

Wojciech MOĆKO
Wojciech ŻAGAN

ANALIZA MOŻLIWOŚCI NORMALIZACJI WARTOŚCI SKŁADOWYCH TRÓJCHROMATYCZNYCH Z WYKORZYSTANIEM PRZEKSZTAŁCENIA NIELINIOWEGO

STRESZCZENIE *W referacie przedstawiono koncepcję zastosowania nieliniowego przekształcenia pomiędzy układami barw. Zostało ono opracowane na potrzeby kolorymetru matrycowego wykorzystującego cyfrowy aparat fotograficzny. Opiera się na założeniu, że bodźce barwne o zbliżonych współrzędnych chromatycznych mają podobne kształty rozkładów widmowych. Uzyskane wartości błędu pomiaru pozwalają na zastosowanie opracowanego systemu w praktyce.*

Słowa kluczowe: *kolorymetr, scalony przetwornik obrazu, pomiary fotometryczne, cyfrowy aparat fotograficzny, kolorymetr matrycowy*

Mgr inż. Wojciech MOĆKO

e-mail: wojciech.mocko@its.waw.pl

Institut Transportu Samochodowego
Zakład Oświetlenia I Wyposażenia Elektrycznego Pojazdów

Prof. dr hab. inż. Wojciech ŻAGAN

e-mail: wojciech.zagan@ien.pw.edu.pl

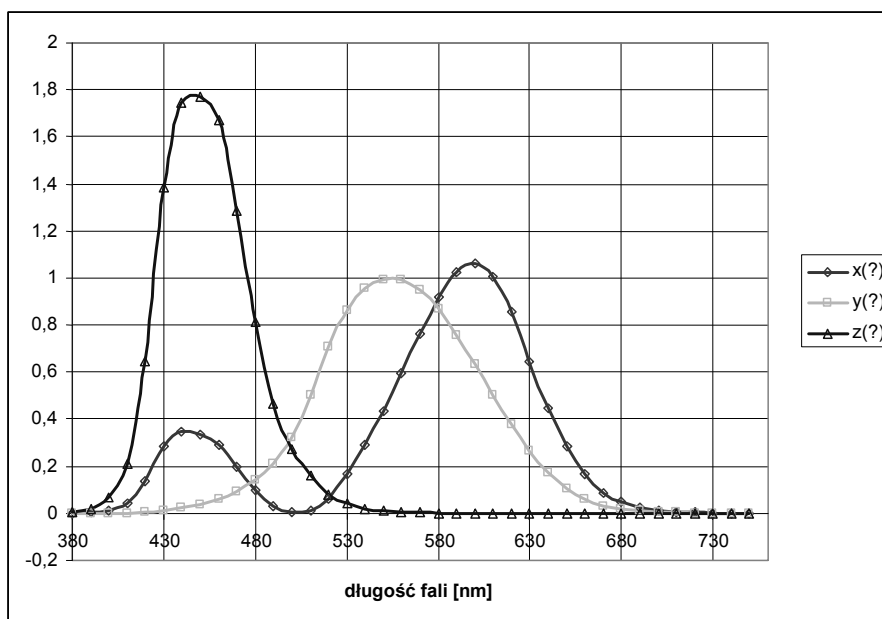
Politechnika Warszawska
Zakład Techniki Świetlnej

1. WSTĘP

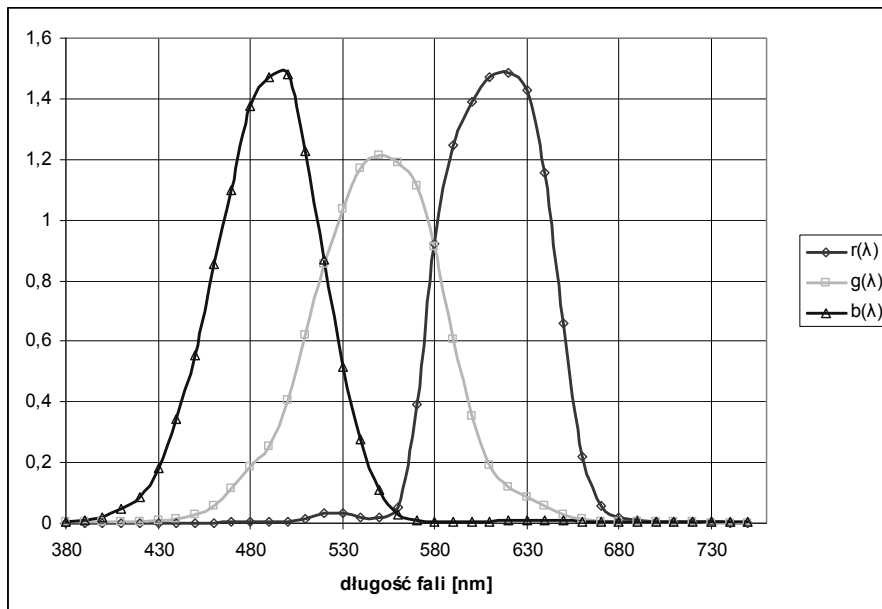
Do opisu bodźca barwnego [1][2], wystarczy określić ilość bodźców podstawowych, które należy zmieszać, aby go odtworzyć. Ilość tych bodźców jest nazywana składowymi trójchromatycznymi. Zgodnie z I prawem Grassmana wystarczą trzy barwy (bodźce) podstawowe, które muszą być niezależne, tzn. żadnej nie można odtworzyć z pozostałych. Można wybrać nieskończenie wiele zestawów barw podstawowych, które spełnią warunek niezależności. Aby wynikiem pomiaru składowych trójchromatycznych nadać wartość metrologiczną i umożliwić porównywanie otrzymanych wyników, w 1931 roku Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa zatwierdziła układ kolorymetryczny CIE 1931 normalny (X Y Z), będzie on w dalszej części tekstu nazywany w skrócie CIE XYZ. W publikacji [3] określono funkcje kolorymetryczne $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, a więc skład widmowy poszczególnych bodźców podstawowych (rys.1). Jest to pierwszy znormalizowany system barw, w oparciu o który można było zrealizować fizycznie kolorymetr. Taki kolorymetr posiada trzy kanały o czułościach widmowych odtwarzających kształt krzywych $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. W najnowszych rozwiązaniach kolorymetrów, wykorzystujących monochromatory bazujące na liniijkach detektorów CCD lub CMOS, składowe trójchromatyczne są wyliczane na podstawie widma badanego bodźca barwnego $\varphi(\lambda)$ zgodnie z zależnością:

$$\begin{aligned} X &= k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int \varphi(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \tag{1}$$

Ponieważ układ barw CIE XYZ nie jest układem równomiernym w kolejnych latach opracowano szereg innych systemów barwnych, w których barwy są rozłożone równomiernie w przestrzeni, zgodnie z odczuwaniem ich różnicy przez człowieka. Są to układy zwane UCS (Uniform Color Scales). Pomimo wielkiej różnorodności tych systemów (praktycznie każdy producent sprzętu, oprogramowania, czy organizacja normalizująca opracowała swój system) podstawowym układem barw jest ciągle CIE XYZ, ponieważ układy barw typu USC są zazwyczaj zdefiniowane właśnie w oparciu o podstawowy układ CIE XYZ.



Rys. 1. Funkcje kolorymetryczne $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$



Rys. 2. Składowe trójkromatyczne widmowe badanego aparatu fotograficznego

Multimedialny sprzęt do rejestracji obrazów [4], jakim jest cyfrowy aparat fotograficzny, jest projektowany, tak aby zapisać i później przedstawić barwny obraz w sposób efektowny dla oglądającego, nie zawsze całkowicie zgodny

z rzeczywistością. Poza tym takie urządzenie nie jest przewidziane do zastosowań kolorymetrycznych, więc czułości widmowe jego poszczególnych kanałów odbiegają od znormalizowanych czułości obserwatora kolorymetrycznego normalnego. Przykład takich charakterystyk dla konkretnego egzemplarza aparatu fotograficznego OLYMPUS E-20 wyznaczone eksperymentalnie (rys. 2). Widać że odbiegają one od krzywych znormalizowanych (rys. 1), a co za tym idzie bezpośredni pomiar składowych trójchromatycznych w układzie CIE XYZ nie jest możliwy.

W publikacji [5] zaproponowano koncepcję przekształcenia matematycznego, która umożliwi wykorzystanie cyfrowego aparatu fotograficznego jako kolorimetru matrycowego. W niniejszym referacie przedstawiono rozwinięcie tej metody, które umożliwia znaczną poprawę dokładności pomiaru składowych trójchromatycznych.

2. DANE WEJŚCIOWE DO EKSPERYMENTU

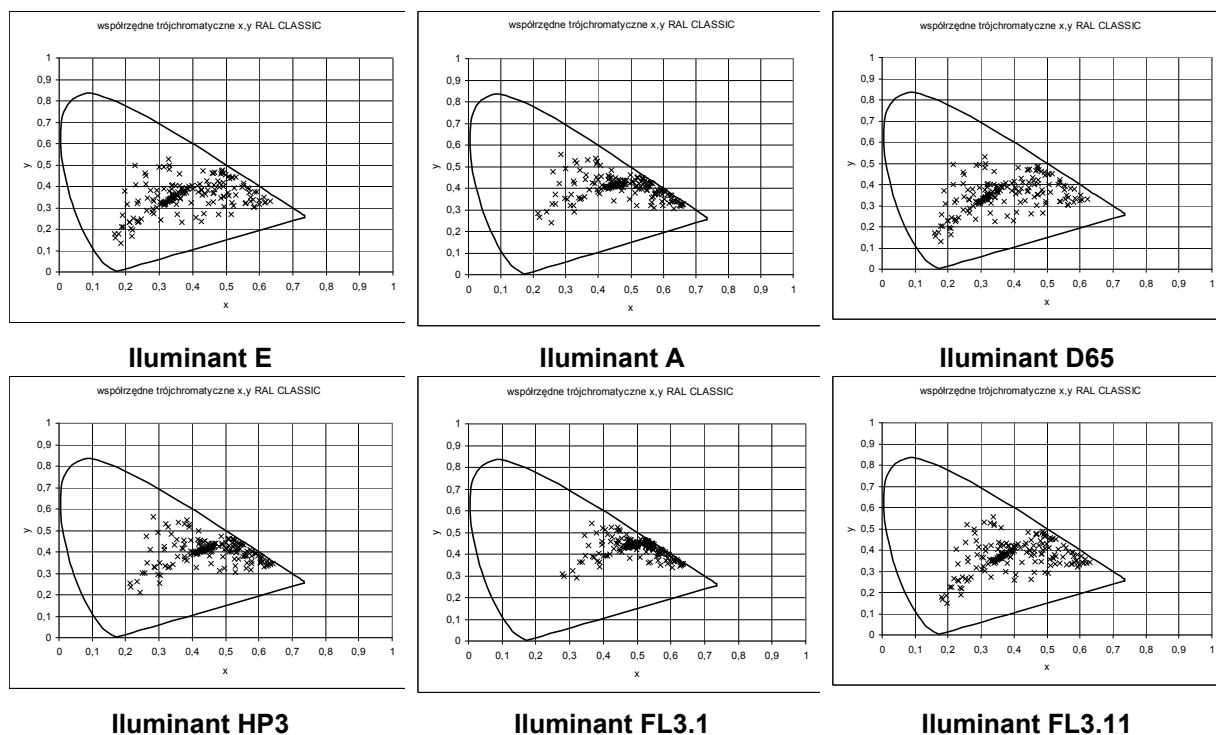
Podczas badań wykorzystano symulacje komputerowe [5], które umożliwiają sprawdzenie zachowania przetwornika w zależności od kształtu widma badanego bodźca barwnego. Eksperymenty polegały na porównaniu wyników pomiaru uzyskanych z użyciem kolorimetru wzorcowego o czułościach widmowych $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ z wynikami pomiaru uzyskanymi z wykorzystaniem matematycznego przekształcenia wartości pomiaru otrzymanych z cyfrowego aparatu fotograficznego. Wynikiem porównania jest różnica barw ΔE^*_{ab} określona w przestrzeni CIE Lab [1]. Wyznaczono błąd minimalny $\Delta E^*_{ab} \text{ Min}$, maksymalny $\Delta E^*_{ab} \text{ Max}$ oraz średni $\Delta E^*_{ab} \text{ Av}$ dla serii pomiarów próbek oświetlonych określonym iluminatorem.

W badaniach wykorzystano widmowe współczynniki odbicia 170 próbek o różnych barwach zmierzone za pomocą spektrometru. Pochodziły one z wzornika firmy RAL i odzwierciedlają bardzo szeroką gamę różnych barw, z którymi można się spotkać w trakcie rzeczywistych pomiarów. Do oświetlenia badanych próbek wybrano kilka iluminatów proponowanych przez CIE [1]:

- A – światło żarówki wolframowej,
- D65- światło dzienne o temperaturze barwowej $T=6500\text{K}$,
- FL3.1, FL3.11 – świetlówka,
- HP3 - lampa wysokociśnieniowa,
- E – źródło o rozkładzie równoenergetycznym.

Współrzędne chromatyczne próbek oświetlonych badanymi iluminantami przedstawiono na rys. 3. Zastosowanie 170 różnych widmowych współczynni-

ków widmowych odbicia w połączeniu z 6 różnymi iluminantami daje aż 1020 różnych kombinacji i pozwala na sprawdzenie zaproponowanej koncepcji w najróżniejszych warunkach. Dzięki temu uzyskujemy pewność, że wyniki pomiaru otrzymane z wykorzystaniem gotowego systemu będą zgodne z rzeczywistością.



Rys. 3. Współrzędne chromatyczne próbek oświetlonych różnymi iluminantami

3. PRZEKSZTAŁCENIA UKŁADÓW BARW

Liniowe przekształcenie składowych tróchromatycznych pomiędzy dwoma układami barw, w tym przypadku układem CIE XYZ i układem aparatu fotograficznego RGB' ma postać:

$$[XYZ] = [RGB'] [M] \quad (2)$$

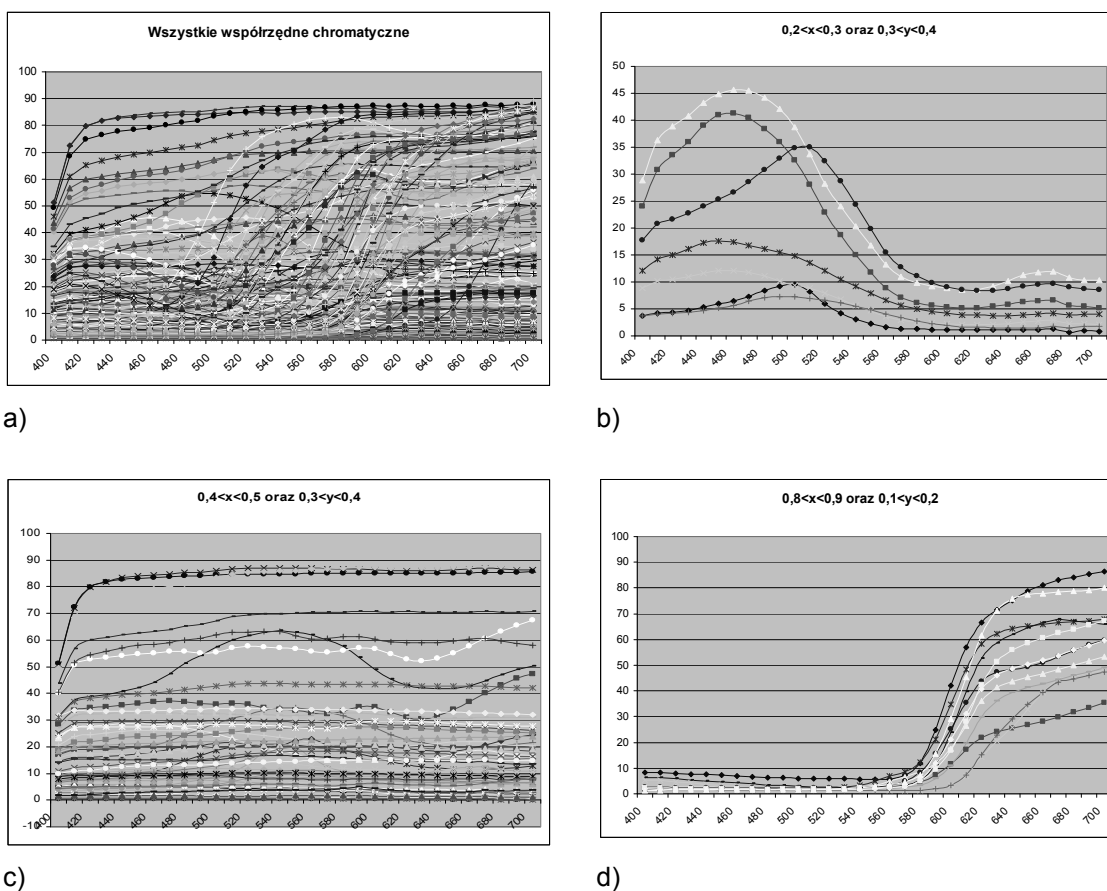
$$M = \begin{bmatrix} R_x & R_y & R_z \\ G_x & G_y & G_z \\ B_x & B_y & B_z \end{bmatrix}$$

gdzie:

- [XYZ] – macierz składowych trójchromatycznych XYZ CIE,
- [RGB'] – macierz składowych trójchromatycznych uzyskanych za pomocą aparatu fotograficznego,
- M – macierz współczynników transformacji.

Wyniki pomiaru uzyskane z wykorzystaniem tego przekształcenia [5] były obciążone zbyt dużym błędem, aby możliwe było zastosowanie je w praktyce. Należało opracować nową dokładniejszą metodę transformacji. W tym celu przeanalizowano kształt charakterystyk widmowych bodźców barwnych o zbliżonych współrzędnych chromatycznych.

Na rysunku 4 a) przedstawiono rozkład widmowy wszystkich próbek, które wykorzystano w symulacji. Widać że ich kształt jest mocno zróżnicowany. Na rysunku 4 b) przedstawiono charakterystyki próbek o odcieniu niebieskim, tj. współrzędnych chromatycznych $0,2 < x < 0,3$ i $0,3 < y < 0,4$, z charakterystycznym



Rys. 4. Rozkłady widmowe próbek w zależności od ich współrzędnych chromatycznych

maksimum dla długości fali około 460 nm i bliskimi zeru wartościami powyżej 600 nm. Na rysunku 4 c) przedstawiono widma próbek białych, tj. współrzędnych chromatycznych $0,4 < x < 0,5$ i $0,3 < y < 0,4$, które mają płaski poziomy kształt. Na rysunku 4 d) przedstawiono widma próbek czerwonych, tj. współrzędnych chromatycznych $0,8 < x < 0,9$ i $0,1 < y < 0,2$, których widma poniżej 600 nm mają praktycznie zerowe wartości, a powyżej zaczynają gwałtownie rosnąć.

Jak pokazano na wybranych przykładach bodźce barwne o zbliżonych współrzędnych chromatycznych mają podobny rozkład widmowy. Zatem współczynniki macierzy przekształcenia powinny zmieniać się w zależności od mierzonej barwy. Powoduje to, że przekształcenie stanie się nieliniowe. W praktyce można to zaimplementować dzieląc wykres współrzędnych chromatycznych na obszary i wewnątrz każdego obszaru wyznaczyć współczynniki transformacji. W niniejszej pracy wykorzystano kwadratowe obszary o boku 0,05.

Zastosowanie metody przekształcenia nieliniowego sprawdzono z wykorzystaniem symulacji [5]. Wyniki przedstawiono w tabeli.

iluminant	Błąd pomiaru barwy „delta E”					
	Liniowe			Nieliniowe		
	$\Delta E_{ab\ Min}^+$	$\Delta E_{ab\ Max}^+$	$\Delta E_{ab\ Av}^+$	$\Delta E_{ab\ Min}^+$	$\Delta E_{ab\ Max}^+$	$\Delta E_{ab\ Av}^+$
A	0,1	24,5	4,1	0,0	8,0	1,0
E	0,1	47,9	5,7	0,0	10,5	0,8
D65	0,0	47,8	5,7	0,0	5,6	0,8
FL3.1	0,0	14,1	3,0	0,0	4,0	0,7
FL3.11	0,0	13,1	3,6	0,0	8,7	0,6
HP3	0,1	27,6	4,4	0,0	8,4	0,8

Wartość błędu pomiaru po zastosowaniu przekształcenia nieliniowego zmalała aż czterokrotnie, niezależnie od iluminantu oświetlającego badaną próbkę. Oznacza to że przyjęte założenia mają charakter ogólny, i sprawdzają się nawet w przypadku oświetlenia światłem o widmie prążkowym jak w przypadku lamp wyładowczych i świetlówek.

4. PODSUMOWANIE

Zaproponowana metoda transformacji wyników pomiaru pomiędzy układem barw cyfrowego aparatu fotograficznego a układem barw kolorymetrycznego obserwatora normalnego CIE 1931 pozwala na osiągnięcie dokładności

pomiaru wystarczającej do zastosowań praktycznych. Średni uzyskany błąd wynosił poniżej rozróżnialnej dla oka ludzkiego wartości różnicy barwy $\Delta E^*_{ab} = 1$. Metoda wymaga znajomości charakteru źródła światła (typu iluminantu) i informacji na temat widmowych właściwości badanego bodźca barwnego, w celu wyboru odpowiednich współczynników dla wspomnianego przekształcenia. Taki warunek jest spełniony w wielu zastosowaniach i dziedzinach np. badaniu lamp sygnałowych pojazdów, gdzie znamy typ iluminantu oraz przybliżoną charakterystykę widmową klosza lampy.

LITERATURA

1. Mielnicki J., Zarys Wiadomości o barwie, Fundacja Rozwoju Polskiej Kolorystyki, Łódź, 2006
2. Felchorski W., Stanioch W., Kolorymetria trójkromatyczna, WNT, Warszawa, 1973
3. CIE 15:2004 3rd Edition, 2004
4. Kaźmierczak P., Zastosowanie fotografii cyfrowej do pomiarów barwy, Przegląd elektrotechniczny, nr 4, s. 9-11, 2006
5. Moćko W., Koncepcja zastosowania scalonych przetworników obrazu do analizy kolorymetrycznej, Technika Świetlna 2006 XV Krajowa Konferencja Oświetleniowa, Warszawa, s. 61-70, 2006

Rękopis dostarczono, dnia 31.08.2006 r.

CONCEPT OF STANDARDIZATION OF TRICHROMATIC VALUES USING NONLINEAR TRANSFORMATION

W. MOĆKO, W. ŻAGAN

ABSTRACT *This paper describes concept of using nonlinear transformation between trichromatic systems. It was developed for the imaging colorimeter based on a digital camera. It is based on assumption that color stimulus with near chromaticity coordinates have similar spectrum. Obtained measurement errors allows to practical use of developed colorimetric system.*

Mgr inż. Wojciech Moćko - Absolwent specjalności systemy pomiarowo-kontrolne na wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. W 2006 r. otworzył przewód doktorski w Zakładzie Techniki Świetlnej Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Od 2003 pracownik Zakładu Oświetlenia i Wyposażenia Elektrycznego Pojazdów w Instytucie Transportu Samochodowego w Warszawie. Obecnie zajmuje się głównie pracami naukowo-badawczymi z zakresu oświetlenia oraz projektowaniem i tworzeniem oprogramowania systemów pomiarowych. Autor lub wykonawca kilkunastu prac naukowo-badawczych wykonywanych w ITS, specjalista PKOŚ.



Prof. dr hab. inż. Wojciech Żagan - kierownik Zakładu Techniki Świetlnej na Politechnice Warszawskiej, obecnie jednocześnie prodziekan Wydziału Elektrycznego. Autor czterech monografii i podręczników z zakresu techniki świetlnej i wielu publikacji o charakterze artykułów w czasopismach bądź referatów na konferencjach. Szczególne osiągnięcia naukowe odnotowuje w obszarze iluminacji obiektów, w którym łączy prace naukowe z realizacjami praktycznymi, choć początkowa działalność poświęcona była oświetleniu samochodowemu. Do dnia dzisiejszego wypromował 4 doktorów. Jest opiekunem naukowym i promotorem w przewodzie doktorskim mgr inż. Wojciecha Moćko.