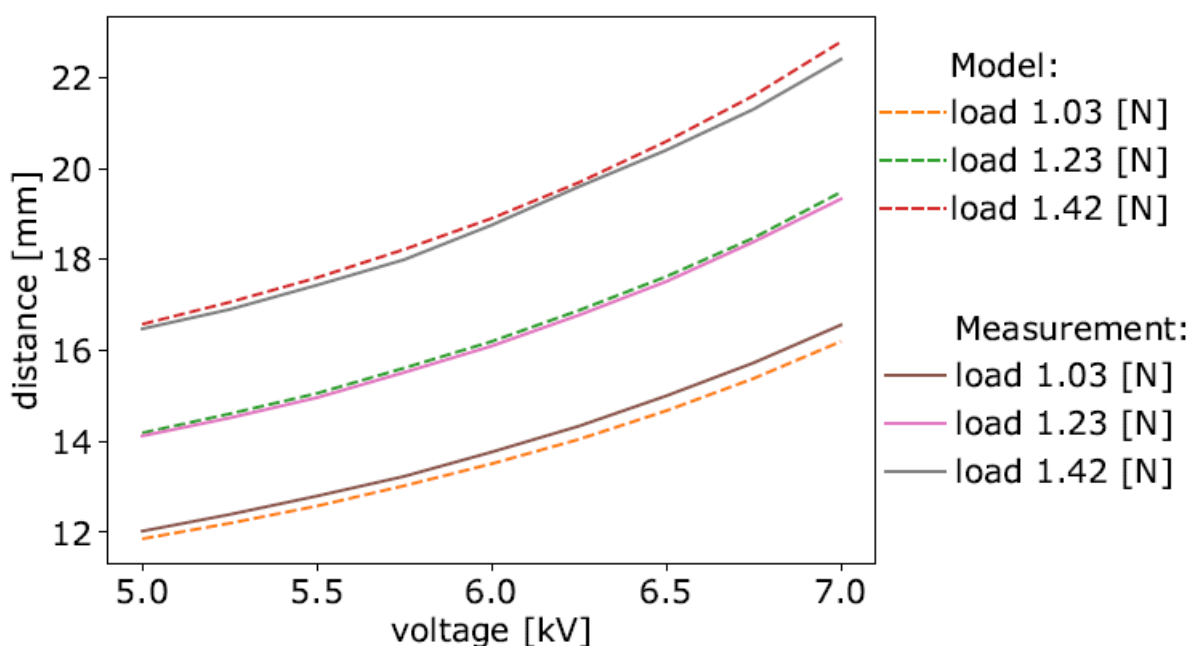
Rysunek 21. Stanowisko laboratoryjne do badania przemieszczenia siłownika DEAP.

Identyfikację modelu nieliniowego przeprowadzono zgodnie z procedurą przedstawioną w pracy [21]. W pierwszej kolejności dokonano pomiarów charakterystyki statycznej bez aktywnego napięcia zasilania (rysunek 22). Posłużyła ona do przeprowadzenia identyfikacji parametrów modelu Ogdena ( $\beta_i$  oraz  $\gamma_i$ ), które opisują statyczne zachowanie membrany.



Rysunek 22. Charakterystyka statyczna definiująca relację przemieszczenia względem siły.

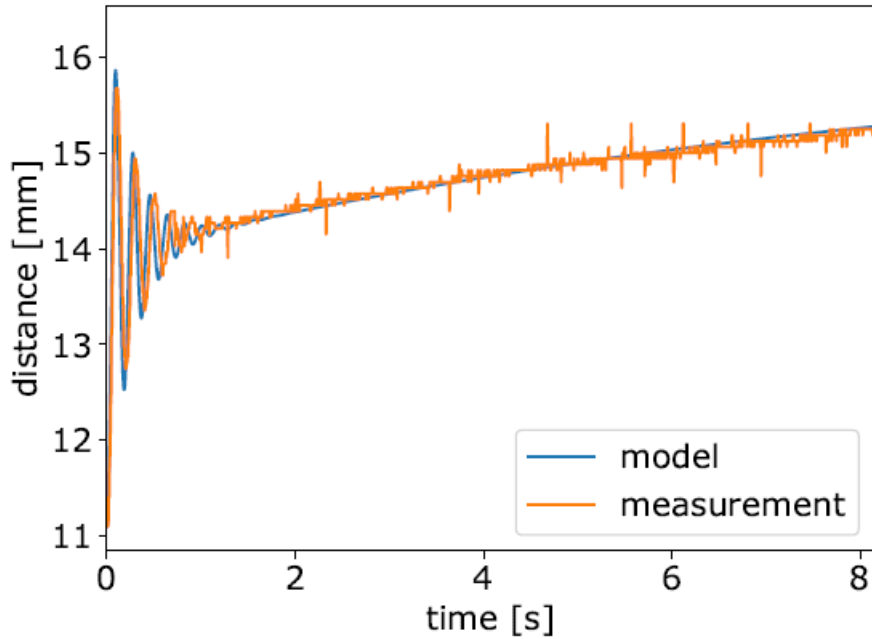
Następnie habilitant zrealizował szereg eksperymentów wyznaczających stan ustalony przemieszczenia siłownika DEAP podczas wymuszenia skokiem napięcia od 5 do 7 kV przy stałym obciążeniu membrany. Pozyskane przebiegi pozwoliły zidentyfikować przenikalność względną  $\epsilon_r$  materiału DEAP (rysunek 23).



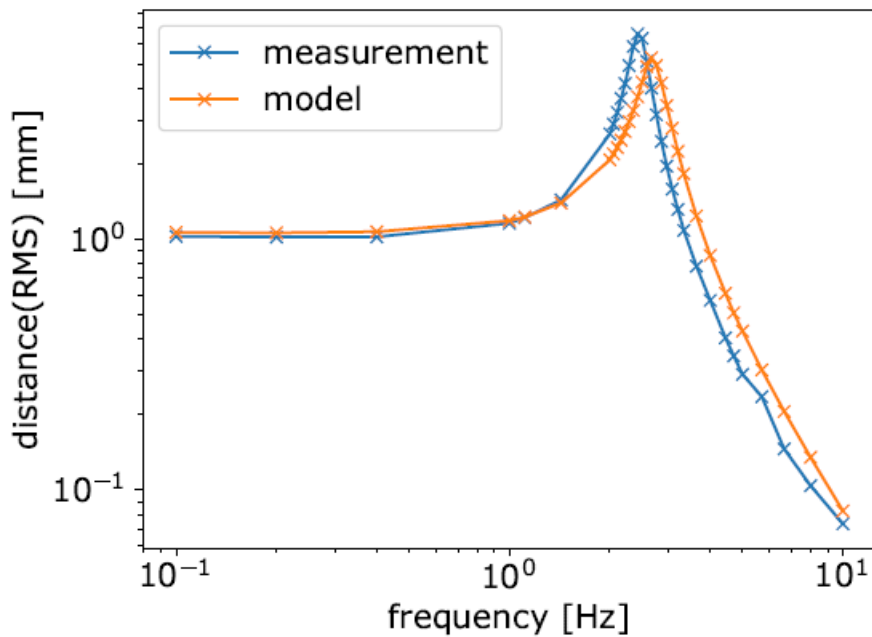
Rysunek 23. Charakterystyka przemieszczenia siłownika DEAP w relacji do różnych poziomów napięcia zasilania i obciążenia membrany

Istotnym wyzwaniem przy identyfikacji parametrów siłownika DEAP w przypadku dynamicznym jest uzyskanie prawidłowych wartości współczynników wiskoelastyczności  $k_e$ ,  $\eta_e$  oraz współczynnika tłumienia  $b$ . W tym celu habilitant przeprowadził badania nad przebiegiem czasowym odpowiedzi przemieszczenia DEAP dla wymuszenia skokiem napięcia 6 kV (rysunek 24).

W celu przeprowadzenia dodatkowej weryfikacji poprawności opracowanego modelu w stosunku do przeprowadzonych eksperymentalnie pomiarów habilitant przeprowadził identyfikację w dziedzinie częstotliwości (rysunek 25). W pracy [JK6] zestawiono wszystkie wartości parametrów uzyskanych w procesie identyfikacji wytworzonego przez habilitanta siłownika a otrzymane odpowiedzi modelu świadczą o prawidłowości pozyskanych wartości.



Rysunek 24. Odpowiedź przemieszczenia siłownika na wymuszenie skokiem napięcia



Rysunek 25. Porównanie charakterystyk częstotliwościowej modelu siłownika z pomiarami

Znaczącym osiągnięciem pracy [JK6] jest również zdefiniowanie oraz implementacja adaptacyjnego obserwatora, który ma za zadanie trafnie rozpoznać ciężar odważnika znajdującego się centralnie na siłowniku DEAP. Poszukiwana jest siła  $F_L$  jako wartość nieznaną a dodatkowo zmienne stanu  $\epsilon_e$  oraz  $\dot{d}$  badanego siłownika DEAP są niemierzalne. Rozważając sygnał przemieszczenia  $d$  jako wyjście  $y$  oraz napięcie  $u$  jako wejście habilitant

zdefiniował układ w postaci systemu afinicznego dla którego wszystkie nieliniowości zależą od sygnału wyjściowego przemieszczenia [25, 26]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A(y)x + \varphi(u, y) + \phi(y)\theta \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{28}$$

gdzie:

$$A(u, y) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_e \sqrt{s(y)} - 1}{\eta_e} & -\frac{k_e}{\eta_e} & 0 \\ 0 & \frac{\bar{c}_1 y \sigma_e}{m s(y)} & -\frac{b d^2}{m l_0^3 s(y)} \end{bmatrix}$$

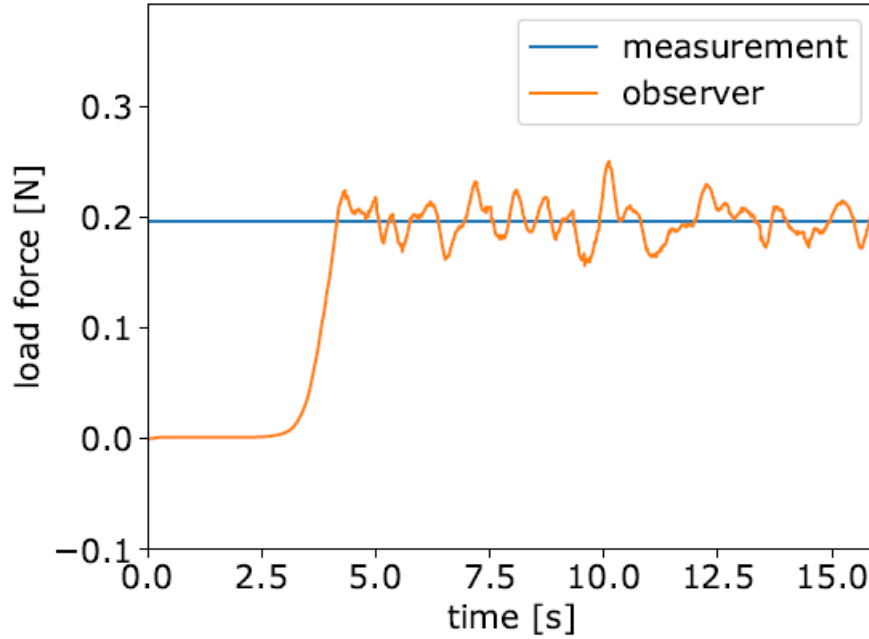
$$\phi(u, y) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0 \ 0], \quad s(y) = 1 + \frac{d^2}{l_0^2}\tag{29}$$

$$\varphi_{11}(u, y) = \varphi_{12}(u, y) = 0$$

$$\varphi_{13}(u, y) = g - \frac{\bar{c}_1 y}{m s(y)} \left( c_2 s(y) u^2 + \underline{\sigma}_e (\sqrt{s(y)}) + k_e (\sqrt{s(y)} - 1) \right)$$

Wektor stanu zdefiniowany jest jako  $x = [d \ \epsilon_r \ \dot{d}]^T$  oraz  $\theta = F_L$ . Siła  $F_L$  jest nieznaną lecz stałą wartością obciążenia membrany. Dla tak zapisanego systemu został zaprojektowany obserwator adaptacyjny zgodnie z literaturą [25, 26]. Rysunek 26 pokazuje przebieg procesu adaptacji, na którym widnieje przebieg estymowanej wartości siły  $F_L$  nieznanego z góry obciążenia membrany masą 0,02 kg. Z rysunku można odczytać, iż już po upływie 2.5 sekundy (gdy pojawia się stan ustalony) obserwator prawidłowo estymuje przyłożony do siłownika DEAP ciężar.

Prezentowane w pracy [JK6] wyniki graficzne poparte wskaźnikami jakości procesu adaptacji dowodzą, iż zastosowanie adaptacyjnego obserwatora pozwala skutecznie określić dociążenie lub odciążenie membrany siłownika w stosunku do jego masy początkowej. Podobnych wyników badań nie prezentowano dotychczas w literaturze światowej według najlepszej wiedzy habilitanta.



Rysunek 26. Przebieg procesu adaptacji dla przypadku obciążenia membrany DEAP

W pracy [JK8] dokonano natomiast linearyzacji zaprezentowanego powyżej modelu DEAP w nominalnym punkcie pracy  $(x_n, v_n)$  wprowadzając wirtualne wejście  $v = u^2$ . Wówczas model przyjął ogólną postać:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)v \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (30)$$

gdzie  $y$  to przemieszczenie siłownika, macierz  $C = [1 \ 0 \ 0]$ ,  $x = [d \ \epsilon_r \ \dot{d}]^T$  jest stanem, natomiast  $f(x)$  oraz  $g(x)$  wynoszą:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= x_3 \\ f_2(x) &= -\frac{k_e}{\eta_e} x_2 + \frac{k_e}{\eta_e} (\sqrt{s(x_1)} - 1) \\ f_3(x) &= g - \frac{\bar{c}_1 x_1}{m s(x_1)} \sigma_e (\sqrt{s(x_1)}, x_2) - \frac{b x_1^2}{m l_0^3 s(x_1)} x_3 \\ g_1(x) &= g_2(x) = 0, \quad g_3(x) = -\frac{\bar{c}_1 c_2}{m} x_1 \end{aligned} \quad (31)$$

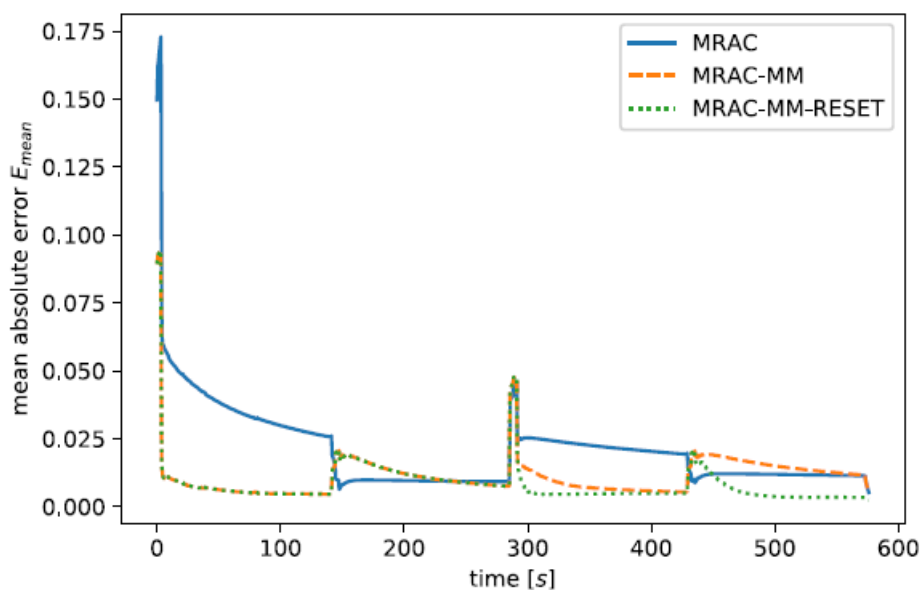
Linearyzacja posłużyła wyznaczeniu współczynników transmitancji  $G_{DEAP}(s) = k_p \frac{Z_p(s)}{R_p(s)} = \frac{\Delta Y(s)}{\Delta V(s)}$ , gdzie sygnały wyjścia oraz wejścia określają odpowiednio wzory  $\Delta y(t) = y(t) - y_n$  oraz  $\Delta v(t) = v(t) - v_n$ . Ukazano zależności parametrów transmitancji od wyboru punktu pracy siłownika DEAP. Symulacje rozważały ciągłą pracę siłownika w długim horyzoncie



czasowym, w którym dochodzi do zmian punktu pracy. Zaprojektowano, dokonano symulacji i zaprezentowano wyniki trzech algorytmów sterowania adaptacyjnego: klasycznego MRAC (ang. *Model Reference Adaptive Controller*), wielomodelowego MRAC oraz wielomodelowego MRAC z algorytmem resetowania. Ten ostatni algorytm stanowi nowatorskie podejście autorów pracy, który poprawia proces adaptacji drugiego poziomu w przypadku analizy układów z nieciągłością parametrów w czasie. Wskaźniki jakości prezentowane w pracy, obliczone zostały dla systemów sterowania adaptacyjnego realizującego następującą trajektorię referencyjną:

$$y_r(t) = 1.5 + 0.75 \operatorname{sign} \left( \sin \left( \frac{2\pi}{T_1} t \right) \right) + 0.25 \operatorname{sign} \left( \sin \left( \frac{2\pi}{T_2} t \right) \right) \quad (32)$$

gdzie  $T_1 = 288$  s oraz  $T_2 = 6$  s. Realizacja sygnału referencyjnego wymuszała zatem zmiany parametrów wynikające z istotnej zmiany punktu nominalnego pracy co 144 sekundy. Na rysunku 27 zaprezentowano porównanie średniej wartości bezwzględnej sygnału błędu sterowania dla zaimplementowanych trzech algorytmów sterowania.



Rysunek 27. Porównanie średniej wartości bezwzględnej sygnałów błędów dla trzech algorytmów sterowania adaptacyjnego siłownikiem DEAP

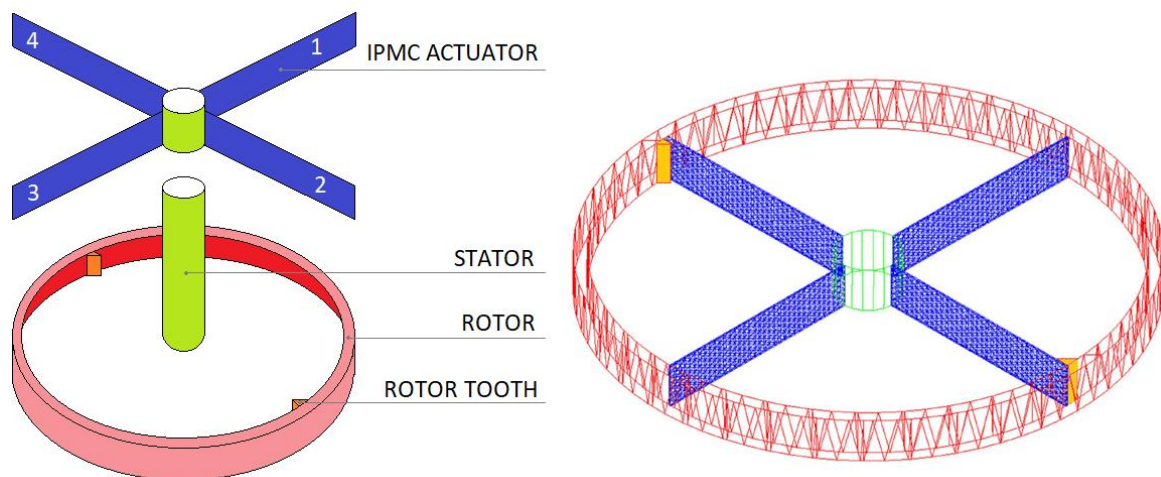
Poniższa tabela podsumowuje wkład merytoryczny oraz udział procentowy habilitanta w pracy związanej z modelowaniem, identyfikacją i sterowaniem DEAP.

<b>symbol pracy</b>	<b>wkład merytoryczny habilitanta w powstaniu pracy</b>	<b>udział % habilitanta</b>
<b>[JK6]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy;</li> <li>➤ zaprojektowanie i wytworzenie siłownika DEAP;</li> <li>➤ zaprojektowanie i wykonanie stanowiska pomiarowego;</li> <li>➤ opracowanie oraz implementacja rozszerzonego modelu siłownika DEAP z reprezentacją tarcia wiskotycznego oraz dodatkową masą obciążenia membrany;</li> <li>➤ implementacja układu obserwatora adaptacyjnego;</li> <li>➤ przeprowadzenie badań eksperymentalnych;</li> <li>➤ opracowanie wyników badań i przeprowadzenie ich analizy;</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	50%
<b>[JK7]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ przeprowadzenie badań eksperymentalnych w celu identyfikacji wirtualnego modułu Younga;</li> <li>➤ opracowanie nowatorskiej konstrukcji dwumembranowej pompy wykorzystującej elektroaktywne polimery dielektryczne;</li> <li>➤ opracowanie oraz implementacja modelu FEM (ang. Finite Element Method) w środowisku ANSYS;</li> <li>➤ opracowanie wyników symulacji i przeprowadzenie ich analizy;</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	100%
<b>[JK8]</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie zlinearyzowanego modelu siłownika DEAP;</li> <li>➤ udział w opracowaniu algorytmów wielomodelowego sterowania adaptacyjnego</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	30%

## 4.2.4 Przykładowe zastosowanie elektroaktywnych polimerów IPMC oraz DEAP

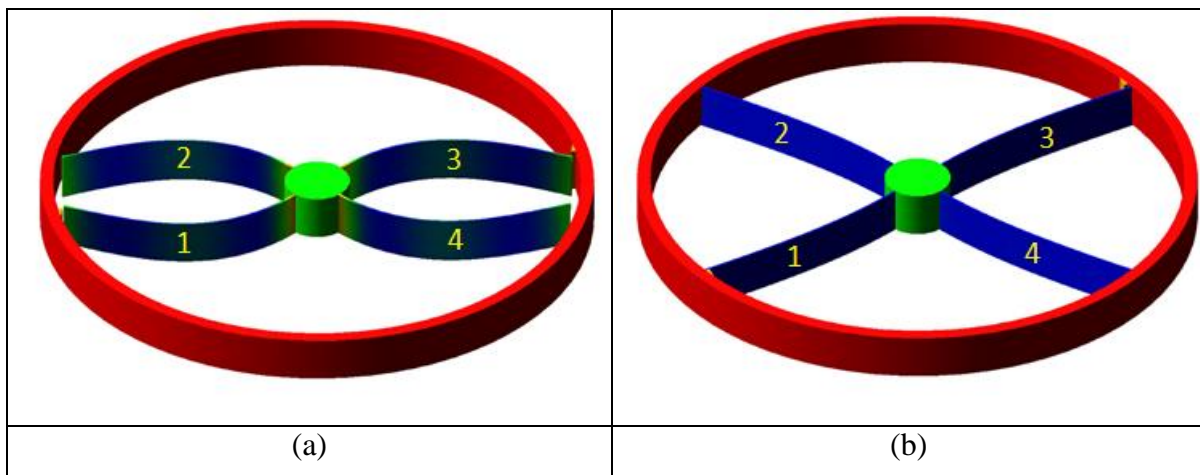
### 4.2.4.1 Napęd IPMC

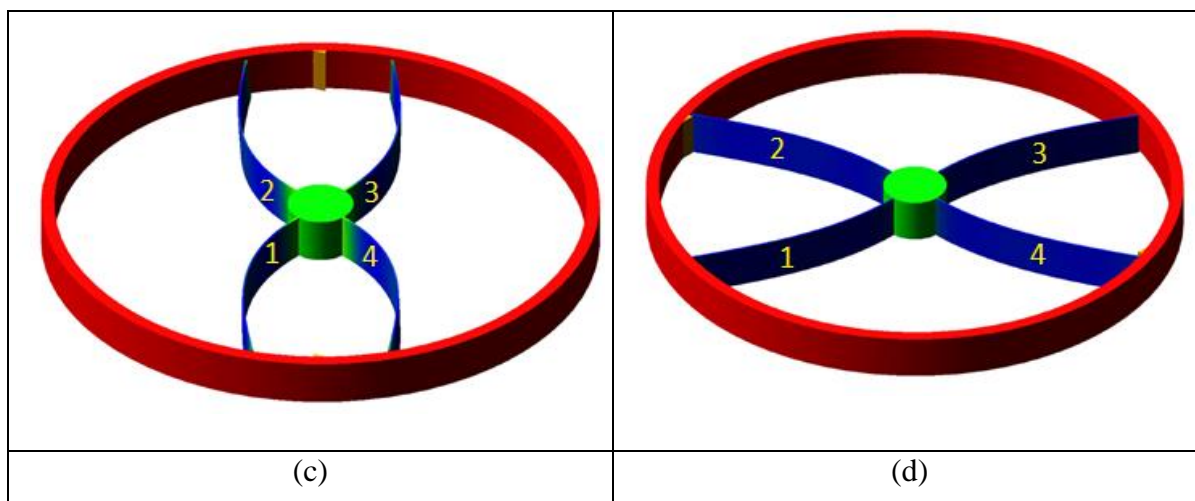
Zweryfikowany eksperymentalnie model zachowania pojedynczego siłownika IPMC stał się punktem wyjścia do opracowania przez habilitanta w pracy [JK5] nowatorskiej konstrukcji napędu krokowego wykorzystującego elektroaktywne polimery jonowe (rysunek 28). Tak opracowana konstrukcja została zamodelowana i przesymulowana metodą elementów skończonych (ang. *Finite Element Method*) w środowisku ANSYS.



Rysunek 28. Struktura silnika krokowego IPMC (lewa) oraz jego siatka 3D (prawa)

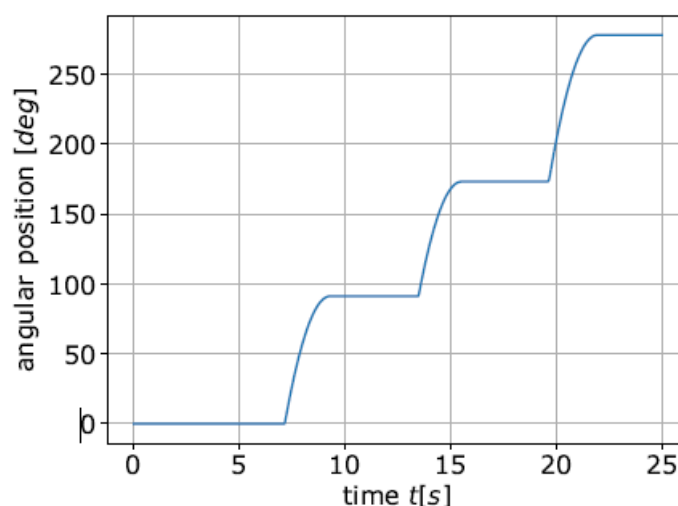
Rysunek 29(a-d) przedstawia kolejne sekwencje ruchów poszczególnych siłowników IPMC w silniku. W części (a) i (b) zwizualizowany został moment przepchnięcia zęba rotora przez siłowniki 1 i 3. Kolejny etap przedstawiają rysunki (c) i (d), na których następuje przekazanie zębów rotora siłownikom 2 i 4.





Rysunek 29. Sekwencje ruchów poszczególnych siłowników IPMC w celu wygenerowania obrotu rotora silnika

W kolejnych cyklach pracy napędu omówiona sekwencja jest powielana dla każdej pary siłowników IPCM, co ostatecznie przekłada się na krokową pracę silnika zaprezentowaną na rysunku 30.

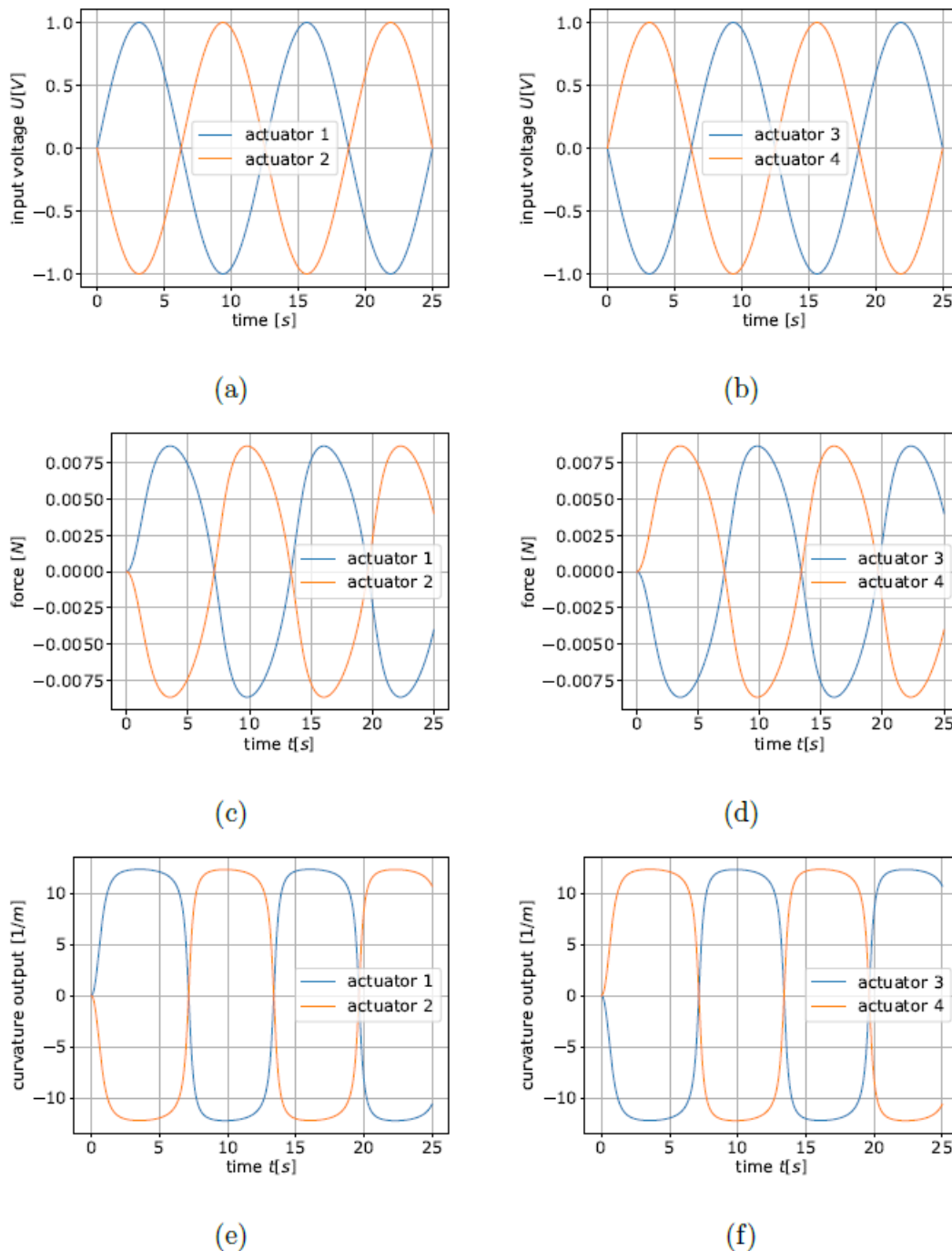


Rysunek 30 Odpowiedź przemieszczenia silnika IPMC

Na rysunku 31 zaprezentowano symulowane przebiegi, które dostarczają pełnej informacji o sile i przemieszczeniu poszczególnych siłowników IPMC w czasie wymuszenia silnika napięciem sinusoidalnie zmiennym:

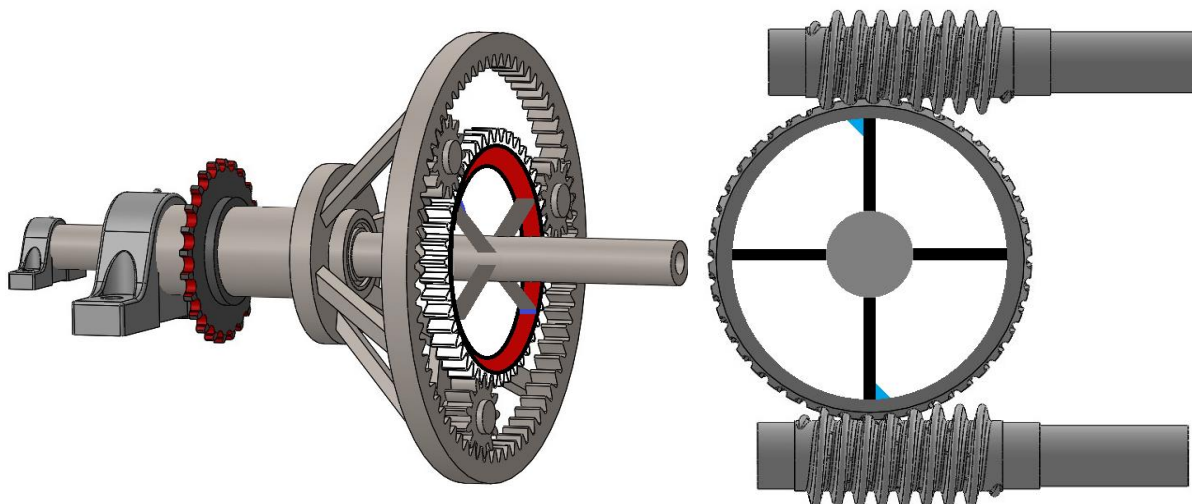
$$U_k(t) = U \sin \left( \frac{2\pi}{T_s} t + \varphi_k \right) \quad (33)$$

gdzie  $k = 1, \dots, 4$  stanowi numer kolejnych siłowników IPMC,  $T_s$  jest okresem (w symulacji równym 12.5 s),  $\varphi_1 = \varphi_4 = 0$ ,  $\varphi_2 = \varphi_3 = 180$  są przesunięciami fazowymi wyrażonymi w stopniach.



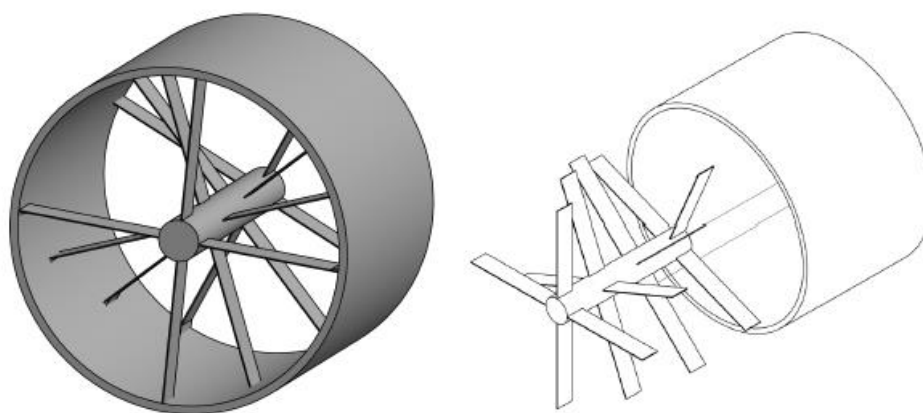
Rysunek 31. Przebiegi napięć wejściowych, sił oraz krzywizn odgięcia poszczególnych siłowników IPMC w napędzie

Przeprowadzone symulacje wykazały, że siłowniki IPMC mogą realizować procesy mikromanipulacji na przykład w systemach robotyki. W rzeczywistych rozwiązaniach silnika IPMC wirnik może być osadzony na różne sposoby. W pracy [JK5] habilitant przedstawił dwa autorskie modele. Jednym z możliwych zastosowań proponowanego silnika jest umieszczenie wirnika między przekładniami zębatymi. Drugą koncepcję stanowi przeniesienie siły napędowej przez śrubę skrętną (rozwiązania przedstawiono na rysunku 32).



Rysunek 32. Przykładowe modele przeniesienia napędu w silniku IPMC

Ze względu na to, iż siłowniki IPMC pracują w środowisku uwodnionym, silnik może pracować całkowicie zanurzony w wodzie. Stanowi to ciekawą właściwość w porównaniu ze standardowymi silnikami elektrycznymi. Ponadto, elastyczna konstrukcja siłowników IPMC i rotora, który może być wykonany np. z gumy umożliwia chwilowe odkształcenia podczas pracy. Dzięki tym właściwościom siłowniki IPMC mogą być stosowane w specjalizowanych aplikacjach robotycznych, na przykład w elastycznym kole. Inną możliwością jest zbudowanie konstrukcji asymetrycznej z siłownikami o różnej długości. Można je konfigurować w złożone kształty, a ich właściwości można dostosowywać do potrzeb. W pracy [JK5] habilitant przedstawił również autorską koncepcję siłownika wielowarstwowego, który ma być propozycją do zwiększenia generowanej przez silnik IPMC siły (Rysunek 33) będącej dzisiaj główną barierą do rzeczywistych zastosowań.



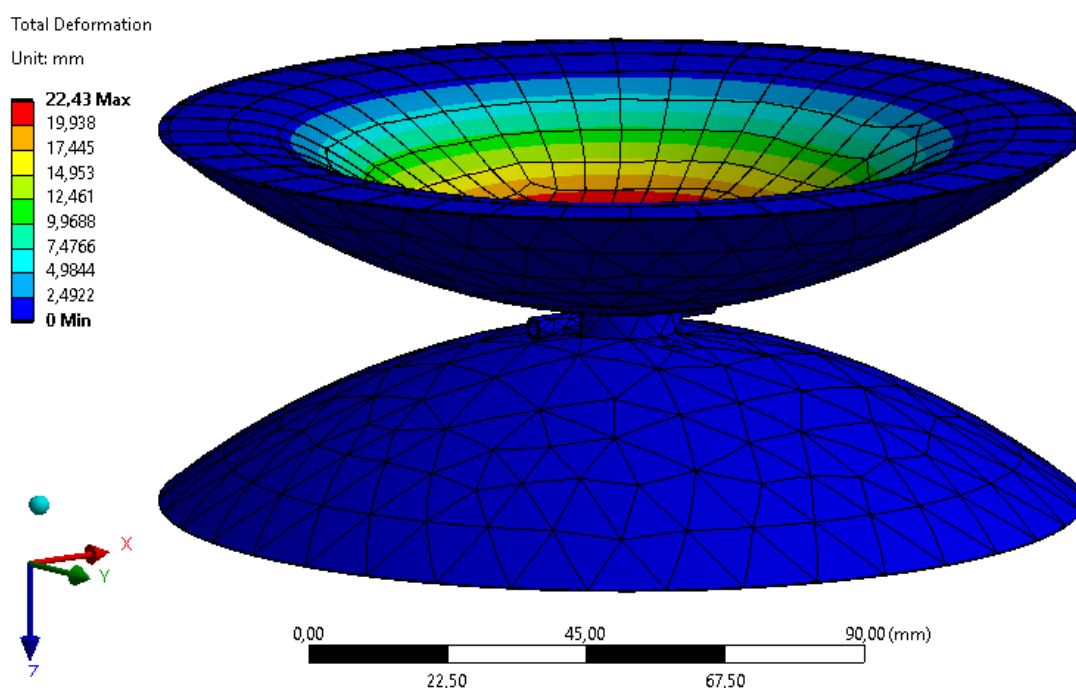
Rysunek 33. Koncepcja czterowarstwowego silnika IPMC



Efekty pracy zaprezentowanej w [JK5] ukazują potencjalne możliwości zastosowania siłowników IPMC do nowych rodzajów napędów, w których wymagana jest odporna na korozję, elastyczna konstrukcja realizująca złożone ruchy (np. podwodnych mikromaszyn). Zdaniem habilitanta w niedalekiej przyszłości rozwiązania wykorzystujące IPMC coraz częściej pojawiać się będą w układach wykonawczych.

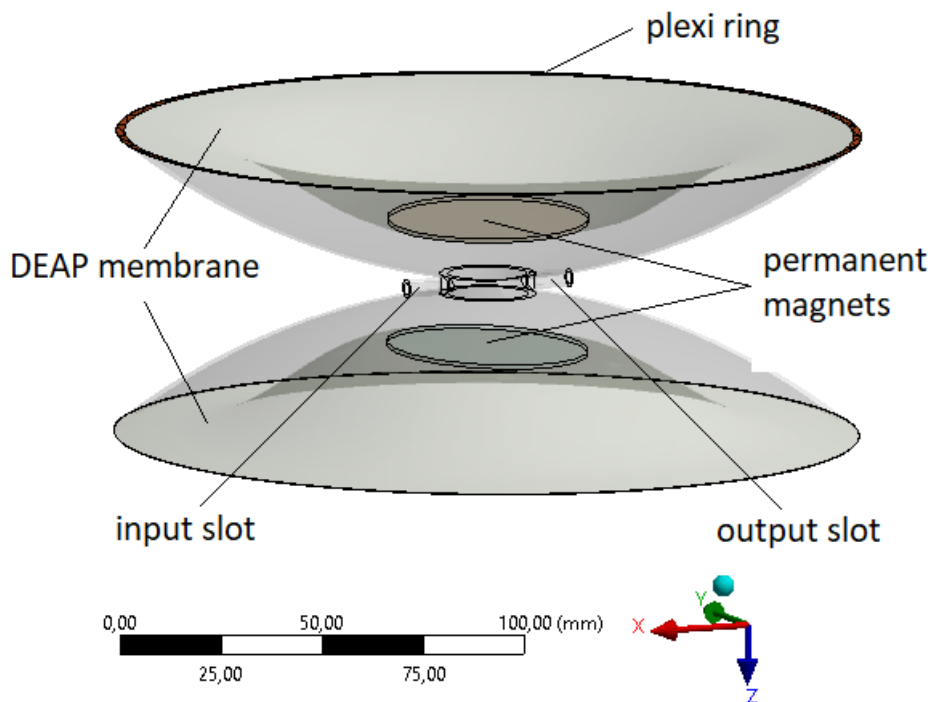
#### 4.2.4.2 Pompa DEAP

Siłownik DEAP generuje sprężyste odkształcenie wynikające ze ściskających sił elektrostatycznych. Do najważniejszych zalet siłowników DEAP zaliczyć można wydajność energetyczną, lekkość, elastyczność konstrukcji i skalowalność. Habilitant dostrzegając te własności zaproponował w pracy [JK7] nowatorskie rozwiązanie w postaci pompy DEAP. Rysunek 34 prezentuje model FEM urządzenia wykonany w środowisku FEM ANSYS. Dokonano identyfikacji wirtualnego modułu Younga (kompensującego nieliniowość modelu) odpowiadając modelem zgodnie z pomierzonym eksperymentalnie przemieszczeniem w zakresie 5-7 kV dla trzech obciążeń 1.03 N, 1.23 N oraz 1.42 N.



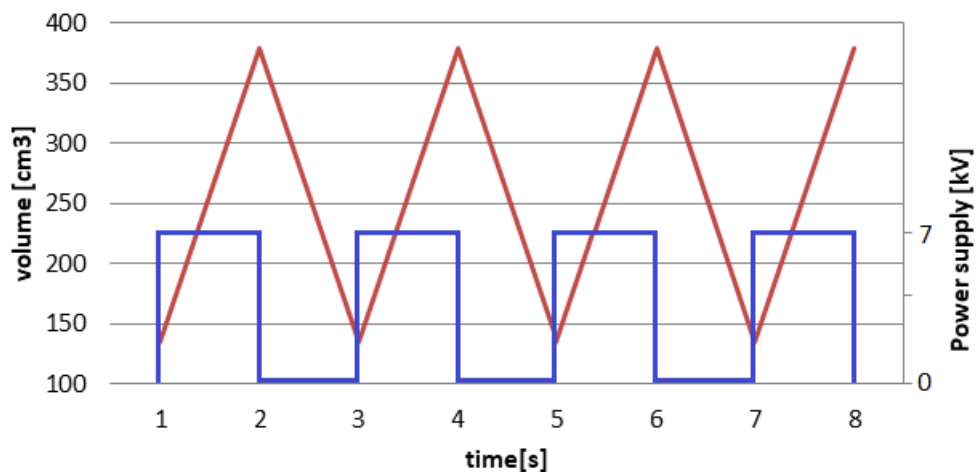
Rysunek 34. Model FEM pompy DEAP w środowisku ANSYS

Mechanizm przyciągania wewnętrznych membran zapewniają dwa neodymowe magnesy trwałe, których parametry zdefiniowano w pracy (rysunek 35).



Rysunek 35. Koncepcja budowy pompy DEAP z wykorzystaniem magnesów trwałych

W celu wypompowania medium, zawór wlotowy pompy zostaje zamknięty a zawór wylotowy otwarty. W tym samym czasie oba siłowniki zostają zasilone napięciem, co powoduje skompresowanie ich membran oraz przyciągnięcie wzajemne poprzez oddziaływanie magnesów trwałych. W cyklu ssania zawór wlotowy pompy zostaje otwarty a zawór wylotowy zamknięty. Napięcie zostaje wyłączone i objętości komór się zwiększają ze względu na dekompresję membran i zmianę ich właściwości elastycznych. Zmiana objętości jednej komory pompy wynosi od 135,64 cm<sup>3</sup> do 379,81 cm<sup>3</sup> a jej wykres skorelowany z sygnałem napięcia w czasie pokazano na rysunku 36.



Rysunek 36. Przebieg napięcia zasilania oraz zmiany objętości komory pompy DEAP.



Poniższa tabela podsumowuje wkład merytoryczny oraz udział procentowy habilitanta w poszczególnych pracach związanych z przykładowymi zastosowaniami elektroaktywnych polimerów IPMC oraz DEAP.

symbol pracy	wkład merytoryczny habilitanta w powstaniu pracy	udział % habilitanta
[JK5]	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie nowatorskiej konstrukcji napędu krokowego wykorzystującego elektroaktywne polimery jonowe;</li> <li>➤ opracowanie oraz implementacja modelu FEM (ang. <i>Finite Element Method</i>) w środowisku ANSYS;</li> <li>➤ przeprowadzenie symulacji oraz opracowanie wyników badań i przeprowadzenie ich analizy;</li> <li>➤ opracowanie i zamodelowanie przykładowych rozwiązań przeniesienia napędu w silniku IPMC;</li> <li>➤ opracowanie i zaprezentowanie koncepcji zwiększenia generowanej siły poprzez budowę wielowarstwową;</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	100%
[JK7]	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ przeprowadzenie badań eksperymentalnych w celu identyfikacji wirtualnego modułu Younga;</li> <li>➤ opracowanie nowatorskiej konstrukcji dwumembranowej pompy wykorzystującej elektroaktywne polimery dielektryczne;</li> <li>➤ opracowanie oraz implementacja modelu FEM (ang. <i>Finite Element Method</i>) w środowisku ANSYS;</li> <li>➤ opracowanie wyników symulacji i przeprowadzenie ich analizy;</li> <li>➤ przygotowanie manuskryptu artykułu;</li> </ul>	100%

#### 4.2.5 Podsumowanie

Przedstawiony cykl publikacji obejmuje 8 prac dotyczących procesów modelowania, identyfikacji parametrów elektroaktywnych polimerów oraz algorytmów ich sterowania ze szczególnym uwzględnieniem procesów adaptacyjnych. Przedstawiony cykl prac naukowych dotyczy zdaniem habilitanta zagadnień bardzo ważnych z punktu widzenia zastosowań nowoczesnej teorii sterowania w odniesieniu do polimerowych siłowników elektroaktywnych. Zaprezentowane w publikacjach wyniki badań habilitanta ukazują, iż wierne odwzorowanie procesów zachodzących w trakcie wymuszenia napięciowego siłowników IPMC oraz DEAP wymagają złożonych, nieliniowych modeli. Habilitant

znacząco poszerzył dziedzinę badań nad modelowaniem IPMC oraz DEAP prezentowaną dotychczas w literaturze światowej. W zakresie IPMC zaproponował zmiany w części mechanicznej oraz zdefiniował pierwszy na świecie model zależny od zmiennej wilgotności polimerowej membrany siłownika. W obszarze polimerów dielektrycznych habilitant opublikował model rozszerzony o tarcie wiskotyczne, w którym uwzględnił nieznaną a priori siłę obciążenia membrany siłownika DEAP dodatkową masą a następnie opracował sterowanie adaptacyjne traktując siłę ciężaru masy jako wartość nieznaną.

Identyfikacja parametrów prezentowanych modeli stanowi odrębny, bardzo złożony proces wymagający szeregu eksperymentów, wykonanych z dużą precyzją w różnych warunkach pracy siłowników. W tym celu habilitant zaprojektował i zbudował sprzętowe zestawy eksperymentalne implementując nowoczesną architekturę sprzętową (np. wzmacniacz wysokiego napięcia TREK model 10/10B-HS, karta czasu rzeczywistego RTDAC Inteco, czujnik laserowy micro-epsilon optoNCDT1302, itd). Prezentowane w cyklu habilitacyjnym prace wnikliwie i szczegółowo opisują zastosowane metody identyfikacji parametrów oraz przebiegi i wyniki eksperymentów w celu pozyskania niezbędnych pomiarów do ich przeprowadzenia. Takie cechy jak dokładność, wierność czy powtarzalność owych procesów niejednokrotnie decydują o przydatności modelu w dalszych etapach prac. Habilitant opracował również symulacje modeli elementów wykonawczych przeprowadzając obliczenia FEM (ang. Finite Element Method). Opracowany został innowacyjny silnik krokowy zbudowany z wykorzystaniem siłowników IPMC oraz przedstawiona została propozycja architektury nowoczesnej dwumembranowej pompy DAEP z magnesami trwałymi. Warto podkreślić fakt, iż dotychczasowa literatura światowa jest jeszcze bardzo uboga w propozycje rzeczywistych urządzeń wykorzystujących IPMC czy DEAP. Elektroaktywne polimery są obiektami trudnymi do sterowania zarówno ze względu na złożoną strukturę jak i niejednokrotny brak możliwości pomierzenia pełnego stanu obiektu. W tym kontekście dużą zaletą prezentowanych prac jest stosowanie algorytmów adaptacyjnych, w tym ich postaci wielomodelowych. Habilitant zaimplementował nowoczesne metody sterowania adaptacyjnego w dziedzinie siłowników elektroaktywnych oraz opracował koncepcję zintegrowanego mapowania do strojenia wielu modeli uwzględniając odwracalność mapowania między parametrami a sygnałami mierzalnymi.

Najważniejsze oryginalne wyniki, które habilitant zaproponował w ramach przedstawionego osiągnięcia habilitacyjnego, to:

1. Opracowanie nowatorskiej koncepcji napędu IPMC zaprezentowanej w pracy [JK5]. Habilitant zaprezentował symulacje modelu opracowanego metodą elementów skończonych w środowisku ANSYS, a następnie zaproponował przykładowe modele przeniesienia napędu oraz zwiększenia generowanej siły.
2. Opracowanie metodą elementów skończonych modelu urządzenia wykonawczego w postaci dwumembranowej pompy z wykorzystaniem elektroaktywnych polimerów DEAP, zaprezentowanego w pracy [JK7]
3. Opracowanie modelu dynamiki IPMC zależnego od zmiennej wilgotności. Prace [JK3] oraz [JK4] prezentują pierwszy na świecie model IPMC zależny od zmiennej wilgotności. Przeprowadzono wnikliwą identyfikację procesów wysychania, która pozwoliła zdefiniować relację  $R(\sigma)$  oraz wprowadzić ją do modelu adaptacyjnego obserwatora estymującego rezystancję membrany.
4. Samodzielne wyprodukowanie elektroaktywnego siłownika DEAP oraz opracowanie autorskiego modelu z uwzględnieniem tarcia wiskotycznego oraz obciążenia membrany dodatkową siłą. W pracy [JK6] zaprezentowano proces identyfikacji parametrów opracowanego modelu oraz zdefiniowano obserwator adaptacyjny służący śledzeniu obciążenia membrany DEAP.
5. Zastosowanie pierwszego na świecie estymatora pozycji w trybie bezczujnikowego sprzężenia zwrotnego dla siłownika IPMC (tylko ze sprzężeniem prądowym) oraz zastosowanie rozszerzonego algorytmu obserwacji wielomodelowej w szacowaniu wartości parametrów obiektu [JK2, JK4].
6. Opracowanie modelu IPMC z rozszerzoną częścią mechaniczną uwzględniającą zjawisko wiskoelastyczności. Sporządzenie opisu modelu IPMC w przestrzeni stanu stanowiło punkt wyjścia do zastosowania oraz zweryfikowania skuteczności metody nieliniowego kwadratowego suboptymalnego sterowania SDRE w ujęciu wielomodelowym [JK2].

## Literatura:

- [1] M. Shahinpoor, “Electromechanics of ionoelastic beams as electrically controllable artificial muscles,” *Smart Structures and Materials : Electroactive Polymer Actuators and Devices*, 1999.
- [2] Y. Bar-Cohen, “Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges” (Bellingham: SPIE Press), 2001
- [3] Z. Chen, D. R. Hedgepeth, and X. Tan, “A nonlinear, control-oriented model for ionic polymermetal composite actuators,” *Smart Materials and Structures*, vol. 18, pp. 1 – 9, 2009.
- [4] K. Newbury and D. Leo, “Electromechanical modeling and characterization of ionic polymer benders,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 13, pp. 51–60, 2002.
- [5] S. Nemat-Nasser and J. Li. “Electromechanical response of ionic polymer–metal composites” *J. Appl. Phys.* 87 3321–31, 2000
- [6] K. M. Farinholt, “Modeling and Characterization of Ionic Polymer Transducers for Sensing and Actuation” - Ph.D. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [7] K. J. Astrom and B. Wittenmark, “Adaptive Control”. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- [8] P. Ioannou, “Robust adaptive control”. University of Southern California, 2003.
- [9] K. S. Narendra and Z. Han, “New concepts in adaptive control using multiple models,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 57, no. 1, pp. 78–88, 2012.
- [10] G. Kim, H. Kim, I. J. Kim, J. R. Kim, J. I. Lee and M. Ree, “Bacterial adhesion, cell adhesion and biocompatibility of nafion films”. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition* 20: 1687–1707, 2009
- [11] S. J. Kim, I. T. Lee, H. Y. Lee and Y. Kim, “Performance improvement of an ionic polymer-metal composite actuator by parylene thin film coating.” *Smart Materials Structures* 15(6), 2006
- [12] K. Oguro, Y. Kawami and H. Takenake, “Bending of an ionconducting polymer film-electrode composite by an electric stimulus at low voltage.” *Journal of Micromachine Society* 5: 27 – 30, 1992
- [13] N. Hosoya, H. Masuda, and S. Maeda, “Balloon dielectric elastomer actuator speaker,” *Applied Acoustics*, vol. 148, pp. 238–245, 2019.
- [14] L. Li, H. Godaba, H. Ren, and J. Zhu, “Bioinspired soft actuators for eyeball motions in humanoid robots,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 1, pp. 100–108, 2019.

- [15] H. Zhang, M. Dai, and Z. Zhang, “The analysis of transparent dielectric elastomer actuators for lens,” *Optik*, vol. 178, pp. 841–845, 2019.
- [16] Pourazadi, H. Bui, and C. Menon, “Investigation on a soft grasping gripper based on dielectric elastomer actuators,” *Smart Materials and Structures*, vol. 28, no. 3, 2019.
- [17] M. Hodgins, G. Rizzello, A. York, and S. Seelecke, “High-frequency dynamic model of a pre-loaded circular dielectric electro-active polymer actuator,” vol. 2, 2013.
- [18] K. Kim and T. S., *Electroactive Polymers for Robotics Applications: Artificial Muscles and Sensors*. Springer, 2007
- [19] Y. Li, I. Oh, J. Chen, H. Zhang, and Y. Hu, “Nonlinear dynamic analysis and active control of visco-hyperelastic dielectric elastomer membrane,” *International Journal of Solids and Structures*, 2018
- [20] Z. Wang and T. He, “Electro-viscoelastic behaviors of circular dielectric elastomer membrane actuator containing concentric rigid inclusion,” *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, vol. 39, no. 4, pp. 547–560, 2018.
- [21] G. Rizzello, D. Naso, A. York, and S. Seelecke, “Modeling, identification, and control of a dielectric electro-active polymer positioning system,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 632–643, 2015.
- [22] T. Çimen, (2010), Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the state dependent Riccati equation (SDRE) method”, *Annu Rev. Control*, 34, 32-51, 2010
- [23] L.G. Lin, J. Vandewalle, and Y.W. Liang, “Analytical representation of the state-dependent coefficients in the SDRE/SDDRE scheme for multivariable systems”, *Automatica*, 59(6433), 106-111, 2015
- [24] T. Çimen, “Survey of state dependent Riccati equation in nonlinear optimal feedback control synthesis”, *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 35 (4), 1025 1047, 2012
- [25] T. He, L. Cui, C. Chen, and Z. Suo, “Nonlinear deformation analysis of a dielectric elastomer membrane spring system”, *Smart Materials and Structures*, 19(8), 085017–1–085017–7, 2010
- [26] G. Besancon, “Nonlinear Observers and Applications”. Springer-Verlag, Inc., Berlin, 2007
- [27] G. Besanon, J. De Len-Morales and O. Huerta-Guevara, “On adaptive observers for state affine systems”. *International Journal of Control*, 79(6), 581–591, 2006
- [28] A. Aabloo, J. Belikov, V. Kaparin and Ü. Kotta, “Challenges and Perspectives in Control of Ionic Polymer-metal Composite (IPMC) Actuators: A Survey”, *IEEE Access*, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007020.

## 5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub w szczególności zagranicznej.

- współpraca z **Politechniką Krakowską im. T. Kościuszki** (ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków) na rzecz projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju „Transfer Innowacji – wzmocnienie powiązań sfery B + R z przedsiębiorcami”, współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Społecznego na podstawie umowy o dofinansowanie nr UDA-POKL.08.02.01-12-021/12-00

<b>Rola w projekcie:</b>	<b>ekspert naukowy (wykonawca)</b>
<b>Zakres prac w projekcie:</b>	160 godzin doradztwa naukowego
<b>Czas realizacji projektu:</b>	rok 2015
<b>Cel projektu:</b>	Celem doradztwa naukowego było opracowanie i wdrożenie w dwóch firmach planu strategicznego, ukierunkowanego na rozwój innowacji i wzmocnienie powiązań MMŚP z sektorem nauki.

- Wykaz prac powstałych w wyniku prowadzenia badań naukowych w więcej niż jednej jednostce naukowej:
  - współpraca naukowa z Zakładem Polimerów na Wydziale Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej (wspólne badanie i wytwarzanie polimerów IPMC) – efektem jest praca „Sensorless position estimator applied to nonlinear IPMC model”, Smart Materials and Structures, 2016, volume 25, number 11, pp. 115037-1-115037-11, doi: 10.1088/0964-1726/25/11/115037
  - współpraca naukowa z The University of Auckland, Bioengineering Institute, New Zeland – wspólna publikacja z Samuelem Rossetem „Identification of Nonlinear Dielectric Elastomer Actuator Model Based on the Harmonic Balance Method” zgłoszona do IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (aktualnie w trakcie drugiego etapu recenzji).
  - współpraca naukowa z University of Southampton, United Kingdom – wspólna praca naukowa z Prof. Janem Sykulskim “A steady state solver for modelling rotating electromechanical devices exploiting the transformation from time to

position domain”, International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, Vol. 27, No. 2, 2014, pp. 213-228.

- współpraca naukowa z URWU Hochschule Ravensburg–Weingarten University of Applied Sciences, Department of Electrical Engineering and Computer Science – promowanie pracy dyplomowej “Implementation of the object detection algorithms applied in Machine Learning” realizowanej w ramach program Erasmus, 2020r.

## **6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.**

<p style="text-align: center;"><b>WYKAZ PROJEKTÓW O CHARAKTERZE DYDAKTYCZNYM PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA</b></p>
---

- 2012 – udział w projekcie „Era inżyniera - Rozbudowa potencjału rozwojowego Politechniki Poznańskiej”, opracowanie szkoleń e-learningowych na platformie moodle (SQL) Europejski Fundusz Społeczny, Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Działanie: 4.1. Wzmocnienie i rozwój potencjału dydaktycznego uczelni oraz zwiększenie liczby absolwentów kierunków o kluczowym znaczeniu dla gospodarki opartej na wiedzy
- 27-28.04.2019 – udział w projekcie Code4Green’19 – przeprowadzenie cyklu 20h zajęć pod tytułem „Warsztaty Techniki Pomiarowej” – program Fundacji Forum Inicjatyw Społecznych finansowany przez fundacje Terre des hommes oraz Volkswagen Belegschaftsstiftung
- 22-23.02.2020, 29.02.2020 – udział w projekcie Code4Green’20 – przeprowadzenie cyklu 20h zajęć pod tytułem „Warsztaty Techniki Pomiarowej” – program Fundacji Forum Inicjatyw Społecznych finansowany przez fundacje Terre des hommes oraz Volkswagen Belegschaftsstiftung
- 16.06.2011 – udział w projekcie „Kampania promocyjna na rzecz kierunków matematycznych, przyrodniczych, technicznych”, wystąpienie podczas spotkania promocyjnego, w ramach projektu systemowego działania 4.1.3 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki. Temat wystąpienia „Implementacja platformy BIOLOID na przykładzie manipulatora przemysłowego i robota kroczącego”

Organizatorzy: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Jana Amosa Komeńskiego w Lesznie,

**WYKAZ UKOŃCZONYCH SZKOLEŃ  
PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA**

- 31.03.2020 – odbyte szkolenie „Prawne aspekty legalnego przetwarzania danych osobowych”, Politechnika Poznańska
- 15.01.2019 – Stowarzyszenie Elektryków Polskich (szkolenie oraz egzamin) uprawnienia SEP w zakresie eksploatacji i dozoru (E+D)
- 17-21.12.2018 – Querying Microsoft SQL Server, szkolenie firmy Microsoft, Warszawa
- 2017-2018 – udział w serii wykładów prof. Witolda Respondka (Normandie Universite, INSA de Rouen, France) pod tytułem "Geometric Nonlinear Control Theory and Applications: controllability, linearization, and flatness".
- 27.05.2010 – szkolenie firmy Eaton Moeller pt. „Wykorzystanie aparatury firmy Eaton Moeller w przemyśle. Przykłady rozwiązań.”, Poznań
- 19.09.2012 – szkolenie Oracle Database 11g Administrator Certified Associate
- 30.07.2012 – egzamin nr MS70-450: Designing, Optimizing and Maintaining a Database Server Infrastructure using Microsoft SQL Server 2008
- 27.07.2012 – egzamin nr MS70-432: SQL Server 2008, Implementation and Maintenance

**DZIAŁALNOŚĆ ORGANIZACYJNA I PROMUJĄCA KIERUNKI TECHNICZNE  
PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA**

- 27.03.2017 – I LO, Karola Kurpińskiego 1, Leszno, prezentacja pt. „Prezentacja kierunków technicznych na Wydziale Informatyki PP”
- 27.03.2017 – LO nr 3, Plac Tadeusza Kościuszki 5, Leszno, prezentacja pt. „Prezentacja kierunków technicznych na Wydziale Informatyki PP”



- 06.03.2017 – Prywatne LO Dąbrowskiego 5, prezentacja pt. „Prezentacja kierunków technicznych na Wydziale Informatyki PP”
- 24.05.2016 – „Festiwal technologii 2016” Gimnazjum nr 9 ul. Szczepanowskiego 14, Leszno, prezentacja pt. „Robot mobilny Bioloid - przykładowe konstrukcje”
- 09.04.2016 – III LO Plac Kościuszki 5, Leszno, prezentacja pt. „Prezentacja kierunków technicznych na Wydziale Informatyki PP”
- kwiecień 2016 – przeprowadzenie serii spotkań z uczniami szkół średnich w ramach promocji kierunków technicznych Politechniki Poznańskiej (I LO, LO nr 4, Pierwsze Prywatne Liceum Ogólnokształcące), temat wystąpienia: „Prezentacja robotów zdalnych i sposobów ich sterowania”
- 13.01.2016 – Pierwsze Prywatne Liceum Ogólnokształcące, ul. Dąbrowskiego 5, 64-100 Leszno, prezentacja pt. „Sposoby programowania architektury sprzętowej mikrokontrolera ATmega CM-5”
- 13.01.2016 – I Liceum Ogólnokształcące, ul. Karola Kurpińskiego 1, 64-100 Leszno temat wystąpienia: „Prezentacja platformy robotów mobilnych Bioloid”
- 13.01.2016 – Liceum Ogólnokształcące nr 3, ul. Plac Tadeusza Kościuszki 5, 64-100 Leszno, temat wystąpienia: „Sterowniki programowalne PLC”
- 12.06.2015 – prezentacja koła naukowego Spider – stoisko z robotami mobilnymi; miejsce wystąpienia: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Lesznie. Habilitant jako opiekun koła naukowego opracował kilka konstrukcji robotów mobilnych
- 09.04.2015 – prezentacja koła naukowego Spider, miejsce wystąpienia: Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Lesznie - prezentacja multimedialna dotycząca architektura mikrokontrolera ATmega CM-5. Promocja specjalności Reprogramowalne Systemy Sterowania na kierunku Automatyka i Robotyka Politechniki Poznańskiej
- 30.03.2015 – prezentacja: „Robot mobilny Bioloid” , miejsce wystąpienia: Zespół Szkół Technicznych w Lesznie , ul. Narutowicza 74a, 64-100 Leszno
- 06.06.2014 – Miejski Ośrodek Kultury w Lesznie, wystąpienie reprezentacji koła naukowego „SPIDER” (którego habilitant jest opiekunem) podczas Festiwalu Technologii Leszno 2014, temat prezentacji: „Sterowniki PLC systemu SCADA/HMI – prezentacja przykładowych konstrukcji i języka programowania
- 21.04.2014 – prezentacja robotów mobilnych w Liceum Ogólnokształcącym we Wschowej jako wydarzenie promujące studia na kierunkach technicznych

- marzec 2012 – przeprowadzenie serii spotkań z uczniami szkół średnich w ramach promocji kierunków technicznych Politechniki Poznańskiej (LO nr 1, LO nr 3, LO nr 4). Prezentacja robotów zdalnych i sposobów ich sterowania
- 6.06.2011 – przeprowadzenie wykładu promującego kierunki techniczne w ramach projektu Leszczyńskich Dni Informatyki, wykład uzupełniony prezentacją sterowników programowalnych (gimnazjum nr 4, ul. Bolesława Prusa 33, Leszno)
- 02.06.2011 – przeprowadzenie wykładu podczas sesji doktorantów i doktorów Leszczyńskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk, temat prezentacji: „Budowa i sterowanie robotów mobilnych typu Bioloid”
- 12.04.2011 – prezentacja platformy manipulatora przemysłowego oraz organizacja wykładu promującego kierunki techniczne w ramach Festiwalu Technologii Leszno 2012 organizowanego przez stowarzyszenie Qltura (ZSE-T ul. Kilińskiego 4 Leszno)
- 31.03.2011 – wykład otwarty, poświęcony prezentacji działalności koła naukowego w budynku biblioteki PWSZ im. J. A. Komeńskiego w Lesznie, temat wystąpienia: „Robot mobilny BIOLOID – prezentacja przykładowych konstrukcji i języka programowania”

<p><b>DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA</b></p>
--

- W ramach działalności dydaktycznej habilitant jest autorem programów nauczania następujących przedmiotów prowadzonych na kierunku Automatyka i Robotyka Politechniki Poznańskiej:  
Przedmioty autorskie prowadzone na studiach I stopnia:
  - Podstawy programowania (wykład + laboratoria)
 Przedmioty autorskie prowadzone na studiach II stopnia:
  - Przemysłowe Systemy Sieciowe (wykład + laboratoria)
  - Protokoły transmisji danych (wykład + laboratoria)
  - Programowanie wybranych sterowników przemysłowych (wykład + laboratoria)
  - Przemysłowe Systemy Baz Danych (wykład + laboratoria)
- W Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Lesznie habilitant jest autorem programów nauczania następujących przedmiotów prowadzonych na kierunkach Elektrotechnika oraz Mechatronika (studia I stopnia):

- Bazy danych i technologie internetowe (wykład + laboratoria)
- Programowanie obiektowe (wykład + laboratoria)
- Systemy sterowania (wykład)
- Aplikacje mobilne (wykład + laboratoria)
- Sterowniki PLC i systemy SCADA/HMI (wykład)
- Informatyka (wykład + laboratoria)
- Technologia informacyjna (wykład + laboratoria)
- Projektowanie Systemów Sterowania (wykład + projekt)
- Techniki Programowania w Elektrotechnice (wykład + laboratoria)
- Promotor 130 prac dyplomowych inżynierskich oraz magisterskich zarówno na studiach stacjonarnych, niestacjonarnych jak i podyplomowych (55 prac dyplomowych inżynierskich oraz 75 prac dyplomowych magisterskich).
- współpraca z firmą Lenze (seria wykładów dla studentów na kierunku AiR) i pozyskanie sprzętu na preferencyjnych warunkach
- współpraca z firmą Moeller Eaton (wykłady z prezentacją sprzętową dla studentów na kierunku AiR) i pozyskanie wyposażenia laboratorium na preferencyjnych warunkach
- od 10.XII.2010 roku opiekun koła naukowego „Spider” w PWSZ im. J.A Komeńskiego w Lesznie - Rozwijanie portalu internetowego społeczności koła naukowego, umieszczanie materiałów mających na celu poszerzanie horyzontów w obszarze tematyki i działalności koła naukowego
- kompleksowe opracowanie materiałów e-learningowych dla wybranych przedmiotów na kierunku Automatyka i Robotyka
- od 2009 – uzyskany certyfikat Microsoft Certified Trainer – prowadzenie szkoleń technicznych dla pracowników największych firm technologicznych w kraju

**DZIAŁALNOŚĆ ORGANIZACYJNA  
PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA**

- 01.10.2011 - 30.06.2012 – powołany na stanowisko kierownika studiów podyplomowych „Inżynieria Komputerowa w Systemach Automatyki Przemysłowej” w Katedrze Inżynierii Komputerowej, Wydział Informatyki Politechniki Poznańskiej

- członek Komisji ds. Jakości Kształcenia dla kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej
- członek Instytutowego Zespołu ds. Promocji PWSZ im. J.A Komeńskiego w Lesznie
- członek Instytutowego Zespołu ds. Współpracy z Zagranicą PWSZ im. J.A Komeńskiego w Lesznie
- członek (kierownik modułu – Systemy Automatyki i Robotyki ) Instytutowego Zespołu ds. Jakości Kształcenia w tym Realizacji Prac Dyplomowych PWSZ im. J.A Komeńskiego w Lesznie
- założyciel i opiekun „Laboratorium Neurodynamiki i Systemów Zalgorytmizowanych” w Katedrze Inżynierii Komputerowej na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej
- założyciel i opiekun „Laboratorium Sieci Przemysłowych” w Katedrze Inżynierii Komputerowej na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej
- założyciel i opiekun laboratorium „Aplikacyjnych Systemów Sterowania” w Katedrze Inżynierii Komputerowej na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej
- założyciel i opiekun laboratorium „Elektrotechniki i Materiałów Inteligentnych” w Instytucie Automatyki i Robotyki na Wydziale Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki Politechniki Poznańskiej
- opiekun specjalności „Reprogramowalne Systemy Sterowania” w Katedrze Inżynierii Komputerowej na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej
- członek Oracle Database 11g Administrator Certified Associate
- nawiązanie współpracy z firmą z branży spożywczej SPA sp. z o.o. w celu pozyskania grantu NCiBR (rola eksperta w obszarze automatyki)
- współpraca z firmą WObit (wykłady z prezentacją sprzętową dla studentów kierunku Automatyka i Robotyka) oraz pozyskanie wyposażenia laboratorium na preferencyjnych warunkach. Prezentacja stanowiska laboratoryjnego na targach Automaticon (Warszawa).
- współpraca z firmą RW SWISS AUTOMATION Sp. z o.o. (wykłady z prezentacją sprzętową dla studentów kierunku Automatyka i Robotyka) i pozyskanie wyposażenia laboratorium na preferencyjnych warunkach (PLC SIEMENS).

**NAGRODY I WYRÓŻNIENIA  
PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA**

- 04.X. 2018 – przyznanie medalu Komisji Edukacji Narodowej (Nr 389-2018-107)
- od 2015 – Certyfikowany nauczyciel technologii bazodanowych Oracle (Oracle Database 11g Administrator Certified Associate)
- od 2012 – zdobycie certyfikatu Microsoft Certified Trainer – MCT certification No. E226-2193
- 30.07.2012 – zdobycie certyfikatu Microsoft Certified IT Professional – MCITP certification No. D966-3947
- 27.07.2012 – zdobycie certyfikatu Microsoft Certified Professional – MCP certification No. F220-0246
- 27.07.2012 – zdobycie certyfikatu Microsoft Certified Technology Specialist – MCTS, certification No. D964-3543
- wielokrotny laureat nagrody dla nauczycieli akademickich Jego Magnificencji Rektora Politechniki za wybitne osiągnięcia dydaktyczne na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej.

Poniżej zaprezentowano wyniki rankingów na najlepiej oceniany przez studentów przedmiot realizowany na I stopniu studiów stacjonarnych kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej:

- rok akademicki 2017/18 – habilitant zajął **1 miejsce**
- rok akademicki 2016/17 – habilitant zajął **1 miejsce**
- rok akademicki 2015/16 – habilitant zajął **1 miejsce**
- rok akademicki 2014/15 – habilitant zajął **1 miejsce**
- rok akademicki 2013/14 – habilitant zajął **2 miejsce**
- rok akademicki 2012/13 – habilitant zajął **1 miejsce**
- 06.11.2011 – nagroda zespołowa II stopnia za wybitne osiągnięcia dydaktyczne (zorganizowanie trzech nowych laboratoriów dydaktycznych w Katedrze Inżynierii Komputerowej na Wydziale Informatyki Politechniki Poznańskiej)
- 06.10.2010 – nagroda rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia organizacyjne uzyskane w roku akademickim 2009/2010

## 7. Inne informacje dotyczące kariery zawodowej

Habilitant obecnie posiada publikację w II etapie recenzji powiązaną tematycznie z prezentowanym w autoreferacie cyklem prac naukowych:

1. Jakub Bernat, Jakub Kołota, Samuel Rosset, „Identification of nonlinear dielectric elastomer actuator model based on the harmonic balance method”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, IF=4.943, 140 pkt MNiSW

.....  
Jakub Kołota  
.....  
(podpis wnioskodawcy)