

Złożoność strukturalna i nieliniowość modelu procesu spalania w kotle są bardzo duże. Podczas modelowania rzeczywistego układu kotła energetycznego, należy uwzględnić następujące problemy:

- Zakład energetyki zawodowej, podłączony do sieci często narażony jest na duże, częste i szybkie zmiany obciążenia wymaganego przez Krajową Dyspozycję Mocy, wpływające na sterowanie procesem jej wytwarzania. W takich sytuacjach, zależności pomiędzy wszystkimi wejściami i wyjściami są obarczone ryzykiem niestabilności. W takiej sytuacji dochodzi często do zmiany współczynników w modelach lub nawet ich charakteru. Występują wtedy duże trudności ze zgromadzeniem odpowiednich danych oraz przeprowadzeniem obliczeń pozwalających na aktualizację modelu. Opracowanie i aktualizacja modelu dla zapewnienia stabilnych warunków jego pracy jest możliwe, ale wymaga zebrania odpowiedniej ilości pomiarów.
- Zmiany jakości paliwa – węgla, w tym jego wartości opałowej, zawartości popiołu, substancji lotnych, wilgoci itd., często są bardzo duże. Z kolei znaczący wpływ parametrów paliwa na proces spalania może bezpośrednio prowadzić do utraty stabilności, czy nawet niepowodzenia wszystkich przeprowadzonych uprzednio prac związanych z przygotowaniem modelu.
- Zmiany jakości węgla, warunki pracy młynów węglowych lub ręczna interwencja w proces mogą spowodować znaczącą zmianę w podawanej ilości paliwa do palników, przy tym samym obciążeniu. To z kolei sprawia, że obciążenie przestaje być kluczowym parametrem warunków spalania. Znacząca zmiana w używanej dystrybucji paliwa w palniku zwykle wymaga odrębnych modeli, aby uniknąć awarii podczas mapowania relacji wejść-wyjść układu.
- Warto podkreślić, że rozdział paliwa do poszczególnych palników w kotle odbywa się w większości instalacji w sposób nierównomierny, przy pomocy klap mechanicznych. W rezultacie, zapewnienie takiego samego spalania w poszczególnych palnikach jest bardzo trudne. Pożądana jest możliwość niezależnego sterowania każdym z palników, której warunkiem koniecznym jest pomiar ilości paliwa w pyłoprzewodach (przed każdym z palników).

Powyższe kluczowe problemy wymagają bezpośredniego spojrzenia na model sterowania procesem spalania w kotle, a także są przyczynami znacznych trudności, które występują w układach sterowania tym procesem z użyciem sztucznych sieci neuronowych.

Modelowanie warunków pracy danego kotła może być czasochłonne i wymaga żmudnego, ręcznego doboru określonych wektorów wejść i/lub wyjść celem uzyskania stabilnego układu sterowania.

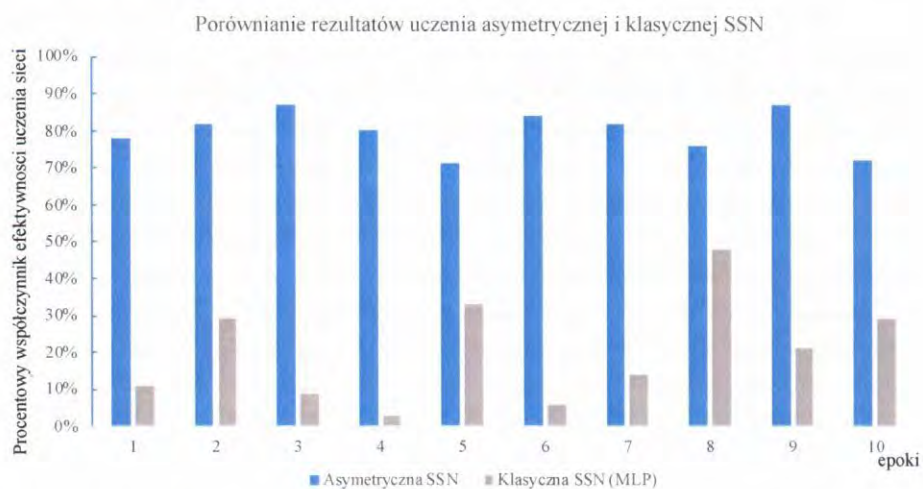
Weryfikację zaproponowanego podejścia przeprowadzono na grupie 60 zbiorów testowych pozyskanych z typowego obciążenia kotła nadkrytycznego o mocy cieplej 500 MW opalanego węglem, odpowiednio dla 75% obciążenia. Utworzono 30 zbiorów treningowych, natomiast pozostałe posłużyły jako zbiory testowe. Na podstawie analizy statystycznej, uznaje się, że ze względu na liczebność zbiorów ich podział spełnia warunek wystarczający uzyskania prawidłowego modelu.

Do realizacji modelu przyjęto parametr opisujący relacje węgiel-powietrze, zamiast powietrze-węgiel. Jest to działanie celowe, ponieważ niweluje dzielenie przez zero w przypadku braku lub awarii rozdziału podawania pyłu węglowego do palników.

Powyższe parametry zastosowano w strukturze asymetrycznej SSN, zawierającej 160 połączeń. Wagi wyjść neuronów o oddziaływaniu globalnym wynosiły zawsze 1, podobnie jak dla neuronów pierwszej warstwy ukrytej.

Dla porównania, zastosowano także model z klasyczną siecią MLP. W tym przypadku ilość połączeń neuronowych wynosi 820. Co warto podkreślić, dla każdej grupy palników, należy uwzględnić odrębne modele. W rezultacie sumaryczne parametry takiego rozwiązania zwiększają się 30–40 krotnie. Dodatkowym utrudnieniem może być potrzeba zwiększenia ilości zbiorów uczących i testujących względem zaproponowanego modelu sieci asymetrycznej.

Porównanie wyników treningu dla proponowanego i klasycznego modelu SNN przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Porównanie efektywności uczenia asymetrycznej i klasycznej sztucznej sieci neuronowej

Do porównania rozwiązań użyto 10 rund. Wyniki testu z maksymalną i minimalną wydajnością uznano za pomyślne lub nie. W jednej rundzie jest 20 procedur treningowych i testowych. Na rysunku 9 pokazano, że wskaźnik powodzenia (ang. *success rate*) asymetrycznego modelu SSN jest średnio zawsze wyższy o około 20–30% w porównaniu do klasycznej sieci MLP.

Opierając się na powyższym rozwiązaniu opracowano symulacyjny model optymalnego sterowania procesem spalania. Umożliwia on sterowanie ilością powietrza wtórnego dla kotła. Na podstawie przeprowadzonych analiz system sterowania procesem spalania oparty na proponowanym modelu pozwala na poprawę średniej wydajności kotła o 0,20% dla typowych warunków obciążenia.

W porównaniu z klasycznym modelem SSN, proponowane rozwiązanie ma mniej rozbudowaną strukturę, lepszy wskaźnik skuteczności wytrenowania i potencjał do zastosowania w praktyce.

### Metody hybrydowe

W „Zaawansowanych technikach sterowania procesem spalania pyłu węglowego” podjęto próbę rozwiązania problemu identyfikacji i sterowania silnie nieliniowego zjawiska, jakim jest proces spalania pyłu węglowego i biomasy. Jego dynamika jest zbyt złożona do zamodelowania ograniczoną liczbą równań (różniczkowych). Do przeprowadzenia badań, uwzględniono trzy wybrane struktury głębokich sieci neuronowych: MLP, prostą sieć rekurencyjną oraz komórki LSTM (ang. *Long Short Term Memory*).

Do zademonstrowania możliwości aplikacyjnych zaproponowanych metod badania przeprowadzono na danych, pochodzących z pomiarów przeprowadzonych w komorze spalania.

Zastosowanie głębokich sieci neuronowych do zadań klasteryzacji i innych obszarów uczenia maszynowego jest dosyć powszechne. Ciekawą alternatywą wydaje się wykorzystanie odmiany rekurencyjnej sieci LSTM (ang. *Long Short Term Memory*) do identyfikacji i sterowania układem dynamicznym. LSTM stanowi obecnie jedną z najpopularniejszych struktur głębokich sieci neuronowych. Została ona zdefiniowana przez Schmidhubera w [14], a jej najistotniejszą cechą jest unikanie zanikającego gradientu (ang. *vanishing gradient*), dzięki trzem bramkom: zapominania, wejściowej i wyjściowej. Przy ich pomocy pamięć o stanach przeszłych (historycznych) może być wydajnie kontrolowana. Można postawić pytanie o zasadność wyboru tej struktury algorytmów głębokiego uczenia. Do argumentów przemawiających za rozwiązaniem należy zaliczyć ograniczenie problemu zanikającego gradientu oraz potencjalne możliwości odwzorowania dynamiki układu.

Ze względu na szczególnie dużą zmienność sygnałów, wykorzystanie pojedynczych modeli AI, na ogół wiąże się z ich utknięciem w lokalnych minimach, a to prowadzi do rozwiązań suboptymalnych. Wyklucza uzyskanie satysfakcjonującej wydajności modelu w zadaniach diagnostyki i sterowania. Niemniej, w celu niwelowania tych ograniczeń coraz odważniej stosuje się rozwiązania hybrydowe [15]. Najnowsze trendy wykazują dwa główne nurty budowy modeli hybrydowych. Jeden z nich stanowi złożenie kilku predyktorów, gdzie ich rezultaty prognozowania stanowią złożenie w celu uzyskania końcowej predykcji.

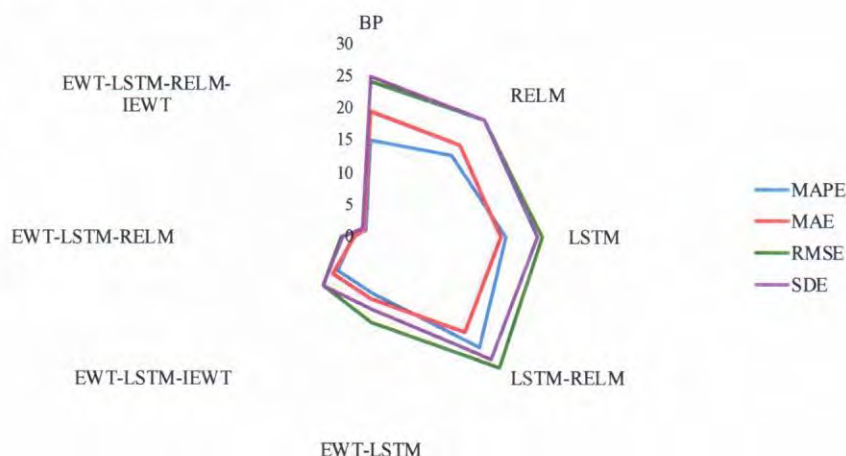
Za przykład mogą tu posłużyć: FFBPNN (ang. *Feed Forward Back Propagation Neural Network*), BPNN (ang. *Back Propagation Neural Network*), BFGSNN (ang. *Broyden Fletcher Gold-farb Shanno Neural Network*), które zastosowano jako predyktory, a rezultaty prognozowania łączono przy pomocy metod GP (ang. *Genetic Programming*). Inny rodzaj modeli hybrydowych koncentruje się na przetwarzaniu danych, w których wykorzystuje się wybrane metody dekompozycji do podziału sumarycznych parametrów procesu spalania na podwarstwy (ang. *sub-layers*). Wówczas każda z podwarstw jest prognozowana przez własny predyktor, a uzyskane rezultaty pozwalają na rekonstrukcję ostatecznego wyniku prognozowania [10].

Średnie wartości omówionych wskaźników, określających dokładność modelu względem wybranej serii danych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyznaczone średnie wartości błędów dla różnych modeli prognostycznych procesu spalania, wyznaczone dla wybranej serii danych

Model	MAE	MAPE	RMSE	SDE
BP	19,508	14,9713	24,071	24,89
RELM	20,053	18,1343	25,631	25,614
LSTM	20,598	21,2973	27,191	26,338
LSTM-RELM	21,143	24,4603	28,751	27,062
EWT-LSTM	9,688	8,6233	13,412	11,226
EWT-LSTM-IEWT	8,323	7,3863	10,634	10,634
EWT-LSTM-RELM	2,478	2,9493	4,532	4,381
EWT-LSTM-RELM-IEWT	1,432	1,2123	1,927	1,631

Z kolei na rysunku 10 zamieszczono wykres radarowy dla wyznaczonych wskaźników oceny wydajności modelowania.



Rys.10. Wykres radarowy wskaźników dokładności modeli

W badaniu uwzględniono prognozowanie wprzód z pięciokrokowym horyzontem. Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że najlepsze rezultaty modelowania szeregów czasowych procesu spalania uzyskano z wykorzystaniem metody hybrydowej EWT-LSTM-RELM-IEWT.

Najmniej atrakcyjny w tym zestawieniu okazał się pojedynczy model ze wsteczną propagacją sygnału BP (ang. *Back Propagation*). *Regularized Extreme Learning Mashine* (RELM) samodzielnie, czy też w połączeniu z modelem LSTM zapewniły wartości średnie RMSE i SDE praktycznie o rząd wielkości większe. Algorytm IEWT wykorzystano do rekonstrukcji złożonych podwarstw i uzyskania ostatecznych wyników prognozowania. Mimo stosunkowo dużej złożoności obliczeniowej, hybrydyzacja modeli do celów prognozowania złożonych procesów wydaje się kierunkiem słusznym.

Proces spalania, jak to już wcześniej wspomniano, w szczególności prowadzony w warunkach przemysłowych, cechuje się bardzo dużą złożonością. Wynika to z charakteru zjawisk, towarzyszących procesowi, jak i utrudnionych warunków pomiarowych, obejmujących niedostępność określonych wielkości oraz wpływ wysokiej temperatury, wibracji i zapylenia na urządzenia pomiarowe oraz rejestrujące. Problematyka omawiana w niniejszej pracy, niezależnie od trendów w zakresie spalania pyłu węglowego w energetyce zawodowej, porusza szereg zagadnień intensywnie rozwijanych wielu prac badawczych. Podjęto w niej próbę sterowania jednym z najtrudniejszych procesów z wykorzystaniem metod analitycznych, heurystycznych oraz hybrydowych. Przeprowadzone badania wpisują się w kierunki poszukiwania algorytmów dla procesów nieliniowych, które będą niezawodne numerycznie, odporne, jak i przede wszystkim umożliwią spełnienie ograniczeń technologicznych w warunkach niepewności parametrów modelu.

Do oryginalnych osiągnięć autora można zaliczyć:

- Uczestnictwo w realizacji badań procesu spalania w obiektach przemysłowych, jak również na stanowisku laboratoryjnym.

- Weryfikacja poprawności i przygotowanie danych do analiz z wykorzystaniem narzędzi analitycznych i symulacyjnych.
- Opracowanie oryginalnych modeli procesu przeznaczonych do sterowania.
- Wykorzystanie optycznych sygnałów diagnostycznych w algorytmie sterowania procesem spalania do prognozowania emisji NO<sub>x</sub> oraz optymalizacji pracy kotła.
- Przygotowanie struktur algorytmów sterowania z modelem referencyjnym, w tym zastosowaniem modeli głębokiego, w szczególności z zastosowaniem pamięci długiej krótkotrwałej (LSTM).
- Przeprowadzenie dyskusji na temat odpornego sterowania procesem spalania.
- Podjęcie tematu zastosowania hybrydowych struktur głębokich rekurencyjnych sieci neuronowych, obejmujących EWT-LSTM-RELM-IEWT do modelowania i sterowania procesem spalania pyłu węglowego.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki badań i analiz nie wyczerpują problemów związanych ze sterowaniem procesem spalania. Doskonalenia wymagają kwestie dynamiki spalania z bardziej szczegółową analizą parametryczną stabilności, jak i warunków występowania turbulencji. W układzie sterowania można uwzględnić inne sygnały optyczne, w tym barwę płomienia oraz rozszerzenie metod hybrydowych o zastosowanie algorytmów rozmytych. W przekonaniu autora zaawansowane algorytmy sterowania będą nadal rozwijane oraz stosowane w szerokim zakresie nie tylko w instalacjach przemysłowych. Można zaryzykować stwierdzenie, że będą się przesuwac w kierunku hybrydyzacji metod sztucznej inteligencji z innymi podejściami.

#### Wykaz źródeł bibliograficznych użytych w autoreferacie:

- [1] Bengio, Y., Simard, P., Frasconi, P., Learning Long-Term Dependencies with Gradient Descent is Difficult. *IEEE Trans. Neural Networks* 1994, 5, 157–166.
- [2] Bris, T. Le, Cadavid, F., Caillat, S., Pietrzyk, S., et al., Coal combustion modelling of large power plant, for NO<sub>x</sub> abatement. *Fuel* 2007, 86, 2213–2220.
- [3] Computation, N., Long Short-term Memory. *Neural Comput.* 2016, 9, 1735–1780.
- [4] Fostås, B., Gangstad, A., Nenseter, B., Pedersen, S., et al., Effects of NO<sub>x</sub> in the flue gas degradation of MEA. *Energy Procedia* 2011, 4, 1566–1573.
- [5] Gromaszek, K., Kotyra, A., in: Signal Process. - Algorithms, Archit. Arrange. Appl. Conf. Proceedings, SPA, vol. 2015–March, 2015, pp. 133–136.
- [6] Hopfield, J.J., Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 1982, 79, 2554–2558.
- [7] Kauranen, P., Andersson-Engels, S., Svanberg, S., Spatial mapping of flame radical emission using a spectroscopic multi-colour imaging system. *Appl. Phys. B Photophysics Laser Chem.* 1991, 53, 260–264.
- [8] Kordylewski, W., Bulewicz, E., Dyjakon, A., Hardy, T., et al., *Spalanie i Paliwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [9] Lhner, R., Applied Computational Fluid Dynamics Techniques: An Introduction Based on Finite Element Methods. *J. Fluid Mech.* 2001, 1, 375–376.
- [10] Liu, H., Mi, X., Li, Y., An experimental investigation of three new hybrid wind speed forecasting models using multi-decomposing strategy and ELM algorithm. *Renew. Energy* 2018, 123, 694–705.
- [11] Ordys, A.W., Pike, A.W., Johnson, M.A., Katebi, R.M., Grimble, M.J., *Modelling and Simulation of Power Generation Plants*, Springer-Verlag, 1994.
- [12] Ribeirete, A., Costa, M., Impact of the air staging on the performance of a pulverized coal fired furnace. *Proc. Combust. Inst.* 2009, 32 II, 2667–2673.
- [13] Sandell, N.R., On Newton's Method for Riccati Equation Solution. *IEEE Trans. Automat. Contr.* 1974, 19, 254–255.
- [14] Sepp, H., Schmidhuber, J., Long short-term memory. *Neural Comput.* 1997, 9, 1735–1780.

- [15] Tascikaraoglu, A., Uzunoglu, M., A review of combined approaches for prediction of short-term wind speed and power. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 34, 243–254.
- [16] Zhou, H., Cen, K., Fan, J., Multi-objective optimization of the coal combustion performance with artificial neural networks and genetic algorithms. *Int. J. Energy Res.* 2005, 29, 499–510.
- [17] Directive 2010/75/EU of The European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02010L0075-20110106&from=LT>, EU 2010.

## V. Przebieg pracy naukowej

Pracę naukową rozpocząłem w 2002 roku w Katedrze Automatyki i Metrologii, początkowo jako stażysta na ostatnim roku jednolitych studiów magisterskich, a następnie jako asystent.

Mimo, że temat mojej pracy magisterskiej dotyczył systemu zarządzania bazą danych Oracle, to obszar zainteresowań badawczych dotyczył algorytmów sterowania, optymalizacji i automatyzacji procesów. Z kolei wyzwaniem stanowiły inżynierskie zastosowania informatyki w procesach sterowania, w tym zastosowania sterowników PLC oraz systemów SCADA.

W początkowym okresie prowadziłem prace badawcze nad dopasowaniem źródła do odbiorników w zakładzie przemysłowym oraz algorytmami neuronowymi i neuronowo-rozmytymi. Część prac z tamtego okresu obejmuje pierwsze próby zmierzenia się z układami nieliniowymi, głównie z zastosowaniem identyfikacji parametrycznej i ich linearyzacją.

W ramach współpracy z Cukrownią Lublin pojawił się między innymi problem badawczy stabilizacji pracy krajalnic.

W latach 2004 – 2006 byłem słuchaczem studiów doktoranckich, prowadzonych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki.

Badania prowadzone w latach 2003 - 2006 koncentrowały się na modelowaniu i sterowaniu układu krajalnic z wykorzystaniem metod adaptacyjnych, a w szczególności regulacji predykcyjnej. Ich wyniki pozwoliły mi na opracowanie rozprawy doktorskiej p.t. „Sterowanie zespołem krajalnic w procesie fabrykacji cukru”, prowadzonej pod kierunkiem dr hab. inż. Waldemara Wójcika.

Pracę doktorską obroniłem 20. grudnia 2006 roku na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej.

Aktywność naukowa podjęta w tym okresie zaowocowała także osiemnastoma artykułami, których byłem autorem lub współautorem. Prace te zostały opublikowane w polskich i zagranicznych czasopiśmie oraz wygłoszone na konferencjach naukowych.

Po uzyskaniu stopnia doktora, w 2007 roku dołączyłem do zespołu badawczego w Katedrze Elektroniki, prowadzonego przez dr hab. inż. Waldemara Wójcika. Moje prace koncentrowały się wokół zagadnień związanych ze diagnostyką i sterowaniem procesem spalania.

Część prac obejmowała udział w badaniach i pomiarach prowadzonych w Elektrowni Kozienice oraz na stanowisku doświadczalnym w Instytucie Energetyki w Warszawie.

Od 1. grudnia 2007 r. do 31. czerwca 2008 r. obok pracy naukowej i dydaktycznej na uczelni pełniłem funkcję kierownika projektu FP6 nr 014641, związanego z badaniami na rzecz

opracowania Regionalnej Strategii Innowacji dla Województwa Lubelskiego. Warto podkreślić, że w koordynowanym przez Politechnikę Lubelską projekcie europejskim brało udział siedmiu partnerów, w tym pięciu zagranicznych. Do moich zadań należało zarządzanie projektem w najbardziej intensywnej jego fazie końcowej. Zdobyte kontakty i doświadczenie zachęciły mnie do poszerzania wiedzy i umiejętności z tego zakresu poprzez podjęcie studiów podyplomowych o zbieżnej tematyce. Dotyczyły one zarządzania projektami badawczymi i pracami rozwojowymi, public relations w badaniach naukowych oraz komercjalizacji wyników badań.

Zaangażowanie w zespole badawczym Katedry Elektroniki umożliwiły mi pracę w następujących projektach:

- MNiI nr 13725 (um. 009/R/T0/2007/IT1), "Światłowodowy system monitorująco-diagnostyczny procesu spalania w warunkach przemysłowych paliwa gazowego, mazutu i pyłu węglowego", o wartości: 590 000 PLN.
- Fundusz Badawczy Węgla i Stali UE, RFCR-CT-2008-00009, "Inteligentne sterowanie i optymalizacja elektrownianych kotłów opalanych pyłem węglowym i mieszanką węgla z biomasą – SMARTBURN", o wartości: 650 000 PLN.
- MNiSW nr 33259 (um. 3110/B/T02/2008/35), "System sterowania procesem spalania w kotle energetycznym", o wartości: 457 840 PLN.
- MNiSW nr N N513 324940 (um. 3249/B/T02/2011/40), "Diagnostyka i sterowanie procesem współspalania biomasy i węgla oraz biogazu z wybranymi gazami", o wartości: 480 000 PLN.

We wszystkich tych projektach pełniłem rolę wykonawcy, lokując swoje działania w kierunku dalszego rozwoju algorytmów sterowania procesem spalania pyłu węglowego oraz współspalania pyłu węglowego i biomasy.

Moja praca koncentrowała się wokół opracowania modeli oraz analiz ukrytych zależności pomiędzy danymi z procesu spalania, w tym z zastosowaniem technik analizy danych (popularnie określanych Data Mining) i metod heurystycznych. Zaowocowało to publikacjami o tematyce modelowania, diagnostyki i sterowania procesem spalania.

Badania prowadzone przez zespół Katedry Elektroniki wpisują się w jeden z głównych kierunków wskazanych w Krajowym Programie Badań, ustanowionym uchwałą nr 164/2011 przez Radę Ministrów w dn. 16.08.2011 roku (w tym kierunek 1. - nowe technologie w zakresie energetyki). Odtąd wybrane wyniki badań poświęcone diagnostyce procesu spalania z użyciem metod optycznych oraz odpowiednie jego parametry zacząłem wykorzystywać także do prognozowania emisji wolnych rodników. Zastosowanie metod umożliwiających estymację odpowiednich parametrów spalania wraz z zaawansowanymi algorytmami sterowania umożliwiło podjęcie próby opracowania algorytmu sterowania procesem spalania, którego wynikiem jest monografia stanowiąca podstawę niniejszego wniosku.

Podsumowując moje osiągnięcia naukowo-badawcze chciałbym podkreślić, że w okresie od zakończenia doktoratu opublikowałem łącznie 126 artykułów naukowych, z czego 11 w czasopiśmie zagranicznych, wyróżnionych w Journal Citation Reports.

Wyniki swoich prac badawczych przedstawiałem na osiemnastu konferencjach naukowych, w tym 6 zagranicznych (ISCOPT 2009 Katciveli, Ukraina; ISDMCI-2010 w Yevpatroii, Ukraina; VKDTS 2013 w Vinnicy, Ukraina; ISDMCI-2013 w Yevpatroii, Ukraina; MCS9-2015 Rodos, Grecja; WSEC-2017 Astana, Kazachstan) i 15 konferencji ogólnokrajowych, lub międzynarodowych odbywających się na terenie Polski. Prezentowałem je także na uczelniach zagranicznych w ramach programów wymiany międzynarodowej pracowników uczelni: Uniwersytet Kraju Basków - Campus de Vizcaya (Bilbao), Campus de Alava (Vitoria-Gasteiz) oraz Naukowy Park Technologiczny Kraju Basków (Hiszpania), Cyprus University of Technology (Cypr), Siemens Technical Academy, Berlin (Niemcy).

Za działalność naukową otrzymałem nagrodę Rektora Politechniki Lubelskiej: nagrodę indywidualną III stopnia w 2007, 2014 i 2017 roku oraz dyplom Rektora Politechniki Lubelskiej za działalność naukową w 2016 roku.

Gromaszek Karol