

## AUTOREFERAT

### 1. Imię i nazwisko

Marek Długosz (ORCID: 0000-0001-6827-9149)

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- **Magister inżynier (2001)**

Studia wyższe magisterskie w latach 1996/97–2000/01 ukończone z wynikiem bardzo dobrym na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie na kierunku Automatyka i Robotyka, specjalność informatyka w sterowaniu i zarządzaniu, praca dyplomowa „*Algorytmy sterowania statkami morskimi*”, opiekun prof. dr hab. inż. Wojciech Mitkowski, obrona 03.07.2001 r (miejsce uzyskania: Kraków, rok uzyskania: 2001).

- **Doktor nauk technicznych w dyscyplinie automatyka i robotyka (2009)**

Rozprawa doktorska „*Problemy optymalizacji układów napędowych w automatyce i robotyce*”, 2008 r., stron 118, poz. literatury 64, promotor prof. dr hab. inż. Wojciech Mitkowski, wszczęcie przewodu doktorskiego 2002 r., obrona 26.10.2009 r., nadanie stopnia przez Radę Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie 29.10.2009 r (miejsce uzyskania: Kraków, rok uzyskania: 2009).

### 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

- **1999-2000** Asystent stażysta w Katedrze Automatyki i Robotyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.
- **2001-2009** Asystent w Katedrze Automatyki i Robotyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.
- **od 2009** Adiunkt w Katedrze Automatyki i Inżynierii Biomedycznej (obecnie Katedrze Automatyki i Robotyki) na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

### 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem

współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

**a) Tytuł osiągnięcia naukowego:**

**Metody projektowania i testowania układów sterowania, ze szczególnym uwzględnieniem sterowania komfortem cieplnym w budynkach mieszkalnych.**

**b) Osiągnięcie naukowe – cykl publikacji:**

Prezentowany cykl publikacji powstał w wyniku realizacji grantu badawczego pod tytułem „**Algoritmy sterowania i zarządzania budynkami mieszkalnymi**”, którego byłem pomysłodawcą oraz **kierownikiem** (okres realizacji grantu: 3 lata, budżet grantu: 601 602,00 PLN, nr rej. N N514 644440, liczba członków zespołu: 4). Grant składał się z dwóch części: naukowej i praktycznej.

W części naukowej grantu skupiono się na metodach sterowania komfortem cieplnym w lokalach mieszkalnych, modelowaniu dynamiki zmian temperatury powietrza w pomieszczeniach, odtwarzaniu niemierzalnych zmiennych stanu modelu oraz testowaniu układów regulacji systemów automatyki budynkowej.

W części praktycznej grantu zespół pod moim kierownictwem skonstruował i przetestował prototypowy zestaw bezprzewodowych urządzeń automatyki budynkowej, takich jak: czujniki temperatury i wilgotności, głowice termostatyczne, przełączniki, centralki sterujące urządzeniami oraz oprogramowanie.

Najważniejsze wyniki prac naukowych, powstałych w wyniku realizacji grantu badawczego, opublikowano w cyklu publikacji prezentowanym poniżej.

1. **Długosz M.**: *The minimum energy building temperature control*, IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2013, ISSN: 1868-4238, Springer, recenzowane artykuł konferencyjny: "System modeling and optimization : 25th IFIP TC 7 conference", s. 471–480.

[MD1]

*W pracy zaproponowałem koncepcję sterowania komfortem cieplnym w pomieszczeniach z wykorzystaniem dwóch typów regulatorów LQR: z skończonym oraz nieskończonym horyzontem czasowym sterowania. Do modelowania dynamiki zmian temperatury powietrza zastosowałem metodę skupionej pojemności cieplnej. Wykonałem wszystkie niezbędne obliczenia oraz symulacje, a całą pracę zrealizowałem samodzielnie.*

2. Skruch P., **Długosz M.**: *A thermal model for the design of the temperature control algorithms in multi-storey buildings*, 1st World multi-conference on Intelligent Building Technologies & Multimedia Management IBTMM, 2013, e-ISBN: 978-83-64275-20-3, recenzowane artykuł konferencyjny: "Proceedings of 7th congress on Intelligent building systems InBus 2013", s. 471–480.

[MD2]

*W pracy zaproponowałem nowe podejście do tworzenia modeli dynamiki zmian temperatury powietrza wewnątrz budynków, oparte na równaniach przewodności cieplnej Fouriera. Współuczestniczyłem w przeprowadzeniu wszystkich niezbędnych obliczeń oraz symulacji numerycz-*

nych, które weryfikowały poprawność rozważań przedstawionych w artykule. Mój procentowy udział w pracy szacuję na 70%.

3. Skruch P., Długosz M., Mitkowski W.: *Mathematical methods for verification of microprocessor-based PID controllers for improving their reliability*, Maintenance and Reliability, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, 2015, ISSN: 1507-2711, vol. 17 no. 3, s. 327–333.

[MD3]

**IF=2.2, IF<sup>2015</sup>=1.248, w roku publikacji lista A – 20 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 140 pkt.**

*Moja rola w procesie tworzenia pracy polegała na opracowaniu koncepcji implementacji omawianych w artykule algorytmów (algorytm 1: metoda wyboru przypadków testowych oparta na testowaniu zgodności, algorytm 2: metoda wyboru przypadków testowych oparta na testowaniu negatywnym) oraz na przeprowadzeniu symulacji numerycznych. Mój wkład merytoryczny w powstanie artykułu obejmował prace nad obydwojema algorytmami testowania. Mój procentowy udział w pracy szacuję na 40%.*

4. Długosz M., Skruch P.: *The application of fractional-order models for thermal process modelling inside buildings*, Journal of Building Physics, 2016, ISSN: 1744-2591, vol. 39 iss. 5, s. 440–451.

[MD4]

**IF=2.69, IF<sup>2016</sup>=1.204, w roku publikacji lista A – 30 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 100 pkt.**

*W pracy byłem autorem koncepcji wykorzystania modeli z ułamkowym rzędem pochodnej do opisu dynamiki zmian temperatury powietrza w pomieszczeniach. Zaplanowałem i przeprowadziłem wszystkie eksperymenty, podczas których zebrano dane do późniejszej identyfikacji. Zaproponowałem dwa rodzaje modeli z ułamkowym rzędem pochodnej, a następnie dokonałem identyfikacji parametrów tych modeli, wykorzystując zebrane dane eksperymentalne. Ponadto przeprowadziłem symulacje numeryczne w celu porównania dokładności modelowania dwóch proponowanych struktur modeli w zależności od wartości ułamkowego rzędu pochodnej. Mój procentowy udział w pracy szacuję na 80%.*

5. Długosz M.: *Aggregation of state variables in an RC model*, Building Services Engineering Research and Technology, 2018, ISSN: 0143-6244, vol. 39 iss. 1, s. 66-80.

[MD5]

**IF=1.5, IF<sup>2018</sup>=1.17, w roku publikacji lista A – 25 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 100 pkt.**

*W pracy samodzielnie opracowałem algorytm redukcji rzędu modeli dynamiki cieplnej budynków, uzyskanych poprzez zastosowanie metody skupionej pojemności cieplnej. W ramach badań działanie proponowanego algorytmu zweryfikowałem na przykładzie modelu pojedynczego*

*pomieszczenia. Ponadto, w swojej pracy zaproponowałem i udowodniłem twierdzenie, które umożliwia określenie, na podstawie struktury macierzy **A** i **C** modelu, o ile można zredukować liczbę zmiennych stanu w matematycznym modelu systemu dynamicznego, nie tracąc przy tym dokładności jego działania. Całość pracy wykonałem samodzielnie.*

6. Skruch P., **Długosz M.**: *Design of terminal sliding mode controllers for disturbed non-linear systems described by matrix differential equations of the second and first orders*, Applied Sciences (Basel), 2019, ISSN: 2076-3417, vol. 9 iss. 11 art. no. 2325, s. 1–20.

[MD6]

**IF=2.5, IF<sup>2019</sup>=2.474, w roku publikacji lista ministerialna czasopism punktowanych – 100 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 100 pkt.**

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na zaproponowaniu koncepcji struktury regulatora, przypadków testowych dla rozważanych algorytmów sterowania, przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń oraz numerycznych symulacji tych przypadków. Proponowane algorytmy sterowania zostały przetestowane na dwóch modelach nieliniowych, a wyniki symulacji potwierdziły słuszność rozważań zawartych w pracy. Mój procentowy udział w pracy szacuję na **60%**.*

7. Skruch P., **Długosz M.**: *A linear dynamic feedback controller for non-linear systems described by matrix differential equations of the second and first orders*, Measurement & Control, 2019, ISSN: 0020-2940, vol. 52 iss. 7-8, s. 913–921.

[MD7]

**IF=1.3, IF<sup>2019</sup>=1.492, w roku publikacji lista ministerialna czasopism punktowanych – 20 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 20 pkt.**

*Mój wkład w powstanie pracy polegał na zaproponowaniu przypadków testowych dla rozważanych algorytmów sterowania, przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń oraz numerycznych symulacji tych przypadków. Proponowane algorytmy sterowania zostały przetestowane na dwóch modelach nieliniowych, a wyniki symulacji potwierdziły słuszność rozważań zawartych w pracy. Mój procentowy udział w pracy szacuję na **50%**.*

8. Skruch P., **Długosz M.**: *A sliding mode controller design for thermal comfort in buildings*, Engineering Transactions, 2019, ISSN: 0867-888X, vol. 67, s. 475-489.

[MD8]

**W roku publikacji lista ministerialna czasopism punktowanych – 70 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 70 pkt.**

*W pracy zaproponowałem zastosowanie regulatora ślizgowego do sterowania temperaturą powietrza w pomieszczeniach. Przeprowadziłem niezbędne obliczenia oraz przygotowałem eksperyment numeryczny, który potwierdził skuteczność działania rozważanego regulatora. Mój procentowy udział w pracy szacuję na **60%**.*

9. **Długosz M.**, Baranowski J.: *Observer design for estimation of nonobservable states in buildings*, Mathematical Problems in Engineering, 2020, ISSN: 1024-123X, art. no. 3404951, s. 1-8.

[MD9]

**IF<sup>2020</sup>=1.305**, w roku publikacji lista ministerialna czasopism punktowanych – **40 pkt.**, w aktualnym wykazie czasopism naukowych – **20 pkt.**

*W pracy zaproponowałem trzy koncepcje doboru macierzy obserwatora odtwarzającego niemierzalne zmienne stanu liniowego systemu dynamicznego. Przeprowadziłem niezbędne obliczenia oraz symulacje numeryczne, które zilustrowały proponowane rozwiązania przedstawione w artykule. Mój procentowy udział szacuję na 80%.*

Optymalne sterowanie komfortem cieplnym w pomieszczeniach mieszkalnych nie jest zadaniem łatwym. Jednym ze wskaźników jakości jest komfort użytkowników – chcemy, aby był jak największy. Drugim ważnym wskaźnikiem jakości jest zużycie energii do sterowania – chcemy, aby było jak najmniejsze. Złożoność obiektu sterowania i wynikające z tego właściwości fizyczne, np. rozkład temperatury w pomieszczeniach, właściwości materiałów, z których zbudowane jest pomieszczenie, a także występowanie zdarzeń niedeterministycznych, np. zmiany temperatury zewnętrznej czy obecność w lokalu określonej liczby osób, powodują, że sterowanie takim obiektem, które zapewni optymalne wartości wskaźników jakości, jest zadaniem złożonym. Z jednej strony układ sterowania, np. temperaturą w pomieszczeniach, powinien zapewniać odpowiedni komfort osobom w nim przebywającym, z drugiej — dąży się do minimalizacji kosztów takiego sterowania. Z punktu widzenia automatyki, teorii sterowania i metod optymalizacji są to zagadnienia bardzo ciekawe i warte rozważań, co też było przyczynkiem do tego, iż w swoich pracach badawczych postanowiłem zająć się tą tematyką, otrzymując grant badawczy pod tytułem „**Algorytmy sterowania i zarządzania budynkami mieszkalnymi**”, którego byłem pomysłodawcą oraz **kierownikiem**. Oprócz zadań naukowych, zespół pod moim kierownictwem miał za zadanie zaprojektować i wykonać prototypy urządzeń wykonawczych (np. sensory, wyłączniki, regulatory oświetlenia, głowice termostatyczne) dla systemów sterowania automatyką budynkową. Nowością, którą miały się charakteryzować wykonane urządzenia, było zastosowanie technologii bezprzewodowej komunikacji (np. Z-Wave, ZigBee) pomiędzy nimi.

Pierwszą pracą zrealizowaną w ramach projektu badawczego była publikacja konferencyjna [MD1], w której rozważany jest układ sterowania temperaturą powietrza wewnątrz budynku, zaprojektowany z myślą o zapewnieniu komfortu użytkownikom i minimalizacji zużycia energii.

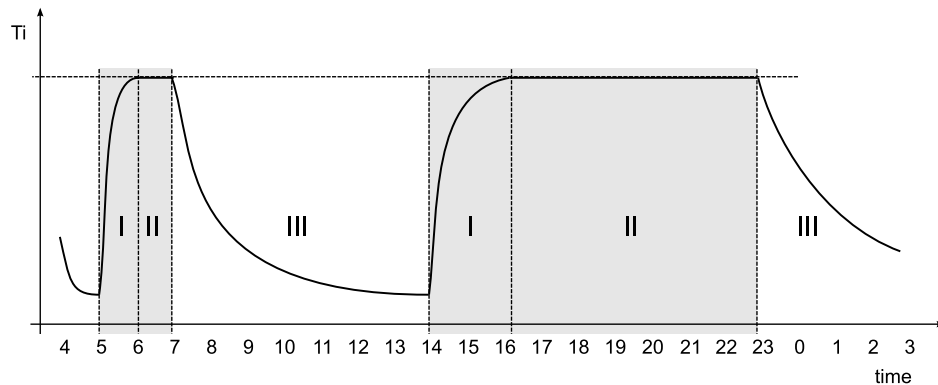
W artykule [MD1] wykorzystano liniowe równania różniczkowe do modelowania temperatury powietrza wewnątrz budynku oraz jego elementów konstrukcyjnych, takich jak ściany zewnętrzne, sufity i podłogi. Równania modelu otrzymano poprzez zastosowanie metody skupionej pojemności cieplnej a otrzymana równania modelu można zapisać w postaci macierzowo-wektorowej jako [1], [2]:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{Z}\mathbf{z}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (2)$$

gdzie:  $\mathbf{A}$  – macierz stanu,  $\mathbf{B}$  – macierz sterowania,  $\mathbf{Z}$  – macierz zakłóceń,  $\mathbf{C}$  – macierz wyjścia,  $\mathbf{x}(t)$  – wektor stanu,  $\mathbf{z}(t)$  – wektor zakłóceń,  $\mathbf{u}(t)$  – wektor sterowania,  $\mathbf{y}(t)$  – wektor wyjścia.

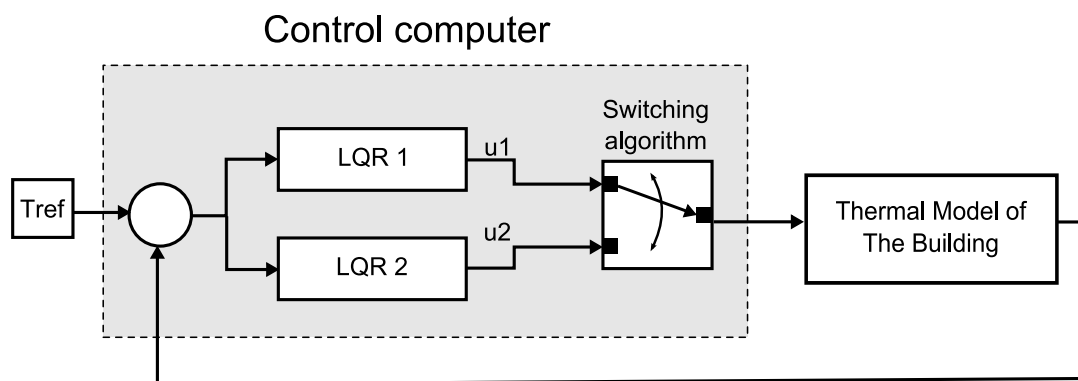
W pracy [MD1] przyjęto pewne wyidealizowane zmiany temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń w horyzoncie czasowym 24 godzin które są przedstawione na wykresie 1.



Rysunek 1: Przykładowe, dzienne zmiany temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń. Źródło: [MD1].

Pierwsza faza to moment, w którym temperatura powietrza wewnątrz pomieszczenia powinna osiągnąć wartość zadaną w określonym, skończonym czasie. Druga faza to okres, w którym temperatura powietrza powinna być stabilizowana na określonym poziomie. Trzecia faza to czas, kiedy temperatura nie musi być stabilizowana ani kontrolowana. Oczywiście są to jedynie przybliżone zmiany temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń, ale generalnie wszystkie bardziej złożone schematy zmian temperatury można opisać, wykorzystując trzy fazy zaznaczone na rysunku 1 symbolami I, II i III. Analizując zmianę wartości temperatury powietrza w czasie, można zauważyć, że w fazie I temperatura rośnie bardzo szybko, aby osiągnąć w określonym (lub najkrótszym) czasie wartość zadaną. W fazie II wartość temperatury powietrza powinna być już tylko utrzymywana na wartości zadanej. Są to dwa różne zadania sterowania: pierwsze to nadążanie za wartością zadaną, a drugie to stabilizacja w zadanym punkcie pracy.

W pracy [MD1] zaproponowałem układ sterowania, zob. rys. 2, który składa się z dwóch rodzajów regulatorów.



Rysunek 2: Schemat blokowy układu sterowania z dwoma regulatorami. Źródło: [MD1].

Obydwa regulatory zastosowane w układzie sterowania są typu *Linear-Quadratic Regulator* (LQR). Pierwszy z regulatorów, oznaczony na rysunku 2 jako LQR 1, ma za zadanie ustalić temperaturę powietrza na zadanym poziomie w skończonym, zdefiniowanym czasie (faza I). Parametry regulatora

zostały wyznaczone w taki sposób, aby minimalizować wskaźnik jakości:

$$J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \frac{1}{2} \int_0^{t_k} (\mathbf{x}(t)^\top \mathbf{W} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}(t)^\top \mathbf{R} \mathbf{u}(t)) dt + \frac{1}{2} \mathbf{x}(t_k)^\top \mathbf{F} \mathbf{x}(t_k). \quad (3)$$

Macierze  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{R}$  to macierze wagowe i muszą spełniać warunki:  $\mathbf{W} = \mathbf{W}^\top \geq 0$ ,  $\mathbf{F} = \mathbf{F}^\top \geq 0$ ,  $\mathbf{R} = \mathbf{R}^\top > 0$ , gdzie  $t_k$  jest czasem sterowania. Macierze modelu  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{B}$  muszą być stabilizowalne, a macierze  $\mathbf{W}$  i  $\mathbf{A}$  muszą być wykrywalne. Sterowanie minimalizujące wskaźnik jakości (3) jest dane równaniem [3]:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^\top \mathbf{K}(t) \mathbf{x}(t) \quad (4)$$

gdzie macierz  $\mathbf{K}$  jest rozwiązaniem macierzowego równania różniczkowego Riccatiego (5) [3]:

$$\dot{\mathbf{K}}(t) = \mathbf{K}(t) \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^\top \mathbf{K}(t) - \mathbf{A}^\top \mathbf{K}(t) - \mathbf{K}(t) \mathbf{A} - \mathbf{W}. \quad (5)$$

Regulator dany równaniem 4 jest regulatorem niestacjonarnym, ponieważ wartości macierzy  $\mathbf{K}$  zmieniają się w czasie.

Drugi z regulatorów, oznaczony na rysunku 2 jako LQR 2, ma za zadanie stabilizować temperaturę powietrza na zadanym poziomie (faza II). Parametry regulatora zostały wyznaczone w taki sposób, aby minimalizować wskaźnik jakości:

$$J(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \int_0^\infty (\mathbf{x}(t)^\top \mathbf{W} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}(t)^\top \mathbf{R} \mathbf{u}(t)) dt \quad (6)$$

Macierze  $\mathbf{W}$  i  $\mathbf{R}$  muszą spełniać takie same warunki jak macierze wskaźnika jakości (3) [3].

Sterowanie minimalizujące wskaźnik jakości (6) jest dane równaniem [3]:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^\top \mathbf{K} \mathbf{x}(t) \quad (7)$$

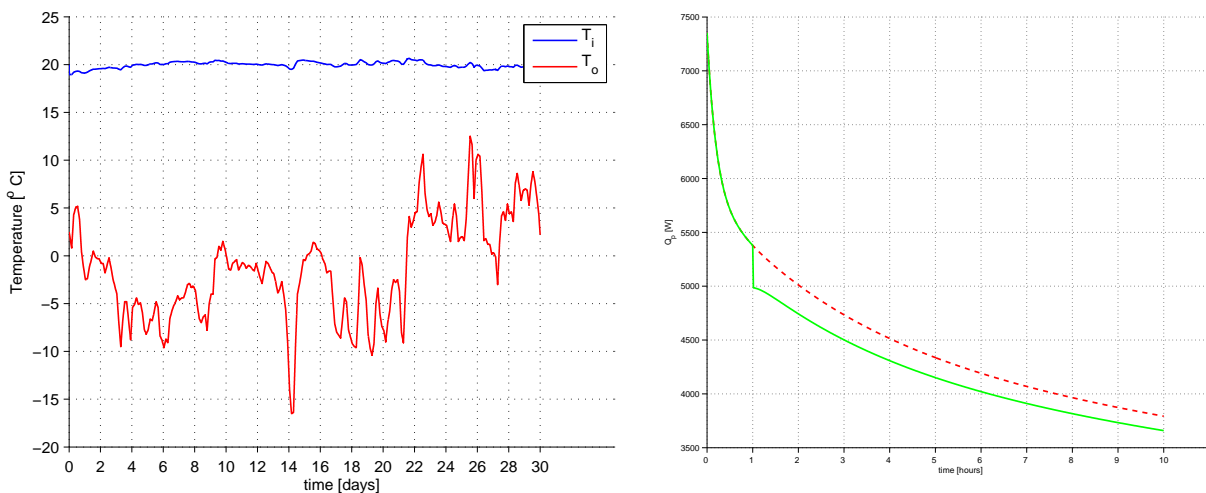
gdzie macierz  $\mathbf{K}$  jest rozwiązaniem macierzowego algebraicznego równania Riccatiego (8) [3]:

$$\mathbf{K} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^\top \mathbf{K} - \mathbf{A}^\top \mathbf{K} - \mathbf{K} \mathbf{A} - \mathbf{W} = 0. \quad (8)$$

Regulator dany równaniem 7 jest regulatorem stacjonarnym, ponieważ wartości macierzy  $\mathbf{K}$  nie zmieniają się w czasie.

W pracy [MD1] zaproponowałem, aby w zależności od tego, czy temperatura powietrza w pomieszczeniu ma zmienić swoją wartość na wartość zadaną, czy też powinna być utrzymywana na ustalonym poziomie, układ sterowania korzystał z regulatora LQR 1 lub LQR 2. Taki podział wynika z właściwości zastosowanych regulatorów LQR. Regulator LQR 1 (ze skończonym horyzontem sterowania) bardzo dobrze sprawdza się w zadaniach nadążania za wartością zadaną. Regulator LQR 2 (z nieskończonym horyzontem sterowania) jest wykorzystywany do stabilizacji wartości sterowanej na zadanym poziomie. Działanie regulatora LQR można modyfikować, dobierając wartości macierzy wagowych  $\mathbf{W}$  i  $\mathbf{R}$ . Zmieniając wartości w macierzy  $\mathbf{W}$ , można zmieniać dokładność działania regulatora, natomiast zmieniając wartości w macierzy  $\mathbf{R}$ , można decydować, ile energii będzie wykorzystane do osiągnięcia zadanego punktu pracy systemu.

Na wykresach 3a i 3b przedstawiono wyniki symulacji numerycznych rozważanego w artykule układu sterowania temperaturą powietrza w pomieszczeniach.



(a) symulacja długokresowa stabilizacji temperatury (b) porównanie sterowania  $\mathbf{u}(t)$  rozważanego układu powietrza sterowania oraz pojedynczego regulatora LQR

Rysunek 3: Wyniki symulacji rozważanego układu sterowania temperaturą powietrza. Źródło: [MD1].

Wykres 3a przedstawia wyniki symulacji długookresowej stabilizacji temperatury powietrza w pomieszczeniach. Można zaobserwować, że pomimo znaczących zmian zewnętrznej temperatury powietrza ( $T_o$  – linia czerwona), temperatura powietrza wewnątrz pomieszczenia ( $T_i$  – linia niebieska) jest utrzymywana na zadanym poziomie 20 stopni. Drugi wykres, 3b, przedstawia przebieg sygnału sterowania  $\mathbf{u}(t)$ , na którym można zaobserwować moment przełączenia pomiędzy regulatorami LQR 1 i LQR 2. Energia konieczna do sterowania jest równa polu powierzchni zawartemu pomiędzy osią poziomą wykresu 3b a sygnałem  $\mathbf{u}(t)$ . Wykorzystanie regulatorów LQR 1 i LQR 2 w odpowiednich warunkach umożliwia komfortowe korzystanie z pomieszczeń budynku, jednocześnie zapewniając oszczędność energii w porównaniu do zastosowania pojedynczego regulatora LQR, co ma istotne znaczenie dla obniżenia kosztów ogrzewania.

Rezultaty wyżej wymienionych badań i eksperymentów które zrealizowałem były prezentowane przeze mnie na konferencji „System modeling and optimization : 25th IFIP TC 7 conference, CSMO 2011” w Berlinie.

W artykule konferencyjnym [MD2] opisałem inny sposób otrzymywania modeli matematycznych dynamiki zmian temperatury w pomieszczeniach, który wykorzystuje równania przewodnictwa cieplnego Josepha Fouriera [4]. Model matematyczny otrzymany w wyniku zastosowania tego podejścia składa się z liniowych równań różniczkowych i jest dany wzorem:

$$\mathbf{E}\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{Z}\mathbf{z}(t) \quad (9)$$

Wektor stanu  $\mathbf{x}(t)$  zawiera wartości temperatur w modelowanych pomieszczeniach, wektor sterowań  $\mathbf{u}(t)$  zawiera sterowania, np. grzejniki lub inne źródła ciepła w danym pomieszczeniu, a wektor  $\mathbf{z}(t)$  modeluje zakłócenia w modelu. Model może być tworzony na poziomie pomieszczenia lub mieszkania, a liczba pomieszczeń lub mieszkań określa rząd modelu dynamicznego. Poszczególne równania dynamiki zmian temperatury  $T_i$  w  $i$ -tym pomieszczeniu można otrzymać, korzystając z równania



przewodnictwa cieplnego:

$$c\rho V_i \frac{dT_i}{dt} = Q_i^{\text{in}}(t) - Q_i^{\text{out}}(t) \quad (10)$$

gdzie  $c$  jest właściwą pojemnością cieplną powietrza,  $\rho$  jest gęstością powietrza,  $V_i$  oznacza objętość pomieszczenia,  $T_i^0$  oznacza początkową temperaturę wewnątrz pomieszczenia,  $Q_i^{\text{in}}$  to moc cieplna dostarczona do pomieszczenia,  $Q_i^{\text{out}}$  to moc cieplna tracona przez pomieszczenie, a  $t > 0$ . W dalszych rozważaniach, w przypadku mocy cieplnej dostarczonej do pomieszczeń, będziemy uwzględniać tylko ciepło pochodzące z instalacji grzewczej. Model można łatwo rozbudować o ciepło pochodzące z promieniowania słonecznego oraz o wewnętrzne zyski ciepłne. Zakładamy również, że temperatura powietrza  $T_i$  w pomieszczeniu  $i$  o objętości  $V_i$  jest taka sama w każdym punkcie przestrzeni pomieszczenia.

Całkowita moc cieplna tracona przez pomieszczenie jest równa sumie ciepła traconego na skutek przewodnictwa oraz wentylacji:

$$Q_i^{\text{out}}(t) = Q_i^{\text{tc}}(t) + Q_i^{\text{ve}}(t) \quad (11)$$

gdzie  $Q_i^{\text{tc}}$  oznacza moc cieplną traconą na skutek przewodnictwa za pośrednictwem ścian, okien, drzwi, sufitu itp., a  $Q_i^{\text{ve}}$  oznacza moc cieplną traconą przez wentylację.

Moc cieplna tracona na skutek przewodnictwa cieplnego może być wyrażona jako [5]:

$$Q_i^{\text{tc}}(t) = \sum_{j=-1}^n A_{i,j} U_{i,j} (T_i(t) - T_j(t)) \quad (12)$$

gdzie  $A_{i,j}$  to pole powierzchni rozgraniczającej pomieszczenia  $i$  oraz  $j$ , a  $U_{i,j}$  to wypadkowy współczynnik przenikalności cieplnej odpowiadający powierzchni  $A_{i,j}$ . We wzorach przyjęto, że pomieszczenie oznaczone numerem  $j = -1$  oznacza grunt, a  $j = 0$  oznacza przestrzeń otaczającą budynek. Wypadkowy współczynnik przenikalności cieplnej może być wyliczony jako średnia ważona ze współczynników przenikalności cieplnej dla elementów konstrukcyjnych wchodzących w skład powierzchni  $A_{i,j}$  [6]:

$$U_{i,j} = \frac{\sum_k A_{i,j,k} U_{i,j,k}}{\sum_k A_{i,j,k}} \quad (13)$$

gdzie  $\sum_k A_{i,j,k} = A_{i,j}$ .

Moc cieplna tracona na skutek wentylacji, z opcją odzyskiwania ciepła, może być wyrażona za pomocą następującego równania [7]:

$$Q_i^{\text{ve}}(t) = (1 - \beta) c \rho q_i (T_i(t) - T_0(t)) \quad (14)$$

gdzie  $q_i$  – strumień przepływu powietrza,  $\beta$  – współczynnikiem określającym efektywność odzyskiwania ciepła przez wymiennik ciepła.

Uwzględniając równania (10)–(14) w równaniu stanu (9), porządkując i grupując określone jego elementy, otrzymujemy ostatecznie:

$$\mathbf{E} = c\rho \text{diag}(V_1, V_2, \dots, V_n) \quad (15)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\sum_{j=1}^n A_{1,j} U_{1,j} & A_{1,2} U_{1,2} & \dots & A_{1,n} U_{1,n} \\ A_{2,1} U_{2,1} & -\sum_{j=1}^n A_{2,j} U_{2,j} & \dots & A_{2,n} U_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n,1} U_{n,1} & A_{n,2} U_{n,2} & \dots & -\sum_{j=1}^n A_{n,j} U_{n,j} \end{bmatrix} - (1 - \beta) c \rho \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \mathbf{I}_n, \quad (16)$$

$$\mathbf{B} = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (17)$$

Elementy wektora macierzy sterowania  $\mathbf{B}$  możemy interpretować w ten sposób, że  $b_i = 1$ , jeśli  $i$ -te pomieszczenie posiada ogrzewanie (lub inne źródło ciepła), a  $b_i = 0$  w przeciwnym przypadku. Model możemy rozszerzyć o równanie wyjścia:

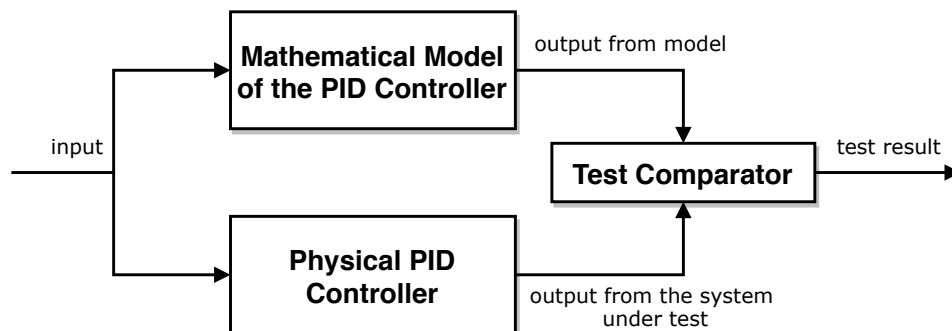
$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (18)$$

gdzie elementy macierzy  $\mathbf{C} = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_n)$  mają wartość  $c_i = 1$  jeśli  $i$ -te pomieszczenie ma czujnik pomiarowy temperatury, a  $c_i = 0$  w przeciwnym przypadku.

Konstrukcja modelu matematycznego dynamiki zmian temperatury powietrza w budynkach, przedstawiona w artykule [MD2], bazuje na metodzie skupionej pojemności cieplnej przy jednoczesnym wykorzystaniu podstawowych zasad termodynamiki oraz praktycznych metod inżynierskich dotyczących obliczania parametrów cieplnych elementów konstrukcyjnych budynku. Jedną z głównych zalet przedstawionego podejścia jest możliwość łatwego i jednoznacznego wyznaczenia parametrów modelu na podstawie geometrii budynku i właściwości termicznych materiałów budowlanych. W rezultacie formalna identyfikacja parametrów modelu teoretycznie nie jest wymagana. Podejście to prowadzi do modeli matematycznych, które mogą być wykorzystywane zarówno do projektowania algorytmów sterowania temperaturą, jak i do obliczania całkowitego zużycia energii.

Rezultaty badań opisanych w pracy [MD2] były prezentowane przeze mnie na konferencji „Intelligent building systems InBus 2013” w Krakowie.

Jedną z cech modelu matematycznego zmian temperatury powietrza w budynkach mieszkalnych jest jego duża bezwładność (tj. zmiany w systemie zachodzą stosunkowo wolno). Z jednej strony jest to korzystna właściwość, ponieważ układ sterowania nie musi być systemem czasu rzeczywistego. Z drugiej jednak strony praktyczne testowanie i weryfikacja układów sterowania mogą trwać bardzo długo i być bardzo kosztowne. Rozwiązaniem tego problemu może być wykorzystanie technik, które w literaturze określane są jako *model-based system development & testing* [8], [9]. W tego rodzaju technikach testowania do weryfikacji poprawności działania projektowanego układu sterowania wykorzystuje się modele matematyczne testowanego systemu. Zagadnienia związane z *model-based system development & testing* są przedmiotem pracy [MD3] której byłem współautorem.



Rysunek 4: Koncepcja systemu testowego z modelem pełniącym funkcję układu weryfikującego. Źródło: [MD3].

Rysunek 4 przedstawia koncepcję systemu testowego, w którym działanie zaprojektowanego i zaimplementowanego (np. w mikrokomputerze) regulatora PID jest porównywane z modelem matematycznym regulatora.

Klasyczne równanie regulatora PID ma postać:

$$u(t) = K \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (19)$$

gdzie  $K$  jest współczynnikiem wzmacnienia,  $T_i$  stała całkowania, a  $T_d$  stała różniczkowania. Stosując podstawienie,  $w_1(t) = \int_0^t e(\tau) d\tau$  oraz  $w_2(t) = \dot{w}_1(t)$ , równanie (19) można przeformułować do postaci macierzowo-wektorowej:

$$\dot{\mathbf{w}}(t) = \mathbf{E}\mathbf{w}(t) + \mathbf{F}u(t), \quad \mathbf{w}(0) = 0 \quad (20)$$

gdzie  $\mathbf{w} = [w_1(t) \quad w_2(t)]^T \in \mathbf{W} \subset \mathbb{R}^2$ .

Zbiór przypadków testowych oznaczymy jako:

$$\mathbf{T}_{\text{case}}^{(j)} = \{T^{(j)}, u^{(j)}(\cdot), w^{(j)}(\cdot)\} \quad (21)$$

gdzie  $u^{(j)} : [0, T^{(j)}] \rightarrow \mathbb{R}$  jest funkcją wejściową i  $\mathbf{w}^{(j)} : [0, T^{(j)}] \rightarrow \mathbb{R}^2$  oczekiwaną funkcją wyjściową.

Sygnal wejściowy jest identyczny dla obu bloków (*Mathematical Model of the PID Controller* i *Physical PID Controller*), zob. rys. 4, natomiast porównanie wyników działania i decyzja, czy fizyczna realizacja regulatora PID działa tak samo jak model matematyczny regulatora, wykonywane jest w bloku *Test Comparator* (zob. rys. 4). Jedną z przykładowych praktycznych implementacji bloku *Test Comparator* dla zbioru przypadków testowych może być następująca:

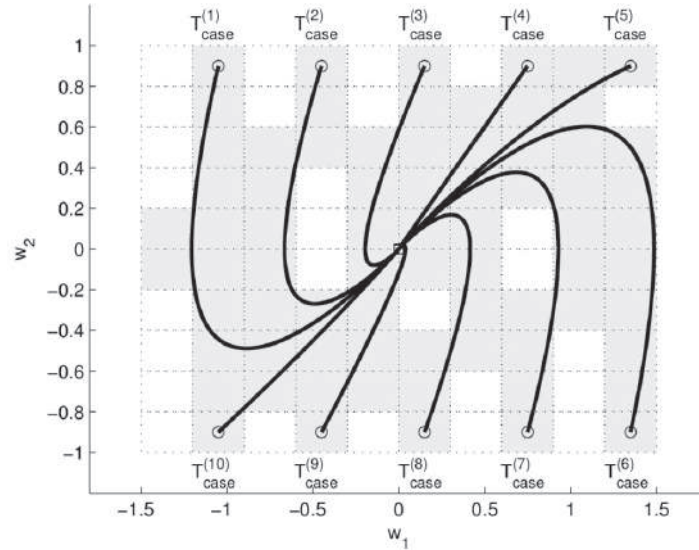
$$z(\mathbf{T}_{\text{case}}^{(j)}) = \begin{cases} 0 & \text{if } \forall_{t \in [0, T^{(j)}]} \|\mathbf{w}^{(j)}(t) - \mathbf{w}_s^{(j)}(t)\| < \epsilon \mathbf{w}^{(j)}(t) \\ 1 & \text{w pozostałym przypadku} \end{cases} \quad (22)$$

gdzie wynik testu  $z = 0$  oznacza, że test został spełniony, a  $z = 1$ , że test nie został spełniony na poziomie tolerancji  $\epsilon > 0$ .

Kluczową kwestią przeprowadzonej weryfikacji jest wygenerowanie odpowiedniego zbioru przypadków testowych, który powinien być możliwie najmniejszy, ale jednocześnie pokrywać w zadanym stopniu zmodyfikowaną przestrzeń stanów  $\mathbf{W}$ . Przedstawiona w omawianej pracy [MD3] strategia polega na sprawdzeniu, czy specyfikacja funkcjonalna w formie równania (20) została poprawnie zaimplementowana. W literaturze proces ten określa się różnie jako testowanie zgodności [10], testowanie poprawności [11] lub testowanie funkcjonalne [12]. Algorytm nr 1, zaprezentowany w pracy [MD3], służy do generowania takiego zbioru przypadków testowych dla weryfikowanych układów dynamicznych na podstawie modeli matematycznych.

Rysunek 5 przedstawia trajektorie  $\mathbf{w}(t)$  testowanego układu sterowania z regulatorem PID, którego parametry zostały zaburzone o około 20% (co może odpowiadać np. błędom zaokrągleń w systemach stałoprzecinkowych). Przykładowe wygenerowane trajektorie pokrywają zmodyfikowaną przestrzeń  $\mathbf{W}$  w około 70%.

Drugi z prezentowanych w pracy [MD3] algorytmów formułuje zadanie testowania jako problem optymalizacyjny, którego rezultatem, w przypadku gdy testowany system działa poprawnie, jest pusty zbiór  $\mathbf{T}_{\text{case}} = \emptyset$ , natomiast w przeciwnym wypadku  $\mathbf{T}_{\text{case}}$  zawiera zbiór przypadków, dla których



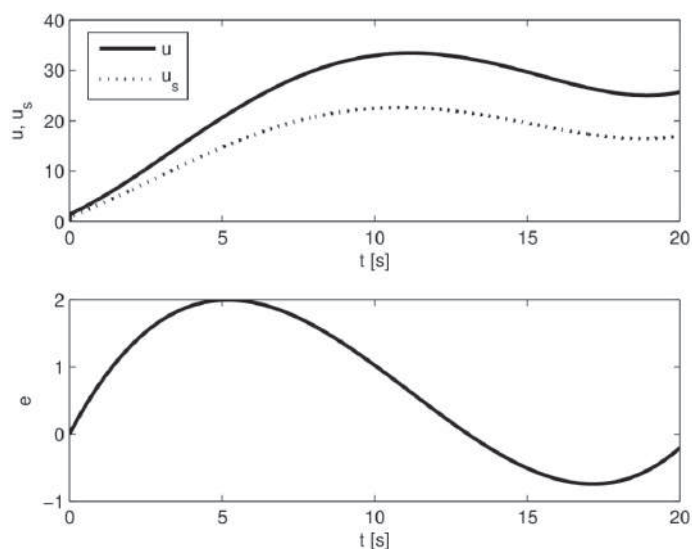
Rysunek 5: Trajektorie  $\mathbf{w}^j$ ,  $j = 1, 2, \dots, 10$  i elementy zmodyfikowanej przestrzeni  $\mathbf{W}$  pokryte przez zbiór przypadków testowych  $T_{case}^{(j)}$  (zaznaczone kolorem szarym). Źródło: [MD3].

testowany system działa błędnie (tzw. testowanie negatywne). W algorytmie tym zbiór przypadków testowych  $T_{case}$  otrzymujemy w wyniku maksymalizacji następującego wskaźnika  $J(\mathbf{e})$ :

$$\max_{\mathbf{e} \in \mathbb{E}_{ad}} J(\mathbf{e}) = \max_{\mathbf{e} \in \mathbb{E}_{ad}} \int_0^T (\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_s(t))^T \mathbf{Q} (\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_s(t)) dt, \quad (23)$$

gdzie  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > 0$  jest macierzą dodatnio określoną zawierającą współczynniki wagowe dla wskaźnika jakości  $J(\mathbf{e})$ ,  $\mathbb{E}_{ad}$  oznacza zbiór dopuszczalnych funkcji wejściowych,  $\mathbf{u}_s(\cdot) \in \mathbb{U}$  jest wektorem składającym się z funkcji wyjściowych uzyskanych z testowanego rzeczywistego urządzenia. Dodatkowo, zbiór  $\mathbb{E}_{ad}$  może zawierać fizyczne ograniczenia testowanego systemu (np. maksymalna amplituda sygnału sterowania), które zawsze występują w rzeczywistych układach sterowania. Główną zaletą metody testowania opartej na algorytmie 2 jest zmniejszenie liczby przypadków testowych, których wyszukiwanie odbywa się za pomocą procedury optymalizacji. Przykładowe elementy zbioru testowego  $T_{case}$  wygenerowane przy użyciu algorytmu nr 2 pokazano na rysunku 6.

Testowanie układów sterowania z wykorzystaniem modeli matematycznych i podejścia *model-based system development & testing* ma jeszcze jedną zaletę – umożliwia testowanie „nietypowych” z punktu widzenia obiektu sytuacji, takich jak podgrzanie lub schłodzenie budynku do temperatur, które można traktować jako anomalie, oraz badanie zachowania systemu sterowania w takich krytycznych sytuacjach.



Rysunek 6: Przykładowy przypadek testowy wygenerowany przy użyciu algorytmu 2. Źródło: [MD3].

Dokładne modelowanie zmian temperatury powietrza wewnątrz budynków nie jest możliwe ze względu na złożoność zachodzących zjawisk fizycznych. Na temperaturę powietrza wewnątrz pomieszczenia wpływa szereg czynników deterministycznych, takich jak włączony grzejnik czy otwarte okno, oraz niedeterministycznych, takich jak ciepło od słońca, temperatura i siła wiatru. Możliwe jest więc opracowanie jedynie przybliżonych modeli matematycznych zmian temperatury wewnątrz budynku [13], [14], [15]. W pracy [MD4] opisano sposób wykorzystania rachunku różniczkowego z pochodnymi rzędu ułamkowego do zamodelowania dynamiki zmian temperatury powietrza wewnątrz budynku. Rachunek różniczkowy rzędu ułamkowego może być traktowany jako uogólnienie pojęć całki i różniczki w klasycznym rachunku całkowym i różniczkowym [MD4].

$${}_a\mathcal{D}_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & \text{Re}(\alpha) > 0, \\ 1 & \text{Re}(\alpha) = 0, \\ \int_a^t (d\tau)^{-\alpha} & \text{Re}(\alpha) < 0, \end{cases} \quad (24)$$

gdzie  $a$  i  $t$  oznaczają granice operacji całkowania,  $\alpha \in \mathbb{Z}$  oznacza ułamkowy rząd pochodnej. W praktycznych obliczeniach wyników działania operatora  ${}_a\mathcal{D}_t^\alpha$  korzysta się z różnych definicji tego operatora. Do najczęściej stosowanych należą definicje: Riemanna-Liouville, Caputo oraz Grünwalda-Letnikova [16], [17]. W pracy [MD4] rozważane są dwa rodzaje modeli rzędu ułamkowego o następujących transmitancjach:

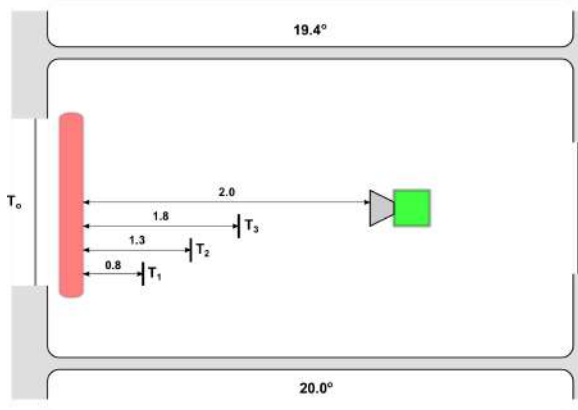
$$G(s) = \frac{b_0}{a_1 s^\alpha + a_0}, \quad \alpha \in [0.1; 2] \quad (25)$$

$$G(s) = \frac{b_0}{a_2 s^{\alpha_2} + a_1 s^{\alpha_1}}, \quad \alpha_1, \alpha_2 \in [0.1; 2] \quad (26)$$

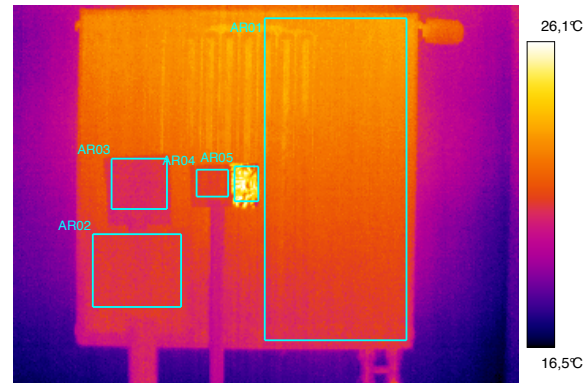
gdzie  $a_0, a_1, a_2 \in \mathbb{R}$  oraz  $b_0 \in \mathbb{R}$  to parametry transmitancji, a  $\alpha, \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}$  oznaczają wartości rzędu dla pochodnych ułamkowych (na podstawie definicji Caputo). Sygnałem wejściowym w przypadku obu transmitancji jest temperatura elementu grzejącego (kaloryfera), a sygnałem wyjściowym jest temperatura powietrza w danym punkcie pomieszczenia.

W pracy [MD4] opisałem również praktyczny eksperyment, który przeprowadziłem w celu weryfikacji rozważań teoretycznych dotyczących możliwości wykorzystania rachunku różniczkowego z pochodnymi rzędu ułamkowego do modelowania dynamiki zmian temperatury powietrza wewnątrz pomieszczenia. Dane pomiarowe niezbędne do identyfikacji parametrów proponowanych modeli matematycznych zostały zarejestrowane podczas tego eksperymentu.

Na rysunku 7a przedstawiono rozmieszczenie grzejnika, punktów pomiarowych temperatury powietrza ( $T_1, T_2, T_3$ ) oraz samej kamery termowizyjnej. Rysunek 7b przedstawia przykładowy obraz z kamery termowizyjnej wraz z zaznaczonymi obszarami, w których mierzone były temperatury.



(a) Schemat układu pomiarowego



(b) Przykładowe zdjęcie z kamery termowizyjnej z zaznaczonymi obszarami pomiarowymi.

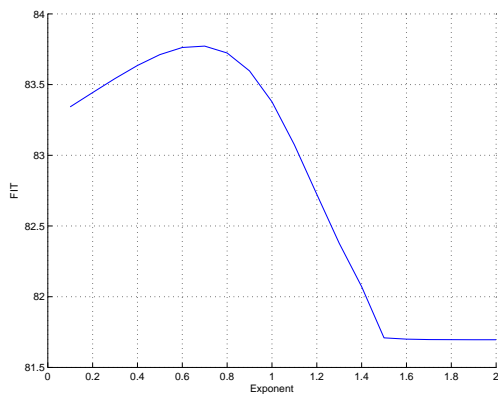
Rysunek 7: Pomiar temperatury podczas eksperymentu. Źródło: [MD4].

W pracy [MD4] przebadłem również, jaki wpływ na dokładność rozważanych modeli matematycznych mają parametry  $\alpha$  w równaniu (25) oraz  $\alpha_1, \alpha_2$  w równaniu (26). Do oceny jakości dopasowania proponowanych modeli matematycznych do danych pomiarowych wykorzystano współczynnik dopasowania (ang. *fit index*) zdefiniowany jako [18]:

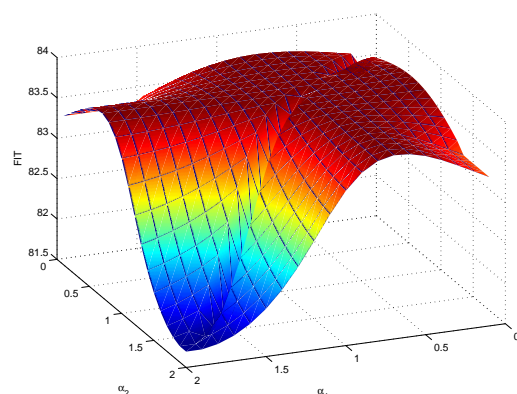
$$\text{FIT} = \left( 1 - \frac{|y - \hat{y}|}{|y - \bar{y}|} \right) \times 100\% \quad (27)$$

gdzie  $y$  to mierzone wyjście identyfikowanego systemu,  $\hat{y}$  to wyjście z modelu, a  $\bar{y}$  to wartość średnia mierzonego wyjścia systemu  $y$ . Współczynnik (27) ma taką właściwość, że jego wartość jest tym bliższa 100%, im dokładniejszy jest zidentyfikowany model (dla wartości 100% zidentyfikowany model jest dokładnie taki sam jak rzeczywisty system). Przyjęto, że parametr  $\alpha$  w równaniu (25) przyjmuje wartości z przedziału  $[0.1; 2]$  z krokiem co 0.1 i dla każdej z tych wartości przeprowadzono identyfikację parametrów  $a_0, a_1, b_0$  (rzęd pochodnej ułamkowej  $\alpha$  nie jest identyfikowany). W taki sam sposób przebadano wpływ parametrów  $\alpha_1, \alpha_2$  występujących w równaniu modelu (26).

Na wykresie 8a przedstawiono zmianę współczynnika dopasowania w funkcji parametru  $\alpha$  dla modelu danego równaniem (25), czyli  $\text{FIT}(\alpha)$ . Na kolejnym wykresie 8b przedstawiono zmianę współczynnika dopasowania (27) w funkcji parametrów  $\alpha_1$  oraz  $\alpha_2$  dla modelu danego równaniem (26), czyli  $\text{FIT}(\alpha_1, \alpha_2)$ . Można zauważyć, że w obu przypadkach istnieją pewne przedziały wartości parametrów  $\alpha$  oraz  $\alpha_1, \alpha_2$ , dla których współczynnik dopasowania (27) osiąga wartość maksymalną.



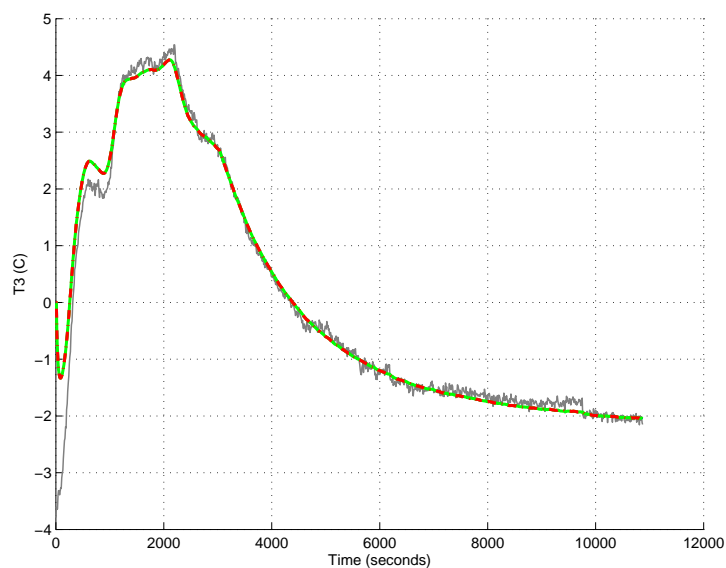
(a) dla modelu (25)



(b) dla modelu (26)

Rysunek 8: Zmiana współczynnika FIT (27) w funkcji parametrów modelu  $\alpha$  oraz  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ . Źródło: [MD4].

Na wykresach 9 porównano działanie obydwu modeli, równania (25) i (26) dla najlepszego zestawu parametrów otrzymanych w wyniku ich optymalizacji.



Rysunek 9: Odpowiedzi identyfikowanych modeli (25) (linia zielona) i (26) (linia czerwona) dla najlepszego dopasowania parametrów. Źródło: [MD4].

Rezultaty wyżej wymienionych badań i eksperymentów które zrealizowałem były prezentowane przeze mnie na konferencji „System modeling and optimization : 26th IFIP TC 7 conference, 2013” w Klagenfurtcie.

W trakcie prac badawczych nad zagadnieniami sterowania komfortem cieplnym w budynkach zauważyłem, że modele dynamiki zmian temperatury powietrza, otrzymane w wyniku zastosowania metody skupionej pojemności cieplnej, nie posiadają właściwości obserwowalności. Z drugiej strony, w rzeczywistym obiekcie, jakim jest pomieszczenie, powinno być możliwe odtworzenie war-

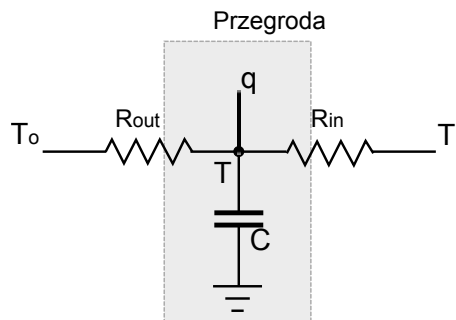
tości wszystkich zmiennych stanu. To skłoniło mnie do bliższego przyjrzenia się temu problemowi, czego efektem była praca [MD5], w której przedstawiłem rozwiązanie problemu braku właściwości obserwowalności modeli dynamiki zmian temperatury powietrza, otrzymanych w wyniku zastosowania metody skupionej pojemności cieplnej.

Jedną z metod stosowanych do modelowania dynamiki zmian temperatury powietrza wewnątrz budynków jest metoda skupionej pojemności cieplnej [19]. W wyniku zastosowania tej metody otrzymujemy model matematyczny w postaci układu liniowych równań różniczkowych pierwszego rzędu, co w znaczący sposób ułatwia późniejszą analizę i projektowanie układów sterowania.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{Z}\mathbf{z}(t) \quad (28)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (29)$$

gdzie:  $\mathbf{A}$  – macierz stanu,  $\mathbf{B}$  – macierz sterowania,  $\mathbf{Z}$  – macierz zakłóceń,  $\mathbf{C}$  – macierz wyjścia,  $\mathbf{x}(t)$  – wektor stanu,  $\mathbf{z}(t)$  – wektor zakłóceń,  $\mathbf{u}(t)$  – wektor sterowania,  $\mathbf{y}(t)$  – wektor wyjścia, oraz:  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^r$ ,  $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times r}$ ,  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ . Budynki mieszkalne składają się z elementów konstrukcyjnych, które charakteryzują się pewnymi przestrzennymi parametrami, od wartości których zależą przepływy ciepła pomiędzy nimi. W metodzie skupionej pojemności cieplnej nie modelujemy przestrzennego rozkładu temperatur poszczególnych elementów. Temperatura elementu rozpatrywana jest jako temperatura w jednym, skupionym punkcie. W takim przypadku wszystkie parametry przestrzenne mogą być traktowane jako pewne parametry skupione, ponieważ znika zmienna przestrzenna, co prowadzi do znacznego uproszczenia równań [20]. Kolejną zaletą metody skupionej pojemności cieplnej jest możliwość interpretowania otrzymanego modelu dynamiki zmian temperatury jako układu elektrycznego RC. Rysunek 10 przedstawia jednowęzłowy model przegrody oraz równoważny obwód elektryczny RC tej przegrody.



Rysunek 10: Jedno węzłowy model przegrody RC. Źródło: [MD5].

Poszczególne parametry jedno węzłowego modelu przegrody oznaczają:  $R_{out}$  i  $R_{in}$  – oporności cieplne elementu,  $C$  – pojemność cieplna elementu,  $T_o$ ,  $T_i$  – odpowiednio temperatury zewnętrzna i wewnętrzna,  $T$  modelowana temperatura. Pojemność cieplna elementu jest interpretowana jako pojemność kondensatora, opór cieplny jako rezystancja, natomiast napięcia w obwodzie elektrycznym są interpretowane jako temperatury. Zmiana temperatury  $T$  wewnątrz przegrody jest opisana następującym równaniem różniczkowym:

$$C\dot{T} = (T_o - T)/R_{out} + (T_i - T)/R_{in} + q \quad (30)$$



gdzie  $q$  – dodatkowe źródło ciepła. Przykładowe równania modelu dynamiki zmian temperatury powietrza dla pojedynczego pomieszczenia, otrzymane w wyniku zastosowania metody skupionej pojemności cieplnej, są dane następującymi równaniami (31)–(37) [21]:

$$C_1 \dot{T}_1 = (-U_{1,1} - U_{1,2})T_1 + U_{1,1}T_i + U_{1,2}T_o \quad (31)$$

$$C_2 \dot{T}_2 = (-U_{2,1} - U_{2,2})T_2 + U_{2,1}T_i + U_{2,2}T_o \quad (32)$$

$$C_3 \dot{T}_3 = (-U_{3,1} - U_{3,2})T_3 + U_{3,1}T_i + U_{3,2}T_{z1} \quad (33)$$

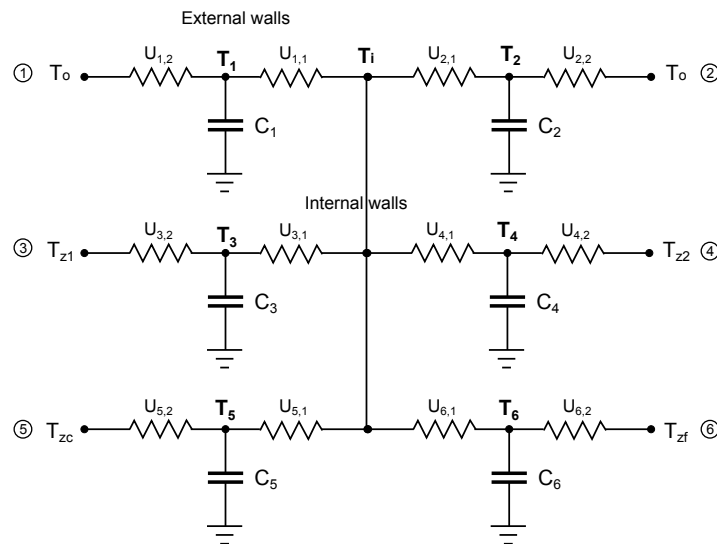
$$C_4 \dot{T}_4 = (-U_{4,1} - U_{4,2})T_4 + U_{4,1}T_i + U_{4,2}T_{z2} \quad (34)$$

$$C_5 \dot{T}_5 = (-U_{5,1} - U_{5,2})T_5 + U_{5,1}T_i + U_{5,2}T_{zc} \quad (35)$$

$$C_6 \dot{T}_6 = (-U_{6,1} - U_{6,2})T_6 + U_{6,1}T_i + U_{6,2}T_{zf} \quad (36)$$

$$C_i \dot{T}_i = U_{1,1}T_1 + U_{2,1}T_2 + U_{3,1}T_3 + U_{4,1}T_4 + U_{5,1}T_5 + U_{6,1}T_6 + (-U_{1,1} - U_{2,1} - U_{3,1} - U_{4,1} - U_{5,1} - U_{6,1})T_i + Q_p + Q_g \quad (37)$$

w których:  $C_i$  – pojemności cieplne powietrza i elementów konstrukcyjnych [ $\text{JK}^{-1}$ ],  $Q_g$  – przypadkowe zyski ciepła w przestrzeni (pomieszczeniu) [W],  $Q_p$  – moc instalacji cieplnej [W],  $Q_s$  – energia słoneczna [W],  $U_{i,j}$  – współczynnik przenikania (przewodzenia) ciepła elementów konstrukcyjnych (uwzględnione są również wymiary geometryczne elementu) [ $\text{WK}^{-1}$ ],  $T_i$  – temperatury elementów oraz powietrza wewnątrz i na zewnątrz pomieszczenia [K]. Modelowane pomieszczenie składa się z dwóch przegród zewnętrznych, zgodnie z równaniami (31) i (32), dwóch przegród wewnętrznych (33) i (34), podłogi (36) oraz sufitu (35). Model ten może być przedstawiony w postaci analogicznego układu elektrycznego RC, jak na rysunku 11. Na tym schemacie przenikalności cieplne modelowane są przez rezystory, pojemności cieplne przez kondensatory, a źródła ciepła jako źródła prądowe.



Rysunek 11: Równoważny model elektryczny pomieszczenia. Źródło: [MD5].

Jedną z wad metody skupionej pojemności cieplnej jest duża liczba równań stanu – na przykład dla pojedynczego pomieszczenia jest to aż 7 równań różniczkowych. Dodatkowo, modele takie nie posiadają właściwości obserwowalności, która umożliwia odtworzenie niemierzalnych wartości zmiennych stanu (np. temperatury wewnątrz przegród). Brak takiej informacji uniemożliwia stosowanie szerokiej grupy regulatorów zależnych od stanu (np. regulatora LQR). Rozwiązanie problemu braku wła-

ściwości obserwowalności modelu dynamiki zmian temperatury powietrza, otrzymanego w wyniku zastosowania metody skupionej pojemności cieplnej, zostało podane przeze mnie w pracy [MD5].

**Twierdzenie 1.** *Dany jest system dynamiczny opisany równaniami (28) i (29) z parametrem  $m = 1$ . Niech macierze  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{C}$  systemu dynamicznego mają następującą strukturę:*

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \cdots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & 0 & \cdots & a_{2n} \\ 0 & 0 & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (38)$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 1]_{1 \times n} \quad (39)$$

Jeżeli w macierzy  $\mathbf{A}$  istnieją elementy  $a_{ii}$  których wartości są równe, tj.  $a_{ii} = a_{kk}$  dla  $i \neq k$  to

$$\text{rank}([\mathbf{C} \ \mathbf{C}\mathbf{A} \ \cdots \ \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1}]^T) = n - w \quad (40)$$

gdzie  $w$ —liczba elementów  $a_{ii}$  których wartości są identyczne.

Twierdzenie 1 znajduje zastosowanie w przypadku modeli dynamiki zmian temperatury powietrza, otrzymanych z wykorzystaniem metody skupionej pojemności cieplnej, ponieważ struktura macierzy  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{C}$  w tych modelach jest taka sama jak w (38) i (39). Jeżeli modelowane pomieszczenie jest zbudowane z przegród o różnych parametrach fizycznych, to model otrzymany w wyniku zastosowania metody skupionej pojemności cieplnej dla takiego pomieszczenia będzie posiadał właściwość obserwowalności. W praktyce jednak taka sytuacja jest rzadko spotykana. Twierdzenie 1 odpowiada również na pytanie, jaki może być minimalny rząd modelu matematycznego dynamiki zmian temperatury powietrza w budynkach, otrzymany w wyniku zastosowania metody skupionej pojemności cieplnej. Dowód twierdzenia 1 zamieściłem w pracy [MD5].

Brak właściwości obserwowalności modelu dynamiki zmian temperatury powietrza w pomieszczeniach nie wynika z charakteru samego układu fizycznego, ale z sposobu, w jaki metoda skupionej pojemności cieplnej generuje równania modelu. To spostrzeżenie pozwoliło mi opracować sposób, w jaki należy zmodyfikować równania otrzymane w wyniku zastosowania metody skupionej pojemności cieplnej tak, aby otrzymany model dynamiczny zmian temperatury powietrza w pomieszczeniach posiadał właściwość obserwowalności [MD5].

Rozważmy przykładowy model dynamiki cieplnej zmian temperatury powietrza pojedynczego pomieszczenia, otrzymany w wyniku zastosowania metody skupionej pojemności cieplnej, dany równaniami (31)–(37). Równania od (31) do (36) mogą być przedstawione w postaci układu równań różniczkowych (28) i równania wyjścia (29), gdzie odpowiednie macierze  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{C}$  mają strukturę (38) i (39).

Równania (33) i (34) opisują dynamikę zmian temperatury w ścianach wewnętrznych. Okazuje się, że jeśli przegrody wewnętrzne mają identyczne parametry fizyczne, takie jak ciepło właściwe  $c$  i współczynnik właściwy przenikania ciepła  $u$  (*thermal transmittance*), to współczynniki przy zmiennych  $T_3$  i  $T_4$  są takie same, ponieważ:

$$\frac{U_3}{C_3} = \frac{A_3 u}{\rho A_3 d c} = \frac{u}{\rho d c} = \frac{A_4 u}{\rho A_4 d c} = \frac{U_4}{C_4} = \beta_1 \quad (41)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość materiału, z jakiego zbudowana jest przegroda [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $A_i$  – pole powierzchni  $i$ -tej przegrody [ $\text{m}^2$ ],  $d$  – grubość przegrody [ $\text{m}$ ],  $c$  – ciepło właściwe przegrody (*specific heat capacity*) [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ],  $u$  – współczynnik właściwy przenikania ciepła (*thermal transmittance* [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]) oraz zachodzi zależność:

$$U_3 = U_{3,1} + U_{3,2}$$

$$U_4 = U_{4,1} + U_{4,2}$$

Konsekwencją tego jest pojawienie się w macierzy  $\mathbf{A}$  układu na głównej przekątnej takich samych wartości, co z kolei prowadzi do tego, iż w macierzy obserwowalności:

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{CA} \quad \mathbf{CA}^2 \quad \dots \quad \mathbf{CA}^{n-1}] \quad (42)$$

pojawiają się liniowo zależne kolumny  $i$ , na podstawie twierdzenia 1, rząd macierzy obserwowalności  $\mathbf{Q}$  jest mniejszy od rzędu układu  $n$ , czyli układ nie jest obserwowalny. W rozważanym przypadku modelu dynamiki cieplnej budynku dwie współrzędne wektora stanu  $\mathbf{x}(t)$  są nierozróżnialne, co w konsekwencji prowadzi do utraty właściwości obserwowalności. Rozważmy równania (33) i (34). Pomnóżmy obie strony tych równań odpowiednio przez współczynniki  $U_{3,1}$  i  $U_{4,1}$ , otrzymując:

$$U_{3,1}\dot{T}_3 = -\frac{U_3}{C_3}U_{3,1}T_3 + \frac{U_{3,1}}{C_3}U_{3,1}T_i + \frac{U_{3,2}}{C_3}U_{3,1}T_{z1} \quad (43)$$

$$U_{4,1}\dot{T}_4 = -\frac{U_4}{C_4}U_{4,1}T_4 + \frac{U_{4,1}}{C_4}U_{4,1}T_i + \frac{U_{4,2}}{C_4}U_{4,1}T_{z2} \quad (44)$$

Dodając do siebie równania (43) i (44) oraz wykorzystując fakt (41), otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(U_{3,1}T_3 + U_{4,1}T_4) &= -\beta_1(U_{3,1}T_3 + U_{4,1}T_4) + \\ &\frac{U_{3,1}}{C_3}U_{3,1}T_i + \frac{U_{3,2}}{C_3}U_{3,1}T_{z1} + \\ &\frac{U_{4,1}}{C_4}U_{4,1}T_i + \frac{U_{4,2}}{C_4}U_{4,1}T_{z2} \end{aligned} \quad (45)$$

Zdefiniujmy nową zmienną:

$$P_1 = U_{3,1}T_3 + U_{4,1}T_4 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{K}} \text{ K} \right] = [\text{W}] \quad (46)$$

wtedy równanie (45) można zapisać jako:

$$\dot{P}_1 = -\beta_1 P_1 + \frac{U_{3,2}}{C_3}U_{3,1}T_{z1} + \frac{U_{4,2}}{C_4}U_{4,1}T_{z2} + \left( \frac{U_{3,1}^2}{C_3} + \frac{U_{4,1}^2}{C_4} \right) T_i \quad (47)$$

Uwzględniając powyższe przekształcenia, równanie (37) przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} C_i T_i &= U_{1,1}T_1 + U_{2,1}T_2 + P_1 + U_{5,1}T_5 + U_{6,1}T_6 + \\ &(-U_{1,1} - U_{2,1} - U_{3,1} - U_{4,1} - U_{5,1} - U_{6,1})T_i \end{aligned} \quad (48)$$

Podobnie można postąpić z równaniami (35) i (36), które modelują zmiany temperatury w podłodze i suficie (przy założeniu identyczności ich parametrów fizycznych). Ostatecznie układ równań modelujący dynamikę ciepłą budynku przyjmuje postać:

$$C_1 \dot{T}_1 = (-U_{1,1} - U_{1,2})T_1 + U_{1,1}T_i + U_{1,2}T_o \quad (49)$$

$$C_2 \dot{T}_2 = (-U_{2,1} - U_{2,2})T_2 + U_{2,1}T_i + U_{2,2}T_o \quad (50)$$

$$\dot{P}_1 = -\beta_1 P_1 + \frac{U_{3,2}}{C_3} U_{3,1} T_{z1} + \frac{U_{4,2}}{C_4} U_{4,1} T_{z2} + \left( \frac{U_{3,1}^2}{C_3} + \frac{U_{4,1}^2}{C_4} \right) T_i \quad (51)$$

$$\dot{P}_2 = -\beta_2 P_2 + \frac{U_{5,2}}{C_5} U_{5,1} T_{zc} + \frac{U_{6,2}}{C_6} U_{6,1} T_{zf} + \left( \frac{U_{5,1}^2}{C_5} + \frac{U_{6,1}^2}{C_6} \right) T_i \quad (52)$$

$$C_i T_i = U_{1,1}T_1 + U_{2,1}T_2 + P_1 + P_2 + U_{5,1}T_5 + U_{6,1}T_6 + (-U_{1,1} - U_{2,1} - U_{3,1} - U_{4,1} - U_{5,1} - U_{6,1})T_i \quad (53)$$

Liczba równań nowego modelu wynosi cztery (o dwa równania mniej niż w modelu pierwotnym). Dodatkowo, model dany równaniami od (49) do (53) posiada właściwość obserwowalności.

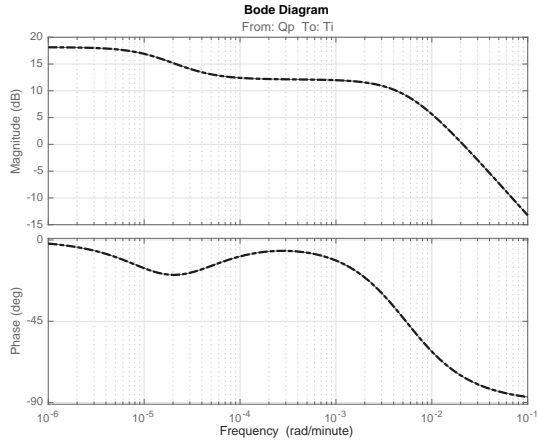
Porównywanie układów dynamicznych nie jest zadaniem prostym. Dwa układy dynamiczne, których odpowiedzi na ten sam sygnał wejściowy są identyczne, mogą działać zupełnie inaczej w zamkniętym układzie sterowania. Wprowadza się różnego rodzaju metryki, przy pomocy których można określić, jak bardzo podobne w działaniu są różne systemy dynamiczne. Jedną z takich metryk jest metryka Vinnicombe (*Vinnicombe metric*), zdefiniowana jako [22]:

$$d(G_1, G_2) = \sup_{\omega} \frac{|G_1(i\omega) - G_2(i\omega)|}{\sqrt{(1 + |G_1(i\omega)|^2)(1 + |G_2(i\omega)|^2)}} \quad (54)$$

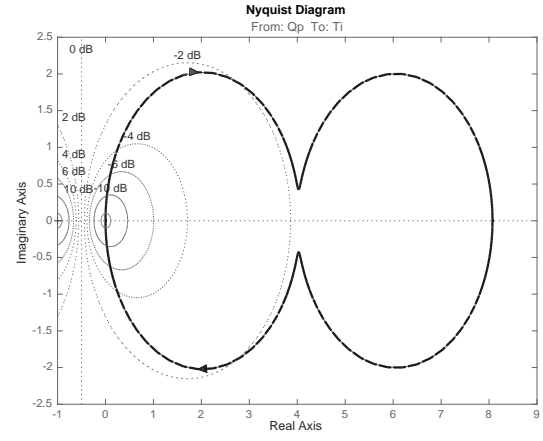
gdzie  $G_1$  i  $G_2$  to transmitancje porównywanych systemów dynamicznych, a  $0 \leq d(G_1, G_2) \leq 1$ . Liczba  $d(G_1, G_2)$  może być interpretowana jako miara różnicy między dwoma systemami dynamicznymi, których transmitancje są dane jako  $G_1$  i  $G_2$ . Im bardziej wartość  $d(G_1, G_2)$  zbliża się do zera, tym bardziej porównywane systemy dynamiczne są do siebie podobne. Dla modeli dynamiki cieplnej opisywanego pomieszczenia wartość metryki Vinnicombe wynosi [23, 24]:

$$d(G_1, G_2) = 9.7559 \times 10^{-4} \quad (55)$$

Tak mała wartość  $d(G_1, G_2)$  potwierdza, że systemy  $G_1$  i  $G_2$  posiadają te same właściwości dynamiczne. Na wykresach 12a i 12b przedstawiono porównanie charakterystyk częstotliwościowych modelu oryginalnego, równania (31)–(37), i modelu zredukowanego, równania (49)–(53).



(a) charakterystyka Bodego



(b) charakterystyka Nyquista

Rysunek 12: Porównanie charakterystyk częstotliwościowych modelu (31)–(37) (linia przerywana) i zredukowanego (49)–(53) (linia ciągła). Źródło: [MD5].

Oprócz zagadnień związanych z modelowaniem dynamiki zmian temperatury powietrza w pomieszczeniach oraz właściwości tych modeli, kolejnym istotnym elementem jest sterowanie realizowane przez regulatory. W automatyce stosowane są różnego rodzaju regulatory, od najprostszych regulatorów proporcjonalnych, przez regulatory PID, po bardziej złożone układy regulacji, takie jak np. regulatory predykcyjne, rozmyte, hybrydowe czy też regulatory neuronowe. W pracy [MD6] rozważałem zastosowanie regulatorów typu *terminal sliding mode control system* (TSMC) dla dwóch klas nieliniowych układów dynamicznych. Tego typu regulatory TSMC są popularne ze względu na swoje właściwości, takie jak odporność na zmiany parametrów systemu i zakłócenia zewnętrzne [25], [26]. Badane w pracy [MD6] układy dynamiczne są opisane przez macierzowo-wektorowe nieliniowe równania różniczkowe rzędu drugiego i pierwszego (56), (57):

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{F}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x})\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{H}(\mathbf{x})\mathbf{u}(t) + \mathbf{z}(\ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, t) \quad (56)$$

$$\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{H}(\mathbf{x})\mathbf{u}(t) + \mathbf{z}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, t) \quad (57)$$

gdzie  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{X} \subset \mathbb{R}^n$  stan systemu,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{U} \subset \mathbb{R}^r$  sterowanie,  $\mathbf{z}(\ddot{\mathbf{x}}, \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}, t) \in \mathbb{R}^n$  zakłócenia,  $\mathbf{F} : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \supset \Omega \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $\mathbf{G} : \mathbb{R}^n \supset \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{H} : \mathbb{R}^n \supset \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{n \times r}$ ,  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$  otoczenie punktu  $(\mathbf{0} \in \mathbb{R}^n)$ ,  $\mathbb{X}$  przestrzeń stanów systemu,  $\mathbb{U}$  przestrzeń sterowań.

Obie klasy systemów zawierają zewnętrzne zakłócenia zdefiniowane przez funkcję  $\mathbf{z}$ , które są nieznane, ale ograniczone. Rozważane w pracy [MD6] powierzchnie „ślizgowe” (*sliding surfaces*) są określone przez stan systemu oraz zadaną trajektorię, po której chcemy, aby poruszał się sterowany system. Dla systemów pierwszego rzędu (57) powierzchnia „ślizgowa” jest dana następującym równaniem (58):

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_d(t) \quad (58)$$

gdzie  $\mathbf{x}_d(t)$  zadana trajektoria systemu. Sterowanie umożliwiające „poruszanie się” systemu (57) po

zadanej powierzchni „ślizgowej” (58) jest dane równaniem:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) = & \mathbf{H}(\mathbf{x})^{-1} (\mathbf{G}(\mathbf{x}) + \dot{\mathbf{x}}_d(t)) - \mathbf{H}(\mathbf{x})^{-1} \mathbf{S}(t) \mathbf{z}^{\max} \\ & - \sigma \mathbf{H}(\mathbf{x})^{-1} \mathbf{S}(t) \mathbf{s}_\eta(t) - \gamma \mathbf{H}(\mathbf{x})^{-1} \mathbf{s}(t), \end{aligned} \quad (59)$$

gdzie  $\sigma > 0$  i  $\gamma > 0$  dodatnie współczynniki oraz:

$$\mathbf{S}(t) = \text{diag} (\text{sgn} (s_1(t)), \text{sgn} (s_2(t)), \dots, \text{sgn} (s_n(t))), \quad (60)$$

$$\mathbf{s}_\eta(t) = \left[ |s_1(t)|^\eta \quad |s_2(t)|^\eta \quad \dots \quad |s_n(t)|^\eta \right]^T, \quad (61)$$

gdzie  $0 < \eta < 1$ .

Sterowanie  $\mathbf{u}$ , dane równaniem (59), zależy od trzech parametrów:  $\sigma$ ,  $\gamma$  i  $\eta$ . Optymalne wartości tych parametrów można uzyskać, minimalizując funkcję celu, która jest zdefiniowana w taki sposób, aby sterowany system dynamiczny (57) osiągał zadany cel. Zaprezentowany w pracy [MD6] sposób sterowania nieliniowymi systemami dynamicznymi pierwszego rzędu może mieć również zastosowanie do sterowania komfortem cieplnym w budynkach mieszkalnych. Dynamika zmian temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń jest modelowana za pomocą układu liniowych równań różniczkowych, które zawierają się w klasie nieliniowych modeli rozważanych w pracy [MD6]. Zamieszczony w artykule przykład sterowania układem RC (model dynamiki zmian temperatury powietrza w pomieszczeniach może być interpretowany jako elektryczny układ RC) potwierdza, iż proponowane sterowanie (59) spełnia swoją funkcję. Co więcej, może ono być wykorzystane do sterowania nieliniowym układem RC, w którym pojemność kondensatorów nie jest stała, co w odniesieniu do modelu dynamiki zmian temperatury powietrza w pomieszczeniach może być interpretowane jako zmiana pojemności cieplnej przegród pomieszczenia.

Rezultatem prowadzonych prac badawczych nad wykorzystaniem regulatorów typu *linear dynamic feedback controller* (LDFC) jest publikacja [MD7]. W pracy tej wykazano, że dla pewnej klasy układów dynamicznych opisanych równaniami:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{x}) \dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{G}(\mathbf{x}) &= \mathbf{H}(\mathbf{x}) \mathbf{u}(t), \\ \mathbf{x}(0) &= \mathbf{x}_0. \end{aligned} \quad (62)$$

gdzie  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$  wektor stanu,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^r$  wektor sterowań,  $\hat{\mathbf{x}}_0 \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^n$  warunek początkowy,  $\mathbf{F}(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta}) = [f_{ij}(\boldsymbol{\xi}, \boldsymbol{\eta})]_{n \times n}$ ,  $\mathbf{G}(\boldsymbol{\xi}) = [g_i(\boldsymbol{\xi})]_{n \times 1}$ ,  $\mathbf{H}(\boldsymbol{\xi}) = [h_{ij}(\boldsymbol{\xi})]_{n \times n}$  macierze których elementy to funkcje nielinowe.

Wyjście systemu dynamicznego (62) jest zdefiniowane jako:

$$\mathbf{y}(t) = \int_0^{\mathbf{x}(t)} \mathbf{H}(\boldsymbol{\xi})^T d\boldsymbol{\xi}, \quad (63)$$

i można je interpretować jako pracę wykonaną w polu sił  $\mathbf{H}$  w przestrzeni  $\mathbb{R}^n$  na cząstce poruszającej się z punktu początkowego 0 do punktu końcowego  $\mathbf{x}(t)$ . W przypadku, gdy elementy macierzy  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{n \times r}$  są stałe, równanie wyjścia (63) upraszcza się do postaci:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}^T \mathbf{x}(t). \quad (64)$$

Regulatora dla takiej klasy systemów dynamicznych dany jest równaniem:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}(\mathbf{w}(t) + \mathbf{y}(t)), \quad (65)$$

i ma on postać regulatora proporcjonalnego z macierzą wzmocnienia  $\mathbf{K}$  zastosowaną do wyjścia systemu (64) oraz zmiennej stanu  $\mathbf{w}(t)$  części dynamicznej regulatora, opisanej równaniami:

$$\dot{\mathbf{w}}(t) + \mathbf{A}\mathbf{w}(t) = \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad \mathbf{w}(0) = \mathbf{w}_0 \quad (66)$$

gdzie  $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{r \times r}$ ,  $\mathbf{K} = \mathbf{K}^T > 0$  dodatnio określona macierze,  $\mathbf{w}_0 \in \mathbb{R}^r$  warunek początkowy,  $\mathbf{A} = \text{diag}[a_i]$ ,  $\mathbf{B} = \text{diag}[b_i]$ ,  $a_i > 0$ ,  $b_i > 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, r$ .

W pracy [MD7] wykazałem, że sterowanie  $\mathbf{u}(t)$  (65) stabilizuje system (62) w zadanym punkcie równowagi. Sygnał sterowania  $\mathbf{u}(t)$  jest zależny od dwóch składowych: wyjścia systemu  $\mathbf{y}(t)$ , które musi być odpowiednio zdefiniowane za pomocą macierzy  $\mathbf{H}$ , oraz zmiennej stanu  $\mathbf{w}(t)$ , niezależnej od zmiennej stanu systemu  $\mathbf{x}(t)$ . Wartości macierzy  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  i wektora wartości początkowych  $\mathbf{w}_0$  (definiującego dynamiczną część sygnału sterowania  $\mathbf{u}(t)$ ) można uzyskać np. przez zastosowanie jednej z wielu metod optymalizacji z odpowiednio dobranym wskaźnikiem jakości.

W pracach [MD6] i [MD7] rozważane są regulatory inne niż standardowe, które stosuje się w systemach sterowania komfortem cieplnym w budynkach. Pomimo że, jak pokazano w pracy [MD5], model matematyczny opisujący dynamikę zmian temperatury powietrza w budynkach ma postać układu liniowych równań różniczkowych, jest to jedynie pewne przybliżenie rzeczywistego obiektu, którym chcemy sterować. Stąd motywacja do poszukiwań regulatorów, które mogą mieć potencjał do wykorzystania w układach sterowania komfortem cieplnym, w których stosuje się nieliniowe modele dynamiki.

W artykule [MD8] zaproponowałem wykorzystanie regulatorów rozważanych w pracach [MD6] i [MD7] do sterowania temperaturą powietrza wewnątrz budynków. Model dynamiki zmian temperatury w pomieszczeniach przyjmuje postać układu liniowych równań różniczkowych, uzyskanych na podstawie równań przewodnictwa cieplnego, który można zapisać w postaci macierzowo-wektorowej [MD2]:

$$\mathbf{E}\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{Z}\mathbf{z}(t) \quad (67)$$

Zakłada się, że w każdym pomieszczeniu znajduje się urządzenie grzewcze, co oznacza, że  $\mathbf{B} = \mathbf{I}$ , gdzie  $\mathbf{I}$  to macierz jednostkowa. W modelu (67) uwzględniono również wpływ zakłóceń na układ za pomocą macierzy  $\mathbf{Z}$  oraz wektora  $\mathbf{z}(t)$ . W pracy [MD8] zaproponowałem regulator ślizgowy (*sliding mode controller*, SMC) do sterowania temperaturą powietrza w poszczególnych pomieszczeniach. Płaszczyzna ślizgowa regulatora jest zdefiniowana jako:

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_d(t) \quad (68)$$

Wektor  $\mathbf{x}_d(t)$  oznacza zadaną temperaturę powietrza w każdym z pomieszczeń. Sterowanie  $\mathbf{u}(t)$ , które zapewnia istnienie trybu ślizgowego wokół zdefiniowanej powierzchni (68), wyraża się jako:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{A}\mathbf{x}(t) - \mathbf{E}\dot{\mathbf{x}}_d(t)) - \mathbf{B}^{-1}\mathbf{S}(t)\mathbf{z}^{\max} - \sigma\mathbf{B}^{-1}\mathbf{S}(t)\mathbf{s}_\eta(t) - \gamma\mathbf{B}^{-1}\mathbf{s}(t) \quad (69)$$

gdzie  $\sigma > 0, \gamma > 0$  to dodatnie współczynniki,  $\mathbf{z}^{\max} \in \mathbb{R}^n$  jest wektorem, którego elementy stanowią górne granice odpowiadających im elementów z  $\mathbf{Zz}(t)$ , takie że:

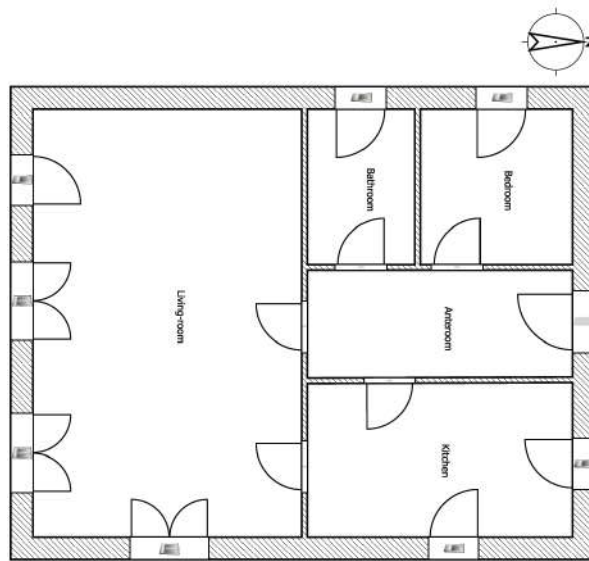
$$\mathbf{z}^{\max} = \max_{t \geq 0} \mathbf{Zz}(t) \geq \mathbf{0} \quad (70)$$

$$\mathbf{S}(t) = \text{diag}(\text{sgn}(s_1(t)), \text{sgn}(s_2(t)), \dots, \text{sgn}(s_n(t))) \quad (71)$$

$$\mathbf{s}_\eta(t) = [|s_1(t)|^\eta \quad |s_2(t)|^\eta \quad \dots \quad |s_n(t)|^\eta]^\top \quad (72)$$

gdzie  $\eta$  jest ilorazem dwóch nieparzystych, dodatnich liczb całkowitych spełniających  $0 < \eta < 1$ .

W pracy [MD8] wykazano, że sterowanie (69) gwarantuje, iż układ zamknięty będzie stabilny, a wyjście z układu będzie nadążać za zadaną trajektorią. Poprawność sterowania (69) zweryfikowano w przykładzie symulacyjnym, w którym przyjęto rozkład pomieszczeń przedstawiony na rysunku 13.



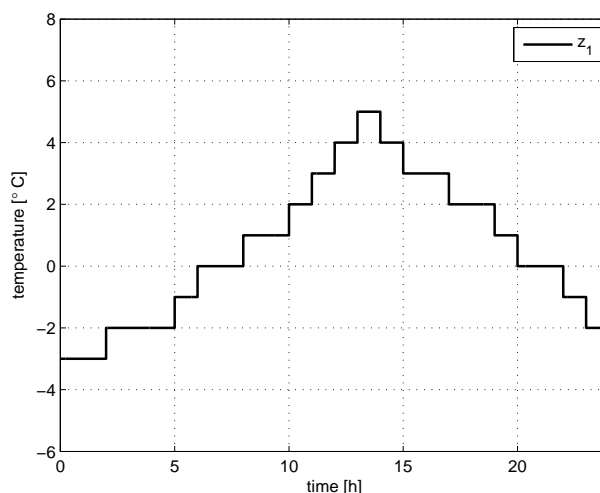
Rysunek 13: Rozkład pomieszczeń w rozważanym budynku. Źródło: [MD8].

Dynamika zmian wartości temperatury powietrza w poszczególnych pomieszczeniach jest opisana przez układ pięciu liniowych równań różniczkowych (67). Zadanie sterowania zostało zdefiniowane w taki sposób, aby temperatury w  $i$ -tych pomieszczeniach nadążały za wartością zdefiniowaną jako:

$$x_{di}(t) = -2 \cos\left(\frac{2\pi}{24}(t - 4)\right) + 20, \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (73)$$

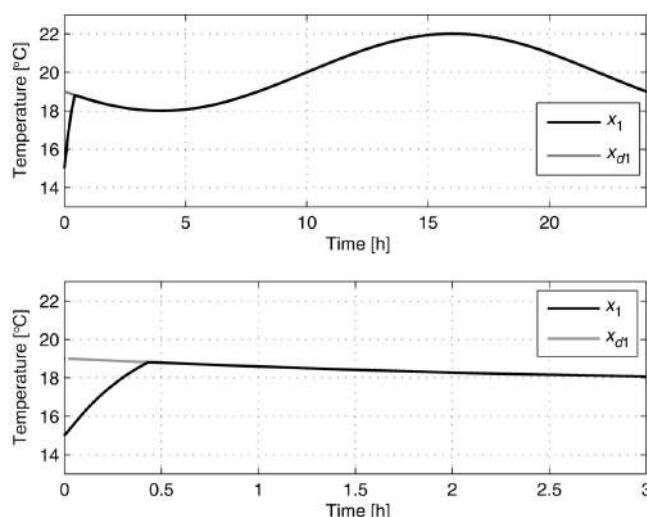
Dzienny profil temperatury zewnętrznej, wykorzystany w eksperymentach symulacyjnych, przedstawiono na wykresie 14.





Rysunek 14: Profil temperatury powietrza zewnętrznego przyjęty w symulacji. Źródło: [MD8].

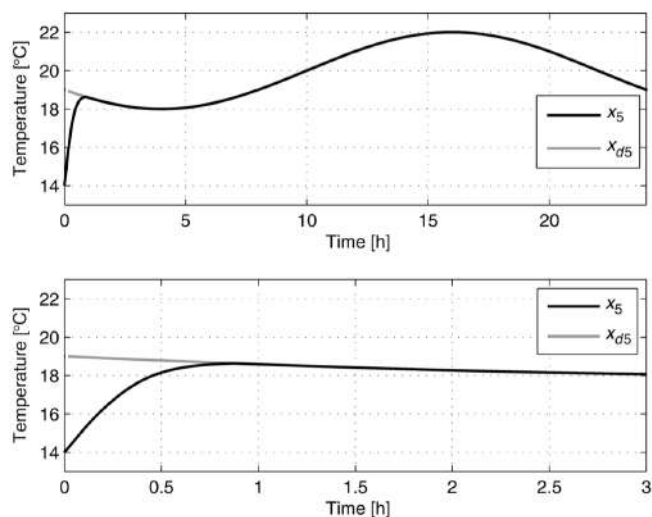
Dodatkowo w symulacji założono, iż każdy z grzejników znajdujących się w pomieszczeniach ma ograniczoną moc maksymalną i minimalną. Ograniczenia te różnią się w zależności od pomieszczenia. Przykładowe wyniki symulacji przedstawiono na wykresach 15 oraz 16.



Rysunek 15: Przebieg zmian temperatury powietrza  $x_1(t)$  (linia czarna) w układzie zamkniętym z regulatorem ślizgowym oraz zadana temperatura  $x_{d1}(t)$  (linia szara). Źródło: [MD8].

Górne wykresy pokazują zmiany temperatury w trakcie całej symulacji, natomiast dolne wykresy przedstawiają zmiany temperatury w powiększonym przedziale czasowym. Jak można zauważyć, na początku symulacji temperatura powietrza wewnętrznego  $x_1(t)$  zmienia się szybciej, aż do osiągnięcia zadanej wartości  $x_{d1}(t)$ . Po osiągnięciu tej wartości temperatura powietrza wewnętrznego podąża za wartością zadaną, mimo występowania zewnętrznych zakłóceń, takich jak zmiany temperatury zewnętrznej.

Wykres 16 pokazuje zmiany temperatury powietrza w holu, gdzie można zauważyć, że temperatura ta zmienia się wolniej, zanim osiągnie zadaną wartość  $x_{d5}(t)$ . Wynika to z faktu, że w holu znajduje się najmniejszy grzejnik.



Rysunek 16: Przebieg zmian temperatury powietrza  $x_5$  (linia czarna) w układzie zamkniętym z regulatorem ślizgowym oraz zadana temperatura  $x_{d5}$  (linia szara). Źródło: [MD8].

W pracy [MD8] zaproponowano i zweryfikowano metodę sterowania temperaturą powietrza w budynkach z wykorzystaniem regulatora ślizgowego (*Sliding Mode Controller*, SMC). Opracowany model dynamiki temperatury w pomieszczeniach, opisany układem liniowych równań różniczkowych (67), uwzględnia wpływ zakłóceń zewnętrznych oraz różnice w parametrach grzejników. Wyniki symulacji wykazały skuteczność zaproponowanego sterowania (69) w zapewnieniu stabilności układu oraz nadążania temperatur w pomieszczeniach za trajektorią zadaną, mimo ograniczeń mocy urządzeń grzewczych i zakłóceń środowiskowych.

W pracy [MD9] rozważam możliwości odtwarzania niemierzalnych, ale wykrywalnych zmiennych stanu systemu dynamicznego. Takie właściwości posiada model skupionej pojemności cieplnej wykorzystywany do modelowania dynamiki zmian temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń. Na temperaturę powietrza wewnątrz pomieszczenia wpływa zarówno sterowanie, jak i temperatury przegród (ściany, podłoga, sufit) tego pomieszczenia. Pomiar temperatur przegród nie jest realizowany ze względów praktycznych, stąd też zachodzi konieczność odtworzenia ich wartości na podstawie dostępnych wyjść systemu, co umożliwi późniejsze wykorzystanie regulatorów zależnych od stanu (np. regulator *LQR*). W artykule [MD9], bazując na modelu dynamiki zmian temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń, zaproponowałem trzy algorytmy estymacji stanu systemu dynamicznego, takie jak: algorytm wykorzystujący macierz modelu  $\mathbf{A}$  systemu dynamicznego, algorytm z przesuwaniem wartości własnych oraz algorytm wykorzystujący właściwości operatorów semigrupy kontrakcyjnej.

W obserwatorze wykorzystującym jedynie macierz  $\mathbf{A}$  modelu, błąd estymacji stanu jest modelowany równaniem (74):

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{e}(t) \quad (74)$$

Ten typ obserwatora nie wykorzystuje pomiarów wyjścia  $\mathbf{y}(t)$  systemu, dlatego jego dynamika jest tożsama z dynamiką samego obserwowanego systemu. Zaletą tego typu obserwatora jest brak wpływu błędów pomiaru wyjścia systemu na estymatę wektora stanu.

W drugim z zaproponowanych przeze mnie w pracy [MD9] obserwatorów, poprzez odpowiedni

dobór macierzy  $\mathbf{G}$ , dąży się do przesunięcia części rzeczywistych wartości własnych macierzy  $\mathbf{A} - \mathbf{G}\mathbf{C}$  jak najdalej na lewo płaszczyzny zespolonej. Wartości własnych macierzy  $\mathbf{A} - \mathbf{G}\mathbf{C}$  nie można jednak umieścić w dowolnym miejscu płaszczyzny zespolonej, ponieważ system dynamiczny nie posiada właściwości obserwowalności, a jedynie jest wykrywalny. Macierz  $\mathbf{G}$  można znaleźć, rozwiązując następujący problem optymalizacyjny:

$$\mathbf{G} = \arg \min_{\mathbf{g}} (\max \{ \operatorname{Re} \lambda (\mathbf{A} - \mathbf{g}\mathbf{C}) \}) \quad (75)$$

Jest to typowy problem optymalizacyjny typu *min-max*, a znalezienie jego rozwiązania jest trudne przy zastosowaniu standardowych algorytmów optymalizacyjnych.

Ostatnim z rozważanych w pracy [MD9] obserwatorów jest obserwator wykorzystujący właściwości operatorów semigrupy kontrakcyjnej (ang. *contraction semigroup*) [27]. Celem jest zapewnienie, aby wartość błędu  $\|\mathbf{e}(t)\|$  estymacji stanu zmniejszała się monotonicznie i eksponencjalnie, co jest kluczowe dla stabilności i prawidłowego działania systemów sterowania. Macierz wzmocnienia  $\mathbf{G}$  takiego obserwatora należy dobrać w taki sposób, aby współczynnik tłumienia osiągał wartość minimalną oraz był ujemny. Dodatkowo, macierz  $\mathbf{G}$  błędu estymacji musi posiadać odpowiednie właściwości strukturalne, np. być macierzą symetryczną, normalną lub dominującą diagonalnie macierzą Metzlera. Dla przyjętej w pracy [MD9] normy spektralnej macierzy jej współczynnik tłumienia jest zdefiniowany w następujący sposób [28]:

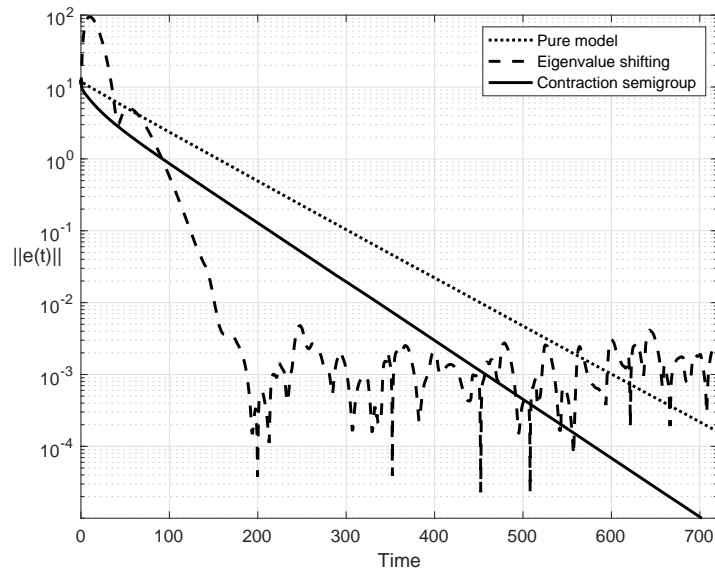
$$\mu(\mathbf{A}) = \lambda_{\max} \left( \frac{\mathbf{A} + \mathbf{A}^T}{2} \right) \quad (76)$$

Ostatecznie macierz wzmocnienia  $\mathbf{G}$  obserwatora może być znaleziona jako rozwiązanie następującego problemu optymalizacyjnego:

$$\mathbf{G} = \arg \min_{\mathbf{g}} \left( \max \left\{ \lambda \left( \frac{1}{2} (\mathbf{A} - \mathbf{g}\mathbf{C} + \mathbf{A}^T - \mathbf{C}^T \mathbf{g}^T) \right) \right\} \right) \quad (77)$$

Na wykresie 17 przedstawiono wartości normy błędu estymacji  $\|\mathbf{e}(t)\|$  dla obserwatorów rozważanych w pracy [MD9]. Wszystkie obserwatory działają poprawnie, tj. norma błędu estymacji  $\|\mathbf{e}(t)\|$  zmierza do zera.

Pierwszy z rozważanych obserwatorów, wykorzystujący jedynie macierz układu  $\mathbf{A}$ , jest najwolniejszy i może być przyjęty jako punkt odniesienia dla porównania działania pozostałych obserwatorów. Analizując zmianę normy błędu obserwatora (75), można zauważyć, że wykazuje on najszybszą zbieżność do wartości 0, co jest pożądaną cechą. Niestety, można również zauważyć, iż na początku działania obserwatora (75) wartość normy błędu  $\|\mathbf{e}(t)\|$  znacząco rośnie, a w trakcie dalszego działania pojawiają się również oscylacje wartości zmiennych odtwarzanych. Takie działanie obserwatora jest niepożądane, ponieważ może prowadzić do znacznych przeregulowań oraz oscylacji wartości sterowanych, co w kontekście rozważanego układu sterowania (stabilizacja temperatury powietrza w pomieszczeniach) może być przyczyną dyskomfortu użytkowników. Najkorzystniejsze właściwości posiada obserwator wykorzystujący właściwości operatorów semigrupy kontrakcyjnej (*contraction semigroup*). Zbieżność wartości normy błędu obserwatora  $\|\mathbf{e}(t)\|$  jest wolniejsza niż w przypadku obserwatora (75), ale brak jest oscylacji sygnału  $\mathbf{e}(t)$ , a jego wartość nie przekracza normy wartości początkowej systemu  $\|\mathbf{x}(0)\|$ . Porównując na wykresie 17 działanie rozważanych w pracy [MD9]



Rysunek 17: Porównanie błędów estymacji w skali logarytmicznej dla rozważanych obserwatorów. Źródło: [MD9].

obserwatorów, można również zauważyć, iż to właśnie dla obserwatora wykorzystującego właściwości semigrupy kontrakcyjnej (*contraction semigroup*) wartość normy błędu obserwatora  $\|e(t)\|$  osiąga najmniejszą wartość, czyli działanie tego obserwatora jest najdokładniejsze.

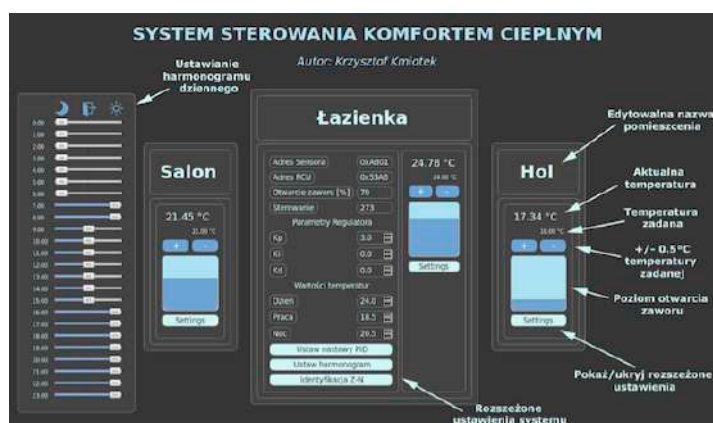
Obserwator wykorzystujący właściwości semigrupy kontrakcyjnej (*contraction semigroup*) jest szczególnie użyteczny w systemach sterowania, gdzie precyzyjna i stabilna estymacja nieobserwowalnych stanów jest kluczowa, np. w zaawansowanych systemach HVAC (ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja) w budynkach, gdzie dokładna kontrola temperatury jest niezbędna dla efektywności energetycznej i komfortu mieszkańców.

### c) Osiągnięcie projektowe – prototypy bezprzewodowych urządzeń automatyki budynkowej:

W ramach realizowanego grantu badawczego pod tytułem „**Algorytmy sterowania i zarządzania budynkami mieszkalnymi**”, którego byłem pomysłodawcą oraz kierownikiem, zespół opracował, wykonał i zrealizował prototypy bezprzewodowych urządzeń automatyki domowej, takich jak: sensory temperatury, głowica termostatyczna, włącznik/wyłącznik oświetlenia oraz oprogramowanie sterujące.

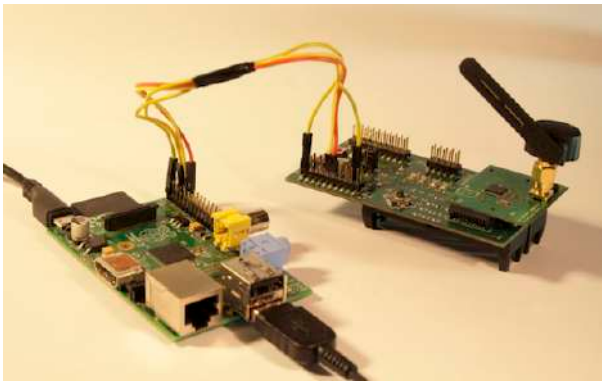
Pierwszą z opracowanych konstrukcji był prototyp bezprzewodowych urządzeń automatyki domowej, w skład którego wchodziły następujące elementy: centralny sterownik systemu automatyki domowej, którego zadaniem było nadzorowanie pracy całego systemu sterowania; czujnik pomiaru temperatury; głowica termostatyczna; oraz włącznik-wyłącznik z regulatorem natężenia światła. Wszystkie urządzenia komunikowały się ze sobą za pomocą standardu ZigBee i profilu ZigBee Home Automation. Dzięki temu do systemu mogły być dołączane urządzenia innych producentów, pod warunkiem że również wykorzystywały profil ZigBee Home Automation.

W ramach projektu powstały prace inżynierskie i magisterskie, takie jak: *“Mikroprocesorowy przełącznik do zdalnego sterowania oświetleniem”*, *“Projekt i wykonanie systemu do bezprzewodowego sterowania komfortem cieplnym w inteligentnym budynku”* oraz *“Projekt i wykonanie systemu do zarządzania budynkiem inteligentnym”*. Zaprojektowany system poprawnie realizował zadania sterowania, takie jak stabilizacja temperatury powietrza w pomieszczeniu czy regulacja natężenia oświetlenia.

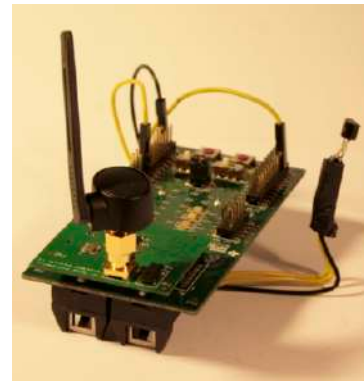


Rysunek 18: Widok ekranu kontrolno–sterującego opracowanego systemu automatyki domowej.  
Źródło: opracowanie własne.

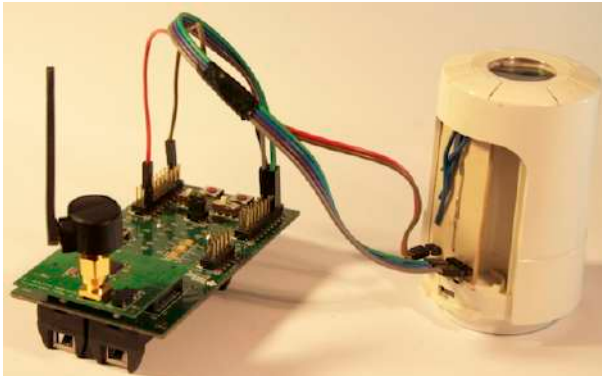
Oprócz części sprzętowej, w zakres projektu wchodziło również zaprojektowanie oprogramowania, które nadzoruje pracę wszystkich elementów systemu. Głównym zadaniem programu była implementacja różnych algorytmów sterowania nadrzędnego. Oprogramowanie zarządzało urządzeniami wykonawczymi, umożliwiało zadawanie warunków pracy urządzeń (np. temperatura powietrza, natężenie oświetlenia), a także prezentowało aktualny stan systemu na ekranach synoptycznych. Na rysunku 18 przedstawiono ekran główny programu do sterowania bezprzewodowymi urządzeniami automatyki domowej. Zdjęcia 19 pokazują wykonane prototypy elementów bezprzewodowych urządzeń automatyki domowej.



(a) centralny sterownik



(b) czujnik temperatury



(c) głowica termostatyczna



(d) włącznik/wyłącznik oświetlenia

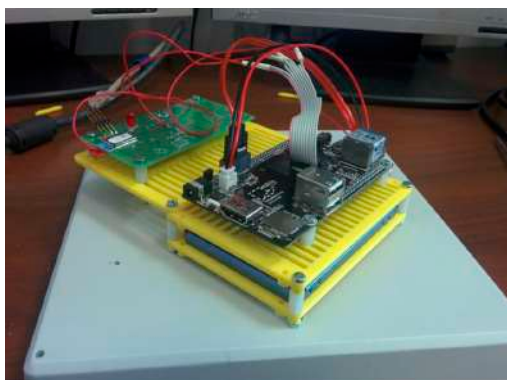
Rysunek 19: Elementy składowe bezprzewodowego systemu automatyki domowej.  
*Źródło: opracowanie własne.*

Kolejnym z zrealizowanych prototypów był bezprzewodowy system pomiaru zużycia i parametrów energii elektrycznej **EMC**. Opracowany system składa się z centralnej jednostki, która zarządza siecią ZigBee oraz zapisuje dane. Do systemu można podłączyć dowolną liczbę sensorów, które mierzą w czasie rzeczywistym następujące parametry opisujące jakość energii elektrycznej:

- moc czynną
- wartość skuteczną prądu
- wartość skuteczną napięcia
- temperaturę układu pomiarowego
- średnią moc bierną
- wartość szczytową prądu
- wartość szczytową napięcia
- moc bierną (wyliczoną z trójkąta mocy)
- współczynnik mocy
- harmoniczną moc czynną
- moc czynną podstawowej harmonicznej

- moc bierną podstawowej harmonicznej

Zdjęcia 20 przedstawiają elementy składowe systemu pomiaru zużycia i parametrów energii elektrycznej **EMC**.



(a) jednostka centralna

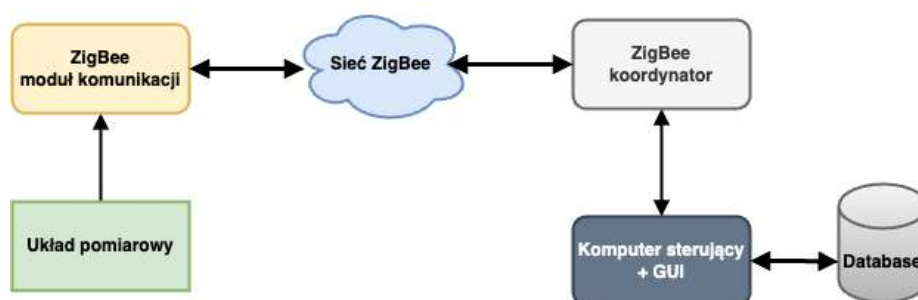


(b) sensor pomiarowy

Rysunek 20: Elementy składowe bezprzewodowego systemu pomiaru parametrów energii.

Źródło: opracowanie własne.

Komunikacja pomiędzy centralną jednostką a poszczególnymi sensorami odbywa się z wykorzystaniem standardu ZigBee i profilu ZigBee Smart Energy. Unikalną cechą zaprojektowanego systemu jest wykorzystanie topologii sieci typu *mesh*. Dzięki temu sensory nie muszą znajdować się w zasięgu bezpośredniej komunikacji radiowej z jednostką centralną (ok. 100-150 m). Poszczególne sensory (które są węzłami sieci ZigBee) przekazują dane z innych sensorów, które nie mają możliwości bezpośredniej komunikacji z jednostką centralną. Tworzenie, zarządzanie i modyfikowanie tego typu sieci odbywa się w sposób automatyczny — nie jest wymagana żadna ingerencja użytkownika systemu. Rysunek 21 przedstawia schemat blokowy systemu pomiaru energii **EMC**.

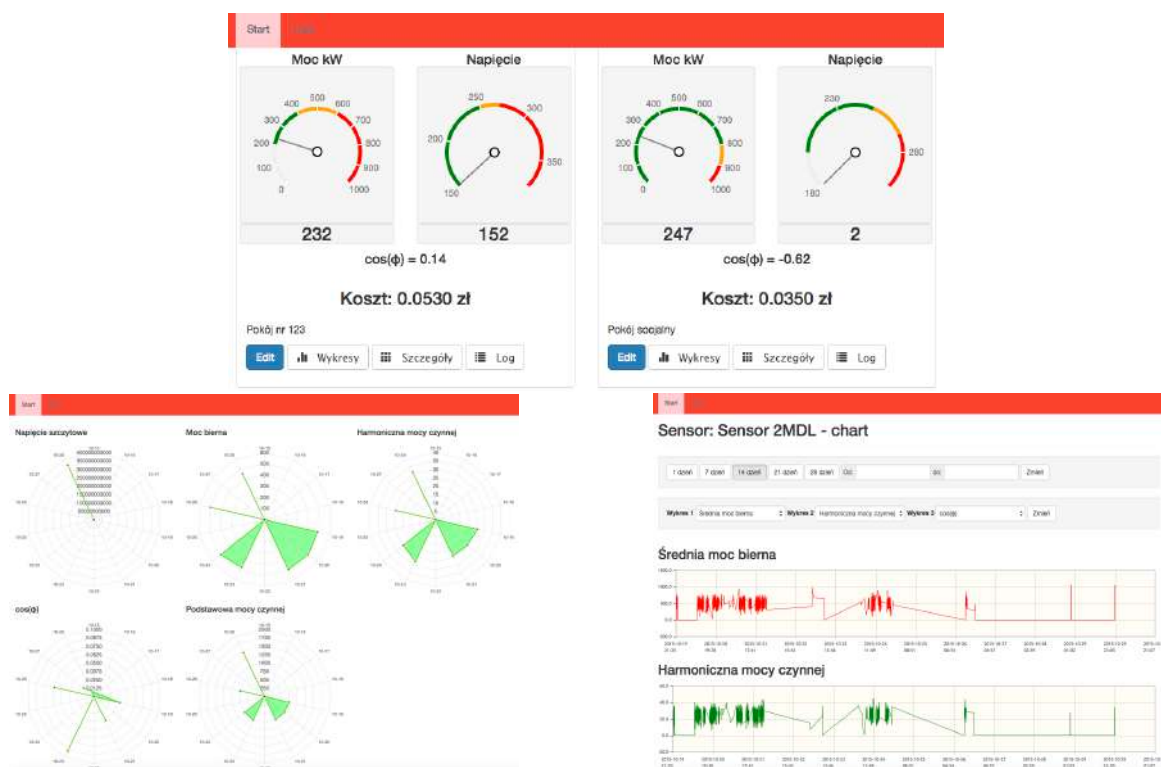


Rysunek 21: Schemat blokowy bezprzewodowego systemu pomiaru parametrów energii **EMC**.

Źródło: opracowanie własne.

Na zdjęciach 22 przedstawiono przykładowe ekrany informacyjne oprogramowania do logowania danych i zarządzania sensorami systemu pomiaru zużycia i parametrów energii elektrycznej **EMC**.

W ramach projektu powstała praca inżynierska „*Bezprzewodowy system pomiaru wykorzystania energii elektrycznej*”.



Rysunek 22: Widok ekranów z danymi zalogowanymi przez bezprzewodowy system pomiaru parametrów energii elektrycznej. Źródło: *opracowanie własne*.

Moja kariera naukowa zawsze była skoncentrowana na łączeniu teorii z praktyką, dążąc do tworzenia rozwiązań mających realne zastosowanie. W moich projektach badawczych, zarówno tych indywidualnych, jak i zespołowych, priorytetem było opracowanie technologii i rozwiązań, które mogłyby polepszyć działanie obecnych rozwiązań oraz opracowywanie całkiem nowych rozwiązujących określone problemy techniczne. Moje publikacje naukowe często dotyczą zastosowań praktycznych w różnych dziedzinach inżynierii. Zawsze starałem się, aby moje odkrycia były nie tylko nowatorskie, ale również przydatne dla szerokiego grona odbiorców. Jestem przekonany, że badania naukowe powinny prowadzić do konkretnych korzyści dla społeczeństwa i przemysłu. Dlatego też angażowałem się w liczne projekty współpracy z firmami, aby wspólnie rozwijać technologie przyszłości. Moja praca została doceniona przez granty oraz nagrody, które potwierdzają jej znaczenie i praktyczne zastosowanie.



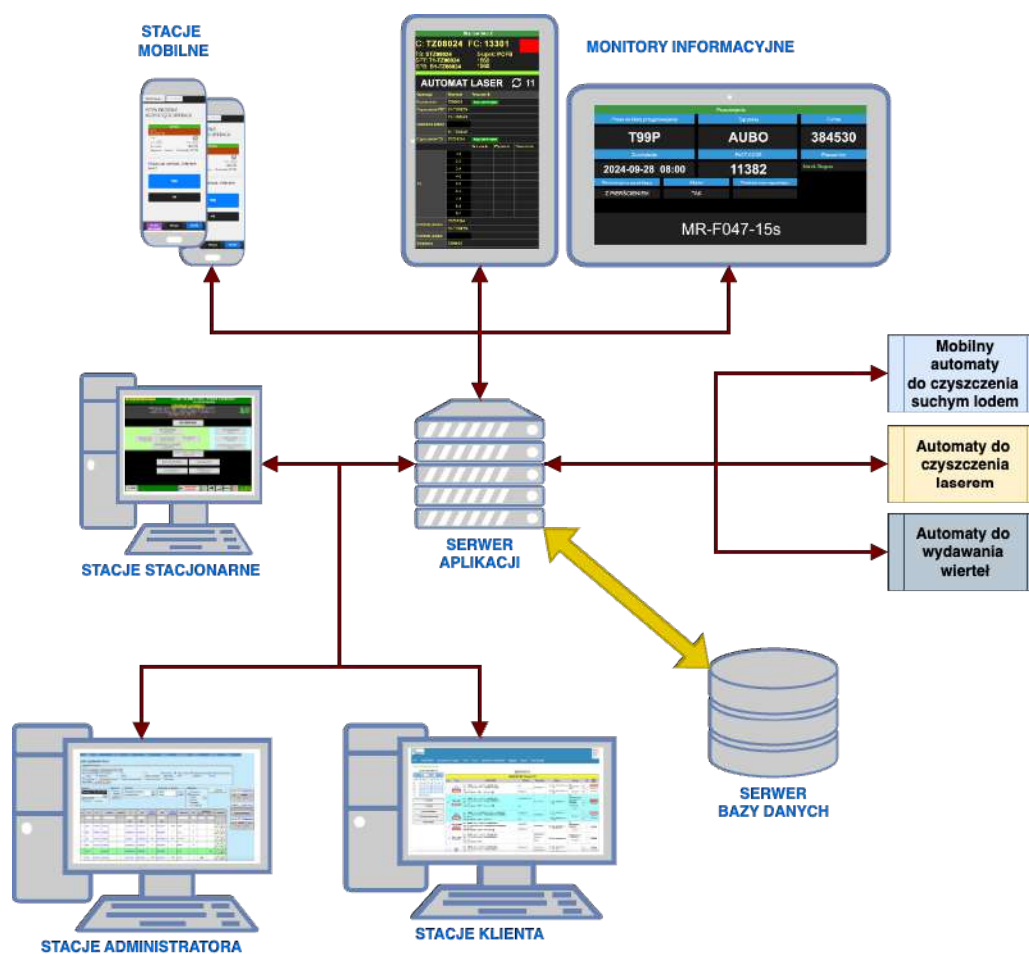
#### **d) Omówienie dodatkowych osiągnięć mających wpływ na rozwój dyscypliny:**

##### **System zarządzania czyszczeniem form do produkcji opon SZF**

W roku 2006 podjąłem współpracę z firmą Astem Sp. z o.o., która specjalizuje się w czyszczeniu form do produkcji opon samochodowych. Zaproponowałem koncepcję budowy kompleksowego systemu informatycznego o nazwie **SZF**, który miał realizować szereg zadań, takich jak:

- zarządzanie i rejestrowanie czynności wykonywanych przez pracowników,
- nadzór nad prawidłową realizacją procesu czyszczenia form do produkcji opon samochodowych,
- planowanie czasu pracy pracowników,
- rejestrowanie wszystkich parametrów procesu czyszczenia form do produkcji opon samochodowych mających wpływ na jakość,
- oprogramowanie automatycznych stanowisk do czyszczenia form do produkcji opon samochodowych z wykorzystaniem technologii czyszczenia: piaskiem, suchym lodem i laserem,
- ekrany informacyjne na stanowiskach do czyszczenia form prezentujące aktualne parametry realizowanego procesu,
- zamawianie i monitorowanie realizacji zamówień przez kontrahentów,
- integracja różnych urządzeń wspomagających, takich jak: czytniki kodów kreskowych, drukarki etykiet, smartfony, automaty do wydawania wiertel i wiele innych,
- system automatycznego tworzenia i zarządzania kopiami zapasowymi,
- analiza zebranych danych pod kątem zapewnienia lepszej jakości i wydajności realizowanych procesów,
- generowanie różnego typu raportów, podsumowań oraz analiz,
- obsługa magazynów przechowujących formy do produkcji opon samochodowych,
- optymalizacja zadań związanych z przewożeniem form do produkcji opon samochodowych,
- monitorowanie czasu pracy form do produkcji opon samochodowych na prasach,
- dynamiczne modyfikowanie procesów czyszczenia form do produkcji opon samochodowych w zależności od liczby cykli pracy poszczególnych elementów formy (boki, segmenty, pierścienie itp.),
- wykorzystanie sztucznej inteligencji (rozpoznawanie numerów poszczególnych elementów) w celu kontroli realizowanych zamówień.

Mając na uwadze różnorodność zadań realizowanych przez stworzony przeze mnie system **SZF**, można stwierdzić, iż zawiera on elementy klasy systemów takich jak MES<sup>1</sup>, ERP<sup>2</sup>, CRM<sup>3</sup> oraz WMS<sup>4</sup>. Zrealizowany przeze mnie system **SZF** składa się z części sprzętowej oraz wytworzonego oprogramowania. W skład części sprzętowej wchodzi standardowe urządzenia, takie jak komputery, monitory, drukarki, ale również niestandardowe urządzenia, takie jak: mobilne stanowisko czyszczenia form, stanowisko do czyszczenia form z wykorzystaniem lasera, ekrany informacyjne, automat do wydawania wiertel, czytniki RFID, czytniki kodów kreskowych oraz kamery. Podstawowym komponentem systemu jest serwer aplikacji oraz serwer bazy danych. Wszystkie komponenty systemu komunikują się poprzez sieć Ethernet z serwerem aplikacji, przysyłając i odbierając dane. Serwer aplikacji komunikuje się bezpośrednio z serwerem bazy danych oraz steruje określonymi urządzeniami (np. automatycznymi stanowiskami do czyszczenia form).



Rysunek 23: Schemat blokowy systemu **SZF**. Źródło: opracowanie własne.

Wykonany przeze mnie system zarządzania czyszczeniem form **SZF** pracuje nieprzerwanie od 2006 roku. Obecnie stanowi kluczowy element całego procesu czyszczenia form do produkcji opon samochodowych. Dzięki jego zastosowaniu całkowicie wyeliminowano papierowy obieg dokumentów (zamówienia, plany pracy, raporty itp.), zoptymalizowano proces planowania i realizacji zamówień.

<sup>1</sup>Manufacturing Execution System

<sup>2</sup>Enterprise Resource Planning

<sup>3</sup>Customer Relationship Management

<sup>4</sup>Warehouse Management System

wień, zmniejszono liczbę transportów form, usprawniono zarządzanie magazynem form oraz zwiększono jakość wykonywanych usług. Zastosowanie systemu **SZF** umożliwiło również bardzo dokładną i precyzyjną kontrolę jakości realizowanych zamówień na każdym ich etapie. Zdjęcia 24a–24f przedstawiają niektóre elementy składowe systemu **SZF**.



(a) stacjonarna stacja na hali produkcyjnej



(b) magazyn form



(c) automat do czyszczenia form laserem



(d) stanowiska do czyszczenia form

Stanowisko 1		Stanowisko 2		Stanowisko 3	
IC: 396579	FC: 13250	IC: 396579	FC: 13250	IC: 396579	FC: 13250
TS: 3396579	SFB: 8396579-01	TS: 3396579	SFB: 8396579-01	TS: 3396579	SFB: 8396579-01
1675	1675	183	183	183	183

AUTOMAT LASER		AUTOMAT LASER		AUTOMAT LASER	
Operacja	Operacja	Operacja	Operacja	Operacja	Operacja
130679	130679	130679	130679	130679	130679
1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0

(e) ekran informacyjny dla grupy stanowisk

Przebieg		
Praca na kółka przygotowujemy	Typ pracy	Forma
<b>T99P</b>	<b>AUBO</b>	<b>384530</b>
Zamówienie	FACT CODE	Pracownicy
<b>2024-09-28 08:00</b>	<b>11382</b>	Marek Dlugosz
Pracownik główny odpowiedzialny	Asystent	Pracownik drugi odpowiedzialny
Z PIERŚCIENIEM	TAK	
<b>MR-F047-15s</b>		

(f) ekran informacyjny dla stanowiska czyszczenia

Rysunek 24: Elementy składowe systemu **SZF**. Źródło: opracowanie własne.

Zdjęcie 24a przedstawia pojedynczą stację wykorzystywaną przez pracowników podczas realizacji zadań. Stacja jest wyposażona w czytnik RFID do szybkiego logowania pracowników oraz automat do wydawania wiertel. Zdjęcie 24b ukazuje magazyn form, w którym formy są składowane na tzw. słupkach. Liczba form na jednym słupku nie może przekraczać sześciu. Na zdjęciu 24c zaprezentowano automat do czyszczenia form laserem. Widać na nim formę podczas czyszczenia oraz głowicę lase-

rową, która czyści formę od wewnątrz. Zaletą wykorzystania lasera do czyszczenia form jest znacznie lepsza jakość wyczyszczonej powierzchni, brak konieczności demontażu formy na poszczególne segmenty czyszczone ręcznie oraz skrócenie czasu całego procesu. Zdjęcie 24d pokazuje stanowiska do czyszczenia form. W tle widoczne są ekrany informacyjne dla każdego ze stanowisk. Zdjęcia 24e–24f przedstawiają ekrany informacyjne zamontowane na każdym ze stanowisk produkcyjnych. Ekrany prezentują aktualne informacje dotyczące procesu czyszczenia danej formy, które są pomocne dla pracowników realizujących konkretne etapy procesu.

System wspomaganie czyszczenia form **SZF** jest stale rozwijany przeze mnie, a do jego funkcjonalności regularnie dodawane są nowe możliwości. Obecnie trwają intensywne prace nad wdrożeniem mechanizmu automatycznego rozpoznawania numerów elementów formy z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. Każdy z elementów formy posiada unikalny numer, a forma do produkcji opon składa się z określonych elementów, które determinują parametry wytwarzanej opony, takie jak rodzaj bieżnika, rozmiar, średnica, indeks prędkości i nośności. Obecnie kontrola poprawności elementów formy jest realizowana przez pracowników, co może prowadzić do błędów. Aby rozwiązać ten problem, zaproponowałem mechanizm, w którym pracownik kontrolujący poprawność montażu formy wykonuje zdjęcia numerów elementów. Numery te są następnie rozpoznawane przez sztuczną sieć neuronową o odpowiednio zaprojektowanej strukturze i wytrenowaną w tym celu. Nie jest to typowe zadanie OCR<sup>5</sup>, dla którego istnieje wiele gotowych i wytrenowanych sztucznych sieci neuronowych. Powodem jest specyfika numerów elementów: są one umieszczone na metalowych powierzchniach, w różnych miejscach, często w odbiciu lustrzanym i na tle, które utrudnia ich rozpoznawanie (zob. zdjęcie 25). Po rozpoznaniu wszystkich numerów elementów formy system **SZF** sprawdza, czy forma jest poprawnie skonfigurowana do produkcji zamówionego typu opony samochodowej. Na zdjęciach 25 przedstawiono przykłady numerów elementów, które muszą być prawidłowo rozpoznawane przez zastosowaną sztuczną sieć neuronową.



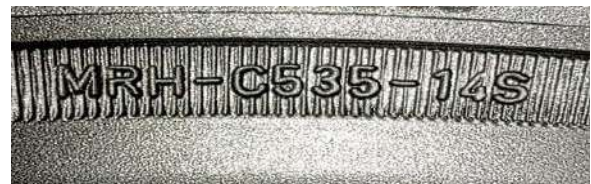
(a) numer elementu



(b) numer elementu w odbiciu pionowym



(c) numer elementu w odbiciu poziomym



(d) numer elementu na tle

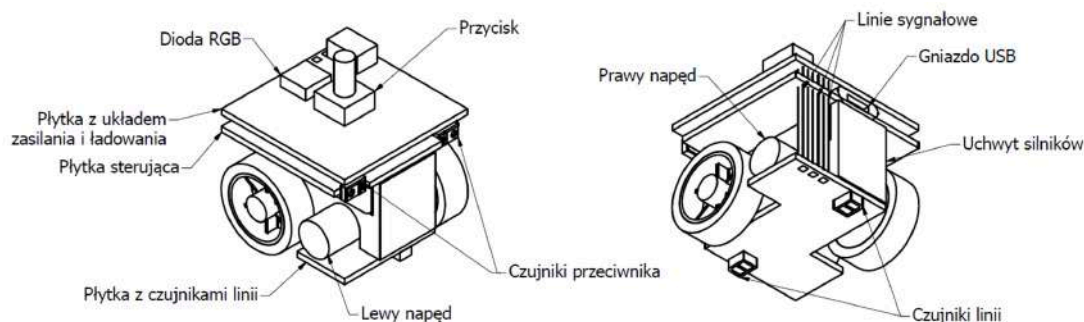
Rysunek 25: Różne warianty numerów elementów formy. Źródło: opracowanie własne.

<sup>5</sup>Optical Character Recognition

## Roboty nanoSUMO

W latach 2014–2015, będąc opiekunem koła naukowego KN Integra, byłem autorem koncepcji i projektu robotów  **nanoSUMO**, które zostały zrealizowane przez członków koła naukowego pod moim kierownictwem. Roboty  **nanoSUMO** to miniaturowe konstrukcje zaprojektowane do zawodów sumo w kategorii nano – najmniejszych robotów w tej konkurencji. Podobnie jak w tradycyjnych zawodach sumo, ich zadaniem jest wypchnięcie przeciwnika poza wyznaczony ring. Zgodnie z zasadami, roboty  **nanoSUMO** „walczą” na ringu o średnicy 19,5 cm, a zwycięża robot, który jako pierwszy dwukrotnie wypchnie przeciwnika poza ring.

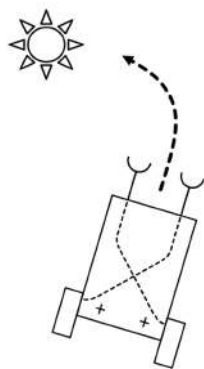
Podstawową trudnością w tej klasie robotów są ich rozmiary – nie mogą być większe niż 2,5 cm × 2,5 cm, a ich waga nie może przekraczać 25 gramów. Ze względu na swoje kompaktowe wymiary roboty  **nanoSUMO** muszą być niezwykle precyzyjnie zaprojektowane, aby pomieścić wszystkie niezbędne komponenty, takie jak czujniki, akumulatory i silniki. Czyni to ich konstrukcję technicznie wymagającą i zaawansowaną. Każdy z robotów  **nanoSUMO** jest wyposażony w dwa miniaturowe silniki z przekładnią, dwa sensory odległości, dwa sensory kolorów, baterię i procesor. Status robota jest sygnalizowany za pomocą diody typu RGB. Włączanie, wyłączenie i aktywacja do walki odbywają się za pomocą jednego przycisku. Akumulator umożliwia około 5 minut „walki”. Na rysunku 26 przedstawiono konstrukcję robota  **nanoSUMO** oraz rozmieszczenie jego kluczowych elementów.



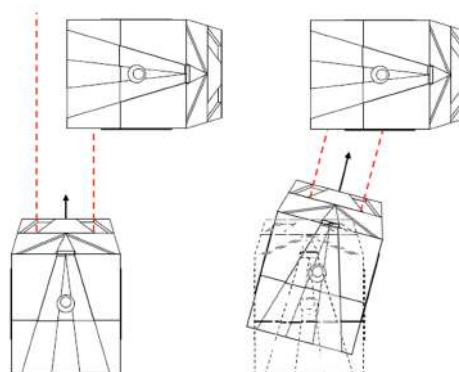
Rysunek 26: Konstrukcja robota  **nanoSUMO**. Źródło: opracowanie własne.

Roboty  **nanoSUMO** do wykrywania przeciwnika wykorzystują jedynie jedną parę czujników odległości. Na podstawie zmierzonych odległości przez te czujniki można w prosty sposób określić, po której „stronie” robota znajduje się przeciwnik. Ze względu na bardzo niewielkie rozmiary robotów  **nanoSUMO**, nie można w nich zastosować rozbudowanych procesorów umożliwiających implementację złożonych algorytmów wykrywania przeciwnika i walki. W związku z tym zastosowano najprostszy z możliwych algorytmów sterowania, oparty na koncepcji agresywnego zachowania robota Braitenberga [29]. Algorytm ten pozwala na efektywne sterowanie robotem przy ograniczonych zasobach sprzętowych. Rysunki 27a–27b przedstawiają agresywną wersję robota Braitenberga oraz jej zastosowanie w konstrukcji robota  **nanoSUMO**.

Końcowy rezultat zrealizowanego projektu  **nanoSUMO** okazał się na tyle dobry, że firma Delphi (obecnie Aptiv) zamówiła wykonanie 30 kompletów (każdy komplet zawierał dwa roboty  **nanoSUMO** oraz ring), które były wręczane jako prezenty okolicznościowe. Zdjęcie 28a przedstawia zmontowanego robota  **nanoSUMO** bez obudowy, natomiast zdjęcie 28b ukazuje kompletny zestaw: dwa roboty  **nanoSUMO** oraz ring do walki.



(a) „agresywny” robot Braitenberga, Źródło: <http://en.wikipedia.org>



(b) sposób wykrywania przeciwnika przez robota  **nanoSUMO**  
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 27: Sposób wykrywania i „atakowania” przeciwnika przez robota  **nanoSUMO**.



(a) zmontowany robot  **nanoSUMO**



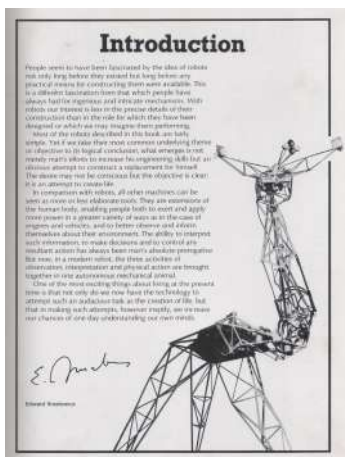
(b) roboty  **nanoSUMO** na ringu

Rysunek 28: Końcowa realizacja robotów  **nanoSUMO**. Źródło: opracowanie własne.

### Reaktywacja rzeźby cybernetycznej **SENSTER**

W 2014 roku, z inicjatywy dr Anny Olszewskiej z Katedry Kulturoznawstwa i Filozofii WH AGH, zainicjowano projekt  **re:SENSTER**, mający na celu reaktywację pierwszej cybernetycznej rzeźby autorstwa artysty polskiego pochodzenia Edwarda Ihnatowicza.  **SENSTER** to monumentalna rzeźba cybernetyczna, będąca pionierskim dziełem sztuki nowych mediów (<http://senster.agh.edu.pl/>).  **SENSTER** to prosta, ergonomiczna konstrukcja szkieletowa, złożona z ruchomych modułów osadzonych na osiach. Jej główny element – pięciometrowe ramię – wsparty jest na potrójnej podporze o wysokości dwóch metrów. Wysięgnik zakończony jest rozdwojoną formą przypominającą kleszcze. Tak ukształtowana „głowa” wyposażona jest w zestaw mikrofonów oraz dwa czujniki dopplerowskie. Płynny ruch ramienia rzeźby zależy od natężenia dźwięku i ruchów rejestrowanych przez sensory. Oryginalnie  **SENSTER** był sterowany za pomocą komputera Philips P9201. Na zdjęciach 29a–29b przedstawiono opis rzeźby  **SENSTER** oraz jej ekspozycję podczas wystawy w Eindhoven.

Moją rolą w projekcie było zaprojektowanie i wykonanie od nowa układu sterowania siłownikami, odtworzenie układu sensorów, a także implementacja testowych algorytmów zachowań i reakcji rzeźby  **SENSTER** na bodźce zewnętrzne. Panel sterowania rzeźby  **SENSTER** został zbudowany z wykorzystaniem sterownika PLC (Astraada One DC2007) wraz z zintegrowanym panelem HMI.



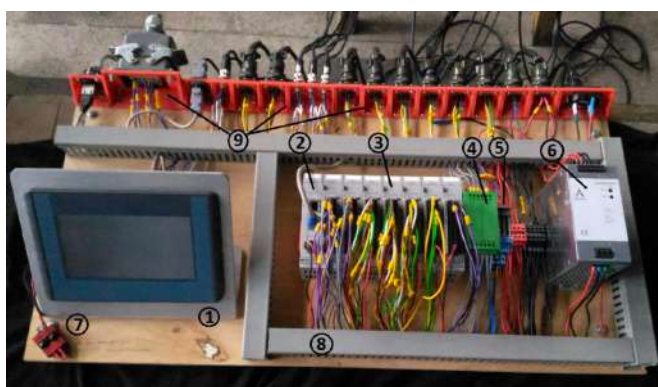
(a) opis rzeźby **SENSTER**



(b) prezentacja na wystawie w Eindhoven

Rysunek 29: Rzeźba **SENSTER** w latach 60 XX wieku. Źródło: <http://www.senster.com>

Sterownik kontroluje wszystkie elementy rzeźby **SENSTER**. Wyzwaniem okazało się odtworzenie programu sterowania rzeźbą **SENSTER**. Do dzisiejszych czasów zachowały się jedynie wydruki oryginalnego programu sterowania stworzonego przez Edwarda Ihnatowicza. Program ten został napisany w języku asembler na prototypowy komputer Philips P9201, a część operacji (np. przetwarzanie sygnałów wejściowych i wyjściowych) była realizowana analogowo. W związku z tym konieczne było stworzenie programu sterującego rzeźbą **SENSTER** od podstaw, bazując na opisach, archiwalnych filmach oraz uwagach syna autora, Ryszarda Ihnatowicza. Zdjęcie 30 przedstawia oryginalny panel sterowania z lat 60. oraz współczesny panel sterowania rzeźby **SENSTER**, zrealizowany przeze mnie.



(a) prototypowy komputer Philips P9201, (b) panel sterowania rzeźby cybernetycznej **SENSTER**,  
 Źródło: <http://www.senster.com> Źródło: *opracowanie własne.*

Rysunek 30: Historyczny i współczesny komputer sterowania rzeźbą **SENSTER**.

Praca Edwarda Ihnatowicza jest powszechnie uznawana za arcydzieło sztuki cybernetycznej. Należy do kanonu sztuki nowych mediów i, mimo upływu lat, wciąż stanowi jedną z najbardziej intrygujących jej realizacji. Rzeźba **SENSTER** była prezentowana na wystawach takich jak: Biennale Wrocław 2019, Trinałsti festival novomedijske kulture Speculum Artium 2021 (Słowenia), Narodowa Galeria Sztuki Zachęta 2021 oraz innych. Zdjęcia 31 przedstawiają rzeźbę **SENSTER** eksponowaną na współczesnych wystawach i festiwalach sztuki.



(a) Biennale WRO, 2019



(b) Zachęta - Narodowa Galeria Sztuki, 2021

Rysunek 31: Prezentacja rzeźby cybernetycznej **SENSTER** na współczesnych wystawach.

Źródło: opracowanie własne.

W wyniku realizacji projektu **re:SENSTER** powstały następujące artykuły:

- Olszewska A., **Długosz M.**: *Autonomia kodu w sztuce mediów : przykład rzeźby cybernetycznej Senster Edwarda Ihnatowicza*, Kultura Współczesna : Teoria, Interpretacje, Praktyka, 2019, ISSN: 1230-4808, nr 1, s. 67-80.
- Olszewska A., **Długosz M.**: *Senster: reactivation of a cybernetic sculpture*, Leonardo , 2021, ISSN: 0024-094X, vol. 54, no. 3, s. 299–305, IF=0.3.

oraz praca inżynierska, której byłem pomysłodawcą i promotorem:

- Bieszczad R.: *Układ sterowania rzeźby cybernetycznej SENSTER*, 2020, AGH praca inżynierska.

### **Autonomiczny robot do badania systemów bezkluczykowych PEPS**

W latach 2016–2017, z mojej inicjatywy, nawiązano współpracę z firmą Delphi (obecnie Aptiv), której celem był projekt i wykonanie autonomicznego robota przeznaczonego do badania i walidacji bezkluczykowych systemów samochodowych (ang. *Passive Entry Passive Start*). Dotychczas zadanie to było wykonywane ręcznie przez pracownika, co było procesem długotrwałym i nużącym. Zaproponowałem koncepcję, konstrukcję oraz sposób działania autonomicznego robota **PEPS**, który realizuje zadanie walidacji systemów bezkluczykowych w sposób całkowicie automatyczny, bez udziału człowieka. Autonomiczny robot **PEPS**, po wskazaniu obszaru, w którym ma zostać przeprowadzone badanie, generuje odpowiednią siatkę punktów pomiarowych (zazwyczaj co 10 cm) i przystępuje do pracy. W każdym punkcie dokonywane są pomiary zdefiniowanych parametrów komunikacji, które następnie są zapisywane w systemie. Zdjęcia 32 przedstawiają finalną konstrukcję robota oraz jego zastosowanie podczas testów systemów **PEPS**.

Pierwszym problemem, jaki należało rozwiązać przy konstrukcji robota **PEPS**, było zapewnienie możliwości poruszania się w dowolnym kierunku i pod dowolnym kątem. Konstrukcja robota wykorzystuje tzw. napęd typu *mecanum*. Jest to system kół wyposażonych w rolki ustawione pod kątem 45 stopni, który umożliwia robotowi płynne poruszanie się w dowolnym kierunku bez potrzeby skręcania kół. Dzięki temu robot może wykonywać ruchy boczne, obrotowe oraz jazdę pod dowolnym kątem, co czyni ten napęd idealnym rozwiązaniem do pracy w ograniczonych przestrzeniach i





(a) konstrukcja robota **PEPS**



(b) robot **PEPS** podczas wykonywania badania

Rysunek 32: Robot **PEPS**. Źródło: opracowanie własne.

w precyzyjnym manewrowaniu. Drugim istotnym problemem było zapewnienie odpowiedniej nawigacji i lokalizacji robota **PEPS**. Robot pracował w wielostanowiskowym garażu, gdzie niewiele było stałych elementów konstrukcyjnych wspomagających lokalizację przy wykorzystaniu technologii lidar. Dodatkowym wyzwaniem była zmienna aranżacja pomieszczenia – wymiana samochodów na stanowiskach oraz przemieszczanie ruchomych elementów wyposażenia warsztatowego. W ramach prowadzonych prac przetestowano dwa sposoby nawigacji robota: pierwszy oparty na lidarze, a drugi na ultradźwiękach. Ostatecznie system nawigacji robota **PEPS** wykorzystuje obydwa rozwiązania, co pozwala na precyzyjne ustalanie pozycji robota w zmiennym środowisku.

W wyniku realizacji projektu powstała praca inżynierska, której byłem pomysłodawcą i promotorem:

- Kasieczka D.: *Porównanie działania dwóch rodzajów systemu lokalizacji wewnątrz pomieszczeń robotów autonomicznych*, 2019, AGH praca inżynierska.

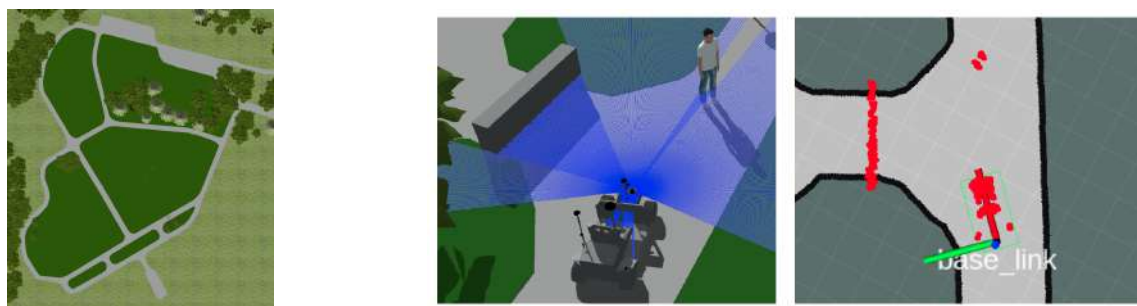
### **Autonomiczny samochód A-EVE**

Kolejnym projektem, którego byłem pomysłodawcą, był projekt budowy prototypowego samochodu elektrycznego z elementami jazdy autonomicznej. Jako pojazd bazowy wykorzystano elektryczny pojazd demonstracyjny EVE, przekazany zespołowi (którego byłem kierownikiem) w ramach współpracy z firmą Delphi (obecnie Aptiv). Pojazd EVE to mały, jednoosobowy samochód o napędzie elektrycznym, charakteryzujący się prostą konstrukcją. Jedną z jego kluczowych cech jest możliwość sterowania wszystkimi funkcjami (przyspieszaniem, hamowaniem, skręcaniem kół, zmianą kierunku jazdy) za pomocą odpowiednich sygnałów elektrycznych. Dzięki tej właściwości pojazd EVE można łatwo zintegrować z dowolnym systemem sterowania, co czyni go idealnym do testowania i implementacji technologii jazdy autonomicznej.

Przy opracowywaniu koncepcji autonomicznego pojazdu **A-EVE** wykorzystałem podejście znane w literaturze jako *digital twin*. Metoda ta zakłada stworzenie cyfrowego modelu fizycznego obiektu oraz środowiska, w którym obiekt funkcjonuje. Dzięki temu, jeszcze przed rozpoczęciem właściwych prac, możliwe jest szybkie testowanie różnych koncepcji przebudowy pojazdu **A-EVE**. Do realizacji układu sterowania pojazdem **A-EVE** wybrano framework ROS<sup>6</sup>. W związku z tym naturalnym wyborem do stworzenia cyfrowego bliźniaka pojazdu było wykorzystanie symulatora Gazebo. Rysunek 33a przedstawia cyfrowy model mapy obszaru, po którym porusza się pojazd **A-EVE**, rysunek 33b

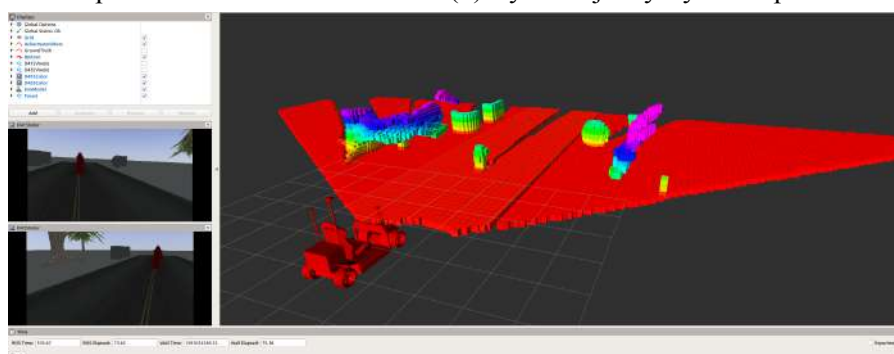
<sup>6</sup>Robot Operation System

prezentuje jeden z symulacyjnych scenariuszy, natomiast rysunek 33c ukazuje wizualizację danych z wirtualnych sensorów pojazdu **A-EVE**.



(a) cyfrowa mapa

(b) symulacja wykrywania przeszkód



(c) wizualizacja wykrytych przeszkód w programie Rviz

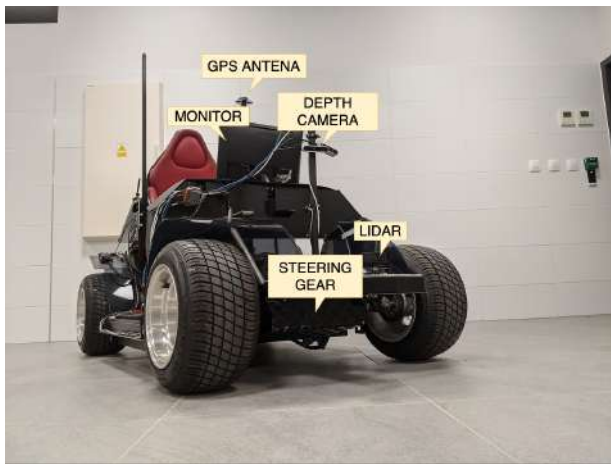
Rysunek 33: Cyfrowy model pojazdu **A-EVE**, jego systemów sensorycznych oraz środowiska otoczenia. Źródło: *opracowanie własne*.

Aby realizować zadania jazdy autonomicznej, pojazd **A-EVE** został przebudowany zgodnie z moją koncepcją i wyposażony w dodatkowe sensory oraz komputery sterujące. Na zdjęciach 34a–34b przedstawiono elementy dodane do pojazdu **A-EVE** oraz miejsca ich montażu. Wśród zamontowanych komponentów znajdują się sensory takie jak: kamery głębokości, lidar, GPS oraz główny komputer sterujący ECU1.

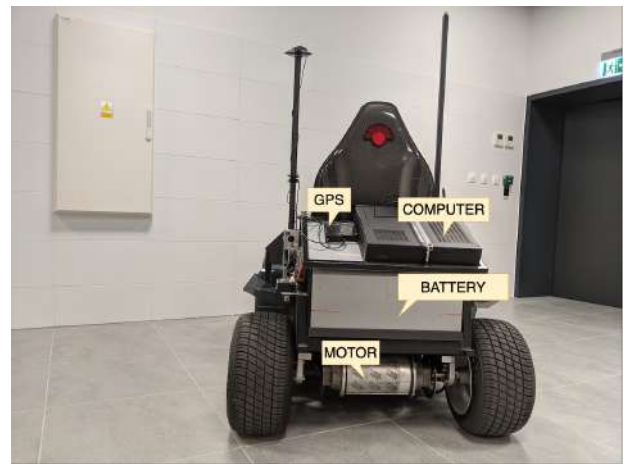
Do sterowania pojazdem **A-EVE** zaproponowałem dwupoziomowy układ sterowania. System składa się z dwóch niezależnie działających komputerów, które wymieniają między sobą dane. Schemat blokowy systemu sterowania pojazdem **A-EVE** przedstawiono na rysunku 35.

Pierwszy z komputerów, ECU1, pełni rolę sterownika nadrzędnego i odpowiada za generowanie tras, analizowanie danych, omijanie przeszkód itp. Do ECU1 podłączone są także sensory: kamery głębokości, lidar oraz odbiorniki GPS. Wygenerowane wartości sterowań (prędkość liniowa i obrotowa) są następnie przesyłane do drugiego komputera, ECU2. Zadaniem ECU2 jest generowanie sygnałów sterowania dla pojazdu **A-EVE**, takich jak prędkość postępową i kąt skrócenia kół przedniej osi. Pełni również rolę interfejsu wejścia–wyjścia dla różnych sygnałów, np. enkoderów kół, położenia pedału przepustnicy, hamulca i innych. Projekt oraz wykonanie sterownika ECU2 było tematem zrealizowanej pracy inżynierskiej pt. *Projekt i realizacja sterownika pojazdu autonomicznego kompatybilnego z ROS*, której byłem pomysłodawcą i promotorem.

Bardzo ważnym elementem układu sterowania pojazdem **A-EVE** był system percepcji danych z otoczenia, kluczowy dla prawidłowego wyznaczania sterowań. Pojazd **A-EVE** wyposażony jest w 8

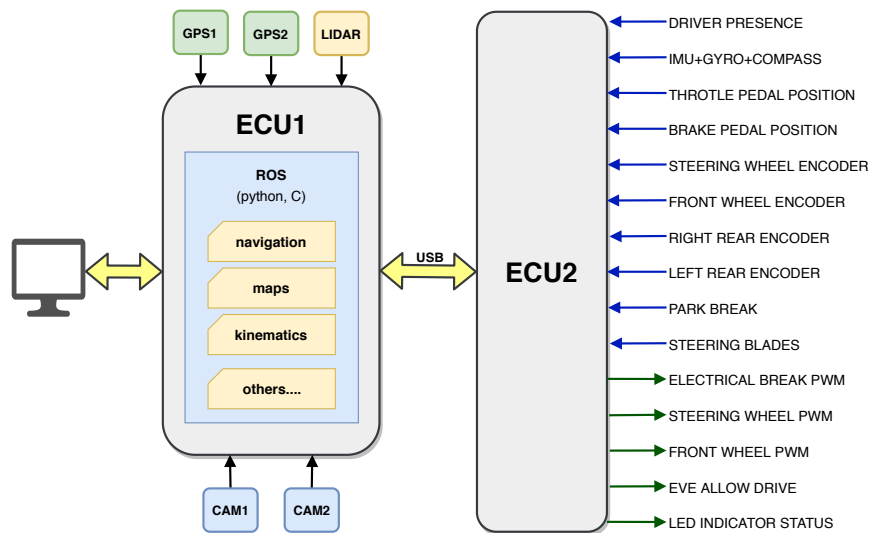


(a) front pojazdu A-EVE



(b) tył pojazdu A-EVE

Rysunek 34: Zmodernizowany pojazd A-EVE z dodatkowym wyposażeniem umożliwiającym realizację jazdy autonomicznej. Źródło: opracowanie własne.

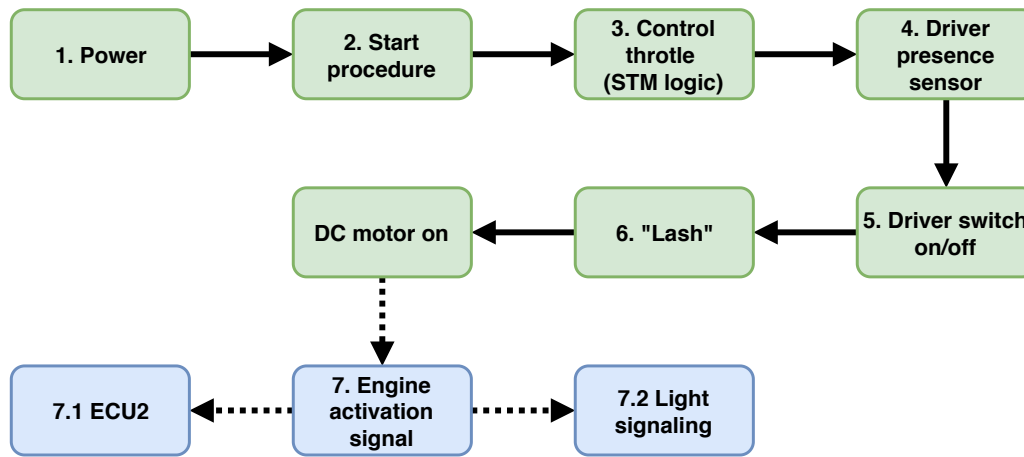


Rysunek 35: Schemat blokowy systemu sterowania pojazdem A-EVE. Źródło: opracowanie własne.

różnego typu sensorów, z których każdy generuje dane o odmiennym charakterze. Aby zapewnić poprawną percepcję otoczenia, w którym porusza się pojazd, konieczne było zastosowanie algorytmów fuzji danych. Zagadnienie fuzji danych z sensorów pojazdu A-EVE było przedmiotem pracy magisterskiej pt. *Sensoryczna fuzja danych na potrzeby lokalizacji i nawigacji pojazdu autonomicznego*, której byłem promotorem. Fuzja danych zastosowana w pojeździe A-EVE obejmowała integrację informacji z kilku kamer RGB i głębokości, filtrowanie danych z czujników typu IMU oraz wyznaczanie położenia i przemieszczenia.

Równie istotnym zagadnieniem w kontekście konstrukcji prototypu pojazdu autonomicznego A-EVE było zapewnienie bezpieczeństwa podczas jego użytkowania. W związku z tym zaproponowałem wieloetapowy system zabezpieczeń, który gwarantuje, że pojazd A-EVE nie będzie poruszał się w sposób niekontrolowany. Schemat blokowy systemu zabezpieczeń został przedstawiony na rysunku 36.

System zabezpieczeń pojazdu A-EVE składa się z podsystemów takich jak: czujnik obecności



Rysunek 36: Schemat blokowy systemu zabezpieczeń pojazdu autonomicznego A-EVE.  
Źródło: opracowanie własne.

kierowcy, włącznik główny, włącznik jazdy autonomicznej oraz moduł sprawdzający, czy układ sterowania został uruchomiony bez żadnych błędów. Wszystkie podsystemy wchodzące w skład systemu zabezpieczeń pojazdu A-EVE są połączone szeregowo. Pojazd A-EVE może realizować jazdę w trybie autonomicznym wyłącznie wtedy, gdy wszystkie podsystemy zabezpieczeń działają prawidłowo i wydają zezwolenie na kontynuację pracy. Niespełnienie choćby jednego warunku w łańcuchu zabezpieczeń powoduje natychmiastowe zatrzymanie pojazdu A-EVE.

Rezultatem realizacji projektu była modernizacja oraz instrumentacja pojazdu A-EVE, dzięki której możliwa stała się jazda w trybie autonomicznym. Opracowane przez zespół, którym kierowałem, rozwiązania zostały zweryfikowane podczas jazd testowych, które w większości potwierdziły ich poprawność. Na podstawie doświadczeń zebranych w trakcie tych testów przygotowywana jest druga wersja pojazdu A-EVE, umożliwiająca jazdę autonomiczną w szerszym zakresie.

W wyniku realizacji projektu opublikowano następujące artykuły:

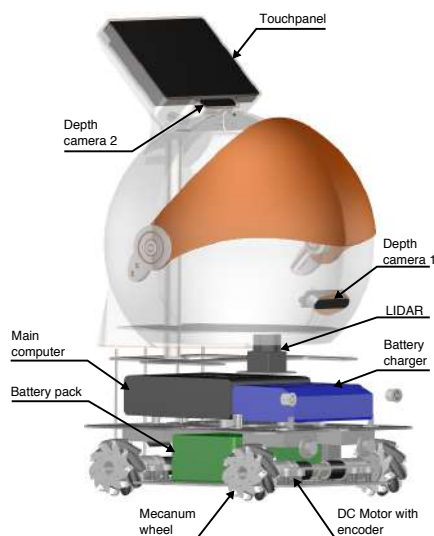
- Skruch P., **Długosz M.**, Cieśla A.: *Kluczowe elementy jazdy autonomicznej na przykładzie elektrycznego pojazdu demonstracyjnego EVE*, Napędy i Sterowanie, 2015, ISSN: 1507-7764, nr 11, s. 96–102,
- **Długosz M.**, Roman M., Węgrzyn M.: *The concept of the control system for the A-EVE autonomous electric vehicle*, Springer Advances in Intelligent Systems and Computing - proceedings of KKA 2020 – the 20th Polish control conference, 2020, ISSN: 2194-5357, vol. 1196, s. 1309–1320,
- **Długosz M.**, Roman M., Węgrzyn P.: *System sterowania autonomicznego pojazdu A-EVE*, Przegląd Elektrotechniczny, 2021, ISSN 0033-2097, nr 8, s. 42–47,
- **Długosz M.**, Roman M., Węgrzyn P.: *Virtual simulation environment of an autonomous A-EVE vehicle*, 25th international conference on Methods and Models in Automation & Robotics, 2021, e-ISBN: 978-1-7281-7380-1, s. 168–172,

oraz prace inżynierskie i magisterskie, których byłem pomysłodawcą i promotorem:

- Roman M.: *Projekt i realizacja sterownika pojazdu autonomicznego kompatybilnego z ROS*, 2019, AGH praca inżynierska,
- Roman M., Węgrzyn P.: *Sensoryczna fuzja danych na potrzeby lokalizacji i nawigacji pojazdu autonomicznego*, 2020 AGH praca magisterska,
- Brodzicki M.: *Inteligentny system rozpoznawania dopuszczalnej drogi dla pojazdu autonomicznego*, 2022, AGH praca magisterska.

### Autonomiczny robot dostawczy **AQUILO**

W latach 2018–2019 byłem kierownikiem projektu badawczo-konstrukcyjnego pt. *Inkubator Innowacyjności++ Autonomiczny Robot Dostawczo–Transportowy*, w ramach którego byłem odpowiedzialny za koncepcję oraz projekt kluczowych elementów robota. Celem projektu było skonstruowanie autonomicznego robota **AQUILO**, przeznaczonego do dostarczania niewielkich przesyłek wewnątrz budynków. Maksymalna masa przesyłek transportowanych przez robota **AQUILO** wynosi 30 kg. Dostawy miały być realizowane w sposób całkowicie automatyczny, dlatego robot **AQUILO** został zaprojektowany z możliwością nawigacji po budynku, planowania tras do miejsc docelowych oraz poruszania się w ograniczonych przestrzeniach, takich jak korytarze czy windy. Na rysunku 37 przedstawiono projekt robota **AQUILO** z oznaczeniem wszystkich kluczowych elementów, takich jak napęd, akumulatory, układ sterowania i sensory. Zdjęcie 37 ukazuje finalną realizację robota **AQUILO**.



(a) projekt robota **AQUILO**

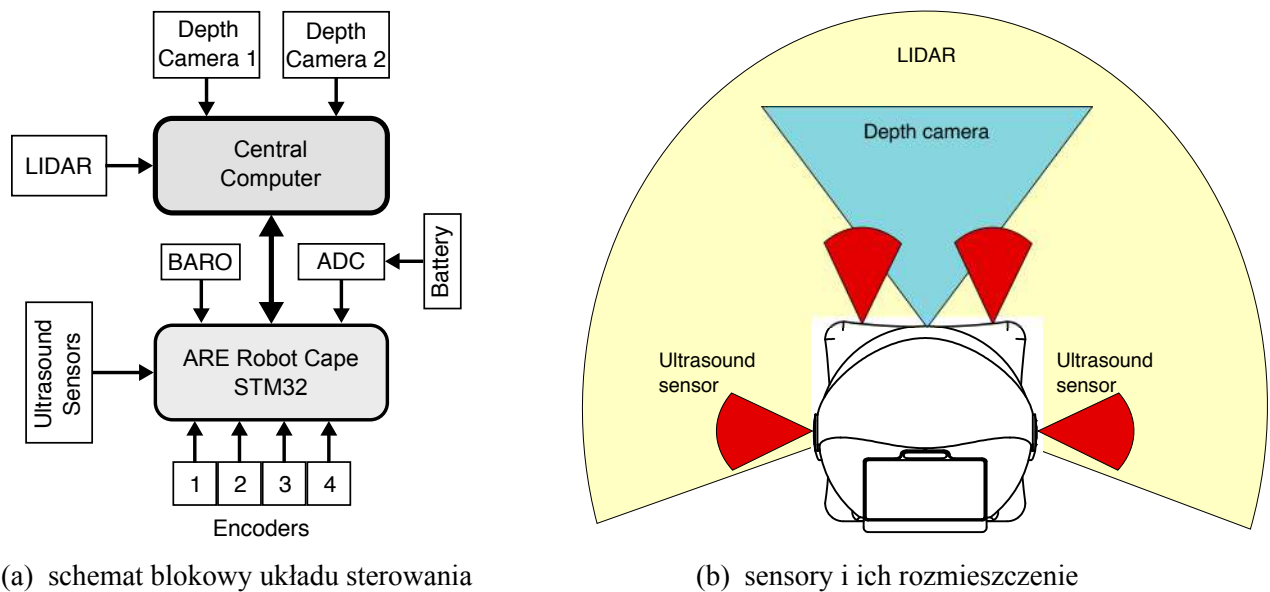


(b) realizacja robota **AQUILO**

Rysunek 37: Projekt i końcowe wykonanie robota **AQUILO**. Źródło: opracowanie własne.

Robot **AQUILO** wykorzystuje tzw. koła typu *mecanum*. Są to specjalne koła wyposażone w rolki umieszczone pod kątem 45 stopni względem osi obrotu. Każde z kół jest napędzane niezależnym silnikiem elektrycznym, co umożliwia precyzyjne sterowanie ruchem robota. Dzięki odpowiedniemu sterowaniu prędkością i kierunkiem obrotów kół robot **AQUILO** może poruszać się w dowolnym kierunku: do przodu, do tyłu, bokiem, po skosie, a także wykonywać ruchy obrotowe bez zmiany pozycji w osiach X lub Y. Takie rozwiązanie pozwala robotowi **AQUILO** na poruszanie się w bardzo ograniczonych przestrzeniach, nawet z dużą liczbą przeszkód, co czyni go idealnym do zastosowań wewnątrz budynków.

Podobnie jak w przypadku pojazdu autonomicznego **A-EVE**, w robocie **AQUILO** zastosowano dwupoziomowy układ sterowania, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 38a.

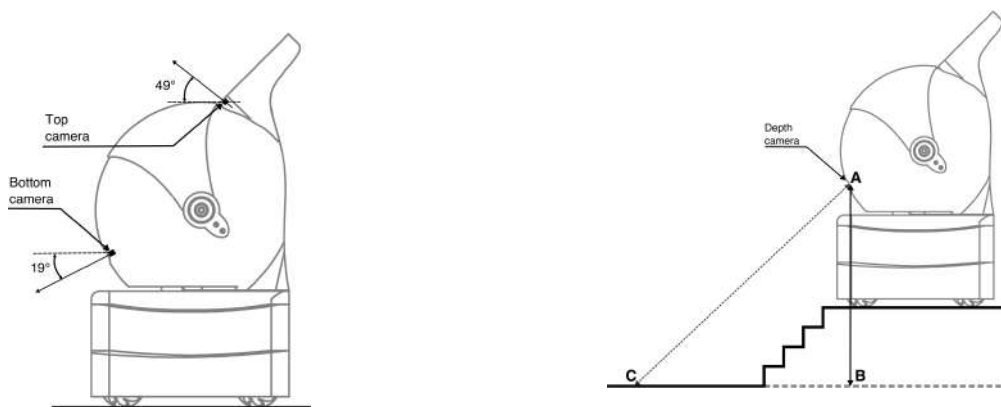


Rysunek 38: Układ sterowania i pole „widzenia” sensorów robota **AQUILO**.  
 Źródło: opracowanie własne.

Pierwszy z komputerów, oznaczony na schemacie 38a jako *Central Computer*, odpowiada za lokalizację robota, omijanie przeszkód, generowanie tras oraz komunikację z użytkownikami za pomocą panelu dotykowego. Drugi komputer, oznaczony na schemacie 38a jako *ARE Robot Cape*, generuje sygnały sterowania dla czterech silników oraz monitoruje proces rozładowania baterii robota. Do komputera *Central Computer* podłączone są sensory, takie jak dwie kamery głębokości oraz lidar, natomiast do komputera *ARE Robot Cape* podłączone są sensory, takie jak enkodery, czujniki ultradźwiękowe i barometr. Na rysunku 38b przedstawiono zasięg oraz pole „widzenia” sensorów robota **AQUILO**. Pole widzenia lidar (tzw. parametr *Horizontal Field of View*) zastosowanego w robocie **AQUILO** wynosi około 270 stopni. W związku z tym robot **AQUILO** ma programowo zablokowaną możliwość jazdy do tyłu, ponieważ w tym kierunku lidar nie zapewnia odpowiedniego pokrycia. Poruszanie się do tyłu mogłoby być niebezpieczne zarówno dla robota, jak i dla osób w jego otoczeniu.

Na rysunku 39a przedstawiono rozmieszczenie dwóch kamer głębokości. Górna kamera jest wykorzystywana do detekcji twarzy osoby znajdującej się przed robotem **AQUILO**. Dolna kamera służy do pracy w systemie *Stair Detection System (SDS)*, którego byłem pomysłodawcą (zob. rys. 39b). Schody, jako elementy mapy, nie są automatycznie oznaczane na mapach tworzonych przez robota **AQUILO** (oznaczenia muszą być dodawane ręcznie, co jest czasochłonnym i żmudnym procesem). System *SDS* umożliwia bieżące wykrywanie schodów i zapobiega poruszaniu się robota **AQUILO** po nich, ponieważ mogłoby to doprowadzić do poważnego uszkodzenia robota **AQUILO** i osób postronnych.

Oprogramowanie robota **AQUILO** zostało stworzone z wykorzystaniem frameworka ROS. Robot **AQUILO** został zaprojektowany do poruszania się po budynkach i biurach, które są wielopoziomowe. W związku z tym należało opracować dodatkowe oprogramowanie, które umożliwia wczytywanie odpowiednich map w zależności od poziomu, na którym robot aktualnie się znajduje.



(a) rozmieszczenie kamer głębokości

(b) wykorzystanie kamery głębokości w układzie bezpieczeństwa

Rysunek 39: Rozmieszczenie i wykorzystanie kamer głębokości robota **AQUILO**.  
*Źródło: opracowanie własne.*

Robot **AQUILO** nie posiada możliwości sterowania pracą wind w budynkach. W sytuacji, gdy musi przemieścić się na inny poziom, czeka przed windą na osobę, która przywoła windę, a następnie za pomocą komunikatu głosowego prosi o wybranie odpowiedniego poziomu budynku na panelu sterowania windą. Wbudowane sensory robota **AQUILO** (barometr) pozwalają mu na bieżąco kontrolować, na którym poziomie się znajduje.

W wyniku realizacji projektu budowy robota **AQUILO** powstały następujące artykuły:

- **Długosz M.**, Roman M., Węgrzyn M.: *Autonomous delivery robot AQUILO*, Springer Advances in Intelligent Systems and Computing - proceedings of KKA 2020 – the 20th Polish control conference, 2020, ISSN: 2194-5357, vol. 1196, s. 1213–1224,

oraz praca inżynierska której byłem pomysłodawcą i promotorem:

- Węgrzyn P.: *Projekt i implementacja algorytmów sterowania autonomicznego robota dostawczego*, 2019, AGH praca inżynierska.

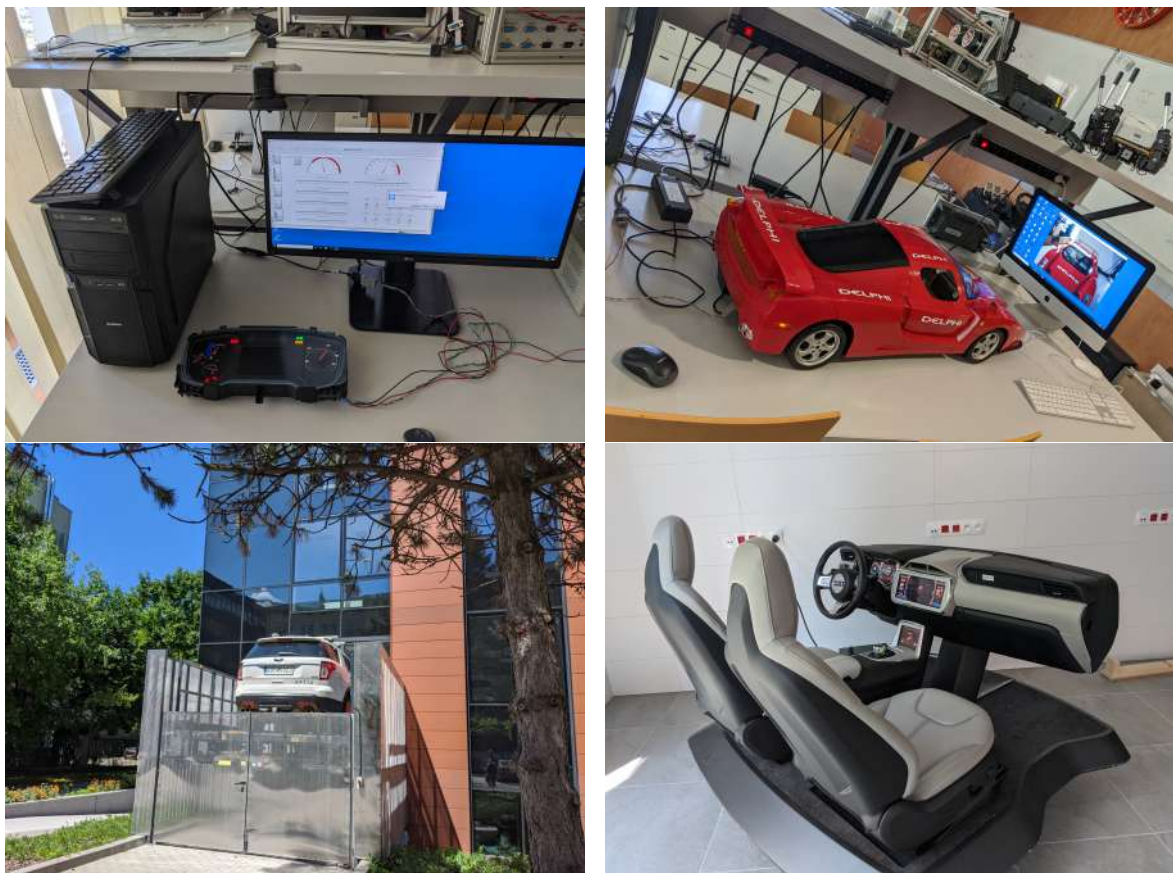
### Laboratorium Pojazdów Autonomicznych AGH-Aptiv

W roku 2013 byłem współinicjatorem utworzenia pierwszego na AGH **Laboratorium Pojazdów Autonomicznych AGH-Aptiv**. Decyzja o utworzeniu takiego laboratorium na AGH, we współpracy z firmą Delphi (obecnie Aptiv), zapadła w dniu 04.06.2014 r. podczas spotkania Prorektora prof. Tomasza Szmucha z przedstawicielami firmy Delphi. Umowa o współpracy w zakresie wyposażenia tego laboratorium oraz badań prowadzonych w jego ramach została podpisana w grudniu 2014 r. przez Kierownika Katedry Automatyki i Inżynierii Biomedycznej, prof. dr. hab. inż. Ryszarda Tadeusiewicza, oraz Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, dr. hab. inż. Antoniego Cieślę.

W laboratorium prowadzone są prace naukowo-badawcze nad algorytmami sterowania w pojazdach i robotach autonomicznych oraz budowane są prototypy pojazdów autonomicznych. Plany dotyczące laboratorium pojazdów autonomicznych zostały zaprezentowane na II Konferencji „Motoryzacja – Nauka – Przemysł”, która odbyła się 26.11.2014 r. w Warszawie, w siedzibie Ministerstwa Gospodarki.

## Laboratorium sztucznej inteligencji i pojazdów autonomicznych Aptiv-AGH

Od 2021 roku jestem kierownikiem **Laboratorium sztucznej inteligencji i pojazdów autonomicznych Aptiv-AGH**, które powstało jako kontynuacja i rozwój pierwszego laboratorium. **Laboratorium sztucznej inteligencji i pojazdów autonomicznych Aptiv-AGH** jest jednym z najnowocześniejszych laboratoriów na AGH i zajmuje powierzchnię ponad 160 m<sup>2</sup>.



Rysunek 40: Stanowiska dydaktyczne w **Laboratorium sztucznej inteligencji i pojazdów autonomicznych Aptiv-AGH**. Źródło: opracowanie własne.

Stanowiska dydaktyczne w laboratorium zostały zaprojektowane tak, aby wspierać zarówno badania, jak i kształcenie studentów w zakresie sztucznej inteligencji, robotyki i systemów autonomicznych. Każde stanowisko jest wyposażone w odpowiednie narzędzia i zasoby, które pozwalają na realizację zaawansowanych projektów w obszarze sztucznej inteligencji i autonomii pojazdów. Wyposażenie obejmuje:

1. Stacje obliczeniowe: 12 zaawansowanych stacji obliczeniowych umożliwiających przeprowadzanie badań i realizację zajęć dydaktycznych z wykorzystaniem nowoczesnych algorytmów sztucznej inteligencji oraz symulacji systemów autonomicznych.
2. Samochód osobowy Ford Explorer: pojazd wykorzystywany do badań i demonstracji w obszarze pojazdów autonomicznych, integracji systemów oraz testowania algorytmów sterowania.
3. Stanowiska z oprogramowaniem Vector Canoe: 10 stanowisk wyposażonych w zaawansowane oprogramowanie Vector Canoe wraz z licencjami. Służą one do analizy i symulacji systemów komunikacji w pojazdach.



4. Stanowiska prototypowania dSpace: 3 stanowiska do szybkiego prototypowania wyposażone w sprzęt firmy dSpace, umożliwiające testowanie i rozwój algorytmów sterowania oraz systemów autonomicznych.
5. Stanowisko Duckietown: specjalistyczne stanowisko laboratoryjne z pięcioma robotami Duckiebot, wykorzystywane do nauki i eksperymentów z zakresu nawigacji, lokalizacji oraz algorytmów sterowania w systemach wielorobotowych.
6. Winda samochodowa: winda umożliwiająca pracę z samochodami wewnątrz laboratorium, co pozwala na wygodną integrację sprzętu i prowadzenie eksperymentów.

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

W roku 2012 byłem beneficjentem programu *Top 500 Innovators*, który był realizowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. W ramach programu wyjechałem na stypendium (2012.10.13–2012.12.16) do USA. Pobyt był podzielony na dwie części: w pierwszym okresie uczestniczyłem w kursie z zakresu komercjalizacji badań naukowych oraz metodologii rozwiązywania problemów *design thinking*. Kurs był prowadzony na **Stanford University w Palo Alto (USA)**. W trakcie drugiej części pobytu odbyłem staż naukowy (2012.11.26–2012.12.18) w **NASA Ames Research Laboratory** w Mountain View (USA). W ramach stażu brałem udział w projekcie *Equations of Motion Verification (EOM)*, którego celem była weryfikacja modeli matematycznych swobodnie spadających ciał w polu grawitacyjnym. Opracowane modele były implementowane w języku FORTRAN 77 i testowane numerycznie. Udział w tym programie pozwolił mi zapoznać się zarówno teoretycznie, jak i praktycznie z metodologią *design thinking*, którą z powodzeniem wykorzystuję do rozwiązywania różnych problemów naukowych i praktycznych do dnia dzisiejszego.



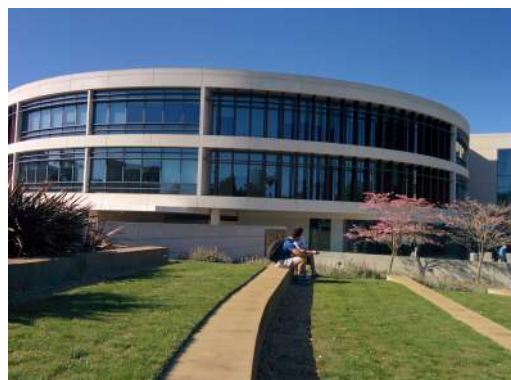
Rysunek 41: Ceremonia wręczenia certyfikatów ukończenia kursu *Design Thinking* w Stanford University, Palo Alto, USA. Źródło: opracowanie własne.

W roku 2016, na zaproszenie prof. Bodhdana Oppenheima, wyjechałem do **Loyola Marymount University w Los Angeles (USA)**. W trakcie wizyty brałem udział w wykładach i zajęciach prowadzonych przez prof. Bodhdana Oppenheima, dotyczących inżynierii systemów (*system engineering*) — interdyscyplinarnej dziedziny inżynierii, zajmującej się projektowaniem, integracją oraz zarządzaniem złożonymi systemami. Inżynieria systemów to podejście holistyczne, obejmujące całość procesu tworzenia systemu: od określenia wymagań i koncepcji, poprzez projektowanie, wdrażanie, testowanie, aż po eksploatację i wycofanie z użytkowania. Główne aspekty inżynierii systemów obejmują: definiowanie wymagań, projektowanie systemu, integrację, testowanie i weryfikację oraz zarządzanie cyklem życia produktu lub usługi. Inżynieria systemów jest szczególnie istotna w projektach o dużej skali i złożoności, takich jak projekty kosmiczne, systemy obronne, systemy telekomunikacyjne, infrastruktura transportowa i inne systemy wymagające skoordynowanego działania wielu różnych elementów. W trakcie tego wyjazdu odwiedziłem również dwa biura projektowe firmy Delphi (obecnie

Aptiv), w tym **Technologies Technical Center w Kokomo** oraz Mountain View. Podczas tych wizyt miałem okazję odbyć jazdę testową jednym z pierwszych prototypowych pojazdów autonomicznych firmy Aptiv. Samochód potrafił w pełni autonomicznie poruszać się zarówno na torze testowym, jak i na drogach publicznych, w tym na autostradach.



(a) prototypowych pojazd autonomiczny firmy Aptiv



(b) główny budynek Layola Marymount University Los Angeles

Rysunek 42: Zdjęcia z wizyty w laboratorium firmy Aptiv i Layola Marymount University Los Angeles, *Źródło: opracowanie własne.*

W roku 2022 uzyskałem dofinansowanie z programu **Erasmus+ Staff Mobility for Training**, w ramach którego wyjechałem na **Slovak University of Technology w Bratysławie**. Celem wyjazdu było szkolenie z zakresu planowania i praktycznego przeprowadzania eksperymentów polegających na logowaniu danych z jazd testowych pojazdów. W trakcie pobytu miałem okazję zapoznać się z prawidłową konfiguracją różnych typów sensorów, takich jak lidar, radar, GPS oraz systemów zapisu danych, tak aby logowane dane z jazdy samochodem były prawidłowe. Oprócz szkolenia teoretycznego zostało również przeprowadzone szkolenie praktyczne na torze Slovakia Ring, podczas którego zrealizowano kilkanaście przejazdów samochodem testowym, logując w trakcie jazdy dane z pojazdów.

W latach 2022 i 2023 regularnie wyjeżdżałem na **Slovak University of Technology w Bratysławie** w celach badawczo-eksperymentalnych w ramach stażu naukowego. Celem tych wyjazdów była współpraca z zespołem dr. hab. inż. Marka Galińskiego w obszarze pojazdów autonomicznych. Tematyka badań dotyczyła sterowania pojazdami autonomicznymi. W trakcie wizyt, na torze wyścigowym Slovakia Ring, przeprowadziliśmy szereg eksperymentów polegających na przejazdach kilku samochodów w różnych scenariuszach (wyprzedzanie, mijanie, jazda w peletonie) oraz logowaniu danych przez pojazd wyposażony w sensory i układ zapisu danych. Zdjęcia 43 przedstawiają pojazdy, ich wyposażenie oraz stanowisko do logowania danych wykorzystywane podczas przeprowadzania eksperymentów na Slovakia Ring.



(a) pojazdy testowe



(b) osprzętem do logowania danych



(c) stanowisko logowania danych w samochodzie



(d) przykładowy scenariusz realizowany podczas eksperymentu

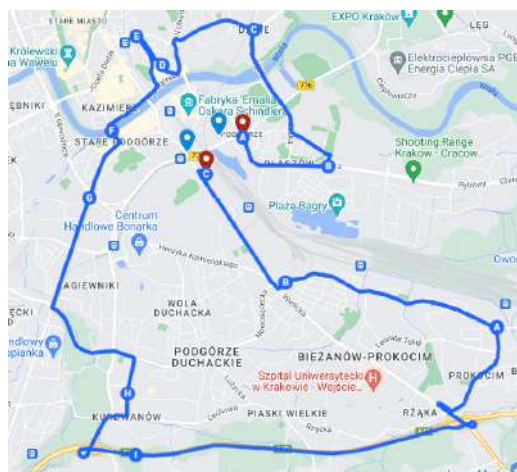
Rysunek 43: Eksperymenty na Slovakia Ring. Źródło: opracowanie własne.

W wyniku wspólnych prac powstały następujące publikacje:

- Bartosik G., Danko J., **Długosz M.**, Galinski M., at all.: *The Influence of the Relative Vehicles Speed on the Environmental Perception-Tests on Slovakia Ring*, Advanced, contemporary control : proceedings of the XXI Polish Control Conference, 2023, ISBN: 978-3-031-35172-3, vol. 2, s.235-244.
- Siwek P., Skruch P., **Długosz M.**: *A clustering-based data reduction for the large automotive datasets*, IEEE - International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 2023, ISSN: 2835-2815, s. 234–239.

Kolejną aktywnością związaną z tematyką pojazdów autonomicznych, w którą jestem zaangażowany, jest projekt **AGHDrive** (<https://drive.agh.edu.pl/>). Celem projektu jest utworzenie pierwszego w Polsce zbioru danych z przejazdów po różnych miastach Polski i ich okolicach, zarejestrowanych przez pojazdy wyposażone w sensory, takie jak lidar, radar, kamery itp. Na chwilę obecną został zrealizowany jeden przejazd w mieście Kraków i jego okolicach. Rysunek 44 przedstawia zaznaczoną na mapie trasę przejazdu.

Dodatkowo, zalogowane dane są etykietowane, co oznacza, że dla danych pochodzących np. z kamer, na każdej klatce oznaczane są elementy (w postaci tzw. *bounding box*-ów), takie jak inne pojazdy, piesi, znaki drogowe, wraz z przypisaniem do nich klasy obiektu oraz współrzędnych *bounding box*-a. Takie zbiory danych są od lat tworzone przez różne organizacje i firmy (np. KITTI, nuScenes,



Rysunek 44: Trasa przejazdu w samochodzie w ramach projektu AGHDrive. Źródło: opracowanie własne.

Waymo, SemanticKITTI i inne) na całym świecie. Wykorzystuje się je do trenowania oraz sprawdzania poprawności działania różnego rodzaju systemów sterowania lub detekcji, wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe. Zdjęcia 45 przedstawiają przykładowe obrazy z kamer umieszczonych w samochodzie, wraz z zaznaczonymi obiektami i przypisanymi do nich klasami.



Rysunek 45: Przykładowe obrazy z kamer wraz z zaznaczonymi obiektami i przypisanymi do nich klasami. Źródło: opracowanie własne.

Samochód, który został wykorzystany do logowania danych, był wyposażony w następujące sensory: jeden lidar 32-wiązkowy, trzy kamery kolorowe (1920x1200) oraz jeden sensor GPS o wysokiej dokładności. Opracowany zbiór danych jest udostępniany nieodpłatnie w celach badawczych. W planach projektu jest zebranie danych z największych polskich miast.

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

Od roku 2014 sprawuję opiekę nad studenckim **Kołem Naukowym INTEGRA**. Członkowie koła realizują różnorodne projekty związane z robotyką, spośród których można wymienić na przykład:

- **KrakSat** – projekt mający na celu budowę i umieszczenie na orbicie niewielkiego satelity (projekt zrealizowany, satelita został wyniesiony na orbitę).
- **Micromouse, Micromouse Vrisker** – projekty małych autonomicznych robotów, których zadaniem jest znalezienie drogi wyjściowej z labiryntu bez mapy.
- **Autonomous Robot Delivery** – autonomiczny robot dostawczy, którego zadaniem jest przewożenie niewielkich przesyłek na terenie budynków AGH.
- **AQUILO** – autonomiczny robot dostawczy, którego zadaniem jest przewożenie niewielkich przesyłek na terenie budynków AGH, wyposażony w napęd typu *mecanum*.
- **Zebulon** – kroczący robot typu heksapod.
- **Linefollower** – roboty, których zadaniem jest podążanie za linią. Roboty tego typu regularnie biorą udział (z sukcesami) w różnych zawodach.
- **Platforma Szachowa** – celem projektu jest zbudowanie platformy szachowej, na której figury przesuwają się za pomocą poruszającego się pod planszą elektromagnesu.
- **Minisumo** – projekty autonomicznych robotów, które następnie walczą ze sobą według zasad sumo.
- **Duckietown** – projekt, którego celem jest rozwijanie algorytmów jazdy autonomicznej z wykorzystaniem niewielkich robotów Duckiebot.
- **F1/10** – projekt, którego celem jest budowa autonomicznych modeli pojazdów, które następnie biorą udział w wyścigach. Zawody rozgrywane są w różnych miejscach na świecie.

Do największych sukcesów członków koła można zaliczyć szereg zdobytych medali i tytułów na różnego rodzaju konkursach. Od kilkunastu lat członkowie **KN INTEGRA** regularnie organizują międzynarodowy festiwal i zawody robotów **ROBOCOMP**, które odbywają się w Krakowie. Kontynuacja festiwalu została przerwana na dwa lata z powodu pandemii COVID-19. W roku 2024 festiwal został reaktywowany i cieszył się dużym zainteresowaniem wśród zawodników krajowych oraz zagranicznych.

W dniu 17 czerwca 2016 roku odbyła się *International Conference on Applying Systems Engineering for Embedded Systems Development*. Organizatorem konferencji było stowarzyszenie **INCOSE Poland** (*International Council on Systems Engineering*) a ja byłem **członkiem komitetu organizacyjnego**. *International Council on Systems Engineering (INCOSE)* to międzynarodowa organizacja zajmująca się promowaniem i rozwijaniem inżynierii systemów. **INCOSE** działa na całym świecie, wspierając inżynierów systemów w różnych sektorach, takich jak lotnictwo, kosmonautyka, energetyka, telekomunikacja, transport, ochrona zdrowia i wiele innych. Celem organizacji jest zapewnienie, że inżynieria systemów będzie kluczowym czynnikiem w rozwijaniu złożonych systemów, które spełniają wymagania użytkowników i interesariuszy. W konferencji brali udział prelegenci z Niemiec, Anglii i USA, a łącznie wygłoszono 5 referatów.



Rysunek 46: Plakat informacyjny konferencji **INCOSE**. Źródło: *opracowanie własne*.

W dniach 18–21 czerwca 2017 roku odbyła się *Krajowa Konferencja Automatyki (KKA 2017)*, której organizatorem była Katedra Automatyki i Robotyki Wydziału EAIiIB AGH w Krakowie, a ja pełniłem funkcję **sekretarza**. Uroczyste otwarcie nastąpiło w Auli AGH 19 czerwca 2017 roku. Na konferencję **KKA 2017** zarejestrowało się 366 autorów, którzy zgłosili 170 artykułów. W wyniku procesu recenzji opublikowano 83 artykuły, a 82 referaty zostały wygłoszone, w tym 4 referaty plenarne. Liczba zarejestrowanych i potwierdzonych uczestników (zgodnie z listą podpisów) **KKA 2017** w Krakowie wyniosła ostatecznie 114 osób. Szczegóły konferencji można znaleźć pod adresem: <http://kka2017.kaib.agh.edu.pl/>. Rysunek 47a przedstawia logo konferencji **KKA 2017**, które opracowałem i które udostępniłem do wykorzystania.



(a) logo konferencji **KKA 2017** zaprojektowane przez mnie



(b) uczestnicy konferencji

Rysunek 47: Krajowa Konferencja Automatyki 2017. Źródło: *opracowanie własne*.

W roku 2018, w ramach przyznanego grantu ministerialnego *Najlepsi z Najlepszych! 2.0*, interdyscyplinarny zespół studentów **AGH Racing** (w skład którego wchodził również członek **KN INTEGRA**) zajął **9. miejsce** w klasyfikacji ogólnej (na 100 startujących zespołów) w prestiżowych zawodach Formuły Student, które odbyły się w Michigan, USA. Studenci AGH przylecieli do USA na początku maja, aby zmontować swój bolid „Grażyna” i przetestować go przed zawodami. Po przejściu kontroli technicznej zespół odniósł sukces w konkurencjach statycznych, zajmując miejsce wśród czterech najlepszych drużyn w prezentacji biznesowej oraz osiągając dobre wyniki w raportach kosztów i designu. W konkurencjach dynamicznych **AGH Racing** osiągnął 6. miejsce w Skid-Padzie, 25. miejsce w Acceleration i 30. miejsce w Autocrossie. Zwieńczeniem zawodów był wyścig Endurance,

w którym zespół zajął 5. miejsce, co znacząco przyczyniło się do ich wysokiej pozycji w klasyfikacji generalnej.



(a) zespół studentów biorących udział w zawodach



(b) przejazd bolidu „Grażyna”

Rysunek 48: . Zespół AGH Racing oraz bolid „Grażyna” na zawodach.

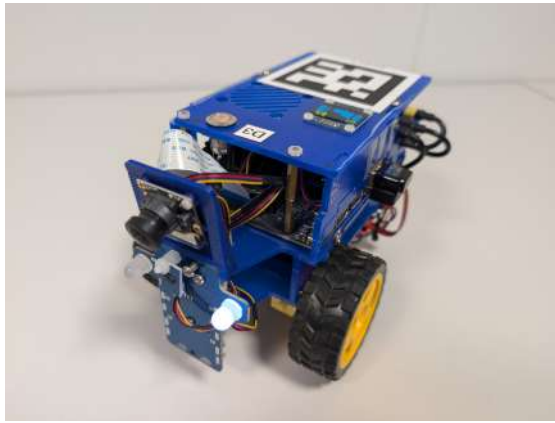
Źródło: <https://www.agh.edu.pl/aktualnosci/info/agh-racing-w-pierwszej-10-najlepszych-zespolow-na-zawodach-formuly-student-michigan/>

W latach 2021–2022 **KN Integra** była także beneficjentem grantu ministerialnego *Studenckie koła naukowe tworzą innowacje*, w ramach którego zrealizowano stanowisko laboratoryjne robotów autonomicznych **Duckiebot**. Międzynarodowy projekt **Duckietown** to inicjatywa edukacyjna, początkowo stworzona przez Massachusetts Institute of Technology (MIT), a obecnie zarządzana przez politechnikę ETH Zurich. Jej celem jest nauczanie robotyki oraz systemów autonomicznych pojazdów. Roboty **Duckiebot** to małe autonomiczne pojazdy, które poruszają się po makiecie miasta **Duckietown**. Wyposażone są w sensory, takie jak kamera, enkodery oraz czujnik odległości ToF, które umożliwiają im nawigację po makiecie, unikanie przeszkód i poruszanie się zgodnie z zasadami ruchu drogowego. Projekt promuje praktyczną naukę, rozwijając umiejętności programowania, inżynierii oraz sztucznej inteligencji, a także współpracę między studentami z różnych uczelni na całym świecie. Zdjęcia 49 przedstawiają robota **Duckiebot** oraz makietę miniaturowego miasta **Duckietown**. Stanowisko laboratoryjne **Duckietown** wykorzystywane jest zarówno do nauczania (np. na przedmiotach takich jak: *Robotyka mobilna*, *Zaawansowane programowanie robotów mobilnych*), jak i do badań naukowych oraz testowania w skali laboratoryjnej algorytmów zarządzania flotą autonomicznych robotów.

W wyniku realizacji projektu **Duckietown** powstały następujące artykuły:

- **Długosz M.**, Skruch P., at all.: *Application of PID controller and CNN to control Duckiebot robot*, ICETA 2023 IEEE : proceedings of the 21st of International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications : information and communication technologies in learning, 2023, DOI: 10.1109/ICETA61311.2023.10344003,
- Skruch P., **Długosz M.**, at all.: *Duckietown project pros and cons*, ICETA 2023 IEEE : proceedings of the 21st of International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications : information and communication technologies in learning, 2023, DOI: 10.1109/ICETA61311.2023.10343846,





(a) robot **Duckiebot**



(b) makieta miasta

Rysunek 49: Elementy składowe projektu **Duckietown**. Źródło: *opracowanie własne*.

oraz praca inżynierska której byłem pomysłodawcą i promotorem:

- Soltys M.: *Wizyjny system wyznaczania pozycji mobilnych robotów*, 2021, AGH praca inżynierska.

W roku 2023 członkowie koła **KN INTEGRA**, za moją namową, po raz drugi otrzymali grant ministerialny *Najlepsi z Najlepszych 4.0*, w ramach którego dwukrotnie wzięli udział w zawodach modeli pojazdów autonomicznych Formuły **F1TENTH** (<https://f1tenth.org/>). Jako opiekun naukowy zespołu studentów biorących udział w projekcie zaproponowałem algorytm generowania optymalnej ścieżki, po której pojazd porusza się po torze o układzie nieznanym dla pojazdu. Projekt **F1TENTH** to przedsięwzięcie edukacyjno-badawcze, które wykorzystuje autonomiczne modele pojazdów wyścigowych w skali 1:10. Jest to platforma open-source, umożliwiająca studentom naukę i rozwijanie technologii autonomicznej jazdy. Uczestnicy budują, programują i testują małe autonomiczne pojazdy zdolne do szybkiego poruszania się po torach wyścigowych. Kluczowym elementem projektu jest rozwijanie algorytmów percepcji, planowania ruchu oraz sterowania pojazdem. Projekt łączy teoretyczne aspekty sztucznej inteligencji i robotyki z praktycznymi umiejętnościami inżynierskimi. **F1TENTH** organizuje także zawody, w których zespoły rywalizują między sobą, aby sprawdzić, czyje algorytmy jazdy autonomicznej działają najlepiej. Zespoły muszą opracować kompleksowe rozwiązania obejmujące detekcję przeszkód, unikanie kolizji oraz optymalizację trajektorii.

W zawodach rozegranych w Yeosu, w Korei Południowej, studenci AGH zajęli trzecie miejsce. Był to znaczący sukces, szczególnie biorąc pod uwagę, że zespół **KN INTEGRA** startował po raz pierwszy w tego typu zawodach. Start w zawodach i zdobycie trzeciego miejsca potwierdziły, że zastosowany algorytm generowania optymalnej ścieżki działał poprawnie. Zdjęcia 50 przedstawiają ceremonię wręczenia nagród, dyplom, zwycięski model pojazdu oraz tor, po którym ścigają się modele **F1TENTH**.

W wyniku realizacji projektu **F1TENTH** powstał artykuł:

- Morys-Magiera A., Lis A., Pudło J., Papierok A., **Długosz M.**, Skruch P.: *Reactive control algorithm for F1TENTH autonomous vehicles in unknown dynamic environments*, Advanced, contemporary control : proceedings of the XXI Polish Control Conference, Gliwice, Poland, 2023, vol. 2, ISBN: 978-3-031-35172-3; s. 225–234.



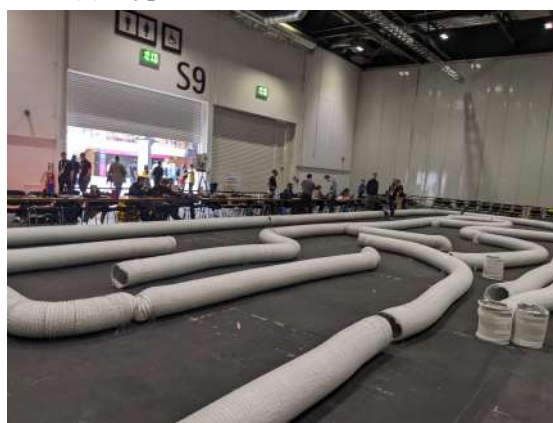
(a) zespół studentów startujący w zawodach



(b) dyplom zawodów FITENTH



(c) pojazd startujący w zawodach



(d) tor na którym ścigają się pojazdy

Rysunek 50: Zawody forumły FITENTH w Korei. Źródło: opracowanie własne.

W roku 2024, na zaproszenie prof. Ulricha Bükera, wyjechałem do **University of Applied Sciences and Arts Ostwestfalen-Lippe** w Lemgo, Niemcy. Celem wizyty było nawiązanie współpracy pomiędzy uczelniami w celu prowadzenia wspólnych badań w obszarze pojazdów autonomicznych, wymiany studenckiej i pracowników oraz wspólne aplikowanie w projektach europejskich. W trakcie wizyty wygłosiłem wykład, którego tematyka obejmowała zagadnienia takie jak projektowanie i budowa autonomicznych robotów mobilnych. Drugim celem wizyty były rozmowy dotyczące zainicjowania wymiany studentów, doktorantów oraz pracowników pomiędzy uniwersytetami. Na zdjęciach 51 przedstawiono wykład autora oraz wspólne zdjęcie z władzami uniwersytetu po jednym ze spotkań.



(a) wykład dla studentów



(b) spotkanie z władzami uniwersytetu

Rysunek 51: Wizyta w **University of Applied Sciences and Arts Ostwestfalen-Lippe**.  
*Źródło: opracowanie własne.*

W roku 2024, na zaproszenie organizatorów, byłem uczestnikiem **XXXIII Forum Ekonomicznego w Karpaczu**. W trakcie forum brałem udział jako ekspert w panelu pod tytułem „**Innowacje i mobilność: spojrzenie w przyszłość**”, który był moderowany przez dr. hab. inż. Pawła Skrucha. Na forum byłem również moderatorem panelu pod tytułem „**Regulacje i polityka: ramy prawne dla AI i robotyki**”. Tematem panelu było omówienie aspektów prawnych związanych z AI i robotyką, w tym praw własności do wyników oraz odpowiedzialności za ich rezultaty.

**7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

Regularnie podnoszę swoje umiejętności i kwalifikacje, biorąc udział w kursach, szkoleniach oraz warsztatach, a także wyjeżdżając m.in. na ministerialne stypendia zagraniczne lub w ramach programu Erasmus. Poniżej przedstawiam wykaz najważniejszych szkoleń i kursów, w których wziąłem udział.

- **Top 500 Innovators**

Udział w programie Top 500 Innovators (2012.10.13–2012.12.16), *Science Management Commercialization*, który był realizowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Uczestnicy programu brali udział w kursach z zakresu komercjalizacji badań naukowych oraz metodologii rozwiązywania problemów *design thinking*. Kursy były prowadzone na **Stanford University w Palo Alto, USA**.

- **Studium doskonalenia dydaktycznego dla pracowników i doktorantów AGH**

Szkolenie z zakresu edukacji osób dorosłych o wymiarze 75 godzin dydaktycznych, przeprowadzone zgodnie z zarządzeniem nr 33/2010 Rektora AGH z dnia 25 sierpnia 2010 roku. Numer zaświadczenia: 18/2014.

- **E-learning – szkolenie certyfikujące**

Szkolenie z zakresu metod prowadzenia zajęć w formie e-learningu, przeprowadzone zgodnie z zarządzeniem nr 12/2015 Rektora AGH z dnia 5 maja 2015 roku, o wymiarze 10 godzin zegarowych. Numer zaświadczenia: CEL/130412/P0135.

- **Komercjalizacja badań naukowych kluczem konkurencyjności województwa małopolskiego — szkolenie z zakresu zakładania i prowadzenia firm typu spin-out i spin-off.**

Szkolenie z zakresu pozyskiwania i wykorzystania funduszy unijnych w celu komercjalizacji wyników naukowych. Kurs obejmował również podstawy przedsiębiorczości, takie jak: aspekty prawne prowadzenia firmy, księgowość oraz tworzenie biznesplanów. Wymiar godzinowy: 95 godzin. Numer projektu: POKL.08.02.01-12-017/08.

- **Matryca logiczna projektów innowacyjnych wspieranych ze środków funduszy europejskich 2007–2013**

Szkolenie organizowane przez *Centrum Transferu Technologii* z zakresu wykorzystywania funduszy europejskich. Numer zaświadczenia: 2009/11/27/01/15.

- **Szkolenie z metodologii zarządzania projektami PRINCE2**

Szkolenie organizowane w ramach zadania 6 — „*Podniesienie kompetencji kadry administracyjnej projektu pn. Zintegrowany Program Rozwoju Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie*”, POWER 3.5 (POWR.03.05.00-00-Z307/17). Szkolenie zakończone egzaminem w akredytowanym ośrodku szkoleniowym.

- **Szkolenie on-line Nature masterclasses**

Szkolenie online, w ramach którego uzyskałem następujące certyfikaty: *Writing a Research Paper, Publishing a Research Paper, Writing and Publishing a Review Paper*.

- **Szkolenie CANoe Fundamentals Training**

Szkolenie organizowane przez firmę Vector, zakończone uzyskaniem certyfikatu CANoe Fundamentals Training.

- **Szkolenie FreeRTOS + C Programming for Embedded Systems dla pracowników dydaktycznych AGH**

Szkolenie organizowane w ramach projektu *Zintegrowany Program Rozwoju Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie*, nr POWR.03.05.00-00-Z309/18.

## **Popularyzacja nauki**

Wielokrotnie brałem udział w różnego rodzaju wydarzeniach, takich jak Noc Naukowców, Festiwal Nauki, Dni Otwarte AGH oraz Dni Otwarte Wydziału, których celem była popularyzacja nauki oraz jej osiągnięć. W trakcie realizacji projektów promowałem i popularyzowałem naukę, uczestnicząc w różnych wydarzeniach lub wypowiadając się w mediach, np.:

- **Teleexpress TVP1** (2018.10.25) – *Senster odnaleziony. Znow porusza wyobraźnię*  
<https://teleexpress.tvp.pl/39631607/senster-odnaleziony-znow-porusza-wyobraznie>
- **Kronika Krakowska TVP3** (2018.10.28) – *Odnaleziono zaginionego Senstera, pół robota, pół rzeźbę*  
<https://krakow.tvp.pl/39689412/odnaleziono-zaginionego-senstera-pol-robotapol-rzezbe>
- **Kronika Krakowska TVP3** (2018.01.30) – *Pierwszy w Polsce... Robot-dostawca*  
<https://www.krakow.tvp.pl/35818843/pierwszy-w-polsce-robotdostawca>
- **Radio Kraków** (2018.01.18) – *Zbudowali autonomicznego kuriera przesyłek teraz pracują nad alternatywą dla sklepowych koszyków*  
<http://www.radiokrakow.pl/audycje/pracuja-na-nobla/zbudowali-autonomicznego-kuriera-przesylek-teraz-pracuja-nad-alternatywa-dla-sklepowych-koszykow/>
- **Gazeta Wyborcza** (2018.02.02) – *Urodzaj robotów od studentów AGH. Rozwoją przesyłki, pokonują labirynt*  
<http://krakow.wyborcza.pl/krakow/7,44425,22972066,urodzaj-robotow-od-studentow-agh-rozwoza-przesylki-pokonuja.html>
- **Droniada** (2016.06.19) – prezentacja autonomicznego samochodu EVE na paradzie robotów
- **Festiwal Nauki Kraków Rynek Główny** (2016.05.20) – prezentacja autonomicznego samochodu EVE
- **portal INNPoland** (2016.03.29) – *Google im nie podskoczy! Krakowiaci konstruują samosterejujący samochód*  
<https://innpoland.pl/125893,krakowscy-inzynierowie-staja-w-szranki-z-google-ich-autonomiczne-auto-w-czerwcu-wyjedzie-do-ludzi>

- **portal Love Kraków** (2016.02.18) – *Krakowscy studenci skonstruowali samochód, który nie potrzebuje kierowcy*  
[http://lovekrakow.pl/aktualnosci/krakowscy-studenci-skonstruowali-samochod-ktory-nie-potrzebuje-kierowcy-zdjecia-video\\_13071.html](http://lovekrakow.pl/aktualnosci/krakowscy-studenci-skonstruowali-samochod-ktory-nie-potrzebuje-kierowcy-zdjecia-video_13071.html)
- **Polskie Radio Poland** (2016.02.09) – *The car of the future: no driver needed*  
<http://www.thenews.pl/1/6/Artykul/240037,The-car-of-the-future-no-driver-needed>
- **TVN Fakty** (2016.02.16) – *Kraków: studenci skonstruowali pojazd, który może zrewolucjonizować motoryzację. Ich auto samo jeździ, a człowiek jest tylko pasażerem*  
<https://fakty.tvn24.pl/fakty-po-poludniu,96/krakow-studenci-skonstruowali-pojazd-ich-auto-samo-jezdzi,619495.html>
- **Radio Eska** (2016.01.21) – *Naukowcy z AGH konstruują samochód przyszłości!*  
<http://krakow.eska.pl/newsy/naukowcy-z-agh-konstruja-samochod-przyszlosci-audio-zdjecia-wideo/103524>
- **Kronika Krakowska TVP3** (2016.01.26) – *W Krakowie powstaje auto, które nie potrzebuje kierowcy*  
<https://krakow.tvp.pl/23763101/w-krakowie-powstaje-auto-ktore-nie-potrzebuje-kierowcy>
- **Radio Kraków: Pracują na Nobla** (2015.12.24) – *Na AGH powstaje auto, które samo jeździ. Ma wozić turystów po kampusie*  
<http://www.radiokrakow.pl/audycje/pracuja-na-nobla/na-agh-powstaje-auto-ktore-samo-jezdzi-ma-wozic-turystow-po-kampusie/>
- **Radio Kraków: W kręgu nauki** (2015.08.23) – *Samochód autonomiczny EVE*  
<http://www.radiokrakow.pl/audycje/w-kregu-nauki/audycja-z-dn23082015-r/>
- **Duckietown** (2024.04.29) – *Teaching robot autonomy at AGH Krakow*  
<https://duckietown.com/dlugosz-robot-autonomy/>

## Stypendia i nagrody

- Brązowa Odznaka Rektora AGH za bardzo dobre wyniki w nauce za rok akademicki 1997/1998
- Nagroda Rektora AGH zespołowa III stopnia za osiągnięcia naukowe dydaktyczne (2015)
- Nagroda Rektora AGH zespołowa II stopnia za osiągnięcia naukowe dydaktyczne (2017)
- Nagroda Rektora AGH zespołowa za osiągnięcia organizacyjne (2021)
- Dyplom uznania od JM Rektora AGH za wyjątkowe zaangażowanie i wieloletnią pracę na rzecz studenckiego ruchu naukowego, 2023, 2024
- Medal Komisji Edukacji Narodowej, 2023

- Nagroda Ministra Edukacji i Nauki za opiekę nad kołem naukowym KN Integra oraz za szczególne osiągnięcia naukowe, 2023

#### **Dane bibliometryczne:**

Ocena bibliometryczna opracowana na podstawie bazy **Web of Science Core Collection** (stan na dzień 05.12.2024)

- Sumaryczny Impact Factor według listy JCR=**9.379**
- Liczba publikacji: **18**, w tym **8** z listy Journal Citation Reports (JCR) posiadające Impact Factor (IF)
- Łączna liczba cytowań publikacji **43**, z wyłączeniem autocytowań **31**
- Indeks Hirscha **4**

Ocena bibliometryczna opracowana na podstawie bazy **Scopus** (stan na dzień 05.12.2024)

- Liczba publikacji: **32**
- Łączna liczba cytowań publikacji **83**, z wyłączeniem autocytowań wszystkich współautorów **50**
- Indeks Hirscha **5**

Ocena bibliometryczna opracowana na podstawie bazy **Google Scholar** (stan na dzień 05.12.2024)

- Liczba publikacji: **79**
- Łączna liczba cytowań publikacji **232**
- Indeks Hirscha **8**

*(podpis wnioskodawcy)*

# Bibliografia

- [1] Kun Deng, Prabir Barooah, Prashant G Mehta, and Sean P Meyn. Building thermal model reduction via aggregation of states. In *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, pages 5118–5123. IEEE, 2010.
- [2] MM Gouda, Sean Danaher, and CP Underwood. Low-order model for the simulation of a building and its heating system. *Building Services Engineering Research and Technology*, 21(3):199–208, 2000.
- [3] Wojciech Mitkowski. *Stabilizacja Systemów Dynamicznych*. WNT Warszawa, 1991.
- [4] J. Fourier. *The Analytical Theory of Heat*. Dover Publications, Inc., New York, USA, 1955.
- [5] Polish Committee for Standardization. *PN-EN ISO 13790:2009. Thermal performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*. <http://www.pkn.pl> [29 August 2012], 2009.
- [6] Polish Committee for Standardization. *PN-EN ISO 6946:2008. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*. <http://www.pkn.pl> [29 August 2012], 2008.
- [7] Polish Committee for Standardization. *PN-B-03430:1983. Ventilation in dwelling and public utility buildings - Specifications*. <http://www.pkn.pl> [29 August 2012], 1983.
- [8] Mark Utting and Bruno Legard. *Practical model-based testing: a tools approach*. Elsevier, 2010.
- [9] Arilo C Dias Neto, Rajesh Subramanyan, Marlon Vieira, and Guilherme H Travassos. A survey on model-based testing approaches: a systematic review. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Empirical assessment of software engineering languages and technologies: held in conjunction with the 22nd IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE) 2007*, pages 31–36, 2007.
- [10] ISTQB (International Software Testing Qualifications Board). Standard glossary of terms used in software testing, October 2012.
- [11] C Kaner. *Testing Computer Software*. Wiley, 1999.
- [12] IEEE. Ieee standard glossary of software engineering terminology, 1990.



- [13] Joseph Clarke. *Energy simulation in building design*. Routledge, 2007.
- [14] JA Crabb, N Murdoch, and JM Penman. A simplified thermal response model. *Building Services Engineering Research and Technology*, 8(1):13–19, 1987.
- [15] CP Underwood. An improved lumped parameter method for building thermal modelling. *Energy and Buildings*, 79:191–201, 2014.
- [16] Dominik Sierociuk. *Estymacja i sterowanie dyskretnych układów dynamicznych ułamkowego rzędu opisanych w przestrzeni stanu*. PhD thesis, The Institute of Control and Industrial Electronics, 2008.
- [17] Piotr Bania and Jerzy Baranowski. Laguerre polynomial approximation of fractional order linear systems. In *Advances in the Theory and Applications of Non-integer Order Systems: 5th Conference on Non-integer Order Calculus and Its Applications, Cracow, Poland*, pages 171–182. Springer, 2013.
- [18] Lennart Ljung. *System identification toolbox: User's guide*. Citeseer, 1995.
- [19] Chris Underwood and Francis Yik. *Modelling methods for energy in buildings*. John Wiley & Sons, 2008.
- [20] Frank P Incropera, David P DeWitt, Theodore L Bergman, Adrienne S Lavine, et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*, volume 6. Wiley New York, 1996.
- [21] M.M. Gouda, S. Danaher, and C.P. Underwood. Low-order model for the simulation of a building and its heating system. *Building Services Engineering Research and Technology*, 21(3):199–208, 2000.
- [22] Karl Johan Åström and Richard Murray. *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*. Princeton university press, 2021.
- [23] Karl Johan Aström and Richard M Murray. *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*. Princeton university press, 2010.
- [24] Glenn Vinnicombe. *Uncertainty and Feedback: loop-shaping and the  $v$ -gap metric*. Imperial College Press, London, UK, 2001.
- [25] Liang Yang and Jianying Yang. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 21(16):1865–1879, 2011.
- [26] Xinghuo Yu and Man Zhihong. Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 49(2):261–264, 2002.
- [27] Jerzy Baranowski. Tuning of strongly damped angular velocity observers. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)(6)*, 2012.

- [28] Guang-Da Hu and Mingzhu Liu. The weighted logarithmic matrix norm and bounds of the matrix exponential. *Linear algebra and its applications*, 390:145–154, 2004.
- [29] Valentino Braitenberg. *Vehicles: Experiments in synthetic psychology*. MIT press, 1986.