



**Politechnika  
Śląska**

**Analiza porównawcza i implementacja  
wybranych nowych modeli  
zmiennoprądowego łuku elektrycznego**

Comparative analysis and implementation of selected new alternating  
current electric arc models

Streszczenie poszerzone rozprawy doktorskiej

**Maciej Klimas**

Promotor: dr hab. inż. Dariusz Grabowski, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr inż. Dawid Buła

Wydział Elektryczny  
Politechnika Śląska  
Gliwice  
2023



# Spis treści

<b>1</b>	<b>Cel i zakres pracy</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Opis elektrycznego pieca łukowego</b>	<b>3</b>
2.1	Model bazowy . . . . .	4
2.2	Dane pomiarowe . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Nowe modele łuku elektrycznego w zastosowaniu do modelowania pieców łukowych</b>	<b>7</b>
3.1	Model oparty o losowe równanie różniczkowe . . . . .	7
3.2	Model chaotyczny . . . . .	11
3.3	Modele wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe . . . . .	14
3.4	Model ułamkowego rzędu . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Analiza porównawcza opracowanych modeli</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>Implementacja w oprogramowaniu EMTP-ATP</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Publikacje własne związane z pracą doktorską</b>	<b>28</b>
	<b>Literatura</b>	<b>31</b>



# 1 Cel i zakres pracy

Elektryczny piec łukowy stanowi jeden z największych odbiorników energii elektrycznej spotykanych w systemach elektroenergetycznych i jest wykorzystywany do produkcji i recyklingu stali. Jego losowa i nieliniowa charakterystyka może powodować wiele problemów w zakresie jakości energii elektrycznej takich jak np. występowanie wyższych harmonicznych w przebiegach prądów i napięć, czy wahania napięcia. Łagodzenie skutków tych problemów wiąże się z koniecznością stosowania systemów poprawy jakości energii oraz odpowiedniego zaprojektowania samego układu zasilania. To z kolei wymaga znajomości zachowania pieca łukowego oraz jego wpływu na sieć. Dokładny model pieca jest w stanie zapewnić te informacje.

Rozprawa doktorska skupia się na stworzeniu nowych, dokładniejszych modeli łuku elektrycznego występującego w elektrycznych piecach łukowych. Praca dotyczy modelowania etapu roztapiania wsadu, który cechuje się najgorszym wpływem na sieć elektryczną pod kątem jakości energii. Zaproponowane modele zostały opracowane na podstawie danych pochodzących z trzech pieców łukowych różnej wielkości: dużego przemysłowego pieca, małego przemysłowego pieca oraz laboratoryjnego pieca zaprojektowanego specjalnie do tego celu. Przebadane piece różnią się pojemnością, mocą znamionową oraz poziomem napięcia roboczego. Rezultaty analizy przeprowadzone na bazie zgromadzonych danych potwierdziły, że zaproponowane metody mogą być skutecznie wykorzystane do modelowania tego typu odbiorników o różnej mocy znamionowej.

Zasadnicza część pracy jest poświęcona opracowaniu modeli łuku elektrycznego przy wykorzystaniu czterech różnych podejść teoretycznych, tak aby umożliwić odzwierciedlenie deterministycznego i stochastycznego zachowania pieca. W tym celu zaproponowano zastosowanie następujących metod: modelu opartego o losowe równania różniczkowe, modelu chaotycznego, modeli korzystających z płytkich oraz głębokich sztucznych sieci neuronowych oraz modelu ułamkowego rzędu. Zarówno jakościowa jak i ilościowa ocena modeli przedstawiona w pracy wykazała, że wszystkie zaproponowane koncepcje mogą być skutecznie stosowane do modelowania elektrycznych pieców łukowych, istotnie zmniejszając błąd między przebiegami symulowanymi a pomiarowymi.

Głównym celem niniejszej pracy było opracowanie nowych i dokładniejszych modeli elektrycznego pieca łukowego oraz implementacja wybranego modelu w programie do symulacji obwodów elektrycznych w dziedzinie czasu. Modele powinny być opracowane na bazie rzeczywistych danych pomiarowych oraz być w stanie odzwierciedlać zarówno część deterministyczną charakterystyki łuku, jak i jej stochastyczne zmiany w szerokim zakresie częstotliwości. Wśród szczegółowych celów pracy można wymienić:

- rozszerzenie istniejącego modelu pieca, bazującego na równaniu bilansu mocy, do postaci losowego równania różniczkowego odzwierciedlającego stochastyczny charakter łuku,
- reprezentacja stochastycznego zachowania łuku przy pomocy sygnałów chaotycznych oraz generowanych przez sztuczne sieci neuronowe,
- uogólnienie równania bilansu mocy poprzez zastąpienie operatora różniczkowego przez operator różniczkowo-całkowy ułamkowego rzędu,
- wielokryterialna analiza porównawcza opracowanych modeli,

- implementacja wybranego modelu bezpośrednio w programie służącym do symulacji obwodów elektrycznych.

Na podstawie powyższych celów, zostały sformułowane hipotezy badawcze. Główna teza stwierdza, iż jest możliwe opracowanie nowych stochastycznych modeli pieca łukowego na podstawie różnych podejść teoretycznych i na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych, tak aby poprawić ich dokładność względem istniejących deterministycznych modeli. Dodatkowo, zostały sformułowane tezy pomocnicze stwierdzające, iż możliwe jest:

- uwzględnienie procesów stochastycznych o fizycznej interpretacji w równaniu bilansu mocy skutkujące poprawą dokładności modelu,
- dopasowanie wybranych układów chaotycznych, tak aby generowane przez nie sygnały reprezentowały stochastyczne procesy w modelu opartym o równanie bilansu mocy, bez pogorszenia dokładności,
- zastosowanie sztucznych sieci neuronowych, tak aby generowane przez nie sygnały reprezentowały stochastyczne procesy w modelu opartym o równanie bilansu mocy, bez pogorszenia dokładności,
- uogólnienie równania różniczkowego bilansu mocy do równania ułamkowego rzędu skutkujące poprawą dokładności modelu,
- zaimplementowanie najlepszego modelu stochastycznego bezpośrednio w programie EMTP-ATP służącym do symulacji obwodów elektrycznych.

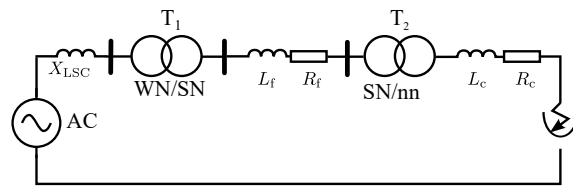
Analiza przeprowadzona na bazie uzyskanych wyników, przedstawiona w rozprawie doktorskiej, wiąże się z zastosowaniem pewnych założeń upraszczających. Najbardziej istotne jest założenie dotyczące obiektu badań. Praca dotyczy jedynie modeli zmiennoprądowych pieców łukowych ze swobodnie palącym się łukiem. W związku z tym, nie zawiera danych dla pieców stałoprądowych oraz pieców łukowo-oporowych. Kolejne założenie dotyczy cyklu pracy pieca. Zdecydowano się na skupienie się wyłącznie na fazie roztapiania wsadu ponieważ ma on najgorszy wpływ na sieć zasilającą. Modele zostały opracowane na bazie danych pochodzących z trzech różnych instalacji o różnej mocy znamionowej, w związku z czym nie analizowano indywidualnych różnic występujących pomiędzy piecami o tej samej wielkości. Ponadto, analiza opiera się na przebiegach fazowych prądu oraz napięcia łuku, w których obserwowane są stochastyczne zmiany. Założono, że wpływ układu sterowania, otoczenia łuku, wpływu rozłożenia wsadu i jego zmian są pośrednio uwzględnione w zarejestrowanych przebiegach. Dodatkowo, pominięto oddziaływanie pomiędzy łukami palącymi się wewnątrz komory pieca.

## 2 Opis elektrycznego pieca łukowego

Elektryczny piec łukowy należy do grupy urządzeń wykorzystywanych w przemyśle metalurgicznym, głównie do produkcji i recyklingu stali. Wykorzystuje zjawisko łuku elektrycznego, który paląc się pomiędzy elektrodami a metalowym wsadem generuje ciepło służące do jego topienia. Niniejsza praca skupia się na analizie modeli zmiennoprądowego łuku elektrycznego występującego w trójfazowych piecach AC z otwarciem palącym się łukiem.

Konstrukcja pieca składa się z głównej komory, w której umieszczany jest wsad. Komora jest wyłożona ogniotrwałym materiałem i posiada kilka otworów technicznych. Otwory boczne służą do załadunku wsadu, spustu płynnego metalu lub umieszczenia w środku dodatkowego osprzętu, np. palników gazowych. Dach komory jest wyposażony w trzy dodatkowe otwory, rozmieszczone na planie trójkąta równobocznego przez które do wnętrza pieca opuszczane są grafitowe elektrody. Są one umieszczone na kolumnach wyposażonych w system ich pozycjonowania. Elektrody połączone są z transformatorem piecowym poprzez przewodzące szyny oraz elastyczne przewody. Osprzęt pieca pracujący w najcięższych warunkach temperaturowych najczęściej jest wyposażony w system chłodzenia wodnego.

Część elektryczna pieca ma istotny wpływ na mierzone napięcie łuku. Rezystancja obwodu wieloprądowego pieców stalowniczych zawiera się w przedziale  $0,5 - 1,5 \text{ m}\Omega$ , a reaktancja w przedziale  $2 - 5 \text{ m}\Omega$ . W związku z tym w przypadku analizy zjawiska łuku istotne jest odjęcie spadku napięcia na tych elementach, tak aby uzyskać dane związane wyłącznie z łukiem. Uproszczony schemat obwodu zasilającego piec znajduje się na rys. 1. Oprócz obwodu wtórnej strony transformatora SN/nn piecowego ( $T_2$ ) zawiera również transformator WN/SN ( $T_1$ ), reaktancję zwarciovą  $X_{LSC}$  oraz  $L_f$  i  $R_f$  reprezentujące indukcyjność i rezystancję obwodu zasilającego oraz parametry  $L_c$  i  $R_c$  elastycznych przewodów, szyn i elektrod.



Rys. 1: Schemat elektryczny układu zasilania pieca łukowego.

Cykl pracy pieca łukowego składa się z kilku etapów, a pierwszym z nich jest załadunek pieca. Następnie elektrody pod napięciem opuszczane są do wnętrza komory aż do zapłonu łuku. System sterowania stara się utrzymać ciągły łuk, który paląc się topi wsad pieca, co stanowi fazę roztapiania. Po stopieniu całego wsadu, jest on wciąż podgrzewany do uzyskania właściwych parametrów materiałowych. Etap ten stanowi rafinację wsadu, któremu towarzyszy dodawanie wymaganych domieszek. Po uzyskaniu odpowiednich parametrów materiałowych metalu, odbywa się spust poprzez przechylenie pieca, tak aby metal grawitacyjnie wylał się przez odpowiedni otwór. Po tej operacji cały cykl może zostać powtórzony. Z punktu widzenia jakości energii elektrycznej najgorszą fazą jest faza roztapiania wsadu, ponieważ w jej trakcie metal jest tylko częściowo płynny i wielokrotnie występują losowe zmiany jego ułożenia. Przekłada się to na losowe zmiany parametrów łuku, co z kolei oddziałuje na przebiegi prądów i napięć. Z tego powodu niniejsza praca skupia się na modelowaniu pieca właśnie w trakcie fazy roztapiania wsadu.

## 2.1 Model bazowy

Modele pieca łukowego spotykane w literaturze oraz dostępne w różnych programach symulacyjnych składają się przede wszystkim z części deterministycznej opisującej zależność między prądem a napięciem łuku. Następnie, komponent deterministyczny może być uzupełniony poprzez dodanie komponentu stochastycznego, poprawiającego zgodność modelu z rzeczywistym zjawiskiem. Część deterministyczna może być

zrealizowana poprzez zastosowanie różnych metod, wśród których bardzo popularne jest stosowanie równań różniczkowych, np. w postaci modelu Cassiego lub Mayra. Niniejsza praca jest poświęcona opracowaniu nowych modeli łuku elektrycznego w oparciu o inny, szeroko stosowany model łuku w postaci równania różniczkowego wynikającego z bilansu mocy chwilowej.

Model bilansu mocy został zaproponowany w pracy [1] - dostarczona do łuku moc elektryczna rozkłada się między dwa główne elementy: moc przekazywaną do otoczenia w postaci ciepła oraz moc zwiększającą energię zgromadzoną wewnątrz kolumny łukowej. Równanie różniczkowe wiąże ze sobą promień i prąd łuku:

$$k_1 r^n(t) + k_2 r(t) \frac{dr(t)}{dt} = \frac{k_3}{r^{m+2}(t)} i^2(t), \quad (1)$$

gdzie:

$r(t)$  – promień łuku,

$i(t)$  – prąd łuku,

$k_j$  – współczynniki proporcjonalności,  $j = 1, 2, 3$ ,

$n, m$  – parametry równania związane ze stanem pracy pieca,  $n = 0, 1, 2$ ,  $m = 0, 1, 2$ .

Dodatkowe równanie służące do obliczenia napięcia łuku ma postać [1]:

$$v(t) = \frac{k_3}{r^{m+2}(t)} i(t). \quad (2)$$

Wartości poszczególnych współczynników  $k_j$ , wymagają estymacji na podstawie konkretnych danych pomiarowych. W różnych przypadkach ich optymalne wartości mogą się różnić. Przykładowo, w [2] zostały oszacowane jako  $k_1 = 3000$ ,  $k_2 = 1$  i  $k_3 = 12,5$ , natomiast w [3] jako  $k_1 = 2565$ ,  $k_2 = 7,04$  i  $k_3 = 26,7$ . Z kolei parametry  $m$  i  $n$  związane są bezpośrednio ze stanem pracy pieca. Gdy otoczenie łuku jest gorące, można przyjąć, że  $n = 0$ , natomiast gdy przekazywanie ciepła do otoczenia jest bardziej efektywne, odpowiednią wartością jest  $n = 1$ . Dla krótkiego łuku przyjmuje się  $n = 2$ . Wartość parametru  $m$  jest związana z niejednorodnością łuku, który może być gorętszy we wnętrzu niż przy zewnętrznej krawędzi kolumny łukowej. Parametr ten przyjmuje wartości 0, 1 lub 2.

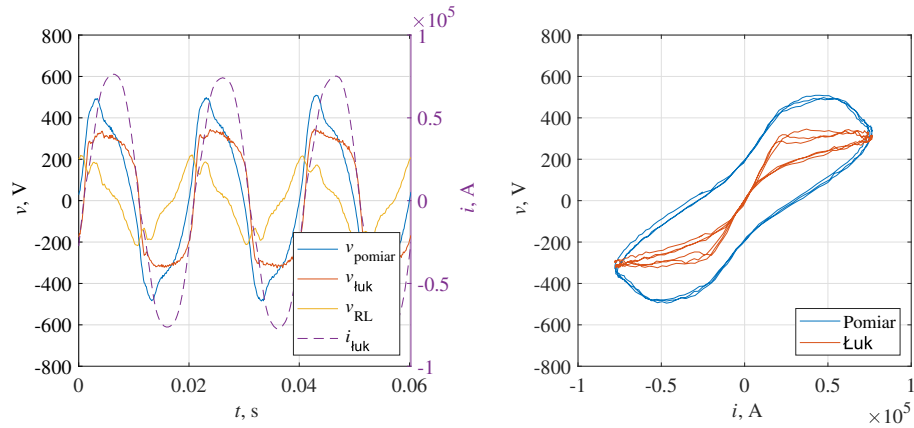
## 2.2 Dane pomiarowe

Wszystkie modele opracowane w ramach niniejszej pracy doktorskiej zostały stworzone w oparciu o dane pomiarowe pochodzące z rzeczywistych pieców łukowych. Dane składają się z zapisu przebiegów prądów i napięć fazowych zmierzonych w czasie roztapiania wsadu. W pracy zostały użyte trzy zbiory danych pochodzące odpowiednio z dużego przemysłowego pieca, małego przemysłowego pieca oraz laboratoryjnego pieca skonstruowanego w celach badawczych. Podstawowym zbiorem danych były dane dużego pieca przemysłowego, natomiast pozostałe zbiory zostały wykorzystane do przetestowania uniwersalności proponowanych podejść.

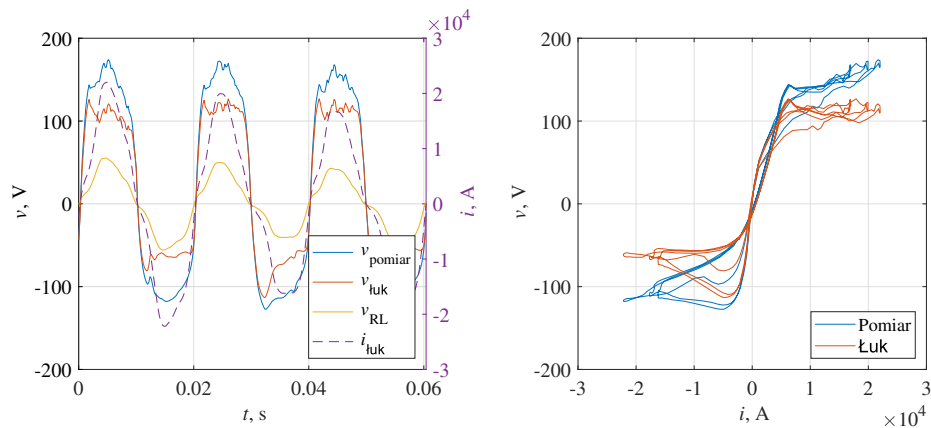
W przypadku każdego przebadanego pieca łukowego określona została impedancja obwodu wtórnego transformatora piecowego, tak aby usunąć z danych niepożądany wpływ tych parametrów. Na rys. 2-4 przedstawiono przebiegi zmierzonych prądów i napięć oraz wyznaczonego spadku napięcia na przewodach i napięcia łuku.



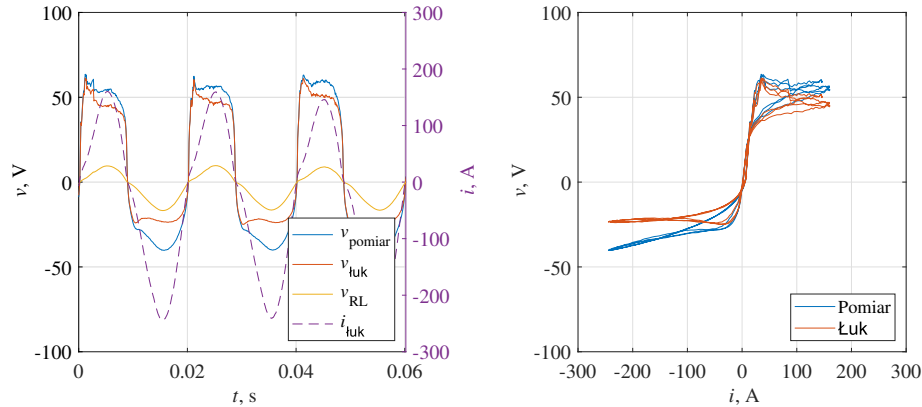
Dodatkowo, na rysunkach umieszczono charakterystyki napięciowo-prądowe obrazujące wpływ spadku napięcia na przewodach zasilających na dane pomiarowe. W dalszej części pracy korzystano jedynie z napięć i prądu łuku, z wyłączeniem wpływu dodatkowych spadków napięcia.



Rys. 2: Porównanie przebiegów napięcia zmierzonego, spadku napięcia na przewodach oraz napięcia łuku dla danych pochodzących z dużego przemysłowego pieca łukowego (z lewej) oraz charakterystyka pomiarowa porównana z charakterystyką łuku (z prawej).



Rys. 3: Porównanie przebiegów napięcia zmierzonego, spadku napięcia na przewodach oraz napięcia łuku dla danych pochodzących z małego przemysłowego pieca łukowego (z lewej) oraz charakterystyka pomiarowa porównana z charakterystyką łuku (z prawej).



Rys. 4: Porównanie przebiegów napięcia zmierzonego, spadku napięcia na przewodach oraz napięcia łuku dla danych pochodzących z laboratoryjnego pieca łukowego (z lewej) oraz charakterystyka pomiarowa porównana z charakterystyką łuku (z prawej).

### 3 Nowe modele łuku elektrycznego w zastosowaniu do modelowania pieców łukowych

W głównej części rozprawy doktorskiej zostały przedstawione modele łuku elektrycznego opracowane przy zastosowaniu czterech różnych podejść teoretycznych: losowych równań różniczkowych, teorii chaosu, sztucznych sieci neuronowych oraz modelowania z zastosowaniem operatora różniczkowo-całkowego ułamkowego rzędu. Kolejne podrozdziały streszczenia zawierają syntetyczny opis zaproponowanych modeli oraz przedstawiają najważniejsze wyniki uzyskane w trakcie badań.

#### 3.1 Model oparty o losowe równanie różniczkowe

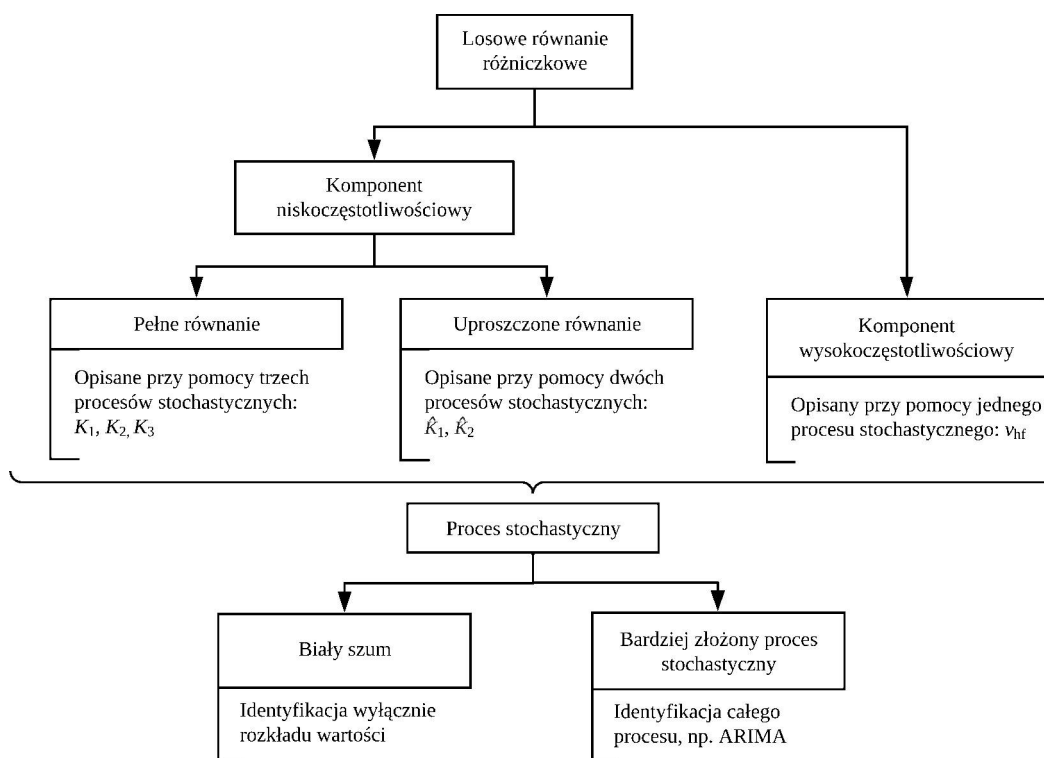
Podejście przedstawione w niniejszym podrozdziale związane jest z problemem reprezentowania losowych zjawisk towarzyszących łukowi elektrycznemu poprzez odpowiednio zdefiniowane procesy stochastyczne. Dane pomiarowe wskazują, iż losowe zmiany w charakterystyce mają miejsce w szerokim zakresie częstotliwości. W związku z tym dla uproszczenia wyznaczono dwa główne komponenty w części stochastycznej - komponent niskoczęstotliwościowy oraz wysokoczęstotliwościowy. Pierwszy z nich związany jest ze zmianami występującymi w ogólnym kształcie charakterystyki prądowo-napięciowej łuku, natomiast drugi związany jest głównie z wysokoczęstotliwościowymi wahaniami widocznymi w szczególności w przebiegu napięcia, w okolicy wartości szczytowych. Oba komponenty mogą być reprezentowane przez odpowiednie procesy stochastyczne.

W niniejszej pracy niskoczęstotliwościowy komponent jest odzwierciedlany poprzez równanie bilansu mocy, w którym trzy współczynniki proporcjonalności zostały zastąpione procesami stochastycznymi. Procesy te są procesami czasu dyskretnego przy dodatkowym założeniu, że wartości poszczególnych współczynników pozostają stałe w czasie pojedynczego okresu sygnału lub jego połowy w przypadku asymetrii między dodatnimi i ujemnymi półokresami przebiegów. Równanie bilansu mocy może być jednak uproszczone poprzez podzielenie go przez jeden ze współ-

czynników. Taka zredukowana postać, w której występują tylko dwa współczynniki zamiast trzech, zakłada również zastąpienie tych dwóch nowych współczynników dwoma innymi procesami stochastycznymi. Z kolei komponent wysokoczęstotliwościowy stanowi sygnał napięciowy, który również w obu przypadkach może być reprezentowany poprzez pojedynczy proces stochastyczny.

Każdy ze wspomnianych procesów musi zostać zidentyfikowany w celu opracowania pełnego modelu pieca. W pracy przedstawiono dwa sposoby identyfikacji. Pierwszy z nich zakłada niezależność kolejnych próbek procesu i obejmuje jedynie identyfikację odpowiedniego rozkładu wartości. W takim przypadku uzyskany proces stanowi biały szum o określonym empirycznie rozkładzie. Druga strategia obejmuje szerszą identyfikację procesu z uwzględnieniem korelacji kolejnych próbek, np. przy pomocy modeli ruchomej średniej, autoregresywnych lub ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average).

Diagram przedstawiający możliwe kombinacje modelu opartego o losowe równania różniczkowe przedstawiono na rys. 5. Podstawowym podejściem, dla którego opracowano modele jest zastosowanie reprezentacji trzech procesów przy użyciu białego szumu oraz wysokoczęstotliwościowego komponentu w oparciu o model ruchomej średniej. W pracy przedstawiono również przykład modelu zredukowanego do dwóch procesów przy pełnej identyfikacji procesów stochastycznych. Niniejsze streszczenie przedstawia najistotniejsze wyniki uzyskane dla metod przyjętych w pracy.



Rys. 5: Diagram przedstawiający możliwe kombinacje struktury modelu pieca łukowego opracowanego w oparciu o losowe równania różniczkowe.

Rozprawa doktorska zawiera wyniki końcowe oraz pośrednie wykresy związane z uzyskaniem wyników dla trzech rozpatrywanych pieców łukowych. W niniejszym podrozdziale streszczenia przedstawiono jedynie najważniejsze wyniki uzyskane dla kompletnego modelu zawierającego zarówno nisko- jak i wysokoczęstotliwościowy komponent reprezentowany przez zidentyfikowane procesy stochastyczne. Dodatkowo, poniżej w Tabelach 1-3 przedstawiono błędy średniokwadratowe (ang. RMSE - root mean square error) uzyskane przy założeniu stałych współczynników  $k$  oraz przy zastosowaniu zmiennych wartości reprezentowanych przez zidentyfikowane procesy stochastyczne. Wartości RMSE były obliczane na podstawie różnicy pomiędzy napięciem pomiarowym a symulowanym uzyskanym z modelu dla tego samego fragmentu przebiegu prądu jako sygnału wejściowego. Wyniki świadczą o istotnej poprawie uzyskanej dzięki uzmiennieniu współczynników. Uzasadnia to zastosowanie zaproponowanego podejścia.

Przykładowe wyniki otrzymane przy pomocy opracowanych modeli przedstawiono na rys. 6-8. Zawierają one realizacje symulowanych napięć porównane z przebiegiem pomiarowym oraz porównanie charakterystyk napięciowo-prądowych. Wyniki wskazują na występowanie stochastycznych zmian podobnych do tych obserwowanych w danych pomiarowych zarówno dla komponentu o niskiej, jak i wysokiej częstotliwości.

Tabela 1: Porównanie błędów przy stałych i zmiennych współczynnikach  $k$  dla danych pochodzących z dużego przemysłowego pieca łukowego.

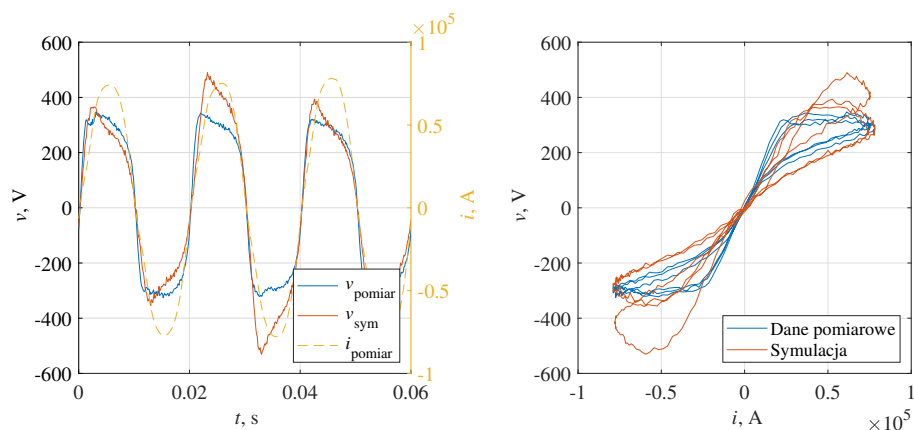
	Stałe współczynniki	Procesy stochastyczne	Względna zmiana
Dopasowane wartości	$k_1 = 2213,3$ $k_2 = 7,46$ $k_3 = 31,82$	$k_j$ zmienne	-
RMSE	3,2	2,4	-27%

Tabela 2: Porównanie błędów przy stałych i zmiennych współczynnikach  $k$  dla danych pochodzących z małego przemysłowego pieca łukowego.

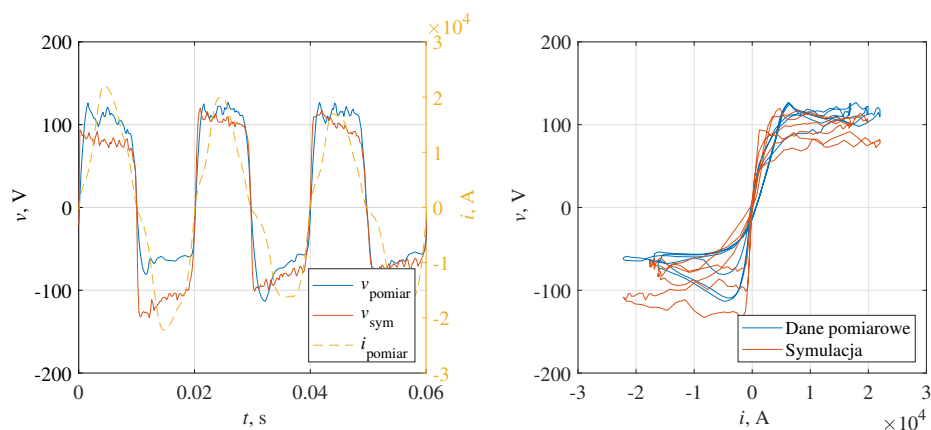
	Stałe współczynniki	Procesy stochastyczne	Względna zmiana
Dopasowane wartości	$k_1 = 62,15$ $k_2 = 0,05$ $k_3 = 114,46$	$k_j$ zmienne	-
RMSE	23,9	14,0	-41%

Tabela 3: Porównanie błędów przy stałych i zmiennych współczynnikach  $k$  dla danych pochodzących z laboratoryjnego pieca łukowego.

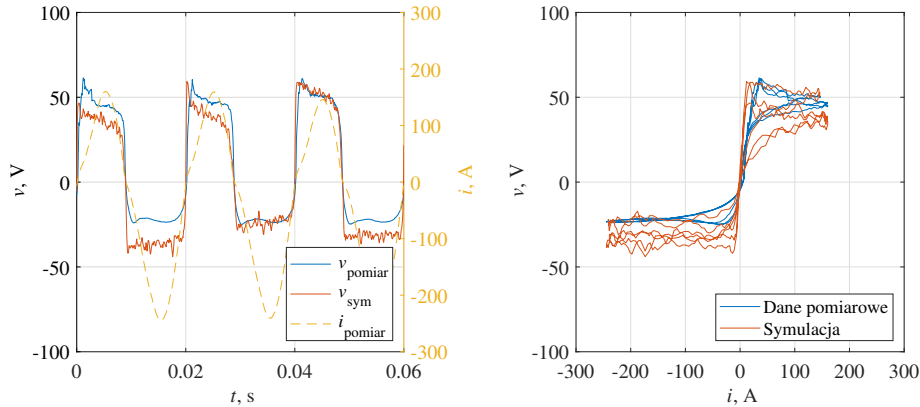
	Stałe współczynniki	Procesy stochastyczne	Względna zmiana
Dopasowane wartości	$k_1 = 88,49$ $k_2 = 0,06$ $k_3 = 12,30$	$k_j$ zmienne	-
RMSE	12,3	3,9	-68%



Rys. 6: Przykładowe przebiegi napięcia (z lewej) i charakterystyki napięciowo-prądowej (z prawej) uzyskane dla danych pomiarowych oraz przy pomocy modelu stochastycznego dla dużego przemysłowego pieca łukowego.



Rys. 7: Przykładowe przebiegi napięcia (z lewej) i charakterystyki napięciowo-prądowej (z prawej) uzyskane dla danych pomiarowych oraz przy pomocy modelu stochastycznego dla małego przemysłowego pieca łukowego.



Rys. 8: Przykładowe przebiegi napięcia (z lewej) i charakterystyki napięciowo-prądowej (z prawej) uzyskane dla danych pomiarowych oraz przy pomocy modelu stochastycznego dla laboratoryjnego pieca łukowego.

### 3.2 Model chaotyczny

Dzięki właściwościom sygnałów chaotycznych możliwe jest ich zastosowanie do odzwierciedlania sygnałów stochastycznych. W podejściu zaprezentowanym w niniejszym podrozdziale zastosowano właśnie układy chaotyczne w celu uzyskania przebiegów o cechach zbliżonych do losowych. Model chaotyczny jest skonstruowany podobnie do modelu opartego o losowe równania różniczkowe, jednak zasadnicza różnica polega na tym, iż w tym przypadku zmiany współczynników równania nie są odzwierciedlane przez procesy stochastyczne, a przez sygnały generowane przez odpowiednio zoptymalizowane układy chaotyczne. Dzięki zaproponowaniu takiego modelu możliwe jest analizowanie różnych scenariuszy symulacyjnych przy zachowaniu dokładnie takich samych pseudolosowych warunków.

W literaturze zdefiniowano wiele różnorodnych układów chaotycznych, a część z nich od dawna znajduje zastosowanie w inżynierii elektrycznej. W celach porównawczych wybrano cztery różne układy chaotyczne, z których każdy dopasowano do poszczególnych współczynników  $k$  równania bilansu mocy. Są to odpowiednio: obwód Chuy, układ Lorenza, układ Rösslera oraz układ chaotyczny, którego atraktor posiada cztery skrzydła, zaczerpnięty z [4], nazywany systemem Four-wing. Współczynniki oraz częstotliwość próbkowania sygnałów chaotycznych została zoptymalizowana w oparciu o kryterium zapewniające jak największą zgodność autokorelacji i rozkładu wartości generowanych sygnałów z tymi uzyskanymi z danych pomiarowych. W Tabelach 4-6 przedstawiono wyniki optymalizacji poszczególnych układów do reprezentowania odpowiednich współczynników. Symbol  $\xi$  oznacza optymalizowany współczynnik układu chaotycznego, który wpływa na ostateczny kształt uzyskanego atraktora chaotycznego, natomiast  $f_s$  oznacza częstotliwość próbkowania. Wartość  $d$  reprezentuje błąd stanowiący odległość euklidesową danego rozwiązania od rozwiązania idealnego o zerowej wartości obu funkcji celu obliczonej po normalizacji ich wartości. Najlepsze rozwiązanie zaznaczono pogrubioną czcionką. Wyniki wskazują, że w przypadku dużego przemysłowego pieca łukowego najlepsze odwzorowanie współczynników  $k_1$  oraz  $k_3$  uzyskano dla układu Lorenza, natomiast  $k_2$  dla układu chaotycznego Four-wing. Wyniki uzyskane dla małego przemysłowego pieca wskazują, że najlepsze odwzorowanie  $k_1$  i  $k_2$  uzyskano dla układu Four-wing.

W przypadku współczynnika  $k_3$  był to układ Rösslera. Z kolei dla laboratoryjnego pieca najlepszy w przypadku każdego ze współczynników okazał się układ chaotyczny Four-wing.

Przykładowe wyniki uzyskane przy pomocy opracowanych modeli przedstawiono na rys. 9-11. Zawierają one realizacje symulowanych napięć porównane z przebiegiem pomiarowym oraz porównanie charakterystyk napięciowo-prądowych. Uzyskane wyniki zawierają zmiany podobne do tych stochastycznych, które są obserwowane w danych pomiarowych zarówno dla komponentu o niskiej jak i wysokiej częstotliwości.

Tabela 4: Wyniki optymalizacji układów chaotycznych dla dużego przemysłowego pieca.

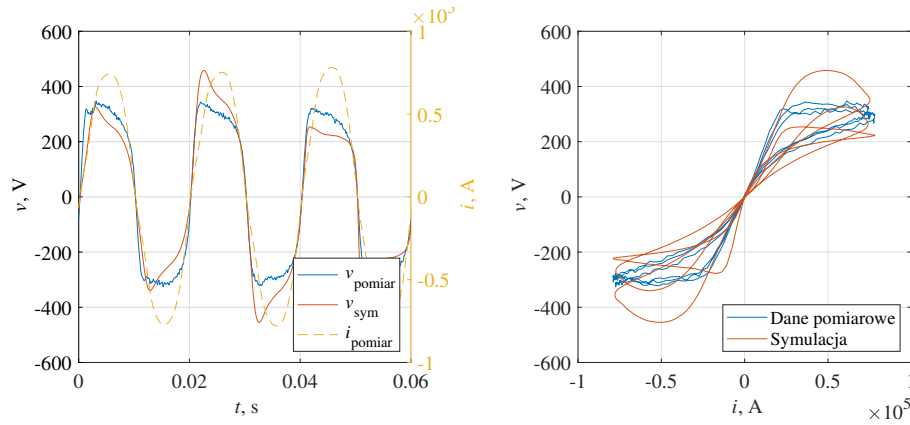
		Chua	Lorenz	Rössler	Four-wing
$k_1$	$\xi$	24,73	<b>41,00</b>	7,34	-0,28
	$f_s$ , Hz	0,18	<b>2,05</b>	0,43	3,00
	$d$	0,13	<b>0,08</b>	1,35	1,00
$k_2$	$\xi$	24,15	27,13	7,86	<b>1,13</b>
	$f_s$ , Hz	0,30	3,40	0,45	<b>8,47</b>
	$d$	0,56	0,54	1,41	<b>0,47</b>
$k_3$	$\xi$	24,21	<b>32,03</b>	7,85	-1,00
	$f_s$ , Hz	0,20	<b>2,48</b>	0,51	3,57
	$d$	0,62	<b>0,43</b>	1,41	0,59

Tabela 5: Wyniki optymalizacji układów chaotycznych dla małego przemysłowego pieca.

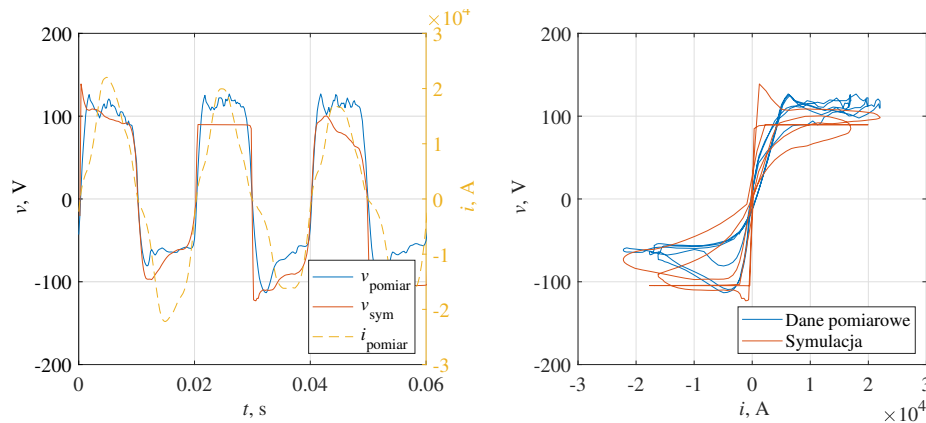
		Chua	Lorenz	Rössler	Four-wing
$k_1$	$\xi$	24,08	31,02	7,85	<b>-1,76</b>
	$f_s$ , Hz	0,86	0,42	2,94	<b>0,44</b>
	$d$	0,76	1,09	1,36	<b>0,50</b>
$k_2$	$\xi$	24,38	41,48	7,86	<b>-0,61</b>
	$f_s$ , Hz	1,47	0,54	2,15	<b>0,42</b>
	$d$	0,44	1,00	1,02	<b>0,12</b>
$k_3$	$\xi$	27,64	37,20	<b>6,10</b>	0,08
	$f_s$ , Hz	0,73	0,31	<b>2,94</b>	0,44
	$d$	1,00	1,14	<b>0,61</b>	1,17

Tabela 6: Wyniki optymalizacji układów chaotycznych dla laboratoryjnego pieca.

		Chua	Lorenz	Rössler	Four-wing
$k_1$	$\xi$	24,21	30,73	6,67	<b>-1,50</b>
	$f_s$ , Hz	1,94	0,40	2,75	<b>0,41</b>
	$d$	0,42	0,38	1,41	<b>0,23</b>
$k_2$	$\xi$	24,41	37,56	7,86	<b>-0,39</b>
	$f_s$ , Hz	1,97	0,55	2,43	<b>0,33</b>
	$d$	0,52	0,53	1,41	<b>0,09</b>
$k_3$	$\xi$	24,60	26,30	7,86	<b>-0,96</b>
	$f_s$ , Hz	0,58	0,23	2,13	<b>0,37</b>
	$d$	1,06	1,01	1,04	<b>0,22</b>

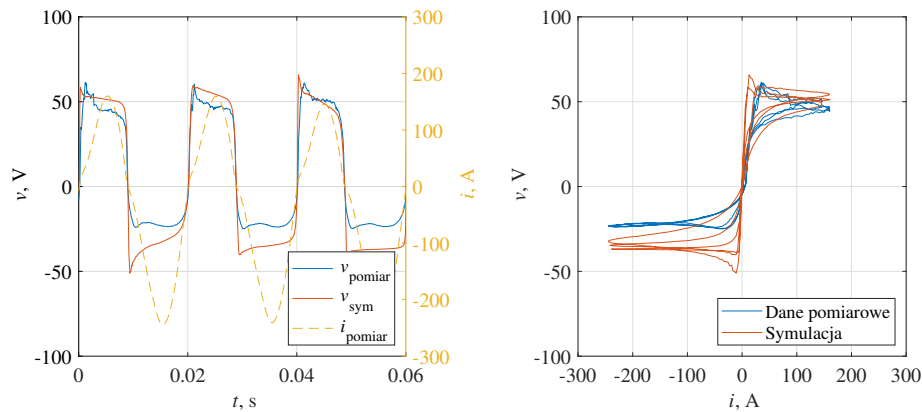


Rys. 9: Przykładowe przebiegi napięcia (z lewej) i charakterystyki napięciowo-prądowej (z prawej) uzyskane dla danych pomiarowych oraz przy pomocy modelu chaotycznego dla dużego przemysłowego pieca łukowego.



Rys. 10: Przykładowe przebiegi napięcia (z lewej) i charakterystyki napięciowo-prądowej (z prawej) uzyskane dla danych pomiarowych oraz przy pomocy modelu chaotycznego dla małego przemysłowego pieca łukowego.

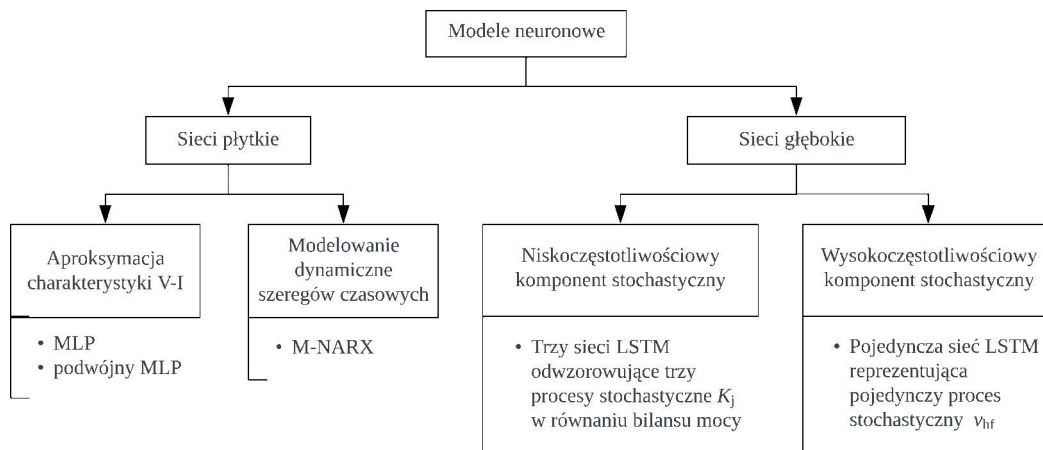




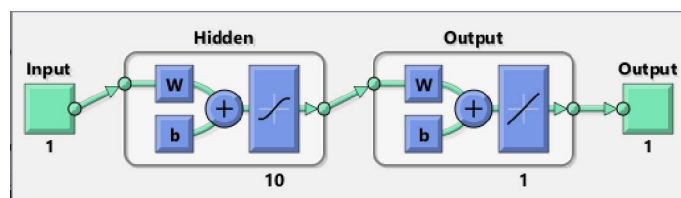
Rys. 11: Przykładowe przebiegi napięcia (z lewej) i charakterystyki napięciowo-prądowej (z prawej) uzyskane dla danych pomiarowych oraz przy pomocy modelu chaotycznego dla laboratoryjnego pieca łukowego.

### 3.3 Modele wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe

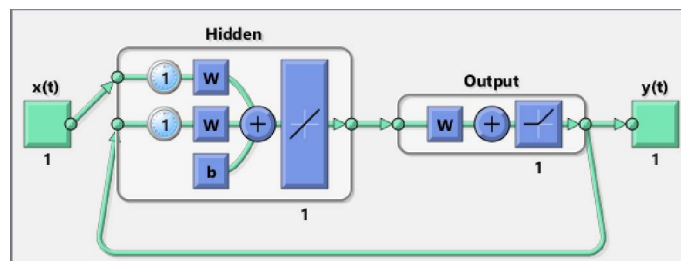
W grupie modeli opracowanych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych można wyróżnić dwie podstawowe kategorie: modele z płytkimi sieciami neuronowymi oraz modele głębokie. Na rys. 12 przedstawiono konfigurację modeli zaproponowanych w niniejszym rozdziale. W pierwszej kategorii stworzono trzy osobne modele. Dwa z nich wykorzystują klasyczną strukturę sieci typu Multilayer Perceptron (MLP). Topologia modelu MLP została przedstawiona na rys. 13. Model ten zakłada, że prąd łuku stanowi dane wejściowe, natomiast napięcie - wyjściowe. Dostarczone do modelu dane są mnożone przez odpowiednie współczynniki, których wartości są dostosowywane w czasie uczenia sieci, a następnie trafiają jako argument do odpowiednio zdefiniowanej funkcji aktywacji. Wartość wyjściowa trafia do kolejnej warstwy sieci, która może różnić się liczbą neuronów oraz funkcją aktywacji. Nieskomplikowana struktura nie pozwala jednak na odzwierciedlenie dynamicznych zmian charakterystyki napięciowo-prądowej czy obecnej w niej histerezy. Poprawę dokładności modelu MLP uzyskano poprzez podwojenie jego struktury, w wyniku czego jedna sieć MLP odzwierciedla jedynie połowę charakterystyki, a druga pozostałą część. Dzięki temu uzyskano w modelu pętlę histerezy, jednak nie było możliwe bezpośrednie odzwierciedlenie dynamicznych zmian charakterystyki. W celu jej uwzględnienia, wykorzystano przekształcone równanie bilansu mocy, w którym wyodrębniono dwa nieliniowe statyczne przekształcenia, pomiędzy którymi znajdował się liniowy blok dynamiczny. W jego przypadku kwadrat prądu stanowił dane wejściowe, a konduktancja łuku dane wyjściowe. Ten właśnie blok zastąpiono płytką siecią neuronową opartą o strukturę modelu typu Nonlinear Autoregressive Exogenous Model (NARX). Działanie tej sieci jest podobne do sieci typu MLP, z tym, że w swojej strukturze posiada opóźnienia oraz pętlę sprzężenia zwrotnego. Do klasycznej sieci NARX wprowadzono zmiany w użytych funkcjach aktywacji tak aby upewnić się, że generowany przebieg konduktancji ma wyłącznie wartości dodatnie. Topologię zastosowanej zmodyfikowanej sieci M-NARX przedstawiono na rys. 14.



Rys. 12: Diagram przedstawiający konfigurację modeli zaproponowanych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych.

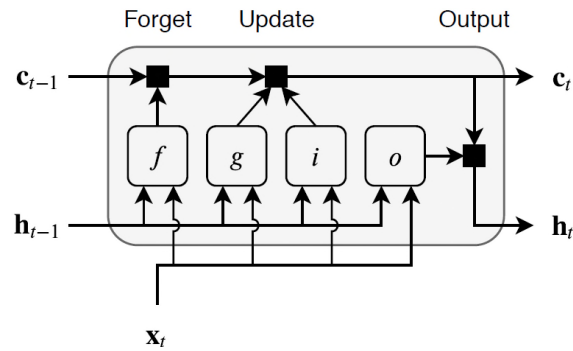


Rys. 13: Topologia sieci neuronowej typu Multilayer Perceptron.



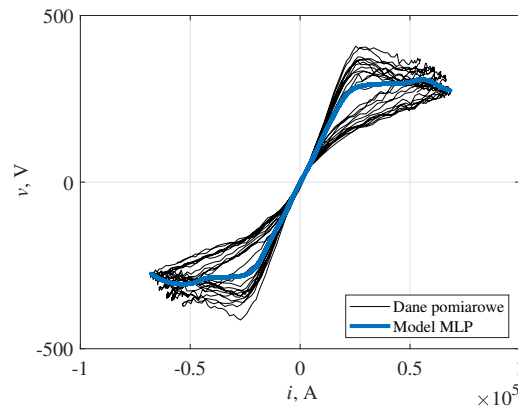
Rys. 14: Topologia zmodyfikowanej sieci typu NARX.

Oprócz zastosowania płytkich sieci neuronowych zaproponowano również rozwiązanie wykorzystujące sieci głębokie typu Long Short-Term Memory (LSTM), których konstrukcja pozwala na zapamiętywanie i samodzielne odzwierciedlenie dłuższych sekwencji. Pojedynczą komórkę sieci LSTM przedstawiono na rys. 15. Sieć składa się z serii takich komórek, w których funkcja "forget" odpowiada za usuwanie z danego stanu komórki informacji zbędnych, natomiast "update" pozwala na uwzględnienie nowych danych, które ostatecznie trafiają do wyjścia komórki oznaczonego jako "output". Opracowano model, który wykorzystywał cztery osobne struktury LSTM do odzwierciedlenia realizacji procesów stochastycznych określonych na bazie danych pomiarowych w podrozdziale związanym z modelem opartym o losowe równania różniczkowe.

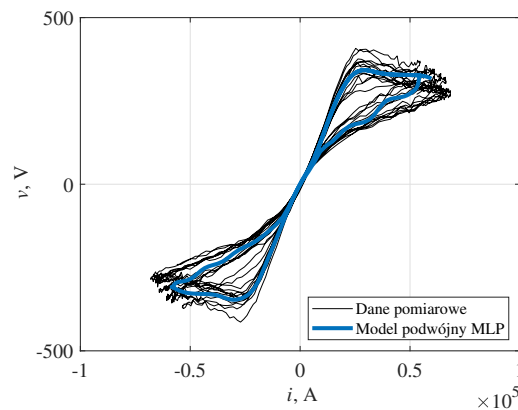


Rys. 15: Struktura pojedynczej komórki sieci LSTM.

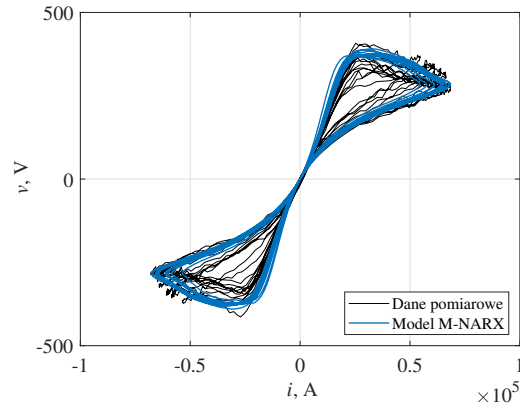
W niniejszym streszczeniu przedstawiono skrótowe wyniki modelowania przy pomocy płytkich sieci neuronowych uzyskane dla podstawowego zbioru danych pochodzących z dużego przemysłowego pieca łukowego. Otrzymane charakterystyki przedstawiono na rys. 16-18. Wykresy potwierdzają, iż zdolności odzwierciedlenia stochastycznej natury pieca poprzez płytke sieci neuronowe są ograniczone.



Rys. 16: Charakterystyka napięciowo-prądowa uzyskana dla modelu MLP dla dużego przemysłowego pieca.

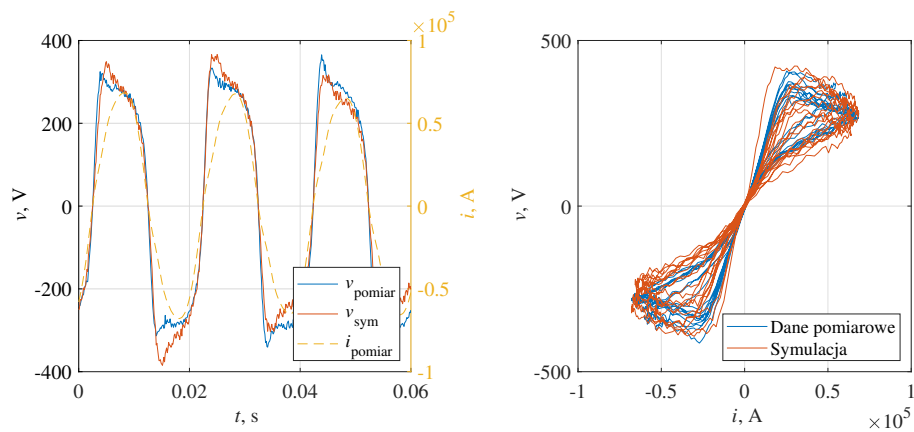


Rys. 17: Charakterystyka napięciowo-prądowa uzyskana dla podwójnego modelu MLP dla dużego przemysłowego pieca.

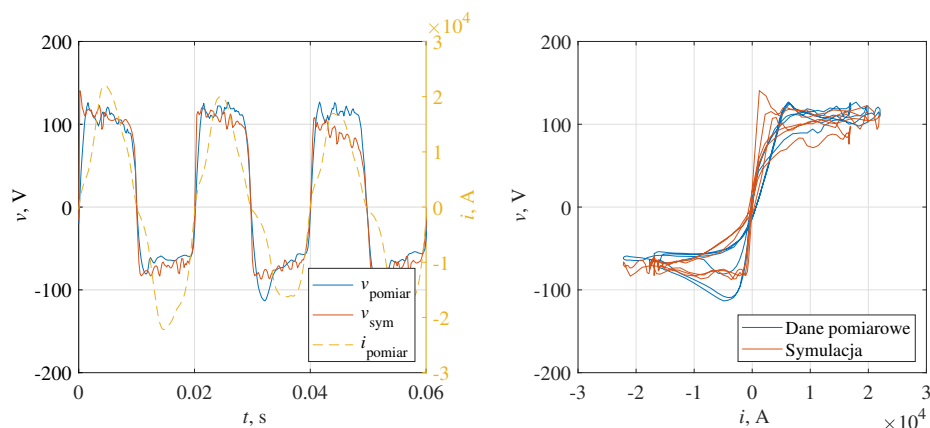


Rys. 18: Charakterystyka napięciowo-prądowa uzyskana dla modelu M-NARX dla dużego przemysłowego pieca.

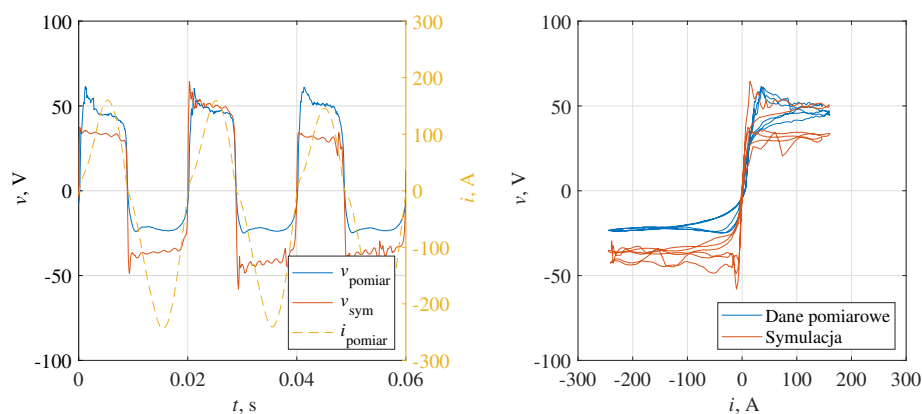
Uzyskanie wyników odzwierciedlających stochastyczne zmiany charakterystyki było możliwe dzięki zastosowaniu modelu opartego o sieci LSTM. Na rys. 19-21 przedstawiono przebiegi napięcia oraz charakterystyki napięciowo-prądowe, otrzymane dzięki jego zastosowaniu. Wykresy wskazują, iż głębokie sieci są w stanie odzwierciedlić realizacje procesów stochastycznych przy zachowaniu podobnych cech.



Rys. 19: Przykładowe przebiegi napięcia (z lewej) i charakterystyki napięciowo-prądowej (z prawej) uzyskane dla danych pomiarowych oraz przy pomocy modelu LSTM dla dużego przemysłowego pieca łukowego.



Rys. 20: Przykładowe przebiegi napięcia (z lewej) i charakterystyki napięciowo-prądowej (z prawej) uzyskane dla danych pomiarowych oraz przy pomocy modelu LSTM dla małego przemysłowego pieca łukowego.



Rys. 21: Przykładowe przebiegi napięcia (z lewej) i charakterystyki napięciowo-prądowej (z prawej) uzyskane dla danych pomiarowych oraz przy pomocy modelu LSTM dla laboratoryjnego pieca łukowego.

### 3.4 Model ułamkowego rzędu

Kolejnym modelem przedstawionym w rozprawie doktorskiej jest model ułamkowego rzędu. Jego opracowanie wymagało transformacji równania bilansu mocy poprzez podstawienie zmiennej pomocniczej zgodnie z metodą przedstawioną w [5]:

$$y = r^{m+4}. \quad (3)$$

Dzięki temu, dla  $n = 2$  oraz  $m = 0, 1, 2$ , równanie sprowadza się do liniowego równania różniczkowego:

$$\frac{dy(t)}{dt} = -\beta y(t) + f(t), \quad (4)$$

gdzie:

$$f(t) = \gamma i^2(t), \quad (5)$$

$$\beta = \frac{(m+4)k_1}{k_2}, \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{(m+4)k_3}{k_2}. \quad (7)$$

W tak sformułowanym równaniu możliwe jest zastąpienie klasycznego operatora różniczkowego ułamkowym operatorem różniczkowo-całkowym. W pracy zastosowano klasyczną definicję Grünwalda-Letnikova (GL), która jest często używana do obliczeń numerycznych. Definicja ma następującą postać:

$${}_a D_t^\alpha y(t) = \lim_{T_s \rightarrow 0} \frac{1}{T_s^\alpha} \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t-a}{T_s} \rfloor} (-1)^j \binom{\alpha}{j} y(t - jT_s), \quad (8)$$

gdzie  $\lfloor \cdot \rfloor$  oznacza część całkowitą argumentu. Dla szerokiej klasy funkcji, definicja GL jest tożsama z definicjami Riemann–Liouville czy Caputo, dla  $y(a) = 0$ .

Zastosowanie tak zmodyfikowanego modelu pieca pozwoliło na dokładniejsze odwzorowanie przebiegu napięcia, niż w przypadku klasycznego modelu. W pracy przetestowano rozwiązanie zakładające, że rząd równania  $\alpha$  stanowi kolejny proces stochastyczny czasu dyskretnego, którego wartości zmieniają się w sposób podobny do procesów reprezentujących współczynniki  $k_j$ . Ponadto, przeprowadzono obliczenia dla stałego  $\alpha$ , wybranego dla dwóch przypadków. Pierwszy przypadek stanowił medianę wartości  $\alpha$  uzyskanej w ogólnej analizie dla zmiennego  $\alpha$ , natomiast drugi był wartością reprezentowaną przez najmniejszą medianę błędu RMSE spośród uzyskanych dla różnych wartości stałego  $\alpha$ . Wyniki tej analizy dla poszczególnych pieców przedstawiono w Tabelach 7-9. Uzyskane wartości świadczą o istotnej poprawie odwzorowania danych pomiarowych przez zaproponowany model. Dodatkowo na rys. 22-24 przedstawiono przykładowy okres przebiegu napięcia dla modelu ułamkowego porównany z danymi pomiarowymi i klasycznym modelem całkowitego rzędu. Na rysunkach umieszczono również wykresy pudełkowe błędów RMSE dla każdego z opracowanych modeli ułamkowych. Pozioma linia w pudełku oznacza medianę, a granice pudełka odpowiednio 25-ty i 75-ty percentyl danych. Dla wszystkich przeanalizowanych zbiorów danych uzyskano poprawę odwzorowania napięcia dzięki zastosowaniu modelu ułamkowego rzędu.

Tabela 7: Mediana błędu RMSE dla modelu ułamkowego dla dużego przemysłowego pieca

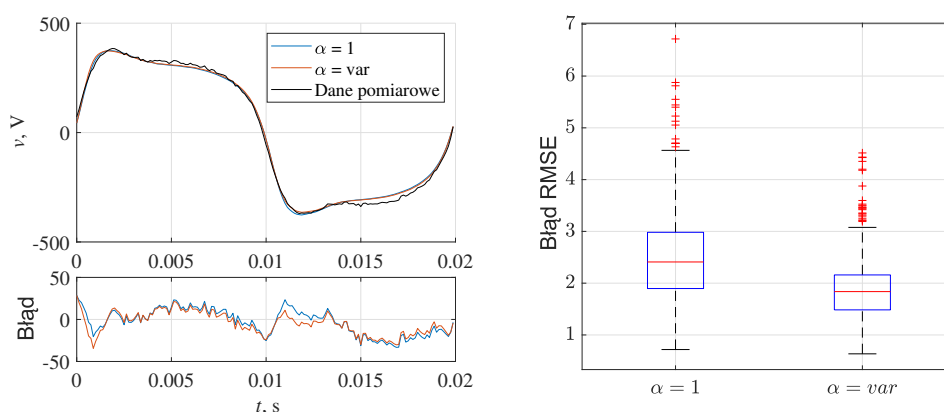
$\alpha = 1$	$\alpha = var$	$\alpha = 0,606$	$\alpha = 0,755$
2,41	1,84	1,91	1,82
<b>zmiana RMSE</b>	-24,8%	-20,8%	-24,3%

Tabela 8: Mediana błędu RMSE dla modelu ułamkowego dla małego przemysłowego pieca

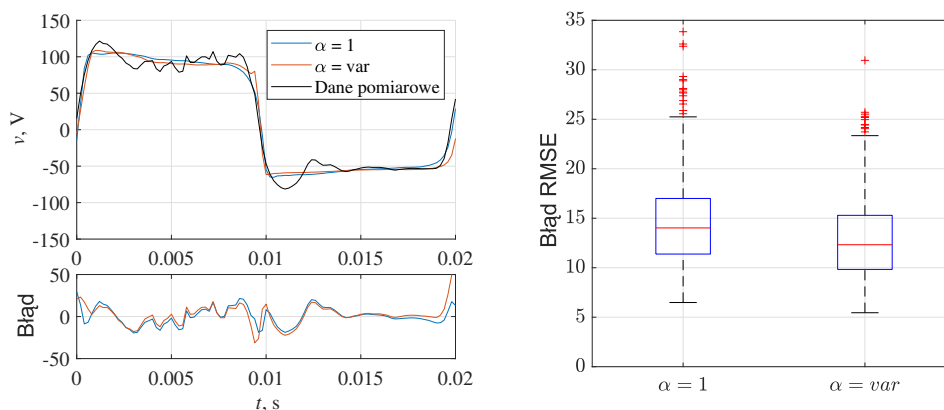
$\alpha = 1$	$\alpha = var$	$\alpha = 1,178$	$\alpha = 1,300$
14,02	12,53	13,54	12,87
<b>zmiana RMSE</b>	-10,6%	-3,4%	-8,2%

Tabela 9: Mediana błędu RMSE dla modelu ułamkowego dla laboratoryjnego pieca

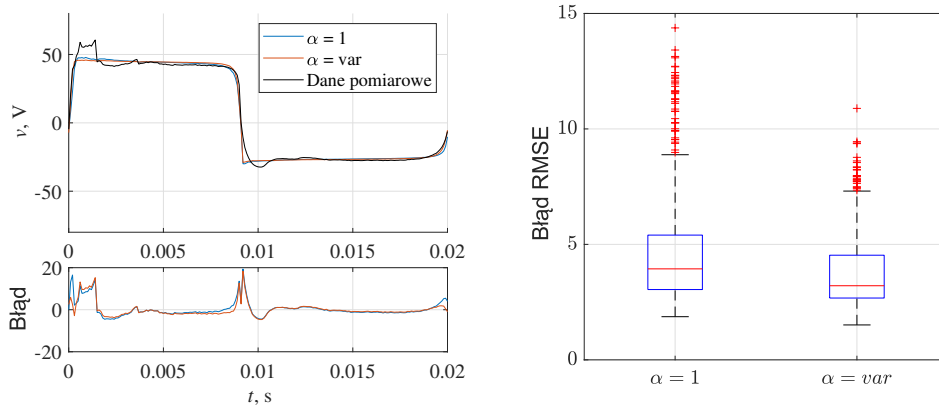
$\alpha = 1$	$\alpha = var$	$\alpha = 0,777$	$\alpha = 0,715$
3,50	3,21	3,34	3,33
<b>zmiana RMSE</b>	-8,4%	-4,8%	-5,0%



Rys. 22: Przykładowy okres napięcia pomiarowego i symulowanego wraz z wykresami pudełkowymi błędów dla dużego przemysłowego pieca łukowego.



Rys. 23: Przykładowy okres napięcia pomiarowego i symulowanego wraz z wykresami pudełkowymi błędów dla małego przemysłowego pieca łukowego.



Rys. 24: Przykładowy okres napięcia pomiarowego i symulowanego wraz z wykresami pudełkowymi błędów dla laboratoryjnego pieca łukowego.

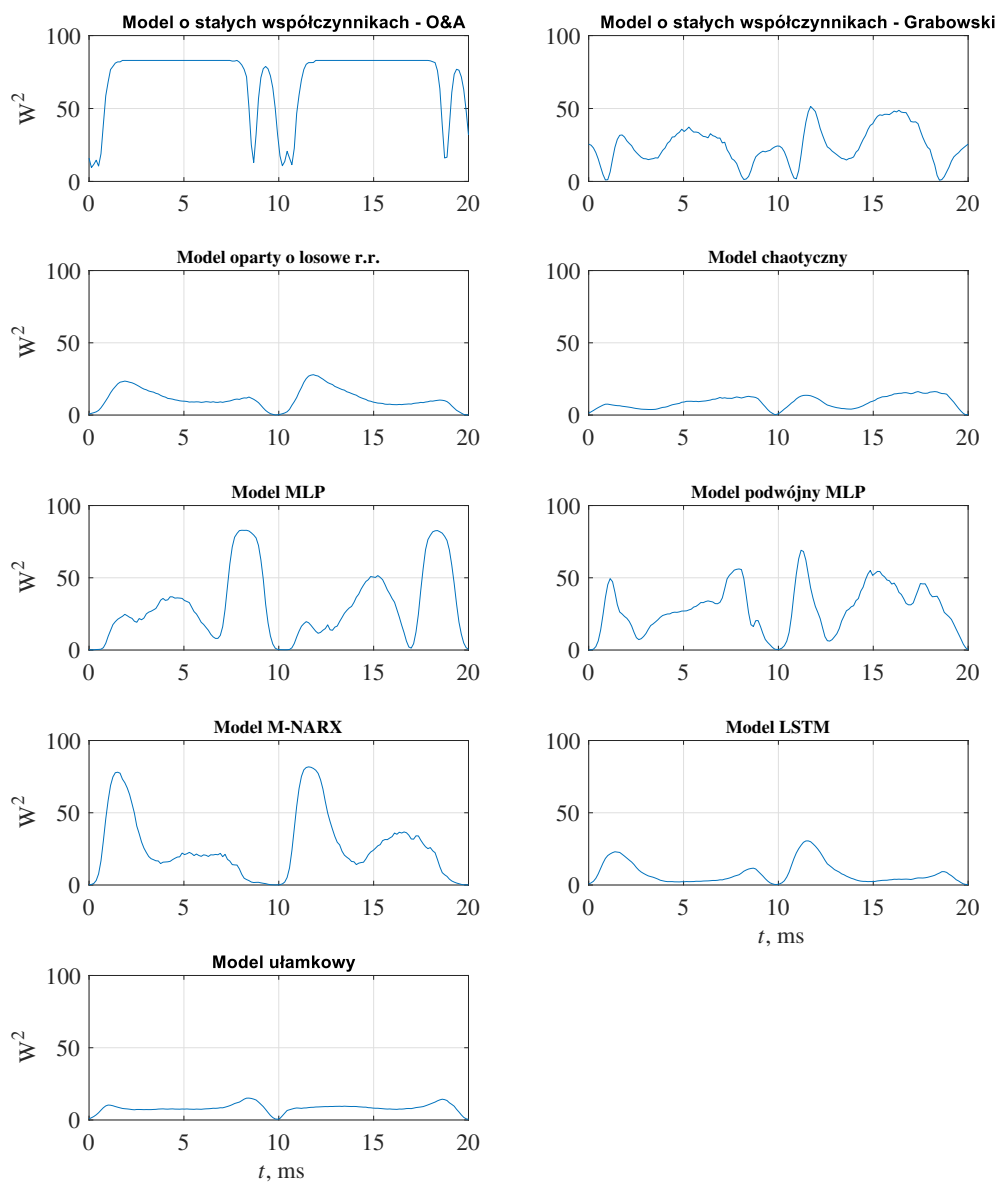
## 4 Analiza porównawcza opracowanych modeli

W ramach założonych celów pracy, konieczne było przeprowadzenie analizy porównawczej opracowanych modeli, aby wybrać model optymalny do implementacji w oprogramowaniu EMTP-ATP. Zaproponowano kilka kryteriów, na podstawie których dokonano porównania. Pierwszym z nich była jakościowa analiza modeli pod kątem ich zdolności do poprawnego odzwierciedlenia stochastycznych komponentów charakterystyki łuku. Wykazała ona, iż jedynie dwa modele: model oparty na losowych równaniach różniczkowych oraz model LSTM, są w stanie odzwierciedlać stochastyczne zmiany charakterystyki pieca w szerokim zakresie częstotliwości.

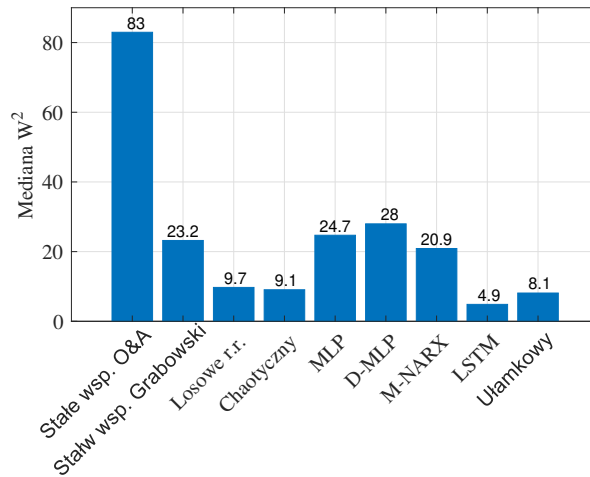
Kolejne przyjęte kryteria miały charakter ilościowy. Dla porównania dokładności modeli w szerokim oknie czasowym wygenerowano 10-sekundowe przebiegi napięcia przy użyciu każdego z modeli opracowanego dla podstawowego zbioru danych pomiarowych. Następnie wszystkie uzyskane okresy nałożono na siebie. Taki zestaw danych wykorzystano do obliczenia miary zgodności rozkładów odpowiadających sobie próbek przebiegu. Każdorazowo porównywano rozkłady pochodzące z danych pomiarowych z tymi uzyskanymi z zaproponowanych modeli. W tym celu zastosowano statystykę Cramér-von Mises'a [6]. Zmienność zgodności określonej tą miarą na przestrzeni okresu przebiegów napięcia zaprezentowano na rys. 25. Im wartość statystyki  $W^2$  jest mniejsza, tym większa jest zgodność rozkładów dla danej próbki.

Na bazie omówionych powyżej wyników zaproponowano również miarę w postaci pojedynczej wartości, zdefiniowaną jako mediana wskaźnika  $W^2$  obliczonego dla porównania danego modelu z pomiarem. Uzyskane wartości median przedstawiono na wykresie słupkowym na rys. 26. Wyniki wskazują, że model o stałych współczynnikach [2] charakteryzuje się najmniejszą dokładnością odwzorowania łuku elektrycznego. Drugi przeanalizowany model o stałych współczynnikach [3] charakteryzowany jest przez większą dokładność, porównywalną z dokładnością modeli dla płytkich sztucznych sieci neuronowych. Pozostałe modele zaproponowane w rozprawie doktorskiej, uwzględniające stochastyczne komponenty łuku elektrycznego, cechują się najwyższą dokładnością. Są to: model oparty o losowe równania różniczkowe, chaotyczny, ułamkowy oraz opracowany na bazie głębokich sieci neuronowych LSTM.





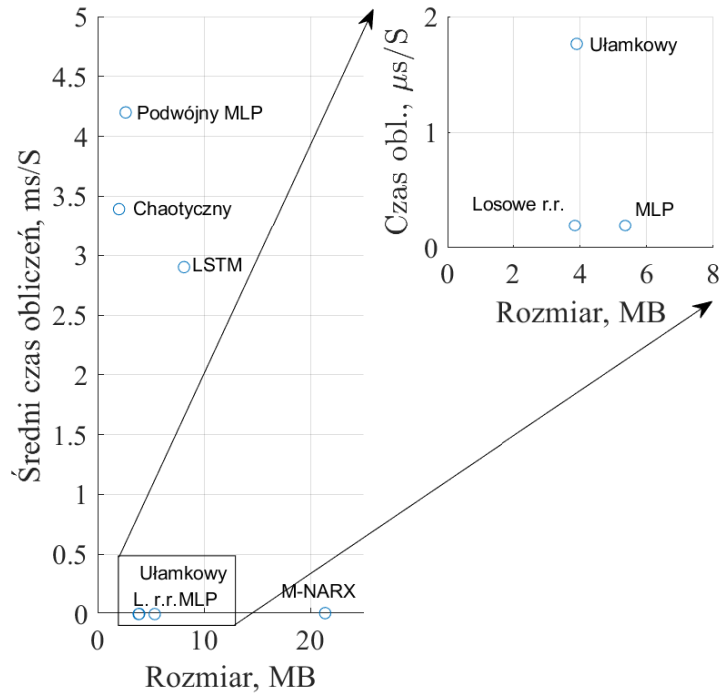
Rys. 25: Statystyka Cramér-von Mises'a obrazująca rozbieżność pomiędzy rozkładami próbek uzyskanych dla danych pomiarowych oraz modeli łuku.



Rys. 26: Wykres słupkowy mediany statystyk  $W^2$  uzyskanych dla wszystkich modeli łuku zaproponowanych w pracy.

Oprócz powyższych kryteriów przeanalizowano również wymagane zasoby obliczeniowe dla każdego z zaproponowanych modeli. W związku z tym wyznaczono dwie wielkości - objętość pamięci zajmowanej przez opracowane modele oraz średni czas wymagany na obliczenie pojedynczej próbki sygnału wyjściowego. Należy podkreślić, że zakres obliczonej pamięci uwzględnia nie tylko dane potrzebne do samodzielnego działania opracowanego modelu, ale również wszystkie zmienne pomocnicze wykorzystywane do jego stworzenia. Tak dobrane kryterium odzwierciedla nie tylko złożoność obliczeniową związaną z działaniem modelu, ale również z jego opracowaniem. Graficzne porównanie uzyskanych wielkości przedstawiono na rys. 27. Model oparty o losowe równania różniczkowe, model MLP oraz ułamkowy są najmniej wymagające pod kątem zasobów obliczeniowych. Model wykorzystujący losowe równania różniczkowe uzyskał najlepszy wynik w obu wspomnianych kryteriach.

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe aspekty analizy porównawczej oraz możliwości docelowego oprogramowania, wybrano model na bazie losowych równań różniczkowych jako optymalny do implementacji w środowisku EMTP-ATP.



Rys. 27: Porównanie średniego czasu obliczeń i zajmowanej pamięci dla zaproponowanych modeli.

## 5 Implementacja w oprogramowaniu EMTP-ATP

Do zaimplementowania modelu w środowisku symulacyjnym EMTP-ATP wykorzystano wbudowany język programowania MODELS oraz element stanowiący nieliniowy rezystor, którego rezystancja przyjmuje wartość obliczoną przez zdefiniowany przez użytkownika kod programu. W związku z faktem, że model łuku ma charakter rezystancyjny, do obliczeń rezystancji zaproponowano przekształcenie modelu opartego o losowe równania różniczkowe, tak aby w ostatecznej formie rezystancję łuku opisywało następujące równanie:

$$R_{arc}(t) = R_p(t) + R_r(t) = R_p(t) + \frac{V_r^*(t)}{i_{arc}(t)}. \quad (9)$$

gdzie:

$R_{arc}(t)$  – całościowa rezystancja łuku w chwili  $t$ ,

$R_p(t)$  – składnik rezystancji związany z niskoczęstotliwościowym komponentem stochastycznym w chwili  $t$

$R_r(t)$  – wysokoczęstotliwościowy składnik rezystancji łuku obliczony na podstawie wysokoczęstotliwościowego sygnału napięcia dla chwili  $t$ ,

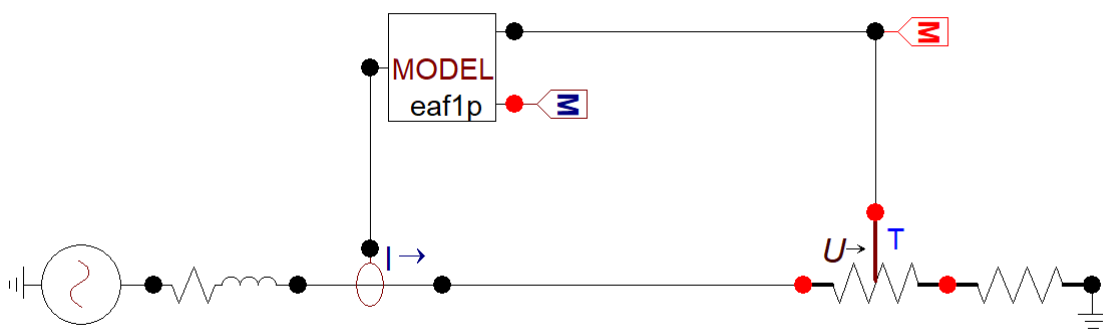
$V_r^*(t)$  – chwilowa wartość napięcia składowej wysokiej częstotliwości,

$i_{arc}(t)$  – chwilowa wartość prądu łuku.

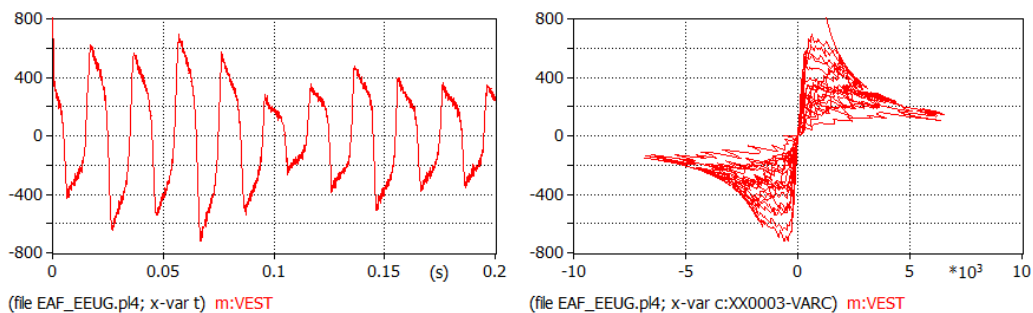
Model opisujący pojedynczą fazę, tj. pojedynczy łuk elektryczny utworzony w programie EMTP-ATP ma postać przedstawioną na rys. 28. Zawiera źródło napięciowe, elementy odwzorowujące parametry przewodów, element mierzący prąd gałęzi, blok z kodem programu w języku MODELS oraz wyjściową rezystancję łuku sterowaną

wyjściem bloku MODELS. Obliczenia są wykonywane na bieżąco na podstawie mierzonego prądu łuku w każdej chwili czasowej. Wyniki obliczone dla pełnego modelu przedstawiono na rys. 29. Zaprezentowane przebiegi napięcia oraz charakterystyka napięciowo-prądowa wykazuje cechy zbliżone do tych obserwowanych w danych pomiarowych. Szczegóły dotyczące implementacji w języku MODELS są przedstawione w rozprawie doktorskiej, a załącznik do rozprawy zawiera pełny kod.

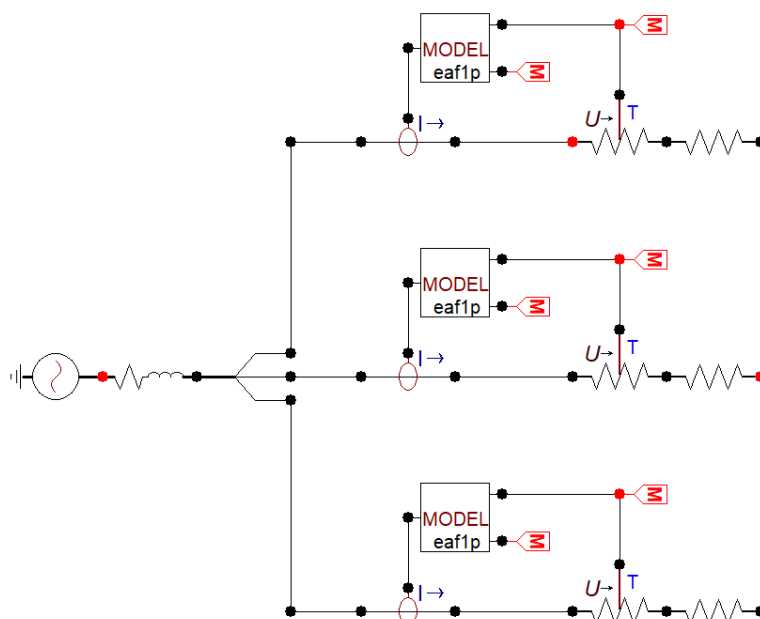
Przemysłowe piece łukowe są urządzeniami trójfazowymi. W związku z tym, w programie EMTP-ATP zamodelowano pełne urządzenie, poprzez potrójzenie struktury modelu dla pojedynczej fazy. Topologię kompletnego modelu przedstawiono na rys. 30, natomiast wyniki przebiegów napięć i prądów na rys. 31 oraz charakterystyki napięciowo-prądowe każdej z faz na rys. 32. Uzyskane wyniki są zbliżone do danych widocznych w przebiegach pomiarowych.



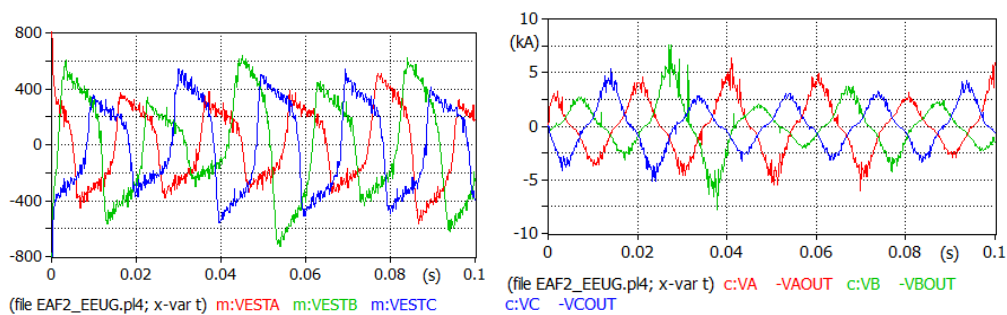
Rys. 28: Obwód pojedynczej fazy pieca łukowego skonstruowany w programie EMTP-ATP.



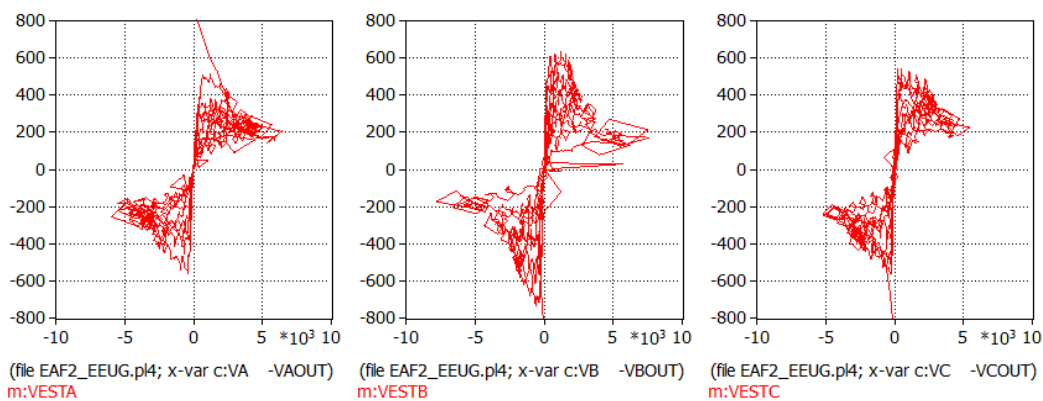
Rys. 29: Przebieg napięcia oraz charakterystyka napięciowo-prądowa uzyskana dla jednofazowego modelu pieca łukowego EMTP-ATP.



Rys. 30: Trójfazowy model pieca łukowego skonstruowany w programie EMTP-ATP.



Rys. 31: Przebiegi napięć (z lewej) oraz prądów (z prawej) uzyskane dla trójfazowego modelu pieca łukowego w EMTP-ATP.



Rys. 32: Charakterystyki napięciowo-prądowe uzyskane dla trójfazowego modelu pieca łukowego w EMTP-ATP.

## 6 Podsumowanie

Rozprawa doktorska dotyczy opracowania nowych, dokładniejszych modeli łuku elektrycznego występującego w elektrycznych piecach łukowych. W pracy zaproponowano modele stworzone w oparciu o różne podejścia teoretyczne, dla których bazą były dane pomiarowe pochodzące z trzech rzeczywistych instalacji. Przeprowadzono również analizę porównawczą, na bazie której wybrano model, który następnie zaimplementowano w programie symulacyjnym EMTP-ATP.

Dane pomiarowe, stanowiące podstawę opracowanych modeli pochodziły odpowiednio z dużego przemysłowego pieca łukowego, małego przemysłowego pieca łukowego oraz laboratoryjnego pieca. W każdym przypadku zmierzono przebiegi prądów i napięć fazowych pieca w trakcie etapu roztopienia wsadu, który cechuje się najgorszym wpływem na jakość energii elektrycznej.

Wszystkie modele zaproponowane w pracy zostały oparte na bazowym modelu w postaci równania różniczkowego wynikającego z bilansu mocy chwilowej dla łuku elektrycznego. Pierwszy z opracowanych modeli zakładał uzmiennienie współczynników równania bilansu mocy oraz odzwierciedlenie ich poprzez odpowiednie procesy stochastyczne zidentyfikowane na bazie danych pomiarowych. W efekcie uzyskano poprawę odwzorowania przebiegów przez model o około 30%, 40% oraz 70%, odpowiednio dla dużego przemysłowego pieca, małego przemysłowego pieca oraz laboratoryjnego pieca.

Kolejny model opisany w pracy był oparty na założeniach podobnych do tych zastosowanych w przypadku powyższego modelu stochastycznego. Najistotniejsza różnica polegała na odzwierciedleniu zmienności współczynników równania bilansu mocy poprzez sygnały chaotyczne zamiast procesów stochastycznych. W tym celu porównano wyniki uzyskiwane dla czterech różnych układów chaotycznych: układu Chuy, Lorenza, Rösslera oraz układu Four-wing. Najlepsze wyniki uzyskano dla kombinacji układu Four-wing oraz układu Lorenza.

Następną grupą modeli opisaną w rozprawie były modele oparte na sztucznych sieciach neuronowych. Zaproponowano kilka modeli wykorzystujących płytkie sieci neuronowe: model MLP, podwójny model MLP oraz model M-NARX. Wspomniane modele nie były w stanie skutecznie odzwierciedlić stochastycznych zmian charakterystyki napięciowo-prądowej pieca, w związku z czym stworzono również model oparty na sieciach głębokich LSTM, dla którego uzyskano satysfakcjonujące wyniki świadczące o możliwości odtworzenia losowych zmian charakterystyki w szerokim zakresie częstotliwości.

Ostatni z zaproponowanych modeli, związany był z poprawą odwzorowania części deterministycznej przebiegów. Polegał na uogólnieniu równania bilansu mocy, tak aby możliwe było zastosowanie operatora różniczkowo-całkowego ułamkowego rzędu. Uzyskane wyniki wykazały, iż takie rozszerzenie równania poprawia odwzorowanie charakterystyki. Najlepsze wyniki uzyskano dla rzędu równania około 0,6, 1,2 oraz 0,8, odpowiednio dla dużego przemysłowego pieca, małego przemysłowego pieca oraz laboratoryjnego pieca łukowego.

W ramach analizy porównawczej zastosowano zarówno kryteria jakościowe, jak i ilościowe. Pierwsze z nich dotyczyły klasyfikacji modeli pod kątem możliwości odzwierciedlenia stochastycznych zmian charakterystyki dla nisko- oraz wysokoczęstotliwościowych składowych. Kryteria ilościowe zostały opracowane na bazie miar statystycznych uwzględniających zmienność przebiegów na przestrzeni dłuższego okna

obserwacyjnego. Ponadto, uwzględniono również wymagania dotyczące mocy obliczeniowej. W wyniku porównania modeli wybrano model stochastyczny oparty o losowe równania różniczkowe jako najlepszy do implementacji w środowisku EMTP-ATP.

Rozprawa doktorska przedstawia również szczegóły implementacji modelu stochastycznego w programie EMTP-ATP. W ramach implementacji zaproponowano odwzorowanie modelu z wykorzystaniem dostępnych komponentów oraz funkcji. Stworzono zarówno model jednofazowy, jak i jego trójfazowe rozszerzenie. Na bazie modelu uzyskano wyniki świadczące o poprawnym odzwierciedleniu charakterystyki łuku w symulacji.

Wśród naistotniejszych osiągnięć rozprawy doktorskiej można wskazać:

- wprowadzenie zmienności współczynników  $k_j$  równania bilansu mocy, odzwierciedlających stochastyczne zmiany charakterystyki pieca łukowego, skutkujące istotną poprawą dokładności modelu,
- zastosowanie zoptymalizowanych układów chaotycznych w celu odzwierciedlenia stochastycznych zmian współczynników równania bilansu mocy,
- opracowanie nowego modelu M-NARX oraz modelu LSTM pozwalających na uwzględnienie dynamicznych i stochastycznych zmian charakterystyki pieca,
- zastosowanie operatora różniczkowo-całkowego ułamkowego rzędu w modelowaniu części deterministycznej charakterystyki pieca łukowego,
- wielokryterialną analizę porównawczą modeli zaproponowanych w pracy oraz zaczerpniętych z literatury, prowadzącą do wybrania i implementacji najlepszego modelu w programie EMTP-ATP,
- zaprojektowanie oraz skonstruowanie stanowiska laboratoryjnego do badania zjawiska łuku elektrycznego.

Biorąc pod uwagę powyższe punkty można stwierdzić, iż wszystkie założone cele pracy zostały wypełnione.

## 7 Publikacje własne związane z pracą dokorską

Treści przedstawione w rozprawie doktorskiej stanowią podsumowanie prac nad modelami łuku elektrycznego występującego w piecach łukowych. Są uporządkowanym i rozszerzonym zbiorem informacji, które zostały zawarte w publikacjach, których autor rozprawy jest współautorem. Poniżej znajduje się kompletny spis wcześniejszych prac powiązanych tematycznie z problematyką rozprawy doktorskiej. Podjęcie tematu pracy oraz ogólna koncepcja jest wynikiem propozycji promotora dr hab. inż. Dariusza Grabowskiego, prof. PŚ. Realizacja poszczególnych modeli, ich analiza porównawcza i implementacja została wykonana przez autora rozprawy doktorskiej przy wsparciu merytorycznym ze strony promotora oraz promotora pomocniczego.

- M. Dietz, D. Grabowski, M. Klimas, and H.-J. Starkloff, “Estimation and analysis of the electric arc furnace model coefficients,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, Art. no. 6, 2022, doi: 10.1109/tpwrd.2022.3163815.

- M. Klimas and D. Grabowski, "Application of shallow neural networks in electric arc furnace modeling," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, Art. no. 5, 2022, doi: 10.1109/tia.2022.3180004.
- M. Klimas and D. Grabowski, "Application of the deterministic chaos in AC electric arc furnace modeling," in *2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854594.
- M. Klimas and D. Grabowski, "Nowe kierunki rozwoju modelowania elektrycznych pieców łukowych," in *Konferencja z podstaw elektrotechniki i teorii obwodów. XLIII SPETO*, Gliwice - Ustroń 25-27. 05. 2022, 2022, p. 12.
- M. Klimas and D. Grabowski, "Implementation of a stochastic electric arc furnace model in EMTP-ATP," in *European EMTP-ATP Conference, 12. & 13. September 2022, Mannheim, Germany. Proceedings of the EEUG Meeting 2022*, 2022, pp. 1–12.
- M. Klimas and D. Grabowski, "Application of shallow neural networks in electric arc furnace modelling," in *2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe : EEEIC / I&CPS Europe*, Bari, Italy, 7-10 September 2021, Ed. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584512.
- M. Klimas and D. Grabowski, "Application of long short-term memory neural networks for electric arc furnace modelling," in *Intelligent data engineering and automated learning - IDEAL 2021 : 22nd International conference*, Manchester, UK, November 25-27, 2021. Proceedings, 2021, vol. 13113, pp. 166–175. doi: 10.1007/978-3-030-91608-4\_17.
- M. Klimas and D. Grabowski, "Identification of nonstationary parameters of electric arc furnace model using Monte Carlo approach," in *2020 Progress in applied electrical engineering (PAEE)*, Kościelisko (Zakopane), Poland, June 21-26, 2020, Ed. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/PAEE50669.2020.9158732.
- D. Grabowski, J. Walczak, and M. Klimas, "Electric arc furnace power quality analysis based on a stochastic arc model," in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe : (EEEIC / I&CPS Europe)*, Palermo, Italy, 12-15 June 2018, Ed. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC.2018.8494547.
- D. Grabowski, M. Klimas, "New directions in electric arc furnace modeling", *Archives of Electrical Engineering*, vol. 72, no. 1, 2023. W trakcie publikacji (zaakceptowany 4.11.2022 r.).
- D. Grabowski, A. Jakubowska-Ciszek, M. Klimas, "Fractional-Order Model of Electric Arc Furnace", *IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE Power & Energy Society*. W recenzji (złożony 11.01.2023 r.).



- M. Klimas, D. Grabowski, "Application of long short-term memory neural networks for electric arc furnace modeling", *Applied Soft Computing*. W recenzji (złożony 16.09.2022 r.).

## Literatura

- [1] E. Acha, A. Semlyen, and N. Rajakovic, “A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 3, pp. 1390–1397, 1990.
- [2] O. Ozgun and A. Abur, “Development of an arc furnace model for power quality studies,” in *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)*, vol. 1, pp. 507–511 vol.1, 1999.
- [3] D. Grabowski, *Selected applications of stochastic approach in circuit theory*. Publishing House of the Silesian University of Technology, 2015.
- [4] G. Qi, G. Chen, M. A. van Wyk, B. J. van Wyk, and Y. Zhang, “A four-wing chaotic attractor generated from a new 3-d quadratic autonomous system,” *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 38, no. 3, pp. 705–721, 2008.
- [5] D. Grabowski and J. Walczak, “Deterministic model of electric arc furnace – a closed form solution,” *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 32, pp. 1428–1436, Jan 2013.
- [6] H. Cramér, “On the composition of elementary errors,” *Scandinavian Actuarial Journal*, vol. 1928, no. 1, pp. 13–74, 1928.