

Dr hab. inż. Andrzej Pieczyński, prof. UZ
Instytut Sterownia i Systemów Informatycznych
Uniwersytet Zielonogórski
Podgórna 50,
65-246 Zielona Góra
Fax: 48 68 3254615
Email: A.Pieczynski@issi.uz.zgora.pl

Zielona Góra, 4 wrzesień 2015

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Haliny Teresy Mroczkowskiej
pt. *Detekcja wybranej klasy uszkodzeń kotła parowego w elektrociepłowni
miejskiej za pomocą inteligentnej klasyfikacji cech sygnałów*

opracowana na zlecenie

Rady Wydziału Elektrycznego

Politechniki Białostockiej

1. Obszar problemowy rozprawy

Rosnąca potrzeba zapewnienia dużej niezawodności działania obiektów przemysłowych, linii technologicznych oraz innych sieci zapewniających przepływ mediów prowadzi do poszukiwania metod monitorowania ich sprawności oraz usuwania usterek. Często stosowane w takich przypadkach systemy diagnostyczne wymuszają konieczność podejmowania decyzji w warunkach skomplikowanych zjawisk i dużej ilości danych dostępnych w opisie omawianych procesów. Stąd też badania podejmowane w tym zakresie są bardzo aktualne, gdyż opracowanie bardziej efektywnych algorytmów i technik wydobywania wiedzy od eksperta a tym bardziej z baz danych pozwala na zwiększenie niezawodności i wiarygodności systemów doradczych. W tym świetle podjęte w danej rozprawie badania są aktualne i dotyczą „...budowy systemu ekspertowego doradczego, wykorzystującego wybrane cechy transformat czasowo-częstotliwościowych procesowych sygnałów, umożliwiającego diagnozowanie przecieków w systemie rurociągów kotła parowego w czasie rzeczywistym a w szczególności: wczesne wykrywanie i lokalizowanie przecieku”. Tak sformułowana teza

Otrzymałam dn. 10. 09. 2015r. *[signature]*

rozprawy wraz z podanymi na stronie czternastej celami pracy badawczej dobrze określają zakres badawczy na tle znanych rozwiązań literaturowych.

Autorka analizując stan badań w zakresie bieżącej eksploatacji kotłów parowych elektrowni i elektrociepłowni omówiła stosowane aktualnie metody diagnostyki (detekcji i lokalizacji przecieków). Przedstawiła kilka stosowanych rozwiązań, omówiła ich zalety i wady skupiając się na rozwiązaniach bazujących na analizie cech procesowych sygnałów oraz związku między nimi jak również przedstawiła stosowane metody oparte o modele analityczne i zbudowane z wykorzystaniem wybranych elementów sztucznej inteligencji.

Zadanie detekcji i lokalizacji nieszczelności rurociągu zrealizowano w oparciu o wyznaczone, za pomocą dwóch metod analizy sygnałów, wektory cechy stanu procesu (metoda PCA oraz transformacji falkowej), które stanowiły wektor wejściowy klasyfikatora neuronowego stosowanego do analizy stanu procesu.

Eksperymenty numeryczne oparte o dane rzeczywiste zrealizowano z wykorzystaniem środowiska programistycznego MATLAB. Załączone w pracy liczne przykłady symulacyjne oraz wyniki w postaci wykresów i tabel wraz z komentarzami potwierdzają dobrą efektywność i skuteczność zaproponowanych algorytmów diagnostycznych

2. Koncepcja oraz realizacja rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska o ogólnej objętości 227 stron, składa się z sześciu rozdziałów, wstępu obejmującego motywację podjęcia tematu badań, tezę rozprawy i cele do realizacji, podsumowania oraz abstraktu w języku angielskim. Szkoda, że autorka w podsumowaniu nie przedstawiła możliwe kierunki dalszych badań. Załączony wykaz cytowanej literatury liczy 267 pozycji literatury podstawowej i 18 pozycji literatury uzupełniającej i raczej dobrze odzwierciedla stan badań i otrzymanych wyników w tym zakresie na świecie i w kraju. Autorka do większości pozycji literaturowych nawiązuje w pracy jednakże 21 pozycji nie znalazło w pracy odwołań (pozycje: 2, 8, 28, 49, 50, 57, 89, 102, 115, 148, 154, 160, 161, 180, 200, 202, 204, 236, 241, 251, 252). Część z tych pozycji literaturowych można by w wykazie pominąć ale niektóre tematycznie są dobrze skojarzone i pokazują aktualność prowadzonych w pracy badań, można sądzić, że ich brak jest przeoczeniem autorki.

Analizując poszczególne rozdziały należy odnotować, że rozdział drugi wprowadza czytelnika w tematykę procesu technologicznego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, opisu zjawisk zachodzących w trójstopniowej przemianie postaci energii. Ponadto Autorka dość czytelnie przedstawiła główne przyczyny awaryjnych wyłączeń polskich elektrowni i elektrociepłowni. W drugiej części tego rozdziału został dokładnie omówiony proces wytwarzania energii cieplnej w elektrociepłowni miejskiej w Białymstoku, proces jego sterowania i system zabezpieczeń. Przedstawiony opis ma istotne znaczenie dla omówionych w dalszych rozdziałach badań oraz analizy wyników ponieważ w oparciu o ten proces autorka dokonała weryfikacji postawionej we wstępie tezy.

Rozdział trzeci wprowadza czytelnika w aktualnie stosowane w tego typu obiektach metody detekcji nieszczelności rurociągów w kotłach. W pierwszej części rozdziału omówiono podstawowe zagadnienia dotyczące diagnostyki uszkodzeń w procesach dynamicznych, nawiązując do procesu energetycznego i przechodząc do metod detekcji nieszczelności w kotle parowym.

W kolejnych czterech rozdziałach pracy zamieszczono omówienie wybranych metod analizy sygnałów diagnostycznych oraz metod klasyfikacji cech charakteryzujących stan procesu, które można zastosować do diagnostyki rurociągów w kotle parowym. W treści tych rozdziałów zaproponowano kilka metod analizy sygnałów oraz zastosowanie wybranych struktur sztucznych sieci neuronowych jako klasyfikatorów stanu procesu. Każdy z omawianych rozdziałów zawiera wyniki eksperymentów numerycznych przeprowadzonych na podstawie rzeczywistych danych zgromadzonych w okresie kilku lat monitorowania elektrociepłowni w Białymstoku pracującej w stanach normalnych i awaryjnych

zakończonych wyłączeniem kotła. Analizę efektywności omawianych metod oparto o wskaźnik dokładności wykrywania nieszczelności rurociągu w kotle parowym.

W rozdziale czwartym przedstawiono koncepcję systemu diagnostycznego opartego o metody statystyczne ze zmodyfikowaną analizą składowych głównych (PCA). Stosując metodę PCA autorka proponowała zobrazowanie rozkładu danych procesowych z przestrzeni n wymiarowej do trójwymiarowej. W przeprowadzonych eksperymentach proponowano redukcję wymiaru obserwowanych sygnałów procesowych do 12 uzasadniając wybór dostateczną reprezentacją stanu rurociągów w kotle.

W rozdziale piątym omówiono funkcjonalność algorytmu MPCA i zasadność jego zastosowania w diagnostyce nieszczelności rurociągów kotła.

Rozdział szósty zawiera opis możliwości zastosowania wybranych sieci neuronowych pracujących jako klasyfikatory stanu kotła parowego. Autorka pracy proponowała przebadanie efektywności pracy dwóch znanych struktur sieci neuronowych: typu MLP oraz LVQ. W procesie uczenia i testowania neuronowych klasyfikatorów zastosowano zbiory cech wyselekcjonowane za pomocą analizy PCA. Zbiory uczące i testujące zawierały cechy opisujące stany normalne oraz awaryjne kotła.

W rozdziale siódmym autorka proponowała budowę systemu diagnostycznego opartego również o klasyfikator zbudowany na bazie sieci neuronowej ale do wstępnego przetworzenia sygnałów czasowych zastosowała analizę falkową. Przeprowadziła serię eksperymentów w celu wyłonienia optymalnej liczby cech transformat falkowych oraz funkcji falkowej. Wybrane cechy transformat falkowych zastosowano jako sygnały wejściowe klasyfikatora neuronowego opartego o sieć typu LVQ. Przeprowadzone w tym rozdziale eksperymenty oraz analizy otrzymanych wyników stanowią podstawę do pozytywnej weryfikacji postawionej we wstępie tezy.

W podsumowaniu autorka porównała proponowane i eksperymentalnie zweryfikowane metody analizy sygnałów diagnostycznych jak również dokonała analizy skuteczności systemu diagnostycznego opartego o klasyfikatory zbudowane na bazie wybranych typów sztucznych sieci neuronowych. Z przebadanych w kolejnych rozdziałach pracy metod detekcji nieszczelności rurociągów kotła najlepszą dokładność klasyfikacji stanu procesu wykazał system oparty o klasyfikator neuronowy typu LVQ bazujący na cechach transformat falkowych zastosowanych do analizy kilku sygnałów procesowych, co potwierdza słuszność postawionej tezy.

Na podstawie przedstawionej pracy doktorskiej oraz skrótowego omówienia treści całej rozprawy doktorskiej, stwierdzam że jej Autorka wykazała się dobrymi umiejętnościami formułowania problemu badawczego oraz jego rozwiązania z wykorzystaniem właściwych

metod i technik badawczych. Rozprawa ma charakter teoretyczno-techniczny, przy czym do opisu zastosowano dostateczny, z punktu widzenia nauk technicznych, formalizm matematyczny.

3. Oryginalne osiągnięcia

Udowadniając sformułowaną tezę oraz realizując wyznaczone cele badawcze, Autorka rozprawy uzyskała kilka oryginalnych wyników naukowych i badawczych do których między innymi zaliczam:

1. Autorskie opracowanie metody selekcji minimalnej liczby istotnych cech rozkładu falkowego, które są wykorzystywane przez klasyfikator do diagnostycznej oceny stanu procesu.
2. Opracowanie metody wyboru typu sieci neuronowej oraz dobór jej struktury w celu zbudowania neuronowego klasyfikatora stanu procesu.
3. Zintegrowanie metody transformaty falkowej z klasyfikatorem neuronowym w celu osiągnięcia skutecznego systemu detekcji i lokalizacji nieszczelności w rurociągach kotłów parowych.
4. Opracowanie koncepcji budowy modelu PCA do redukcji wymiarowości wektora zmiennych procesowych, co umożliwia zwiększenie efektywności monitorowania przez operatora stanu procesu.

Wymienione oryginalne osiągnięcia naukowo-wdrożeniowe częściowo zostały już opublikowane lub zgłoszone do publikacji (po wstępnych pozytywnych recenzjach wydawniczych) przez Autora w 5 publikacjach, głównie współautorskich. Między innymi jest Ona autorem 2 artykułów opublikowanych w czasopiśmie *Przegląd Elektrotechniczny*.

Mając na uwadze wyżej wymienione oryginalne osiągnięcia oraz zadawalający dorobek publikacyjny, uważam że Pani mgr inż. Halina Teresa Mroczkowska zrealizowała założony cel badawczy oraz uzasadniła słuszność sformułowanej tezy. Ponadto wykazała się umiejętnościami samodzielnego rozwiązywania problemów naukowo-technicznych z wykorzystaniem właściwych metod badawczych i na zadawalającym poziomie naukowym (mieszczącym się w dolnej części skali) odpowiadającym wymaganiom przy realizacji rozpraw doktorskich z nauk technicznych.

4. Komentarze i uwagi

Zachowując dobrą ocenę całej rozprawy doktorskiej chcę zwrócić uwagę na pewne niedociągnięcia ogólne oraz szczegółowe, z których niektóre mają charakter dyskusyjny.

1. Autorka w części wstępnej pracy przedstawiła tezę pracy, w której ważnym elementem jest system ekspertowy pozwalający diagnozować nieszczelności. Niestety w pracy autorka niewiele pisze o strukturze zaproponowanego w pracy (autorskiego) systemu ekspertowego. W pracy wiele mówi się o klasycznych metodach diagnostycznych, o metodach analizy zmiennych procesowych, o schematach użycia wybranych sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń. W opinii recenzenta w pracy, w jej początkowej części, powinno znaleźć się omówienie struktury systemu diagnostycznego z opisem funkcji poszczególnych modułów.

Celem pracy było opracowanie systemu diagnostycznego. Po przeczytaniu pracy można mieć uczucie wielkiego niedosytu informacyjnego w tym zakresie. Autorka w żadnym rozdziale nie omówiła schematycznie idei pracy tego systemu;

2. W odczuciu osoby czytającej pracę koncepcja pracy zaproponowanego systemu polega na analizie możliwości diagnostycznych kilku metod analizy sygnałów procesowych i połączeniu otrzymanych cech z klasyfikatorem neuronowym. W końcowej części autorka pisze, że najlepsze wyniki otrzymała po zastosowaniu transformaty falkowej i sieci neuronowej. Czy w pracy rozważano możliwość połączenia kilku technik opartych na cechach procesu uzyskanych po przekształceniu PCA i transformaty falkowej budując w ten sposób pewną formę systemu hybrydowego?
3. Ważnym elementem zaproponowanego systemu diagnostycznego jest klasyfikator. W pracy zaproponowano klasyfikator neuronowy zbudowany w oparciu o sieci typu LVQ i MLP. Sieci MLP bardziej nadają się do zadania modelowania nieliniowych charakterystyk. W opinii recenzenta lepszą efektywność można by uzyskać za pomocą innego typu sieci np. RBF. Poza tym do celu lokalizacji a tym bardziej identyfikacji poziomu uszkodzenia skuteczne mogłyby okazać się sieci neuro-rozmyte;
4. W rozdziale 7 jako klasyfikator przebadano sieć LVQ, mimo, że w poprzednim rozdziale autorka dokonała analizy efektywności pracy dwóch klasyfikatorów opartych o sieci typu LVQ i MLP. W przedstawionych, w rozdziale szóstym, wynikach badań żadna z sieci nie została wyróżniona jako lepsza w ujęciu dokładności klasyfikacji stanu procesu. Dlaczego w tym rozdziale badano tylko sieć LVQ?

5. W metodzie opartej o główne składowe (PCA) występuje problem wyznaczenia liczby wykorzystywanych w dalszej analizie składowych. Czy autorka brała pod uwagę zastosowanie do oceny wartości informacyjnej zmiennej procesowej metodę opartą na entropii sygnału (metoda często stosowana przy wydobywaniu wiedzy z danych np. algorytm Quinlana)?
6. Na stronie 68 wskazano na kryterium oceny położenia trajektorii poza elipsą ufności i decyzji o wykryciu nieszczelności. W założeniach przyjęto obserwację godzinnego segmentu trajektorii i dodatkowych warunków pozwalających wnioskować o nieszczelności. Ciekawe byłyby badania wpływu tego założenia na poprawność detekcji, liczbę fałszywych alarmów, wczesne wykrywanie nieszczelności.

Uwagi szczegółowe

1. Strona 14, 5 linia od dołu – autorka pisze: *metody sztucznej inteligencjia trafność takiej oceny jest większa niż oceny człowieka dokładnie znającego ten problem* – w ocenie recenzenta jest to zbyt daleko idące uogólnienie. Ekspert, a o takim człowieku jest mowa, poza ocenami wizualnymi często korzysta z wiedzy którą trudno opisać analitycznie czy werbalnie a stanowi ona niekiedy bardzo ważny element podejmowania decyzji i wtedy najlepszy system diagnostyczny nie zastąpi eksperta;
2. Strona 16, 3 linia od dołu – w tym miejscu jak również jeszcze w kilku np. w podsumowaniu używa się pojęcia *optymalne rozwiązanie, optymalny sposób* co w ocenie recenzenta jest nieprawidłowe. Można mówić o optymalnym rozwiązaniu wtedy gdy zbudujemy odpowiedni wskaźnik jakości i udowodnimy, że nasze rozwiązanie minimalizuje lub maksymalizuje jego wartość, że nie ma w całej przestrzeni obserwacji lepszego rozwiązania. W przypadku omawianych w pracy treści możemy mówić o rozwiązaniu najlepszym dla analizowanej sytuacji, zadawalającym czy suboptymalnym przy założeniu uproszczeń.
3. Strona 96, rys. 5.7 – kolorem czerwonym oznaczono ostatnie przed awarią serie danych – część z nich (większa) znajduje się wewnątrz elipsoidy ufności, natomiast wcześniejsze serie (kolor żółty krzywej) częściowo są poza elipsą mimo, że zostały zarejestrowane w większej odległości czasowej od awarii – jak to interpretować, czy to są symptomy uszkodzenia, czy niedoskonałość metody generująca fałszywe alarmy?

4. Praca jest dość obszerna objętościowo. Recenzent ma wątpliwość do zasadności umieszczenia rozdziału 6.2 i 6.3 – to jest materiał bardzo szeroko omawiany w wielu znanych pozycjach literaturowych dotyczących sztucznych sieci neuronowych;
5. Strona 129, pierwszy akapit – jest napisane *dane testowe nie brały udziału w treningu sieci* - w celu zweryfikowania działania poprawności sieci a szczególnie jej zdolności do uogólniania sieć testuje się zawsze danymi, które nie biorą udziału w procesie uczenia. Autorka w tym miejscu i pozostałych eksperymentach numerycznych nie zdefiniowała metody wyboru danych testujących. Zawsze powinny reprezentować przestrzeń, z której wybiera się dane uczące;
6. Rys. 6.23 i 6.24 – jak wyjaśnić wyniki przedstawione na tych rysunkach. Wyniki z rysunku 6.23 wskazują, że awaria z 22.01.2010 jest w tej samej podgrupie co awaria z 4.12.2011, natomiast awaria z 19.02.2011 powinna być zaliczona do innej podgrupy. Analiza wyników z rys. 6.24 zaprzecza tym wnioskom dla sieci o większej liczbie neuronów.
7. Rys. 6.27 – jak wytłumaczyć uzyskane wyniki testowania dla danych 11.01.2013. Przecież trening sieci był przeprowadzony przed modernizacją a testy przeprowadzono na podstawie danych uzyskanych po modernizacji. Modernizacja wprowadziła duże zmiany w własnościach dynamicznych rurociągów. Czyżby system diagnostyczny był niewrażliwy na parametry dynamiczne obiektu?
8. Strona 137 – w akapicie pod rysunkiem wpisano, że sieć LVQ uzyskała bardzo wysoką dokładność klasyfikacji danych treningowych co nie stanowi zaskoczenia jeśli w procesie uczenia uzyskuje się bardzo mały błąd uczenia. Ciekawym byłoby gdyby uzyskano wysoką dokładność dla danych testowych;
9. Rys. 6.32 – na wykresie przedstawiono wyniki oceny dokładności klasyfikacji sieci danymi, które uczestniczyły w procesie uczenia i testowania. Jak wytłumaczyć gorszy wynik dokładności klasyfikacji dla danych uczących niż testujących dla struktury 10+10, jeżeli proces uczenia zakończono przy małym błędzie uczenia (0.005)?
10. Rys. 6.34 – w podpisie pod rysunkiem wpisano: *wyniki treningu a) i uczenia b)*, czym się różnią te dwie operacje (trening, uczenie). Brak komentarza do przedstawionych na rysunku wykresów. Czy na rysunku b) podczas testowania sieć utrzymywała na wyjściu stały stan i dlaczego? W górnym lewym narożniku przedstawionego rysunku występuje opis LVQ_pokaz_sygnal_31_01 natomiast w opisie pod rysunkiem jest mowa o wynikach eksperymentu dla sieci MLP, jak to wyjaśnić?

11. Rys. 6.38 – z przedstawionych wykresów wynika, że największą dokładność klasyfikacji osiągnęła sieć o strukturze 20_15_1 lub 20_25_1 natomiast w komentarzu do wyników wskazano jako najlepszą strukturę 10_15_1 lub 10_20_1, skąd te różnice?
12. Rys. 6.40 i 6.38 – jak interpretować wyniki przedstawione na rys. 6.40 w porównaniu z wynikami zamieszczonymi na rys. 6.38 jeżeli z opisu wynika, że dane są z eksperymentów prowadzonych w tych samych warunkach? Na rysunku 6.40 pokazano dużo gorszy poziom dokładności klasyfikacji w procesie testowania niż na rys. 6.38.
13. Rys. 6.41 – na rysunku pokazano wyniki badań dla sieci, która w 2 warstwie miała maksymalnie 25 neuronów. Natomiast na rysunku 6.41 pokazano wyniki dla sieci z 40 neuronami w 2 warstwie. Czym podyktowana była zmiana liczby neuronów. Tak prowadzone eksperymenty nie dają możliwości porównywania wyników.
14. Rys. 7.15 – w opisie napisano, że wykonano rozkład na poziomie 5 za pomocą falki db8, natomiast w podpisie pod rysunkiem jest wskazanie na falkę symlet8, jak to wyjaśnić?
15. Strona 174, ostatni akapit – porównano energie detalu 4 z rys. 7.14 i 7.15 i stwierdzono, że wzrosła 100 razy z 10^{-3} na 10^{-1} , jednakże nie widać tego efektu na wykresach, występuje ta sama skala?
16. Rys. 7.26, 7.27, 7.28 – na wykresach pokazano większą dokładność klasyfikacji sieci dla danych testowych niż uczących. Jak wyjaśnić uzyskane wyniki, przecież sieć jest uczona danymi tak długo aż uzyska się bardzo mały błąd uczenia a następnie testuje się pracę sieci danymi, których sieć nie widziała w trakcie uczenia. W takim razie jak był przeprowadzony proces uczenia, że sieć lepiej pracuje z danymi testowymi?
17. Strona 194 – jak rozumieć określenie *sygnalizuje podejrzenie uszkodzenia przez dłuższy czas* (to jest realizowane w oparciu o odpowiedź sieci neuronowej lub innego detektora) – w wynikach jest to okres do 1200 minut? Jak wykorzystać tę informację w procesie detekcji aby uniknąć fałszywych alarmów (za wcześniej sygnał alarmu) lub wykryć nieszczelność za późno (system zostanie wyprzedzony przez operatora)?
18. Strona 23 – drugi akapit występuje odwołanie do rys. 2.6, powinno być do 2.5, opis nad rys. 2.5 jest słabo skojarzony z symbolami umieszczonymi na rysunku;
19. Strona 24 – 13 linia od góry – jest odwołanie do rys. 2.3 a powinno być do 2.6;

naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wraz z zmianami w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika;

- b) uwagi wyszczególnione w recenzji, częściowo dyskusyjne, nie podważają w niczym wyniku pozytywnej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej;
- c) **wnoszę o przyjęcie rozprawy na Radzie Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

