

Autoreferat

na temat dorobku i osiągnięć naukowo-badawczych
w tym opis zasadniczego osiągnięcia naukowego -
jednotematycznego cyklu publikacji pod tytułem:
**„Metody oceny jakości działania układów
regulacji z wykorzystaniem metod
niegaussowskich”**

dr inż. Paweł D. Domański

Politechnika Warszawska

Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej

28 września 2017

Spis treści

1	Ogólne informacje o habilitancie	2
1.1	Posiadane stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej	2
1.2	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych . . .	2
2	Wykaz publikacji będących podstawą wniosku habilitacyjnego	2
3	Opis zasadniczego osiągnięcia naukowego	4
3.1	Struktura osiągnięcia naukowego	4
3.2	Zakres i cel naukowy badań	5
3.3	Podsumowanie uzyskanych wyników	7
4	Omówienie uzyskanych wyników prac badawczych	8
4.1	Praktyczna metodologia oceny jakości sterowania w warunkach niegaussowskich	8
4.2	Niegaussowskie wskaźniki oceny w oparciu o parametry rozkładów gruboogonowych	15
4.2.1	Funkcja Cauchy’ego	17
4.2.2	Rozkład α -stabilny (Lévy)	17
4.2.3	Rozkład Laplace’a	17
4.2.4	Rozkład Generalized Extreme Value GEV	18
4.2.5	Nieograniczone funkcje Johnsona S_U	18
4.2.6	Dopasowanie rozkładu do histogramu	18
4.3	Fraktalne podejście do oceny jakości sterowania	18
4.3.1	Wykładnik Hurst - miara persystencji	19
4.4	Stosowalność dla regulatora PID i GPC	26
4.5	Niegaussowskie szacowanie zysku z usprawnienia sterowania	33
4.6	Podsumowanie prac	37
5	Omówienie pozostałej działalności naukowo-badawczej	40
5.1	Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych innych niż przedstawione w punkcie 2	40
5.2	Czynny udział w konferencjach i seminariach naukowych	42
5.3	Kierowanie projektami badawczymi lub udział w takich projektach	51
5.3.1	Udział w projektach	51
5.3.2	Udział w innych projektach przemysłowych	52
5.4	Nagrody za osiągnięcia naukowe	52
5.5	Zbiorcze wskaźniki bibliometryczne	53

1 Ogólne informacje o habilitancie

1.1 Posiadane stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

- Doktor nauk technicznych (z wyróżnieniem) w dziedzinie Automatyka i Robotyka Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Tytuł rozprawy: *Zastosowanie metod jakościowych do modelowania i projektowania układów regulacji*, 1996
- Magister inżynier w dziedzinie Automatyka i Robotyka Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki
Tytuł rozprawy: *Algorytmy sterowania adaptacyjnego*, 1991

1.2 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Lata	Miejsce
1991 - obecnie	Politechnika Warszawska Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej - adiunkt (od 1996) - asystent (od 1991)

2 Wykaz publikacji będących podstawą wniosku habilitacyjnego

Poniższe publikacje wchodzą w skład osiągnięcia, o którym mowa w art. 16 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Jest nim jednotematyczny cykl publikacji (obejmujący 11 pozycji) zatytułowany: **„Metody oceny jakości działania układów regulacji z wykorzystaniem metod niegaussowskich”**.

Publikacje wchodzące w skład zasadniczego osiągnięcia naukowego wnioskodawcy obejmują okres lat 2015–2017 i powstały po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Prace te mają charakter zarówno autorski jak i współautorski.

Przy każdej pozycji podany jest Impact Factor (IF) czasopisma (jeżeli czasopismo takowe ma) wg Web of Science. Ilościowy oraz jakościowy udział współautorów w przygotowaniu publikacji określony i poświadczony podpisami został przedstawiony w załączniku Z5. Pozostały dorobek wnioskodawcy jest zamieszczony w osobnych załącznikach.

Wybrany cykl publikacji:

- [H1] P. D. Domański. Non-Gaussian properties of the real industrial control error in SISO loops. In *Proceedings of the 19th International Conference on System Theory, Control and Computing*, pages 877–882, 2015. (MNiSW = 15).
- [H2] P. D. Domański. Fractal measures in control performance assessment. In *Proceedings of IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR*, pages 448–453, Międzyzdroje, Polska, 2016. (MNiSW = 15).
- [H3] P. D. Domański. Non-Gaussian and persistence measures for control loop quality assessment. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 26(4):043105, 2016. (IF = 2.283, MNiSW = 45).
- [H4] P. D. Domański, S. Golonka, R. Jankowski, P. Kalbarczyk, and B. Moszowski. Control rehabilitation impact on production efficiency of ammonia synthesis installation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55(39):10366–10376, 2016. (IF = 2.843, MNiSW = 35).
- [H5] P. D. Domański. Multifractal properties of process control variables. *International Journal on Bifurcation and Chaos*, 27(6):1750094, 2017. (IF = 1.329, MNiSW = 30).
- [H6] P. D. Domański. Non-Gaussian assessment of the benefits from improved control. In *Proceedings of 2017 IFAC World Congress*, pages 5092–5097, Toulouse, France, 2017. (MNiSW = 15).
- [H7] P. D. Domański. On-line control loop assessment with non-Gaussian statistical and fractal measures. In *Proceedings of 2017 American Control Conference*, pages 555–560, Seattle, WA, 2017. (MNiSW = 15).
- [H8] P. D. Domański and M. Gintrowski. Alternative approaches to the prediction of electricity prices. *International Journal of Energy Sector Management*, 11(1):3–27, 2017. (IF = 0.600).
- [H9] P. D. Domański and M. Ławryńczuk. Assessment of predictive control performance using fractal measures. *Nonlinear Dynamics*, 89:773–790, 2017. (IF = 3.464, MNiSW = 40).
- [H10] P. D. Domański and M. Ławryńczuk. Assessment of the GPC control quality using non-Gaussian statistical measures. *International Journal of Applied Mathematics & Computer Science*, 27(2):291–307, 2017. (IF = 1.420, MNiSW = 25).
- [H11] P. D. Domański and P. M. Marusak. Estimation of control improvement benefit with α -stable distribution. In J. Kacprzyk, W. Mitkowski, K. Oprzędkiewicz, and P. Skruch, editors, *Trends in Advanced Intelligent Control, Optimization and Automation*, volume 577, pages 128–137. Springer International Publishing AG, 2017. (MNiSW = 15).

Łączny IF czasopism, w których opublikowano powyższe prace wynosi 11.939.

3 Opis zasadniczego osiągnięcia naukowego

3.1 Struktura osiągnięcia naukowego

Tematyka cyklu publikacji będących podstawą niniejszego wniosku habilitacyjnego obejmuje zagadnienia związane z niestandardowymi metodami oceny jakości układów sterowania zakładającymi niegaussowski charakter sygnałów opisujących pętlę regulacji. Przyjęcie takiego założenia skłania ku rozważeniu zdefiniowania niegaussowskich metodologii oraz odpowiednich dla nich miar oceny jakości układów sterowania. Zadanie to wpisuje się w szeroki kontekst zagadnień inżynierskich związanych z procesem poprawy efektywności pracy dowolnego procesu przemysłowego w oparciu o modernizację układu sterowania.

Ogólnie możemy wyróżnić dwa podstawowe podejścia do zagadnienia oceny pracy układu sterowania. Część metod wymaga przeprowadzenia specjalizowanych eksperymentów jak na przykład poprzez pobudzenie skokiem jednostkowym. Inne metody bazują na danych z normalnej pracy układu w postaci szeregów czasowych podstawowych wielkości opisujących układ sterowania, jak zmienna sterowana, sterująca czy też uchyb regulacji. Istnieje wiele różnych miar wykorzystywanych do analizy pętli sterowania, jak różnorakie wskaźniki całkowite, statystyczne, minimalno-wariacyjne, rozwiązania nieliniowe, czy też czysto biznesowe wskaźniki KPI (Key Performance Indicators).

Tematyka niniejszego cyklu prac wpisuje się w dwie grupy podejść uwzględniając miary statystyczne oraz rozwiązania nieliniowe realizowane z wykorzystaniem metod fraktalnych. Proponowana metodologia analizy nie wymaga wiedzy *a priori* o procesie czy też jego modelu i bazuje jedynie na szeregach czasowych przebiegów uchybu sterowania.

Ponieważ zagadnienia rozważane w cyklu publikacji nie mogą być traktowane w oderwaniu od rzeczywistych modernizacji układów sterowania, część prac prezentuje zarówno tło przemysłowych projektów wdrożeniowych [H4], jak też analizuje rzeczywiste dane procesowe [H1–H3, H6, H7, H11]. W szczególności prace [H1–H3] prezentują wstępne analizy porównawcze rozważając właściwości statystyczne zmiennych opisujących pętlę sterowania. Wskazują one bardzo często występujące właściwości niegaussowskie i grubo-ogonowy charakter zmiennych. Poza analizą statystyczną wskazują one możliwość wykorzystania metod fraktalnych rozważając między innymi miary persystencji szeregów czasowych. Analogiczne rozważania dla innych zadań inżynierskich pokazały zasadność proponowanego podejścia. Prace dotyczące analizy szeregów czasowych cen energii elektrycznej na zderegulowanym rynku [H8] stanowiły wstęp do rozwoju proponowanej metodologii.

Podejście statystyczne zostało szczegółowo rozważone poprzez analizę symulacyjną dla jedno-pętlowych układów sterowania wykorzystujących regulator PID oraz predykcyjny GPC [H10]. Praca rozszerza perspektywę porównawczą na właściwości persystentne przy wykorzystaniu metod fraktalnych dla pętli z regulatorem PID, podczas gdy dalej [H9] prowadzone są analogiczne rozważania dla jednowymiarowego algorytmu predykcyjnego GPC. Praca [H5] weryfikuje zaś właściwości wielo-fraktalne. W opracowaniu [H7] zaproponowana i przetestowana została możliwość wykorzystania powyższych miar do ciągłego nadzoru jakości sterowania oraz wykrywania niedoskonałości na bieżąco.

Równoległe wyniki tych badań pozwoliły zaproponować rozszerzenie klasycznych metod szacowania potencjału poprawy efektywności pracy instalacji dzięki lepszej regulacji. Klasyczne metody opierają się na podejściu gaussowskim, tzw. *the same limit rule*. Roz-

szerzenie na inne rozkłady grubo-ogonowe w postaci rozkładów Laplace’ego i Cauchy’ego zostało zaproponowane w [H11], natomiast kolejna praca [H6] przeprowadza analizę podejścia dla ogólnego rozkładu α -stabilnego.

Przedstawione powyżej prace w sposób całościowy opisują niegaussowskie zagadnienia oceny jakości układów sterowania, począwszy od etapu ich projektowania aż po ocenę działania już pracujących pętli regulacji.

3.2 Zakres i cel naukowy badań

Badania opisywane w niniejszym opracowaniu są w znaczący sposób inspirowane doświadczeniami przemysłowymi autora. Począwszy od 1996 roku praktycznie po dzień dzisiejszy autor aktywnie uczestniczy w tworzeniu, wdrażaniu oraz promowaniu zaawansowanych układów sterowania oraz optymalizacji procesowej w przemyśle [Hu1,Hu2,Hu5,Hu8,Hu15]. Owe prace dotyczyły różnych aspektów sterowania, począwszy od projektowania rozwiązań, poprzez audyty i studia wykonalności, aż po wdrożenia oraz działania związane z odbiorem i późniejszym utrzymaniem.

Obszary algorytmiczne związane z filozofią regulacji obejmowały większość podejść stosowanych w przemyśle procesowym: układy jedno- i dwu-pętlowe, odsprzęganie, linearyzację, filtrowanie [Hu12,Hu16], [H4], wieloobszarowe układy rozmyte (*Fuzzy Gain Scheduling*) [Hu3], układy sterowania predykcyjnego MPC [Hu4,Hu6,Hu13], sterowanie optymalizujące oraz globalną optymalizację ekonomiczną [Hu10], [P64]. Rozwiązania bezpośrednio związane z regulacją były uzupełniane rozwiązaniami bazodanowymi i softwarowymi wyższego poziomu (modelowanie, prognozowanie, optymalizacja) w postaci rozwiązań klasy MES (Manufacturing Execution Systems) i SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) [P55,P57,P60,P61,P65].

Projekty były realizowane dla różnych klientów, głównie z przemysłu energetycznego ale i przetwarzania gazu oraz inżynierii chemicznej, praktycznie na całym świecie (w szczególności w USA i Polsce) we współpracy z czołowymi dostawcami systemów automatyki. Wraz z czasem projekty czysto wdrożeniowe zostały zastąpione projektami eksperckimi obejmującymi audyty oraz studia koncepcyjne i stosowalności. Właśnie te projekty, poprzez swoje urozmaicenie oraz dostęp do szerokiego wachlarza różnorodnych przypadków, technologii i danych zainicjowały oraz wsparły badania zawarte w niniejszym opracowaniu. Prezentowane wyniki nie są zawieszane w próżni. Poparte są one doświadczeniem oraz walidacją obiektową, co niestety nie zawsze mogło znaleźć odzwierciedlenie w publikacjach ze względu na ograniczenia upubliczniania rezultatów.

Jakość pracy układu sterowania ma istotny wpływ na ogólną efektywność całego procesu wytwarzania. Widocznym to jest szczególnie w obecnych czasach, gdy zagadnienia zwiększania wydajności, ochrony środowiska czy też zarządzania energią wymagają bezpiecznej, niezakłóconej i nad wyraz dokładnej pracy jak najbliżej ograniczeń technologicznych. Co gorsza obiekty rzeczywiste podlegają nieustannym zmianom i modyfikacjom, będąc procesami silnie niestacjonarnymi. Tym samym jednorazowa inicjatywa dotycząca projektu i strojenia układu sterowania jest skuteczna jedynie na krótkim horyzoncie. Chcąc zapewnić poprawne działanie w długim okresie, jesteśmy zmuszeni realizować ciągły nadzór i monitoring. Istnieje wiele opracowań pokazujących korzyści finansowe uzyskane

w wyniku poprawnej struktury i zestrojenia układu sterowania [85, 88], [H4].

Nieustanne utrzymywanie wysokiej jakości sterowania wymaga wypracowania i stosowania metodologii oceny pracy układu regulacji wraz z miarami umożliwiającymi ilościowe porównanie. W praktyce jest to najczęściej codzienna praca inżynierów automatyków odpowiedzialnych za działanie instalacji. Niestety w przypadku skomplikowanych obiektów, kiedy koniecznym staje się nadzór nad setkami czy też tysiącami pętli, pojawiają się wymagania posiadania odpowiedniej ilości doświadczonego personelu. Ograniczenia ujawniają się w wypadku ograniczonego dostępu do wysoko wykształconych inżynierów. Efekt ten jest widoczny już na poziomie automatyki bazowej wykorzystującej jedno-pętlowe czy też kaskadowe struktury PID. W przypadku rozwiązań automatyki wykorzystujących rozwiązania sterowania zaawansowanego lub optymalizacji [59] stanowi istotne ograniczenie stosowalności.

Literatura przedmiotu pokazuje, że znacząca część przemysłowych pętli sterowania pracuje źle. 60% bazowych pętli SISO jest błędnie zestrojona a nawet większa ich część (85%) posiada nieadekwatną strukturę [85]. Można wymienić wiele przyczyn tego zjawiska:

1. Błędne zestrojenie pętli sterowania wynikające z niestacjonarności, niewystarczającego nadzoru, konserwatywnego zestrojenia na najgorszy przypadek, częstych zmian punktów pracy instalacji czy też zmienności urządzeń wykonawczych i pomiarowych.
2. Problemy i awarie osprzętu automatyki.
3. Wpływ zakłóceń procesowych połączone z rzadkim odsprzęganiem.
4. Niedopasowany projekt systemu automatyki często wynikający z podejścia *copy-paste*.

Podsumowując, nadzór realizowany przez człowieka jest niewystarczający. Tym samym istnieje rosnące zapotrzebowanie na metody i rozwiązania wspierające ten proces. Muszą one spełnić wiele wymagań, aby uzyskać akceptację przemysłu. W szczególności muszą pracować autonomicznie wykorzystując dane z codziennej pracy bez konieczności realizacji jakichkolwiek specjalizowanych testów oraz muszą być sformułowane w oparciu o jasno zdefiniowane i wiarygodne miary (wskaźniki oceny).

W trakcie wieloletniej praktyki autor miał okazję współuczestniczyć i zrealizować kilkadziesiąt projektów modernizacji układów sterowania. Obserwacje poczynione w tym czasie wskazały, że znacząca ilość przebiegów czasowych z przemysłowych pętli sterowania nie cechuje się właściwościami gaussowskimi. Jednocześnie większość stosowanych metod i podejść bazuje na takim założeniu. Tym samym istnieje potrzeba wypracowania rozwiązań oraz algorytmów, które adresowałyby owe zagadnienia. W literaturze można znaleźć pierwsze prace idące w tym kierunku.

Analiza rzeczywistych danych procesowych stała się źródłem i inspiracją badań oraz pozwoliła na wypracowanie ich zakresu. Równocześnie analiza symulacyjna umożliwiła lepsze i systematyczne badanie zjawisk, które nie są jednoznaczne w wypadku danych rzeczywistych. Oba podejścia w sposób harmoniczny uzupełniły się.

Analiza statystyczna pokazała, iż rzeczywiste dane przemysłowe bardzo często cechują się charakterem grubo-ogonowym, co uzasadniło postawienie hipotezy, że parametry rozkładów grubo-ogonowych (rozkłady Cauchy'ego lub α -stabilne Lévy'ego) mogą stanowić

rozsądną alternatywę dla najpopularniej stosowanego odchylenia standardowego rozkładu normalnego. Dalszy kierunek badań wynikał z faktu istnienia powiązania parametru stabilności α z fraktalną miarą persystencji w postaci wykładnika Hursta [90]. Owa obserwacja pozwoliła na postawienie i weryfikację kolejnych hipotez związanych z wykorzystaniem miar fraktalnych pochodzących z analizy długo-zasięgowej oraz wykresu przeskalowanego zasięgu R/S . Według zaproponowanej przez Hursta koncepcji [84] zmienność przeskalowanego zakresu wraz ze zmianą odcinka czasu jest miarą siły trendu i poziomu szumu. Dla szeregu n przyrostów analizowanego procesu Hurst opracował metodę zwaną analizą przeskalowanego zakresu $(R/S)_n$, która polega na obliczaniu stosunku zakresu wahań R do odchylenia standardowego szeregu czasowego S , zawierającego n obserwacji [86]. Szczegółowy opis znajduje się w rozdziale 3.2. Warto nadmienić, iż analiza ta jest popularna w wielu dziedzinach, jak fizyka, medycyna, geologia, biofizyka, a praktycznie nie jest wykorzystywana w kontekście inżynierskim automatyki i sterowania.

Badania potwierdziły zasadność mono-fraktalnego podejścia do zagadnienia. Naturalną kontynuacją badań było sprawdzenie czy sygnały charakteryzujące układ sterowania i jego jakość posiadają również cechy wielo-fraktalne [52].

Proponowane rozwiązania i miary można użyć zarówno off-line badając dane historyczne jak i on-line korzystając z danych pojawiających się w czasie rzeczywistym. Również metoda nie wymaga żadnych eksperymentów ingerujących w proces. Podstawą analizy jest przebieg uchybu regulacji. Ma on te cechę, iż powinien fluktuować wokół zera, co umożliwia prostą analizę uchybu ustalonego oraz asymetrii sterowania, jak też upraszcza późniejszą analizę, gdyż w danych nie powinno być żadnych trendów a ich usuwanie (często arbitralne) nie jest konieczne.

Rozważania dotyczące niegaussowskich wskaźników jakości pętli regulacji, szczególnie analiza miar statystycznych, pozwoliły na odniesienie się również do zadania szacowania potencjalnego zysku wynikającego z zastosowania lepszego sterowania. Problem ten znalazł swoje miejsce w badaniach i zostały zaproponowane podejścia bazujące na rozkładach gaussowskich [39, 49, 55]. Jako że jednym z wyników badań jest hipoteza o częstych własnościach niegaussowskich pętli sterowania naturalnym stało się rozszerzenie zadania estymacji potencjalnych zysków z usprawnienia sterowania na rozkłady grubo-ogonowe, tzn. Laplace'a, Cauchy'ego oraz α -stabilny.

3.3 Podsumowanie uzyskanych wyników

Wyniki wypracowane w trakcie badań stanowiących podstawę prac wchodzących w skład niniejszego cyklu pozwalają na weryfikację zdefiniowanych powyżej hipotez. Do najważniejszych i najciekawszych rezultatów otrzymanych w trakcie badań należy zaliczyć:

- wypracowanie oraz weryfikacja podczas rzeczywistych projektów wieloetapowej metodologii oceny jakości dynamicznej pętli sterowania począwszy od analizy histogramu uchybu regulacji, analizy jego cech statystycznych oraz persystentnych i fraktalnych (omówienie znajduje się w rozdziale 4.1),
- zaproponowanie i uzasadnienie autorskich wskaźników oceny jakości sterowania w postaci miar statystycznych rozkładów grubo-ogonowych (omówienie znajduje się w rozdziale 4.2),

- zaproponowanie i uzasadnienie autorskich wskaźników oceny jakości sterowania poprzez analizę długo-zasięgową oraz wskaźniki wykresu przeskalowanego zasięgu R/S, tj. wykładnika Hursta (pojedynczego i wielokrotnego) oraz punktów przełamania (ang. *crossover*) (omówienie znajduje się w rozdziale 4.3),
- analizę stosowalności proponowanych wskaźników oceny do nastaw klasycznego regulatora PID oraz podstawowych parametrów regulatora predykcyjnego na przykładzie algorytmu GPC (omówienie znajduje się w rozdziale 4.4).
- rozszerzenie klasycznego podejścia ”*the same limit*” służącego do oszacowania zysku możliwego do otrzymania w wyniku poprawy sterowania o rozkłady niegaussowskie (omówienie zamieszczono w rozdziale 4.5).

4 Omówienie uzyskanych wyników prac badawczych

Znajdujący się w niniejszym rozdziale opis prezentuje najistotniejsze rezultaty z prac [H1–H11] jednotematycznego cyklu publikacji stanowiącego podstawą oś wniosku habilitacyjnego. Uzupełnieniem powyższych prac są inne własne publikacje [Hu1, Hu2, Hu3, Hu4, Hu5, Hu6, Hu7, Hu8, Hu9, Hu10, Hu11, Hu12, Hu13, Hu14, Hu15, Hu16], zarówno autorskie jak i współautorskie, powiązane tematycznie z jednotematycznym cyklem i wykorzystane w opisie poprzez odwołania.

Omówienie uzyskanych wyników prac badawczych zaprezentowane jest merytorycznie zgodnie z realizowaną metodologią stawiania hipotez i ich weryfikacji. Opis rozpoczyna się rozdziałem 4.1 przedstawiającym proponowaną autorską metodę analizy jakości układów sterowania. Ważnym elementem tej części (bez której praktycznie kolejne elementy nie zaistniałyby) jest uzasadnienie przemysłowe wynikające z szeregu rzeczywistych prac wdrożeniowych.

Następne dwa rozdziały opisują szczegółowe badania właściwości statystycznych pętli regulacji oraz ich cech fraktalnych (odpowiednio rozdziały 4.2 oraz 4.3). W tej części opisu zaproponowane i przetestowane zostały różne nowe miary oceny jakości sterowania.

Rozdział 4.4 przeprowadza czytelnika przez symulacyjną analizę stosowalności proponowanych wskaźników dla regulatorów PID oraz predykcyjnego algorytmu GPC. Opis zamyka rozdział 4.5 prezentujący rozszerzenie zadania estymacji potencjalnych zysków z usprawnienia sterowania na rozkłady grubo-ogonowe, tzn. Laplace’a, Cauchy’ego oraz α -stabilny.

4.1 Praktyczna metodologia oceny jakości sterowania w warunkach niegaussowskich

Pomimo solidnie ugruntowanej świadomości, iż złe sterowanie znacząco pogarsza efektywność ekonomiczną danego procesu wytwarzania, wciąż często mamy do czynienia z nieodpowiednio skonfigurowanymi strukturami regulacji czy też niewłaściwym doбором nastaw. Istnieje wiele przyczyn takiej sytuacji, aczkolwiek chyba najważniejszą jest niewystarczający codzienny nadzór połączony z oceną pracy układów sterowania. Zjawisko

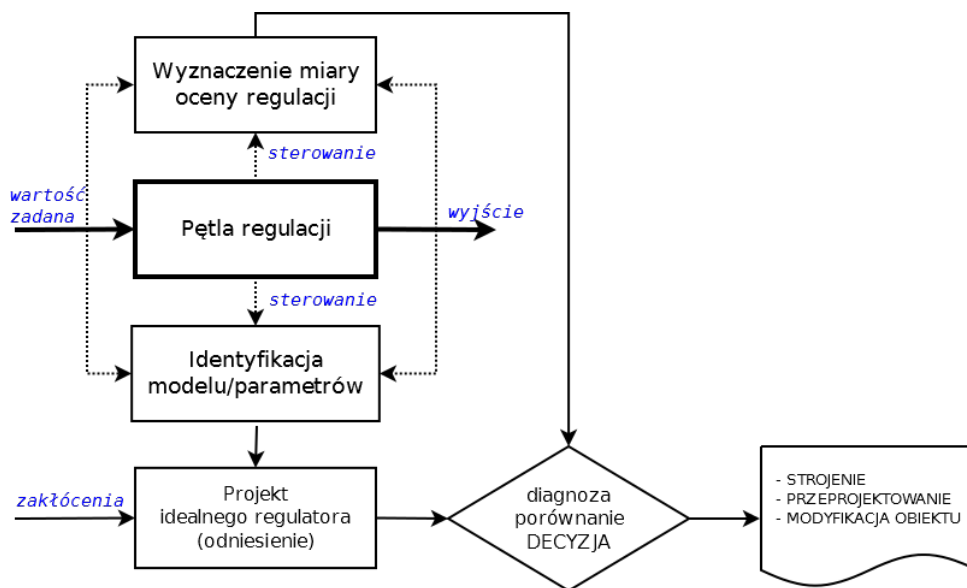
to generuje konieczność wsparcia inżyniera poprzez metodologie oceny jakości sterowania i relewantne wskaźniki oceny, umożliwiające porównanie oraz konstruktywne wnioski przyczynowo-skutkowe.

W literaturze temat ten rozpatrywany jest od wielu lat. Pierwsze raportowane prace pojawiają się w latach *60-ych* wraz z ocenami pracy układów sterowania w piśmiennictwie dokonany przez Astroma [4]. Badania były kontynuowane w kolejnych dziesięcioleciach [8, 12]. Znaczne przyspieszenie nastąpiło w roku 1989 wraz z pracami Harrisa [15] na temat metod minimalno-wariacyjnych. Obecne rozwiązania pozwalają na zastosowanie dla różnych przypadków oraz zjawisk, jak na przykład nieliniowości [28], układów wielkiej skali [38], regulacji predykcyjnej [43, 75], systemów wielowymiarowych [56], uwzględniając wpływ tarcia w urządzeniach wykonawczych [83], zjawiska oscylacji [64] i wiele innych [79]. Owe badania znalazły również przełożenie komercyjne, jako że istnieje wiele rozwiązań informatycznych automatyzujących proces [78]. Jako że opracowano wiele różnych wskaźniki, można wydzielić kilka grup podejść:

- rozwiązania w dziedzinie czasu wykorzystujące odpowiedź skokową: uchyb ustalony, przeregulowanie, czas regulacji, dojścia, osiągnięcia maksimum, wskaźniki: Area Index, Output Index, R-index, Idle Index [65],
- wskaźniki bazujące na przebiegach czasowych zmiennych biorących udział w sterowaniu (sygnał sterujący, uchyb regulacji, wyjście procesu), najczęściej w postaciach całkowitych: średni błąd kwadratowy (MSE - Mean Square Error), średnia całka z modułu (IAE - Integral of Absolute Error), ale i innych jak wskaźnik amplitudowy (AMP - Amplitude Index),
- miary statystyczne: odchylenie standardowe, wariancja, skośność, kurtoza, współczynniki skali, kształtu, statystyki wyższego rzędu [40] lub lokalne [80],
- wskaźniki minimalno-wariacyjne [15],
- miary bazujące na modelu [69],
- alternatywne rozwiązania, np. wykorzystujące sieci neuronowe [51], analizę w dziedzinie falek [26], częstotliwości [68], funkcji ortogonalnych [85], rozwiązania jądrowe (kernelowe) [81], fraktalne [65, 72], analizy spektralne [76] czy też entropię [77],
- czysto biznesowe wskaźniki, najczęściej wyrażone w jednostkach monetarnych zwane KPIs [44], [66, 67].

Powyższe podejścia i wskaźniki wpisują się w klasyczną metodologię oceny jakości sterowania. Jest ona zaprezentowana na Rysunku 1.

Przedstawione podsumowanie pozwala poczynić trzy interesujące spostrzeżenia. Po pierwsze część najpopularniejszych wskaźników (jak przeregulowanie i czas sterowania) opiera się na konieczności ingerencji w proces poprzez przeprowadzenie eksperymentu testu skokowego. W warunkach rzeczywistych jest to mocno utrudnione lub niemożliwe ze względu na kwestie bezpieczeństwa czy też ekonomiczne. Po drugie, część popularnych wskaźników, a na pewno wskaźniki minimalno-wariacyjne, wymagają założeń odnośnie



Rysunek 1: Klasyczna procedura oceny (wg [47])

liniowości procesu oraz struktury modelu (rzędy wielomianów, opóźnienie). Założenia te w praktycznych zastosowaniach są trudno realizowalne, tudzież arbitralne. Ostatecznie większość podejść zakłada, iż analizowane procesy mają charakter gaussowski.

Dla odmiany wskaźniki całkowite MSE i IAE nie mają raczej ograniczeń stosowalności. Opisane są one za pomocą prostych zależności:

- MSE:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i^* - y_i)^2 \quad (1)$$

gdzie N - ilość próbek, y^* - wartość zadana, y - wyjście procesu.

- IAE:

$$IAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i^* - y_i| \quad (2)$$

Najczęściej wskaźniki te stosowane są wymiennie, bez głębszej refleksji. Jednakowoż w literaturze przedmiotu możemy znaleźć analizy wskazujące istotne różnice pomiędzy nimi. Seborg *et al* [91] stwierdził, że strojenie ukierunkowane na minimalizację błędu średnio-kwadratowego karze znaczne odchylenia. Jednocześnie MSE generuje agresywne sterowania, jeśli zostaje wykorzystane do strojenia układu regulacji. Shinsky [35] pokazał zaś, że wskaźnik modułu uchybu jest blisko związany z zależnościami ekonomicznymi. Ze względu na ich popularność oraz szerokie zastosowanie zostały one dokładnie przebadane i porównane z proponowanymi wskaźnikami statystycznymi i fraktalnymi. W zrównoważony sposób uzupełniają one te wskaźniki i tym samym znalazły uzasadnienie wykorzystania w proponowanej metodologii.

Autor niniejszego opracowaniu współuczestniczył w wielu przemysłowych projektach związanych z modernizacją automatyki, w głównej mierze przy wykorzystaniu regulacji

zaawansowanej (APC – Advanced Process Control) [Hu1]. Obejmowały one szereg zastosowań przemysłowych układów sterowania wykorzystujących zaawansowane układy regulacji wielopętlowej [Hu12], algorytmy predykcyjne [Hu8], sieci neuronowe [Hu4, Hu5], układy rozmyte [Hu2], sieci Kohonena [Hu9], metody optymalizacji lokalnej i globalnej [Hu7].

Wdrożenia dotyczyły wielu istotnych aspektów związanych z poprawą sprawności wytwarzania [Hu6] (ograniczenie emisji gazów cieplarnianych CO_2), zmniejszaniem emisji tlenków siarki SO_x [Hu3] i azotu NO_x [Hu13]. Obejmowały wiele aspektów wytwarzania energii, tj. różne rodzaje spalania, paliwa, układu ko-generacji [Hu1, Hu7, Hu14, Hu15]. Ostatnio doświadczenia rozszerzyły się na przemysł chemiczny [Hu16], [H4]. Przemysłowe uznanie tych działań zostało potwierdzone przyznaniem patentu [Hu11] oraz nagrodami.

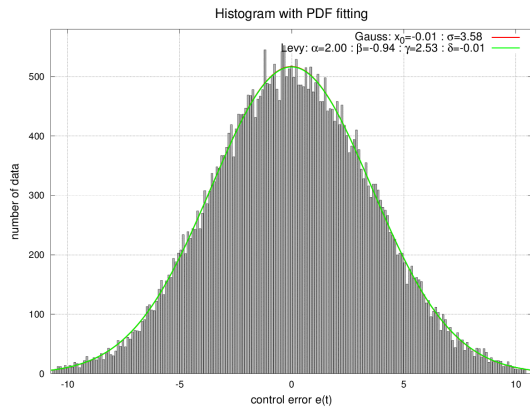
Ważnym elementem praktycznie każdego wdrożenia jest przeprowadzenie audytu stanu obiektu, zarówno *przed* jak i *po* projekcie. Obejmuje on wszelkie aspekty projektu. Status układu sterowania jest jednym z najważniejszych [Hu10] jego elementów. Jego brak uniemożliwia pełne wykorzystanie potencjału. Właśnie te doświadczenia uświadomiły kluczową wagę zagadnienia i skierowało zainteresowanie autora w tę stronę.

Analiza rzeczywistych przebiegów sterowania pochodzących z kilkuset różnorodnych pętli regulacji z różnych branż procesowych (energetyka, przetwarzanie odpadów, chemia) nie potwierdza popularnego założenia o gaussowskim charakterze sygnałów charakteryzujących system sterowania [H1, H3]. Obserwowane układy bazowały na regulatorach PI/PID w układach jedno-pętlowych czy też kaskadowych z rzadkim wykorzystaniem odsprzęgania zakłóceń (*feedforward*). Statystyczne podsumowanie tej analizy pokazuje, iż:

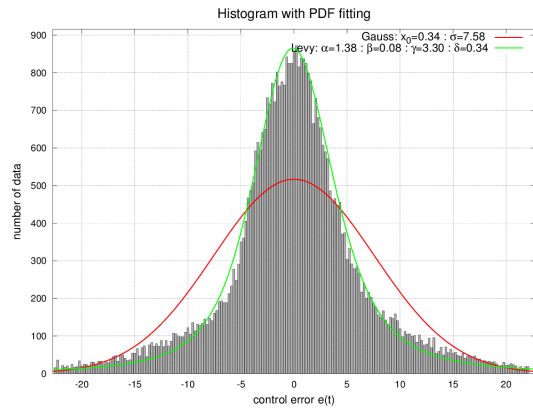
- ponad 80% analizowanych pętli pracuje głównie w trybie AUTO, co świadczy o ich dobrym wykorzystaniu,
- jedynie 7% badanych uchybów ma charakter gaussowski potwierdzony dopasowaniem rozkładu normalnego do histogramu czy też testami zgodności (Kolmogorow-Smirnow, Lilliefors, test skośności i stabilności) – przykład na Rysunku 2a,
- około 8% cechuje się dziwnym kształtem, najpewniej spowodowanym nieliniowościami, wadami urządzeń wykonawczych lub ingerencją operatora – Rysunek 2c,
- około 24% ma ewidentny charakter grubo-ogonowy – Rysunki 2b, 2d.

W wielu klasycznych rozwiązaniach analiza statystyczna ogranicza się do wyznaczenia dwu parametrów: średniej jako miary uchybu ustalonego oraz odchylenia standardowego (wariancji) jako miary zmienności sygnału (dokładność odwzorowania wartości zadanej – analogia przeregulowania). Podejście takie czasami rozszerza się o statystyki wyższego rzędu, jak skośność (miara asymetrii) lub kurtoza (miara skupienia).

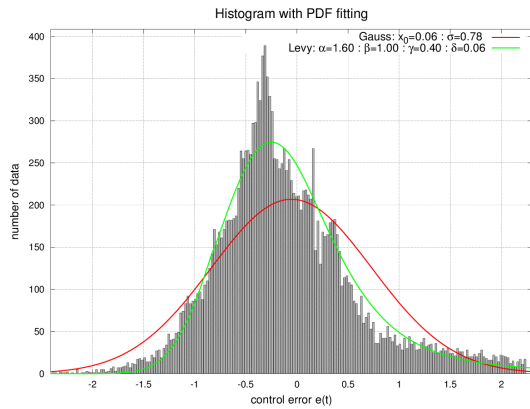
Obserwując rzeczywiste histogramy widać, że czasami podejście gaussowskie jest uzasadnione (przykład na Rysunku 2a). Jednakże przegląd pokazuje, że najczęściej najlepsze dopasowanie osiągnane jest przez rozkład α -stabilny Lévy'ego. Widać to zarówno na przykładzie histogramu gaussowskiego (Rysunek 2a), grubo-ogonowego (Rysunek 2b) czy też innych (Rysunek 2c i 2d). Tym samym pojawiła się hipoteza, że być może współczynniki rozkładu stabilnego stanowią lepszą alternatywę. Szczegółowa analiza tej hipotezy



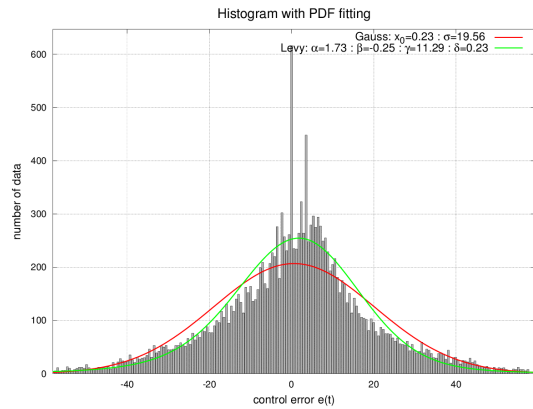
(a) Dobrze zestrojona pętla z ograniczonym wpływem sprzężeń - charakter gaussowski



(b) Pętla sterowania o grubo-ogonowym charakterze uchybu



(c) Uchyb sterowania z histogramem o niesymetrycznym kształcie



(d) Pętla sterowania z lekko niesymetrycznym i przesuniętym histogramem

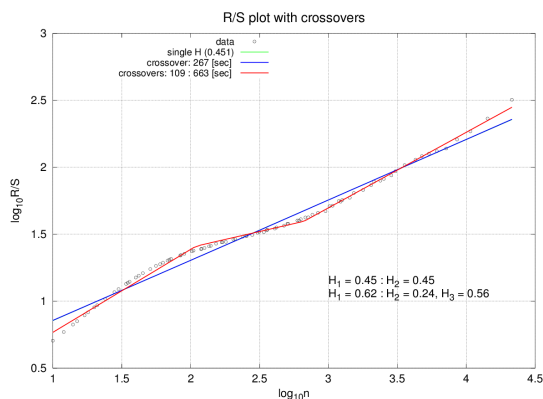
Rysunek 2: Histogramy uchybów regulacji dla przykładowych pętli wraz z dopasowaniem krzywej rozkładu Gaussa i α -stabilnego Lévy'ego i parametrami tych funkcji

znajduje się w kolejnym rozdziale 4.2. W tym miejscu warto nadmienić, że umożliwiają one ocenę różnych aspektów jakości sterowania, jak uchybu ustalonego, dokładności dynamicznej odtwarzania wartości zadanej oraz asymetrii sterowania.

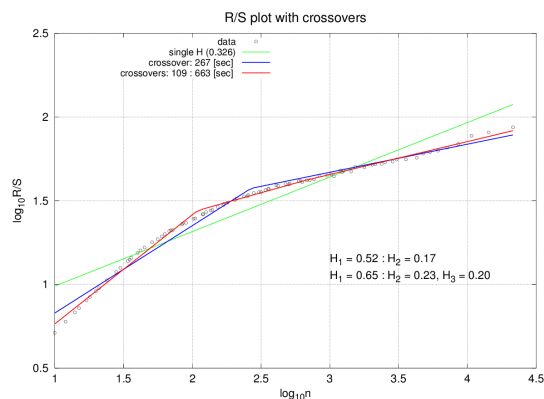
Możliwości dalszej analizy wynikają z hipotezy istnienia powiązania parametru stabilności α rozkładu Lévy'ego z fraktalną miarą persystencji w postaci wykładnika Hursta [89, 90]. Owa obserwacja uzasadnia kolejne hipotezy związane z wykorzystaniem miar fraktalnych analizy długo-zasięgowej oraz wykresu przeskalowanego zasięgu R/S.

Zestrojenie pętli regulacji oddziałuje na szerokość histogramu uchybu. Równocześnie pamiętamy, że układy sterowania procesów rzeczywistych pracują w warunkach nieliniowości oraz zakłóceń (zarówno wewnętrznych jak i zewnętrznych), które są tylko w małym stopniu odsprzęgnięte. Układy są w dużej mierze skomplikowane składając się z kilkadziesiątu czy też nawet kilkuset pętli sterowania pracujących we wzajemnej zależności. Nie można również pominąć zmiennych w czasie relacji długo-zasięgowych o różnej skali. Na koniec należy również uwzględnić istotny wpływ człowieka na pracę układu poprzez

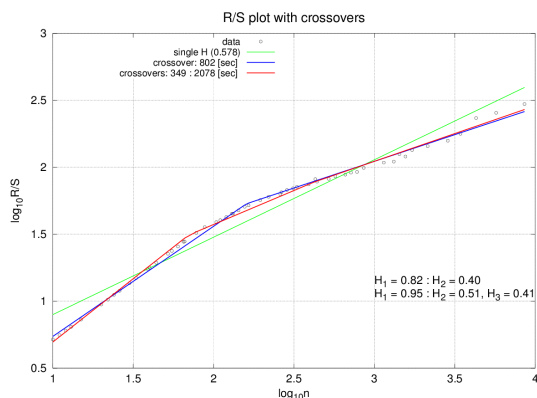
używanie ręcznego trybu sterowania, zmiany wartości zadanych, nastaw, ograniczeń, itp.



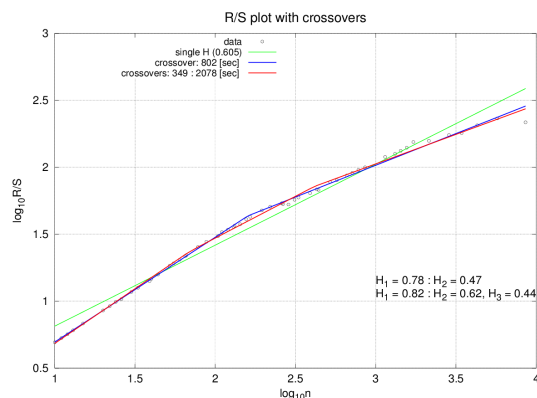
(a) Dobrze zestrojona pętla z ograniczonym wpływem sprzężeń - charakter gaussowski



(b) Pętla sterowania o grubo-ogonowym charakterze uchybu



(c) Uchyb sterowania z histogramem o niesymetrycznym kształcie



(d) Pętla sterowania z lekko niesymetrycznym i przesuniętym histogramem

Rysunek 3: Wykres przeskalowanego zasięgu R/S - zmienne z Rysunku 2

Powyższe efekty najczęściej generują własności fraktalne i cechy persystentne szeregów czasowych, w wyniku czego wykładnik Hursta (jedna z miar persystencji) różni się od 0.5 [33]. Pokazano również, że skomplikowana dynamika powoduje istnienie wielokrotnych wykładników skalowania w tym samym zakresie [48], co uzewnętrznia się zachowaniu wielopersystentnym. Idąc dalej tym tropem analiza fraktalna rozszerza się na analizę multi-fraktalną, szczególnie ze względu na występowanie czynnika ludzkiego [25].

Przykładowe wykresy przeskalowanego zasięgu R/S tych samych danych, dla których przedstawione zostały wykresy histogramów znajdują się Rysunku 3. Pierwsze badania [65, 70, 72, 73] wskazały, iż wykładnik Hursta może odzwierciedlać jakość dostrojenia. Szczegółowa weryfikacja wskaźników fraktalnych znajduje się w rozdziale 4.3.

Powyższe analizy uzasadniają propozycję autorskiej, rozszerzonej metodologii oceny jakości regulacji wykorzystującej miary niegaussowskie oraz podejście fraktalne. Metodologia ta została zasygnalizowana wcześniej, zaś opracowanie [H4] prezentuje jej zastosowanie w rzeczywistym przypadku dla skomplikowanej przemysłowej instalacji syntezy

amoniaku NH_3 w JP Azoty, Zakłady Azotowe Kędzierzyn-Koźle, Grupa Azoty S.A.

Proponowana metodologia opiera się na istotnej obserwacji, iż proste wyznaczanie wskaźników jakości, bez głębszej refleksji nad warunkami zewnętrznymi, może być mylące. Wizualna weryfikacja danych źródłowych oraz wykresów (histogramy, wykresy R/S i inne) jest konieczna. Taka obserwacja jest mocno konserwatywna i rzeczywiście może zniechęcać. Jednakże nie można jej pominąć z inżynierskiego, racjonalnego punktu widzenia. Proponowana procedura składa się z następujących etapów:

1. Przegląd przebiegów czasowych zmiennych procesowych, tzn. wartości zadanej, sygnału sterującego, wyjścia procesu, uchybu regulacji. Koniecznym jest weryfikacja poprawności zebrania danych z obiektowej infrastruktury informatycznej (SCADA, DCS), jako że dane takie często są zakłócone kompresją czy też systemowym filtrowaniem. Ważnym jest również sprawdzenie szeregów czasowych pod kątem występowania artefaktów, czyli danych nie mających źródła w procesie. Należy się również upewnić, czy analizowane dane pochodzą z pożądanego trybu pracy. Etap ten jest niestety żmudny i długotrwały, niemniej zwiększa on wiarygodność wyników.
2. Wybór sygnału do analizy. Każdy z sygnałów biorących udział w sterowaniu ma swoje specyficzne znaczenie. Wartość zadana informuje nas o głównym realizowanym zadaniu sterowania przez pętlę regulacji. Sygnał sterujący (wyjście regulatora) odzwierciedla pracę algorytmu sterowania. Szczególnie rozważenie zależności pomiędzy sterowaniem a wyjściem procesu przekazuje ważne informacje, w głównej mierze o charakterystyce urządzenia wykonawczego.
Dynamiczna jakość pętli regulacji najczęściej oceniana jest na podstawie wyjścia procesu lub też uchybu regulacji, przy czym większość analiz uwzględnia wyjście procesu. Autor niniejszego opracowania sugeruje wybór **uchybu regulacji**.
Ma on kilka praktycznych cech, które wyraźnie go preferują. Po pierwsze, jest niezależny od przebiegu wartości zadanej i powinien zmieniać się wokół zera. Jeśli jest inaczej, mamy do czynienia z uchybem ustalonym lub inną wadą układu sterowania. Równocześnie nie jest konieczne usuwanie żadnych zewnętrznych trendów związanych ze zmianami wartości zadanej. W ten sposób ograniczamy arbitralność decyzji podejmowanych podczas usuwania trendów.
3. Wykreślenie i analiza histogramu uchybu regulacji. Etap ten jest bardzo istotny, ponieważ umożliwia wgląd w pracę pętli, charakter jej otoczenia (np. zakłóceń) oraz jej zmienności dynamicznej (zestrojenie, dynamika procesu). Z drugiej strony uzasadnia decyzje związane z wyborem podejścia statystycznego, tzn. kształtem funkcji rozkładu prawdopodobieństwa oraz właściwych miar.
Bardzo ważnym etapem analizy jest dopasowanie do histogramu różnych funkcji gęstości prawdopodobieństwa oraz wykonanie testów zgodności w celu rzetelnego zapoznania się z pętlą i jej środowiskiem:
 - (a) gaussowski charakter pozwala zastosować klasyczne podejście. W szczególności miary rozkładu normalnego, jak odchylenie standardowe czy też wariancja.
 - (b) W wypadku grubo-ogonowego kształtu należy wykorzystać podejście poprzez funkcję Cauchy'ego lub Lévy'ego. W szczególności sugerowanym odpowiedni-

kiem odchylenia standardowego jest współczynnik skali γ (dla dowolnego z rozkładów grubo-ogonowych). Co ważniejsze okazuje się, że jest on odporny na wpływ zakłóceń procesowych o różnym charakterze a jego zdolności odzwierciedlania jakości zestrojenia są zachowywane.

Pozostałe parametry rozkładu α -stabilnego wnoszą kolejne informacje na temat uchybu ustalonego, asymetrii czy też cech stabilnych.

- (c) W pozostałych przypadkach wskazane jest wykorzystać współczynniki najlepiej dopasowanego rozkładu.
 - (d) Należy pamiętać, iż wybór statystyk powinien zapewniać odporność na wpływ zakłóceń procesowych. Efekt ten musi również uwzględniać stosowany algorytm regulacji. Aspekt ten w szczegółach przedyskutowany jest w rozdziale 4.4.
4. Grubo-ogonowy charakter jest odzwierciedlony w parametrze stabilności $\alpha \neq 2$ funkcji Lévy'ego. W takiej sytuacji istnieje uzasadnienie hipotezy, co do istnienia właściwości fraktalnych szeregu, a co za tym idzie można przeprowadzić taką analizę. Umożliwi ona nie tylko oszacowanie jakości pracy regulatora, jak na przykład jego zbyt wolne czy też agresywne zestrojenie. Możliwie jest również oszacowanie przyczyn określonych cech, jak na przykład czy jest to zmienność wynikająca z dynamiki (strojenie), czy też przyczyna leży w długookresowych korelacjach. Istnieje również możliwość wykrycia ewentualnego wpływu czynnika ludzkiego na przebiegi. Tematyka ta jest dokładnie zaprezentowana w rozdziale 4.3.
5. Uzupełnieniem analizy powinno być sprawdzenie wskaźników całkowych MSE oraz IAE. Szczególnie ten drugi będzie wartościowym uzupełnieniem ze względu na swoją zwiększoną odporność na wpływ zakłóceń.

Powyżej przedstawiona autorska procedura oceny jakości układów regulacji jest koncepcja otwartą, uwzględniającą różne aspekty i miary w ocenie jakości sterowania. Nic nie stoi na przeszkodzie, aby ją uzupełniać tudzież rozwijać. Na koniec należy zwrócić uwagę na trzy istotne aspekty dowolnej metodologii, w tym również proponowanej. Po pierwsze istotna jest bezinwazyjność podejścia. Proponowana procedura spełnia ten warunek. Po drugie, trzeba mieć na uwadze wpływ zakłóceń procesowych oraz zapewnienie jak najwyższej odporności na zawsze występujące w rzeczywistości zakłócenia, a przynajmniej świadomość ich istnienia i zakres stosowalności. Wątek ten dokładnie analizowano symulacyjnie i przedstawiono w kolejnych częściach opisu. Po trzecie, metoda powinna być konstruktywna, tzn. nie tylko pokazywać jakość pracy, ale również wskazywać kierunki poprawy. Ten aspekt stanowi główną oś narracji w rozdziale 4.4.

4.2 Niegaussowskie wskaźniki oceny w oparciu o parametry rozkładów grubo-ogonowych

Okazuje się, że rozkłady niegaussowskie nie są takie rzadkie w automatyce, jakby to potocznie się wydawało. Równocześnie są one popularne i skutecznie wykorzystywane w innych dziedzinach nauki, jak fizyka, astronomia, meteorologia, geologia, . . . Ważną częścią nauki, gdzie takie rozwiązania okazały się adekwatne, są nauki społeczne, a w głównej

mierze ekonomia. Okazuje się, że tam gdzie istnieje wpływ człowieka zjawiska przestają mieć charakter normalny (w sensie Gaussa). Istnieje znacząca literatura opisująca takie zjawiska, jak np. [54, 92].

Jeden z wielu takich przykładów był badany przez autora i dotyczył on cen na rynkach energii elektrycznej [H8] – polskim i austriackim. Okazało się, że ceny nie mają rozkładu normalnego a z kilkudziesięciu analizowanych rozkładów funkcja Cauchy’ego cechowała się najlepszym dopasowaniem. Obserwacje takie są bardzo częste w naukach innych niż inżynierskie. Powyższe wyniki dały impuls do nowego spojrzenia na charakter przebiegów występujących w sterowaniu oraz zainicjowały opisywane prace.

Klasyczne podejście do oceny jakości regulacji w głównej mierze opiera się na statystykach rozkładu normalnego. Wartość średnia czy też odchylenie standardowe (wariancja) uchybu regulacji to najczęściej stosowane praktycznie wskaźniki oceny. Pierwszy z nich, oznaczany μ , pozwala ocenić uchyb ustalony, podczas gdy drugi, σ , niesie informację o zmienności (analogia przeregulowania). Pożądana wartość wartości średniej wynosi zero. Im wyższe jest odchylenie standardowe, tym większe są fluktuacje uchybu, a co za tym idzie gorsze sterowanie. Niestety podejście to nie pozwala określić najlepszej wartości σ . Dysponujemy jedynie względną oceną mówiącą, czy poprawiamy sterowanie zmniejszając odchylenia standardowego, czy też przeciwnie.

Powyższe miary są często uzupełniane przez inne statystyki, jak mediana, skośność, kurtoza oraz inne wyższego rzędu [40]. Kurtoza informuje o tym, czy rozkład jest wysmukły, czy spłaszczony. Wykorzystywana jest do określenia stopnia koncentracji wokół średniej. Im większą wartość osiąga, tym rozkład jest bardziej spłaszczony. Skośność pokazuje różnice pomiędzy dodatnimi i ujemnymi odchyleniami od wartości średniej. Powszechnie stosowany jest dla wykazania czy rozkład wyników jest symetryczny. Dla rozkładu symetrycznego wartość tego wskaźnika wynosi zero. Dla skośnego ujemnie przewaga liczebności występuje wokół wysokich wartości zmiennej – niedoregulowanie do wartości zadanej. Dla rozkładu skośnego dodatnio przewaga liczebności występuje wokół niskich wartości zmiennej, co oznacza częstsze przekroczenia zadanej.

Rozkład normalny i odchylenie standardowe są podstawą jednej z ważnych metod szacowania potencjału poprawy wskaźników ekonomicznych instalacji poprzez lepszą regulację [32]. Można wymienić trzy warianty tego podejścia: reguła *same limit, same percentage* oraz *final percentage* [49]. Podejście to ma wiele zalet i jest rozpowszechnione szczególnie w branży chemicznej. Niemniej trzeba pamiętać o założeniu konieczności dobrego dopasowania do histogramu rozkładu normalnego.

Istotność oraz popularność metod gaussowskich jest bezsporna. Większość badaczy oraz praktyków codziennie je stosuje. Niemniej należy pamiętać, że obserwacja histogramów wzbudza wątpliwości odnośnie założenia o idealności rozkładu normalnego (choćby przykłady z Rysunku 2). Poza obserwacjami histogramów, charakter rozkładów może zostać potwierdzony testami zgodności, jak np. Kołmogorowa-Smirnova, Smirnov-Cramervon Mises [1], Anderson-Darling [2], Shapiro-Wilk [3], Lilliefors [5], czy też zgodności z kurtozą, skośnością lub stabilnością.

Autorski przegląd kilkuset pętli regulacji z różnych branż [H1] pokazał, że tylko mała ich część ($\approx 6\%$) może być wiarygodnie opisana za pomocą funkcji rozkładu normalnego. Większość z nich jest lepiej odwzorowana przez funkcje grubo-ogonowe, jak Cauchy

($\approx 30\%$) lub Lévy ($> 60\%$). Trudno jest jednoznacznie wyrokować o przyczynie takiego zjawiska. Z pewnością wysokie skomplikowanie oraz wielość skrośnych powiązań w procesie, w połączeniu z nieliniowościami, niestacjonarnością oraz czynnikiem ludzkim składa się na taki a nie inny obraz. Ze względu na dostępność wielu danych przebadana została zgodność z różnymi funkcjami prawdopodobieństwa. Główne z nich opisane są poniżej.

4.2.1 Funkcja Cauchy'ego

Rozkład opisany funkcją Cauchy'ego opisuje kształt grubo-ogonowy. W miarę oddalania się od środka funkcja nie zanika tak szybko, jak dla rozkładu normalnego. Kształt jest symetryczny, a parametry mają znaczenie relatywnie zbliżone do rozkładu normalnego (3). Współczynnik położenia $\delta \in \mathbb{R}$ informuje o położeniu funkcji, podczas gdy skala $\gamma > 0$ określa szerokość rozkładu, czyli zakres zmienności.

$$PDF_{\delta,\gamma}(x) = \frac{1}{\pi\gamma} \left(\frac{\gamma^2}{(x - \delta)^2 + \gamma^2} \right) \quad (3)$$

4.2.2 Rozkład α -stabilny (Lévy)

Rozkład α -stabilny Lévy'ego należy do rodziny funkcji stabilnych (4). Posiada on więcej stopni swobody (cztery parametry) niż rozkład Cauchy'ego.

$$PDF_{\alpha,\beta,\delta,\gamma}(x) = \exp\{i\delta x - |\gamma x|^\alpha (1 - i\beta l(x))\}, \quad (4)$$

gdzie

$$l(x) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(x) \operatorname{tg}\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) & \text{for } \alpha \neq 1 \\ -\operatorname{sgn}(x) \frac{2}{\pi} \ln|x| & \text{for } \alpha = 1 \end{cases},$$

$0 < \alpha \leq 2$ nazywane jest współczynnikiem *stabilności*, $|\beta| \leq 1$ parametrem *skośności*, $\delta \in \mathbb{R}$ odzwierciedla *położenie*, a $\gamma > 0$ oznacza współczynnik *skali*. Funkcja Lévy'ego może opisywać szeroki wachlarz kształtów. W szczególności zestaw $\alpha = 2$, $\beta = 0$, $\gamma = 1$ i $\delta = 1$ odzwierciedla dokładnie rozkład normalny.

4.2.3 Rozkład Laplace'a

Funkcja Laplace'a jest zwana rozkładem podwójnie wykładniczym. Kształt opisany jest różnicą pomiędzy dwoma zmiennymi o identycznym rozkładzie wykładniczym (5).

$$PDF_{\mu,b}(x) = \frac{1}{2b} e^{-\frac{|x-\mu|}{b}}, \quad (5)$$

gdzie $\mu \in \mathbb{R}$ oznacza *położenie* a $b > 0$ jest parametrem *skali*. Kształt zanika wykładniczo zależnie od parametru b wraz z oddalaniem się od środka.

4.2.4 Rozkład Generalized Extreme Value GEV

Rozkład GEV (6) jest rodziną ciągłych funkcji zbudowanych zgodnie z teorią wielkości ekstremalnej łącząc różnorakie rozkłady (Gumbel, Fréchet and Weibull).

$$PDF_{\mu,\sigma,\xi}(x) = \frac{1}{\sigma} t(x)^{\xi+1} e^{-t(x)}, \quad (6)$$

gdzie

$$t(x) = \begin{cases} \left(1 + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\xi\right)^{-\frac{1}{\xi}} & \text{if } \xi \neq 0 \\ e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}} & \text{if } \xi = 0 \end{cases},$$

$\mu \in \mathbb{R}$ oznacza *położenie*, $\sigma > 0$ *skalę* a $\xi \in \mathbb{R}$ nazywany jest współczynnikiem *kształtu*. Funkcje (7) oraz (8) definiują wartość średnią i odchylenie standardowe rozkładu.

$$mean_{GEV} = \mu - \frac{\sigma}{\xi} + \frac{\sigma}{\xi} \cdot \Gamma(1 - \xi) \quad (7)$$

$$stdev_{GEV} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{\xi^2} (\Gamma(1 - 2\xi) - \Gamma^2(1 - \xi))} \quad (8)$$

4.2.5 Nieograniczone funkcje Johnsona S_U

Rozkład Johnsona S_U jest opisany z wykorzystaniem czterech parametrów i jest swego rodzaju transformacją rozkładu normalnego.

$$PDF_{\gamma,\xi,\delta,\lambda}(x) = \frac{\delta}{\lambda\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{x-\xi}{\lambda}\right)^2}} \times e^{-\frac{1}{2}(\gamma + \delta \sinh^{-1}(\frac{x-\xi}{\lambda}))^2},$$

gdzie $\gamma \in \mathbb{R}$ oraz $\delta > 0$ są nazywane współczynnikami *kształtu*, $\xi \in \mathbb{R}$ to parametr *położenia*, a $\lambda > 0$ jest parametrem *skali*.

4.2.6 Dopasowanie rozkładu do histogramu

Istnieje wiele metod dedykowanych dopasowaniu funkcji rozkładu prawdopodobieństwa do histogramu zmiennej [57]. W prowadzonych badaniach dla rozkładu Cauchy'ego wykorzystano estymację największej wiarygodności (MLE - Maximum Likelihood Estimation) wykorzystującą solver zaimplementowany w środowisku `Octave` [45]. Podejście regresyjne Koutrouvelisa [9] pozwoliło na dopasowanie rozkładu α -stabilnego. Estymacja funkcji Laplace'a oraz GEV również korzysta z algorytmu MLE. Funkcja Johnsona uzyskana została przy pomocy metody momentów [7].

4.3 Fraktalne podejście do oceny jakości sterowania

Podejście fraktalne stanowi naturalne przedłużenie badań opisanych w rozdziale 4.2. Taki kierunek jest popularny w wielu dziedzinach nauk naturalnych [13, 23, 36, 42, 90] i społecznych [25, 54, 57, 63, 87, 89, 92]. Pojawia się również w medycynie [52] oraz naukach

inżynierskich, jak na przykład telekomunikacja [41, 48, 62] czy prognozowanie [H8]. W automatyce, a na pewno w teorii sterowania jak też ocenie jakości regulacji, tematyka ta pozostaje na obrzeżach zainteresowań.

Pierwsze, pojedyncze i wrywkowe, prace na ten temat pojawiły się dopiero kilka lat temu. Obejmowały one wykorzystanie wykładnika Hursta H , jako wskaźnika oceny jakości sterowania opierając się na przebiegu wyjścia procesu. Algorytm DFA (Detrended Fluctuation Analysis) służył do estymacji wykładnika [65]. Kontynuacja tych prac poszła w kierunku filtru Kalmana [70], regulacji PI [73, 74] oraz nadążnego regulatora PID [72]. Prace te ograniczają się do kilku ośrodków w USA, Indiach oraz RPA. Poza nimi autor nie znalazł innych opracowań tego tematu.

Określenie fraktalny (łac. *fractus*, czyli połamany, cząstkowy), samopodobny lub nieskończenie subtelny (ang. *infinitely subtle*) zostało wprowadzone w latach '70 przez Benoit Mandelbrota [86]. Samopodobieństwo czyli niezależność od zmian skali lub rozmiaru [90] jest pojęciem leżącym u podstaw teorii fraktali oraz prawa zależności potęgowej (ang. *power law*). Czasami jest on postrzegany jako kształtowanie symetrii naszego otoczenia, czy też sposób jej interpretacji. Analogiczne pojęcia matematycy rozważali już wcześniej, jednakże dopiero kwestie uwzględniania losowości [92] zdecydowały o dalszym rozwoju.

W matematyce od dawna istniały obiekty cechujące się niecałkowitym rozmiarem Hausdorffa. Rozważania Cantora, Peano, Hilberta, Kocha, Sierpińskiego czy Julii pozwoliły Mandelbrotowi uporządkować i sformułować założenia teorii fraktalnej. Równocześnie rozwój możliwości obliczeniowych komputerów wspomógł wizualizację czyniąc teorię atrakcyjną i popularną. Fraktale cechują się trzema właściwościami: samopodobieństwem, niecałkowitym rozmiarem Hausdorffa większym od topologicznego oraz prostą iteracyjną definicją.

4.3.1 Wykładnik Hurst - miara persystencji

Prace związane z wykładnikiem Hursta prowadzone były niezależnie i wcześniej. Harold Edwin Hurst pracował przy budowie tam na Nilu i analizował poziom rzeki dysponując historią 847 wylewów [84]. Pierwotnie opierano się na założeniu na pełnej niezależności wylewów od historii. Hurst udowodnił coś przeciwnego. Wykładnik Hursta jest zdefiniowany jako cecha asymptotyczna przeskalowanego zasięgu R/S .

$$E \left[\frac{R(n)}{S(n)} \right] = cn^H, n \rightarrow \infty \quad (9)$$

gdzie R oznacza rozpiętość (zakres) dla każdego podciągu o długości n , S oznacza odchylenie standardowe dla wycinka danych o długości n , c - stałą dodatnią, n - ilość obserwacji, H - wykładnik Hursta. H obliczamy z zależności logarytmicznej

$$\ln E \left[\frac{R(n)}{S(n)} \right] = \ln c + H \ln n \quad (10)$$

rysowanej w podwójnie logarytmicznej skali $E [R(n)/S(n)]$ jako funkcja n i estymowany jako nachylenie linii prostej.

Zbyt małe wielkości n czynią wynik antypersystentny, a wartość wykładnika będzie błędna. Jednocześnie długie okna przy zbyt małej ilości danych mogą również utrudniać estymację H . Tym samym dobór ilości danych powinien być rozsądny. Wykładnik Hursta pełni ważną rolę w teorii fraktalnej, będąc jedną z najpopularniejszych miar persystencji.

- Wartość $H = 0.5$ oznacza, że szereg ma cechy ruchu Browna. Wszystkie obserwacje są statystycznie niezależne. Otrzymujemy nieskorelowany proces stochastyczny.
- Wartości $0 < H < 0.5$ oznaczają szereg antypersystentny (ergodyczne), zbiegający do średniej. Wzrost w przeszłości sugeruje spadek w kolejnych chwilach i na odwrót.
- Wartości $0.5 < H \leq 1$ oznaczają szereg persystentny, tj. wzrost w przeszłości wskazuje na dalszy wzrost w kolejnych chwilach i analogicznie dla spadków. Szereg taki zwany jest cząstkowym ruchem Browna (ang. *fractional Brownian motion*)
- O wartościach jeszcze większych, tj. $1.0 < H < 1.5$ mówi się, że nie wykazują zależności w dziedzinie czasu.

Z formalnego punktu widzenia H powinien leżeć pomiędzy 0 a 1 , jednakże jego pomiar często bywa problematyczny. Zdarza się, że zależności w danych są tak złożone (trendy, okresowości, zmienności) lub ich uszkodzenia są tak poważne, że konwencjonalne algorytmy wyznaczania doprowadzają do estymacji wykładnika większej od 1 . Powyższa dyskusja odnosi się również do zależności pomiędzy wykładnikiem Hursta, a współczynnikiem stabilności Lévy’ego. W ogólności przyjmuje się, że $H = 1/\alpha$ [89]. jednak zależność ta spełniona jest tylko w określonym zakresie i niestety nie zawsze. Wielokrotne długo-okresowe korelacje o różnych amplitudach są uważane za jedną z takich przyczyn. W literaturze można znaleźć inne miary persystencji zależne od wykładnika Hursta, jak np. korelacja fraktalna

$$C = 2^{(2H-1)} - 1 \quad (11)$$

lub rozmiar fraktalny

$$D = 2 - H. \quad (12)$$

Metoda wykorzystująca wykres długo-zasięgowy R/S stanowi klasyczny algorytm wyznaczania wykładnika Hursta. Jej zaletą jest nie tylko wgląd w zależności w danych i obserwacje spełniania prawa potęgowego, ale również możliwość wyznaczania wielu wykładników w różnych skalach zasięgu oraz oddzielających je punktów przełamania (ang. *crossovers*). W literaturze możemy znaleźć wiele algorytmów estymacji wykładnika (chronologicznie): Periodogram [11], Higuchi (Fractal Dimension Method) [14], Haslett and Raftery [16], wavelet-based analysis [17], Boxed lub Modified Periodogram Method [18], Aggregated Variance Method [82], Index of Dispersion for Counts [19], Detrended Fluctuation Analysis [20], estymator największej wiarygodności Whittle’a [82], Absolute Value Method [22], Differential Variance [27], etc.

Jak widać istnieje bogactwo metod estymacji wykładnika Hursta. Niestety żadna z tych metod nie jest uniwersalna i cechuje się własnym zakresem stosowalności. Temat ten jest często spotykany i szeroko dyskutowany w literaturze [30, 34, 46, 58, 60]. Z punktu widzenia jednotematycznego cyklu prac tematyka ta jest poboczna, niemniej z punktu widzenia inżynierskiego warto byłoby rozważyć wybór rozsądnego podejścia. W pracy [H3]

zostało dokonane porównanie wybranych najpopularniejszych metod estymacji wykładnika Hursta dla danych regulacyjnych.

Podsumowanie rezultatów dla danych z rzeczywistych pętli regulacji pozwała sformułować wniosek o słabej zgodności poszczególnych estymatorów. Ostatecznie metody podzielono na trzy grupy, choć trzeba sobie zdawać sprawę, że być może podział ten nie zawsze obowiązuje:

1. metody Absolute Value, Aggregated Variance oraz Higuchi,
2. metody Periodogramów (klasyczna i zmodyfikowana) oraz Differential Variance,
3. metoda bezpośrednia z wykresu przeskalowanego zasięgu R/S i metody z rodziny Detrended Fluctuation Analysis.

Jak to zostało określone w [46] estymowanie wykładnika Hursta to w dużej mierze *hit and miss game*. Należy być ostrożnym i uważnym oraz nie polegać na jednym estymatorze. Co najważniejsze, odniesienie do wykresu R/S powinno być zawsze weryfikowane. Istnieje wiele różnych hipotez tłumaczących brak zgodności, jak np. charakter powiązań, zakłóceń lub też wewnętrznych korelacji. Autor skupił się na wielo-persystencji, jako aspekcie ważnym z punktu widzenia szeregów uchybów sterowania. Wymienione wyżej metody w głównej mierze pozwalają wyliczyć pojedynczy wykładnik Hursta. Natomiast w przypadku danych inżynierskich okazuje się, że pojedyncze nachylenie wykresu R/S jest rzadkie.

jedna skala		wiele skalowań	
ilość pętli	udział [%]	ilość pętli	udział [%]
109	27%	246	70%

Tabela 1: Ilość i udział pętli dla jednej i wielu skal w zakresie

W Tabeli 1 pokazano rozdział wyników. Należy zwrócić uwagę, że ilość pętli nie sumuje się do 100%, ponieważ są przypadki dyskusyjne o niejasnym charakterze wykresu R/S. Niemniej widać, że tylko $\sim 30\%$ może być traktowana jako posiadająca pojedynczy wykładnik Hursta (przykład – Rysunek 4a). Znacznie częściej otrzymujemy dwa lub więcej. Pominięcie wielokrotnych skal podczas estymacji wykładnika prowadzi do obciążenia wyników [42]. Obserwowane sytuacje odzwierciedlają jakieś zjawiska. Zatem należy przeprowadzić analizę w celu identyfikacji znaczenia ilości występujących wykładników, ich wartości oraz położenia punktów przełamania.

Wielokrotne skale wraz z rozdzielającymi je punktami przełamania odzwierciedlają dychotomię zjawiska skalowania. Istnieje kilka przyczyn istnienia wielu skal. Mogą one wynikać z addytywnego nałożenia się na siebie nieliniowości oraz wielu zakłóceń pochodzących z innych źródeł i o różnych opóźnieniach (analogia z modelami sieciowymi w telekomunikacji) [62].

Druga przyczyna może wynikać z faktu, że uchyb regulacji zawiera fluktuacje spowodowane przez powiązane zakłócenia pojawiające się z różnymi opóźnieniami. Wykładnik Hursta dla najkrótszej skali (pierwszy) zależy od lokalnych zależności o krótkiej pamięci,

czyli jakości zestrojenia, niedopasowanej filozofii sterowania, zmienności wartości zadanej czy też szumów pomiarowych. Dalsze, tj. drugi i trzeci wykładnik najpewniej uzależniony jest od wpływów w okresach dłuższych, uzależnionych od środowiska w którym pracuje instalacja (zakłócenia pochodzące z innych fragmentów instalacji, zmienność pogody, itp.). Im obiekt jest bardziej skomplikowany i mocniej uzależniony od warunków zewnętrznych, tym efekt ten wpływa więcej na zależności R/S.

Trzecia przyczyna najpewniej uzależniona jest od natury sterowania jako takiego oraz idei sprzężenia zwrotnego. Charakter prowadzenia regulacji, tzn. powiązanie nadążania i tłumienia zakłóceń ma również istotny wpływ. Obserwacje otrzymywanych charakterystyk długo-okresowych zdecydowanie pokazują istnienie trzech dominujących wariantów: jeden, dwa lub trzy wykładniki (odpowiednio zero, jeden i dwa przełamania).

Kolejnym aspektem wykresu R/S są osiągane wartości wykładników. Analiza pozwala wyróżnić trzy szczególne, najczęściej występujące scenariusze: **scen_1** o dwu wykładnikach i $H^{(1)} > H^{(2)}$ (Rysunek 4b), scenariusz przeciwny, tzn. **scen_2** i $H^{(1)} < H^{(2)}$ (Rysunek 4c) oraz wykres z trzema wykładnikami (**scen_3**) wraz z $H^{(1)} > H^{(2)}$ i $H^{(2)} < H^{(3)}$ (Rysunek 4d). Statystyczny udział pętli w danych pokazany jest w tabeli 2.

scen_1		scen_2		scen_3	
ilość pętli	udział [%]	ilość pętli	udział [%]	ilość pętli	udział [%]
190	67%	49	17%	43	15%

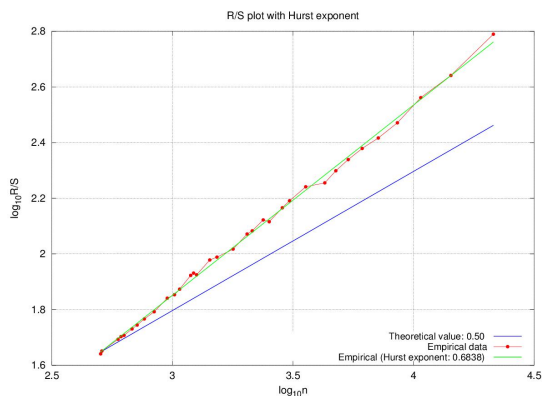
Tabela 2: Charakter zaobserwowanych scenariuszy

Widać, iż scenariusz **scen_1** występuje kilka razy częściej, niż pozostałe. Co ciekawsze obserwujemy, że praktycznie zawsze $H^{(1)} > 0.5$, podczas gdy $H^{(2)} \approx 0.5$ i ma tendencję zbliżania się do szeregu niezależnego. Wyniki te są w zgodzie z wcześniejszymi hipotezami. Pierwszy wykładnik $H^{(1)}$ odzwierciedla dynamiczną jakość dostrojenia oraz lokalne zakłócenia procesowe, podczas gdy drugi $H^{(2)}$ pokazuje długookresowy charakter pracy obiektu, gdy nawet kiepsko zestrojone pętle w końcu stabilizują proces [H3, H5] [33]. Wyniki znalazły swoje potwierdzenie również w analizach symulacyjnych, zarówno dla regulatora PID jak i GPC [H9].

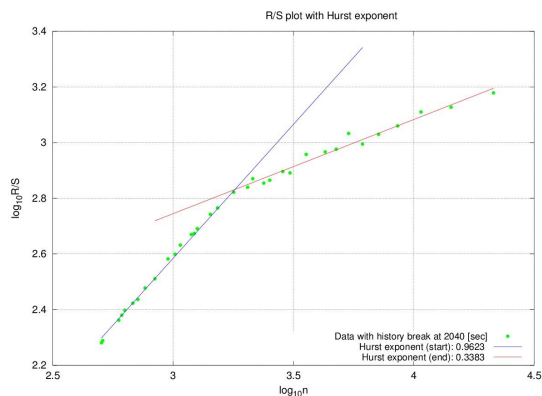
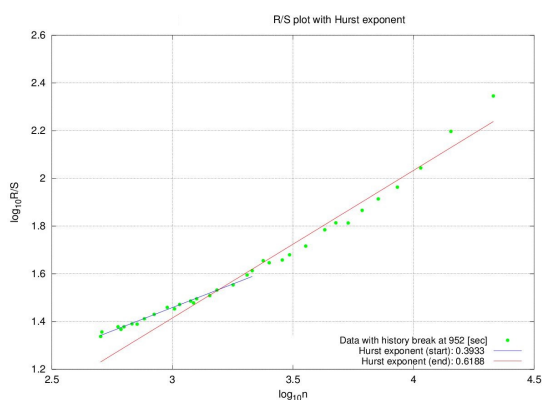
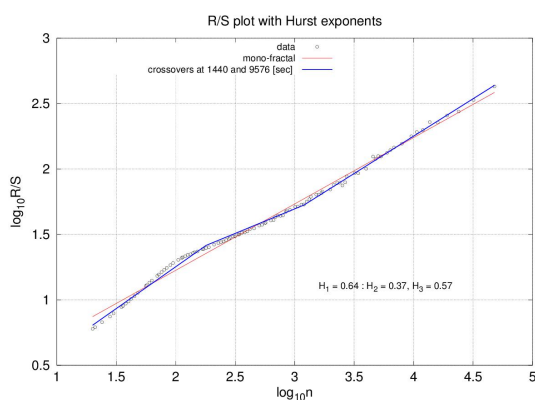
Przeciwny scenariusz **scen_2** jest również zgodny z powyższym: $H^{(1)} < 0.5$, podczas gdy analogicznie jak poprzednio $H^{(2)} \approx 0.5$. Podsumowując oba przypadki otrzymujemy persystentny lub antypersystentny charakter zależności w krótkiej skali, zaś w długiej zbliżamy się do niezależnych realizacji ruchu Browna. Podążając za hipotezą zaproponowaną w [74] zachowanie persystentne $H > 0.5$ oznacza zbyt powolnie, asekuracyjnie zestrojony regulator, podczas gdy właściwości antypersystentne określają zbyt szybki, agresywny zestaw parametrów regulatora.

Analizy prowadzone przez autora, zarówno dla danych rzeczywistych jak i symulacyjnych oraz dla różnych układów sterowania potwierdzają tę ogólną hipotezę. Niemniej głębsze obserwacje zwróciły uwagę na wartość wykładnika dla dobrze zestrojonego sterownika. Autorzy [72, 74] przyjmują $H = 0.5$.

Jednakże dokładne obserwacje większej ilości różnych danych, symulacyjnych oraz rzeczywistych, sugerują ostrożniejszą interpretację [H2]. Należy sobie zdawać sprawę, że na wartość H wpływ ma nie tylko regulator, ale i obiekt oraz ewentualnie charakter zakłóceń



(a) Przypadek z jednym wykładnikiem

(b) Przypadek podwójny **scen_1**(c) Przypadek podwójny **scen_2**(d) Przykład potrójny **scen_3**

Rysunek 4: Różne przykłady zależności R/S dla uchybów sterowania

procesowych. Również pojęcie idealnego regulatora jest względne. Czasami optymalne nastawy faworyzują wolniejszą pracę, a w innych przypadkach pożądana jest regulacja agresywna z przeregulowaniem. Tym samym pojęcie regulacji idealnej oraz odpowiadającej jej wartości wykładnika Hursta nie może być upraszczane do $H^{ideal} = 0.5$. Każda pętla powinna być rozważana oddzielnie. Otrzymane obserwacje danych wskazują raczej na wartości bliższe $H^{ideal} \approx 0.6$.

Scenariusz o trzech wykładnikach **scen_3** jest zbliżony do scenariusza **scen_1**, tzn. $H^{(1)} > 0.5$ i $H^{(2)} \approx 0.5$. Pojawia się jeszcze $H^{(3)} > 0.5$ znowu zdecydowanie persystentny. Wy tłumaczenie dla pierwszych dwu skal jest analogiczne. Charakter najdłuższej skali uwzględnia zakłócenia bardzo długo-okresowe, jak na przykład wpływy pogodowe (część danych pochodzi z przemysłu chemicznego, gdzie ten wpływ jest istotny). Podobne obserwacje zostały zauważone również w innych dziedzinach nauki, jak medycyna [21], biomechanika [48], hydrologia [29].

Podsumowanie otrzymanych wniosków pozwala postawić hipotezę, że wykładnik Hursta może w konstruktywny sposób pomóc w ocenie jakości regulacji a nawet pozwolić określić zewnętrzne wpływy, jak korelacje, zakłócenia, opóźnienia. Z punktu widzenia podstawowego, tzn. oceny jakości sterowania najistotniejszy jest pierwszy (krótka skala)

wykładnik Hursta. W pewnym sensie stanowi on analogię przeregulowania. To on informuje o zestrojeniu układu i jego dynamicznych odpowiedziach. Zatem podczas analizy fraktalnej powinniśmy narysować histogram a potem wykres zależności długookresowej R/S. Jeśli mamy do czynienia z jednym nachyleniem, możemy wykorzystać dowolną metodę estymacji wykładnika i analizować jego wartość zgodnie w przedstawionym wyżej wskazówkami ilościowymi. Gdy mamy dwie lub więcej skal i wyróżniamy wielokrotne wykładniki Hursta, do oceny jakości dostrojenia regulatora powinniśmy posłużyć się najkrótszym, pierwszym, wykładnikiem $H^{(1)}$.

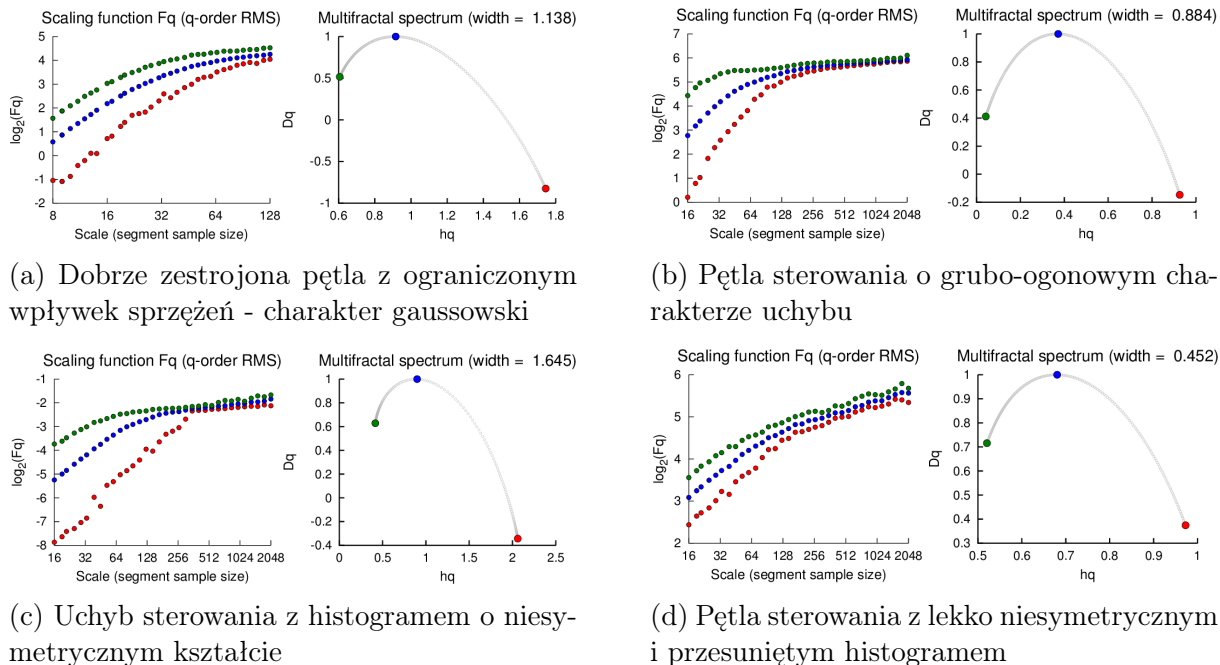
Ostatnim aspektem, który wymaga dyskusji jest zjawisko przełamania. Można wstępnie postawić hipotezę, że czas (punkt) przełamania odnosi się do potocznie rozumianego czasu regulacji. Analogie to zostały dostrzeżone w badaniach symulacyjnych. Równocześnie te same prace pokazały, że punkt przełamania może również pokazywać długookresowe zależności spoza pętli regulacji, jak na przykład charakter zmienności wartości zadanej czy też odzwierciedlać zmienność instalacji. Ciekawe są rozważania na ten temat prowadzone w innych kontekstach. Autorzy [29] badając specyfikę przepływu pakietów w internecie oraz przepływów w systemach hydrologicznych zaproponowali, że przeplatające się zjawiska przepełnienia oraz braku dopływu może *zrywać* model i właściwa natura procesu jest zakłócona. W układzie sterowania dostrzegamy analogiczne zjawiska. Nakładający się na siebie charakter zmian wartości zadanej i losowych zakłóceń, które w warunkach przemysłowych mogą się pojawiać nie w sposób ciągły a w losowych momentach, z pewnością generuje podobne efekty. Wpływ nieliniowości (nasylenia, strefy nieczułości, histerezy, tarcia, zacinania się urządzeń wykonawczych) oraz interwencje ludzkie (zmiany operatorskie, przestrojenia, przełączenia urządzeń) mogą stanowić kolejną przyczynę.

Naturalnym, kolejnym kierunkiem badań była weryfikacja tezy czy szeregi czasowe pochodzące z układów sterowania posiadają cech multifraktalne. Przeprowadzono analizę tego zagadnienia zarówno dla danych rzeczywistych jak i symulacyjnych [H5]. Pojęcie multifraktalne zostało po raz pierwszy zaproponowane oraz wykorzystane do analizy przepływów turbulentnych [6]. Miary multifraktalne pokazują występowanie takich samych nieregularności we wielu skalach czasowych. Analiza spektrum fraktalnego obejmuje przegląd różnych rozmiarów fraktalne. Pojęcie spektrum jest analogią rozmiaru fraktalnego z teorii mono-fraktalnej. Zrozumienie zjawisk multifraktalnych uzupełnia wgląd w dynamikę analizowanych procesów, czy też szeregów czasowych.

W 1997 roku model MMAR [25] (Multifractal Model of Asset Returns) został zaproponowany jako narzędzie do analizy dynamiki zmienności w danych finansowych, które bardzo często charakteryzują się grubymi ogonami oraz elementami znaczenie odstającymi od średniej (ang. *outlier*). Zjawiska analogiczne bardzo często występują w danych ekonomicznych [71]. Prace autora pokazują, że podobne efekty występują w szeregach czasowych przemysłowych uchybów regulacji.

Istnieje wiele algorytmów wspierających wyznaczenie spektrum multifraktalnego, jak Box Counting [10], Discrete Wavelet Multifractal Model (DWMM) [24], Wavelet Transform Modulus Maxima (WTMM) [17], wavelet leaders [53] i Multi-Fractal Detrended Fluctuation Analysis (MF-DFA) [33]. Ten ostatni, w wersji zaproponowanej w [61] – MF DFA1, został wykorzystany w pracach autora. Przykładowe spektra multifraktalne dla tych samych danych co na Rysunkach 2 i 3 są zamieszczone na Rysunku 5. Wykresy

te pokazują zależność wariancji $F_q(s)$ rzędu q zarówno dla wartości dodatnich i ujemnych q dla każdego zasięgu (rozmiaru) s w podwójnej skali logarytmicznej oraz spektrum multifraktalne $f(\alpha)$.

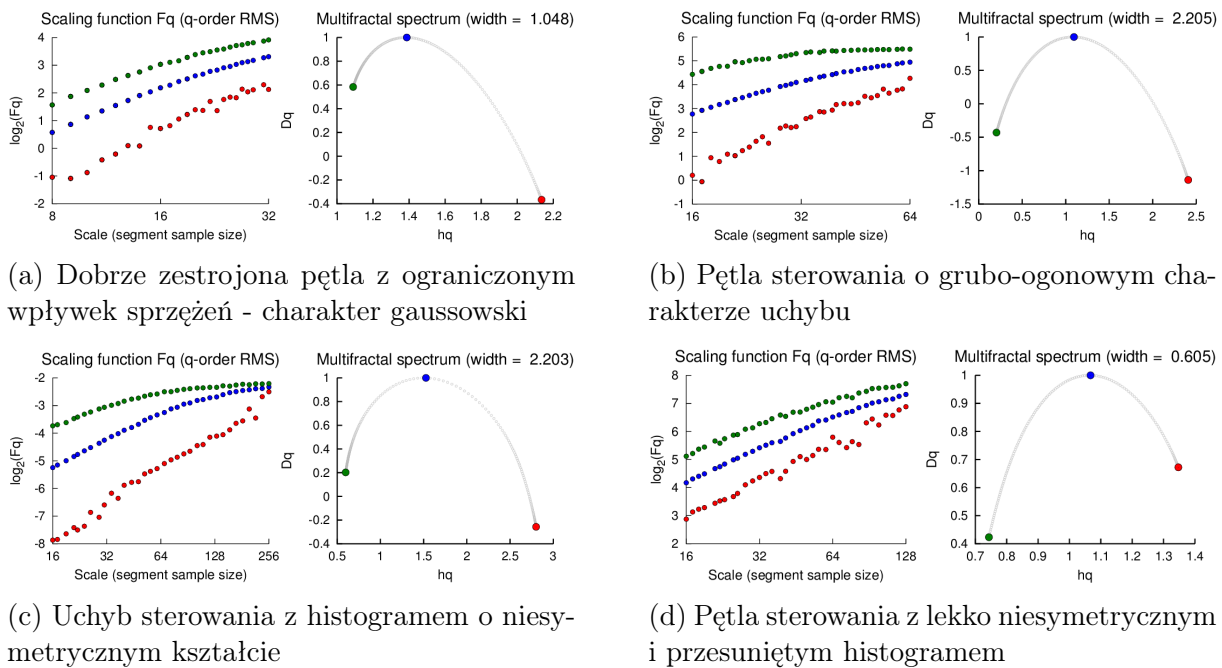


Rysunek 5: Wykres $\log(F_q)$ od $\log(s)$ oraz spektrum multifraktalne

Obserwacje danych pozwalają potwierdzić istnienia zjawiska przełamania również w analizie multifraktalnej. W ramach dalszych analiz rozważane były przyczyny występowania tych zjawisk. Podążając za wynikami wcześniejszych analiz, rozważane dalej powinny być spektra dla krótszej skali (Rysunek 6).

Obserwacje potwierdzają hipotezę istnienia zjawisk multifraktalnych. Widać również, że zmienne o gorszych własnościach histogramu (grube ogony czy też niesymetryczny, *poszarpany* kształt) odzwierciedlających gorszą regulację mają spektrum szersze. Niestety dane służące do analizy w skali krótko okresowej bazują na ograniczonej ilości danych. Ograniczenia te wynikają z okresu próbkowania danych podczas archiwizacji oraz dynamiki procesu. Większa ilość próbek poprawia wiarygodność analizy oraz osiągane wyniki. Zatem potrzebna jest jak największa gęstość próbkowania, szczególnie dla procesów o szybkiej dynamice i niskiej wartości czasu przełamania. Niestety może to być trudne w warunkach rzeczywistych.

W literaturze wyróżniane są dwa podstawowe źródła zjawisk fraktalnych: korelacje wewnętrzne oraz szerokość funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Testem korelacji jest przemieszanie danych i powtórny test, natomiast walidacja szerokości rozkładu polega na usunięciu z danych elementów odległych od średniej. Analizy pokazują, że głównym źródłem efektu multifraktalnego są korelacje a efekt ten jest bardziej widoczny w dłuższych skalach. Okazuje się, że usunięcie elementów odstających od średniej nie zmienia (a wręcz pogarsza) co oznacza, że elementy odstające przynależą do tych samych zakresów skali. Analogiczny efekt był dyskutowany w naukach naturalnych i społecznych [54], [31].



Rysunek 6: Wykres $\log(F_q)$ od $\log(s)$ oraz spektrum multifraktalne dla krótkiej skali

Analiza danych symulacyjnych nie potwierdza hipotezy multifraktalnej. Jest to istotny rezultat. Oznacza on, że zjawisko multifraktalne nie może być prosto odtworzone w warunkach symulacyjnych i oznacza wysoką komplikację procesu rzeczywistego i bardzo prawdopodobny wpływ ludzki (działania operatorskie).

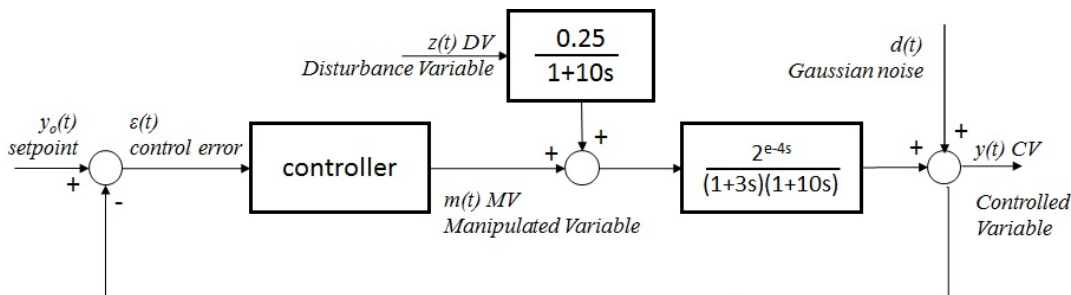
Na koniec niniejszej części należy wspomnieć o innym aspekcie badań. Powyższe zjawiska są ewidentnie rozpoznawalne w danych rzeczywistych pochodzących z procesów przemysłowych. Co gorsza nigdy nie mamy pełnej informacji o rzeczywistych czynnikach oraz skali ich oddziaływań. Symulacyjne odtworzenie przemysłowego środowiska jest praktycznie niemożliwe, co widać szczególnie w przypadku analizy multifraktalnej. Można jedynie próbować weryfikować pojedyncze hipotezy proponowane podczas obserwacji rzeczywistości. A ta jest trudna, jako że nie zdarza się, aby właściciel instalacji umożliwił eksperymenty na *żywym obiekcie*.

Badacz zmuszony jest ograniczyć się do dostępnej fragmentarycznej informacji. Zatem im więcej badań rzeczywistych będzie przeprowadzonych, im większe zbiory danych są dostępne oraz większą informacją o procesach dysponujemy, tym większe są szanse na konstruktywne hipotezy i ich racjonalne oraz wiarygodne tłumaczenia. Kolejny rozdział stanowi opis prac zaplanowanych i zrealizowanych w tym celu.

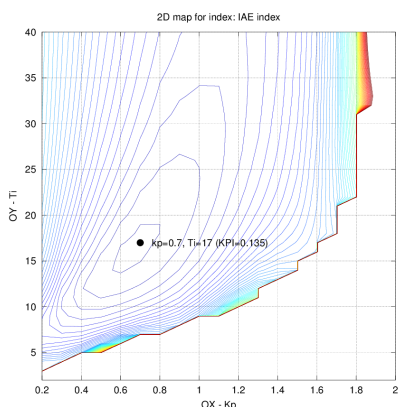
4.4 Stosowalność dla regulatora PID i GPC

Hipotezy dotyczące wykorzystania niegaussowskich metod statystycznych oraz rozwiązań fraktalnych bazujących na efektach persystencji i multifraktalnych są atrakcyjne. Początkowe prace dotyczyły analiz danych rzeczywistych pochodzących z procesów przemysłowych. Obserwacje potwierdzają hipotezy, że charakter danych, z którym spotykamy się w

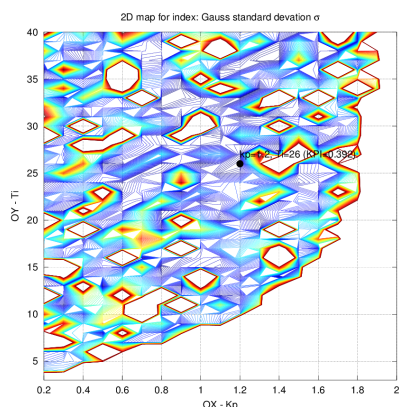
w warunkach przemysłowych jest niegaussowski. Tym samym potrzebne są alternatywne podejścia różne od standardowych. Analizy przebiegów wskazują na wyraźnie grubo-ogonowy charakter rozkładów. Idąc tym tropem, zaproponowane zostały miary oceny jakości sterowania w oparciu o współczynniki skali γ rozkładu Cauchy’ego, czy też analogicznie α -stabilnego Lévy’ego – współczynnik skali γ oraz stabilności α .



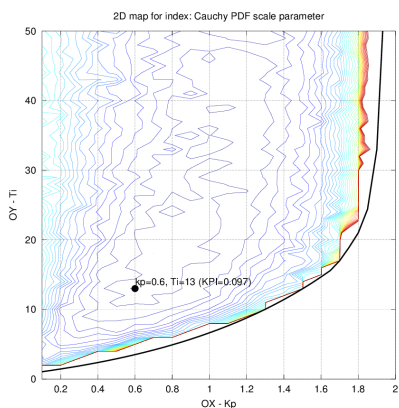
Rysunek 7: Symulacja w układzie jedнопętlowym



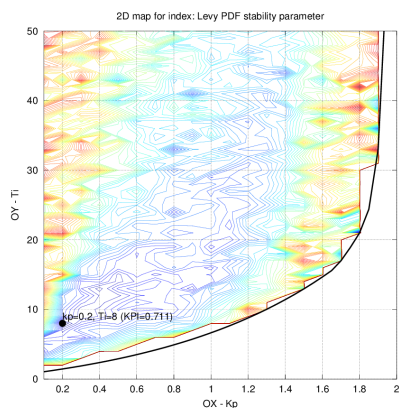
(a) Wskaźnik IAE bez zakłóceń



(b) Odchylenie standardowe z zakłóceniem



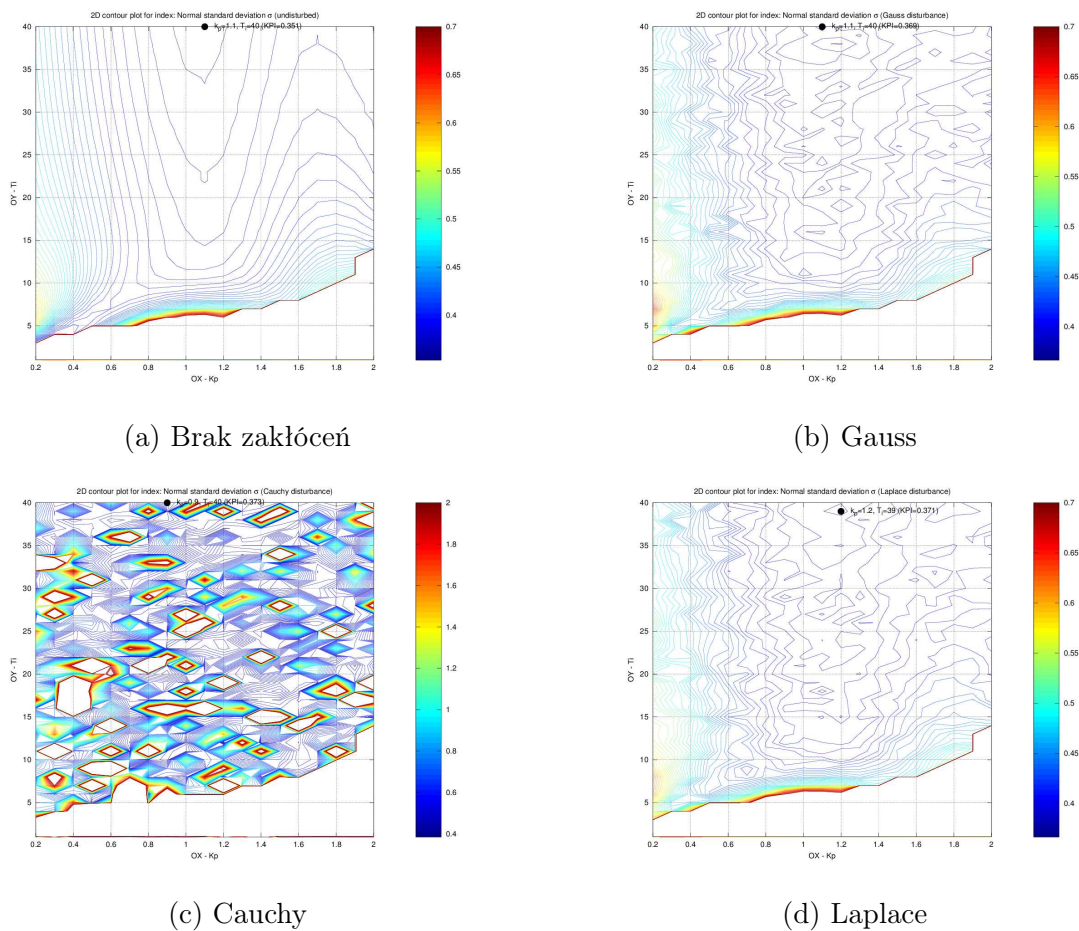
(c) Czynn timer skali (Cauchy) z zakłóceniem



(d) Czynn timer stabilności (Lévy) z zakłóceniem

Rysunek 8: Przestrzenie parametrów dla regulatora PI

Analizy wskazały występowanie w danych prawa potęgowego i skierowały badania w stronę analiz fraktalnych. Parametry wykresu zależności długookresowych R/S ukazały związek jego parametrów z charakterem sterowania. Po drugie pokazano częsty charakter multi-persystentny szeregów czasowych uchybu regulacji. Okazuje się, że wykładnik Hursta dla najkrótszej skali odzwierciedla jakość sterowania – analogia z przeregulowaniem. Wykładniki dla większych zakresów oddziaływania pokazują charakter oddziaływań zewnętrznych, niezależny od dynamicznej jakości sterowania. Czas przełamania odnosi się do czasu regulacji. Finalnie analiza multifraktalna pokazuje, że takie zjawiska występują w danych rzeczywistych. Ich przyczyna to w głównej mierze skomplikowanie procesu i wewnętrzne korelacje, nie zaś szerokość funkcji rozkładu, czyli nie jakość sterowania.

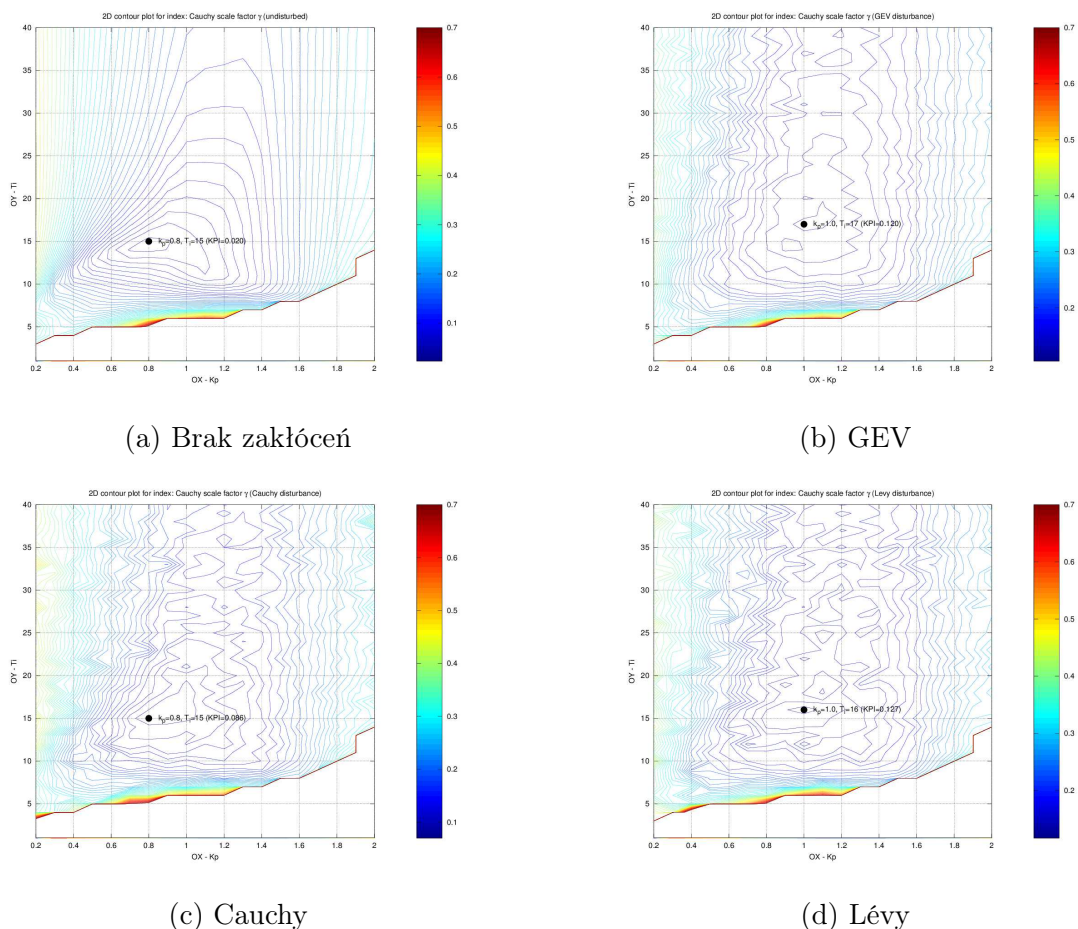


Rysunek 9: Rysunek konturowy dla odchylenia standardowego σ

Niestety analiza danych rzeczywistych nie pozwala na głębszą analizę przyczynowo-skutkową. Do tego potrzebna jest analiza symulacyjna. Badania takie zostały szczegółów przeprowadzone dla różnych podejść oraz algorytmów regulacji. Badania te dotyczyły jednopętlowych struktur sterowania (Rysunek 7). Zostały przeprowadzone wstępne nie-gaussowskie analizy statystyczne dla algorytmu PID (w wersji P, PI oraz PID). Jedną z głównych hipotez weryfikowanych w tej pracy była obserwacja, że charakter zakłóceń ma znaczący wpływ na detekcję jakości sterowania. Efekt ten został nazwany przez autora

zaciemnianiem zakłóceń (ang. *disturbance shadowing*).

Symulacje potwierdziły, że analizy wykorzystujące współczynniki rozkładu normalnego są skuteczne jedynie w wypadku braku zakłóceń (niski stosunek zakłócenia do sygnału), tudzież o charakterze normalnym. Selekcja metody analizy powinna opierać się o rozkład najlepiej dopasowany do danych. Najczęściej występujący charakter grubo-ogonowy ma tę cechę, że potrafi skutecznie utrudnić (*przesłonić*) detekcję. Okazało się że rozkłady Laplace'a oraz GEV są nieskuteczne w obliczu tego zjawiska. Tak samo dzieje się w przypadku rozkładu Gaussa. Jedynie parametry funkcji Cauchy'ego i Lévy'ego są odporne. Efekt ten pokazany jest na przykładowych zależnościach dla regulatora PI (Rysunek 8).



Rysunek 10: Rysunek konturowy dla współczynnika skali γ (Cauchy)

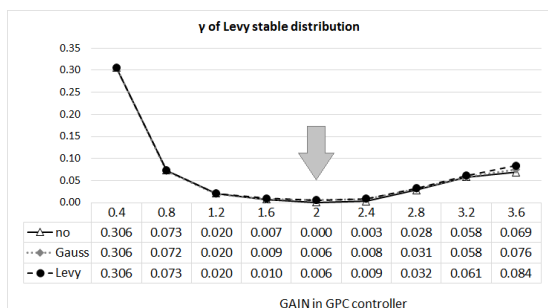
Zostało pokazane, że miara całkowita uśrednionego modułu IAE jest bardziej odporna na wpływ zakłóceń niż MSE i preferuje nastawy o niższym przeregulowaniu.

Badania pozwoliły na szczegółową analizę wpływu efektu przesłonięcia przez zakłócenia. Podczas analizy przebadane zostały różnorakie sytuacje dla sześciu różnych scenariuszy zakłóceń: bez zakłócenia, Gauss, Cauchy, Lévy, Laplace, GEV oraz Johnson. Okazało się, że analiza ilościowa wskaźników nie jest wystarczająca. Można wyróżnić dwa rodzaje kształtów powierzchni jakości regulatorów. Jeden jest zbliżony do wskaźnika MSE oraz

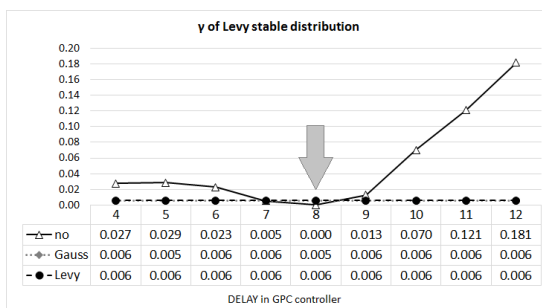
odchylenia standardowego. Drugi do miary oceny IAE i parametrów rozkładów grubo-ogonowych. Te drugie miary są bardziej odporne na zakłócenia o różnym charakterze. Poniżej zamieszczone są wykresy płaszczyzn detekcji dla odchylenia standardowego (Rysunek 9) oraz czynnika skali Cauchy’ego (Rysunek 10) przy różnych zakłóceniach.

Analogicznie do analiz dla PID, przeprowadzono badania detekcji metodami statystycznymi jakości oceny regulacji predykcyjnej [H10] GPC. Przebadano pięć hipotez odnośnie możliwości detekcji różnych wpływów przy pomocy współczynników statystycznych: wpływ zakłóceń (normalnego i grubo-ogonowego), wpływ profilu wartości zadanej, możliwość detekcji najlepszego wzmocnienia, opóźnienia i dynamiki modelu oraz doboru horyzontu predykcyj. Obserwacje poczynione podczas tych badań są następujące:

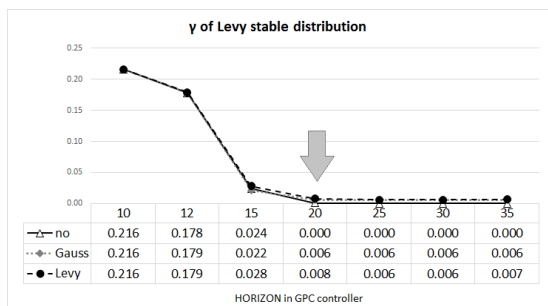
- a) Wskaźniki minimalno-wariacyjne tracą możliwość detekcji w sytuacji zakłóceń.
- b) Zauważony został wpływ kształtu wartości zadanej na skuteczność detekcji. Okazało się, że odchylenie standardowe jest obciążone przez kształt wartości zadanej. Współczynnik skali rozkładu Lévy’ego okazuje się najbardziej odporny. Równocześnie wskaźnik IAE też jest odporny.
- c) Oba odporne wskaźniki oceny są w stanie wskazać optymalne wzmocnienie i dynamikę modelu wewnętrznego regulatora GPC jak i horyzont predykcyj.
- d) Detekcja jest nieefektywna w przypadku wartości opóźnienia modelu wewnętrznego. W tym wypadku zakłócenia skutecznie zaciemniają wszelkie możliwości detekcji.



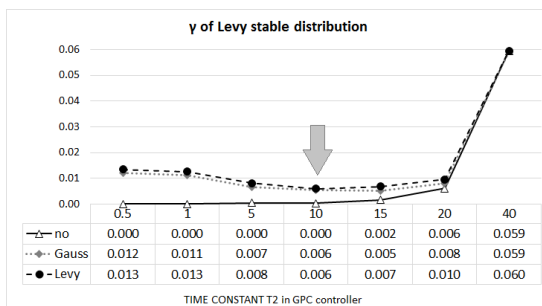
(a) Detekcja wzmocnienia



(b) Detekcja opóźnienia



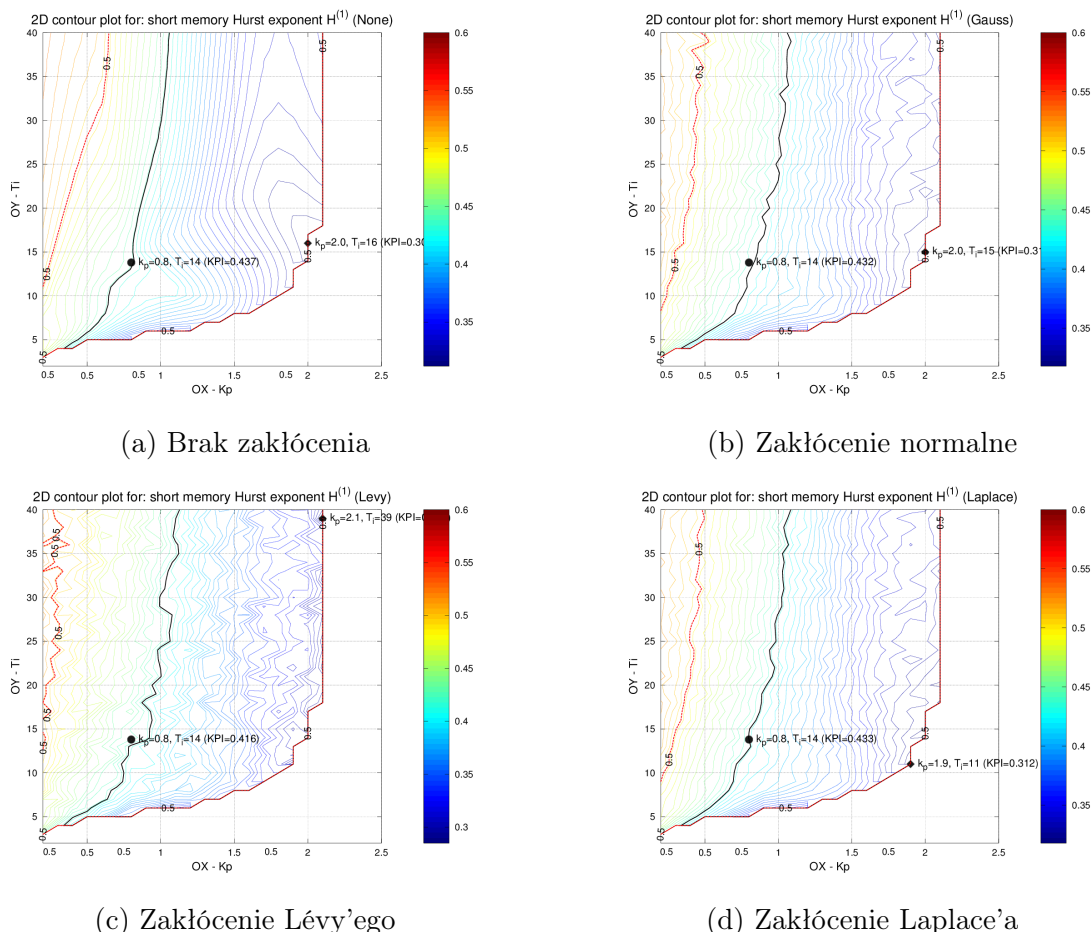
(c) Detekcja horyzontu



(d) Detekcja dynamiki

Rysunek 11: Możliwości detekcji za pomocą współczynnika skali γ

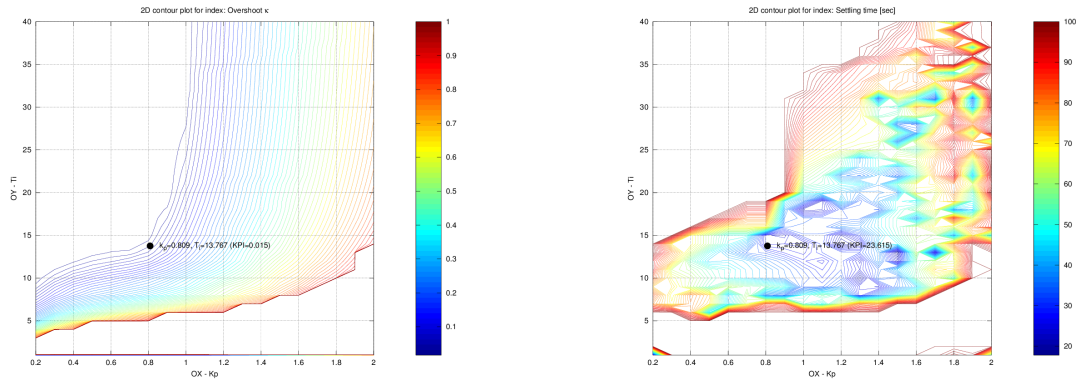
Przykładowe wykresy dokumentujące zdolność detekcji dla wskaźnika statystycznego w postaci współczynnika skali γ są zamieszczone na Rysunku 11. Wykresy te potwierdzają wcześniejsze obserwacje i wnioski. Widoczna jest poprawna detekcja.



Rysunek 12: Efekt zaciemnienia dla regulatora PID - wykładnik Hursta w krótkim zasięgu

Kolejne dwie prace objęły badaniami możliwości detekcji nastaw regulatora PID oraz predykcyjnego GPC [H9] za pomocą wskaźników fraktalnych. Metodologia działań jest analogiczna. Biorąc pod uwagę wcześniejsze analizy badania zostały skoncentrowane na wykładniku Hursta. Analogicznie jak w badaniach przemysłowych wykres zależności długookresowych cechuje się punktem przełamania i więcej niż jednym wykładnikiem. W związku z tym najciekawsza część analiz obejmuje weryfikację hipotezy, czy wykładnik Hursta o najkrótszej skali przejawia zdolność detekcji dobrych nastaw regulatora PID. Wykresy dla różnych zakłóceń pokazane są na Rysunku 12.

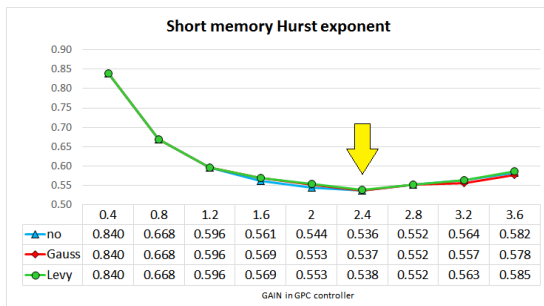
Widoczna jest odporność wykładnika na zakłócenia. Przebiegi są praktycznie identyczne. Aczkolwiek najciekawszą obserwacją jest otrzymany kształt płaszczyzn. Dla porównania zostały również przygotowane analogiczne płaszczyzny dla klasycznych miar: przeregulowania oraz czasu regulacji (Rysunek 13). Bardzo dobrze widoczny jest podobny kształt dla przeregulowania oraz wykładnika Hursta.



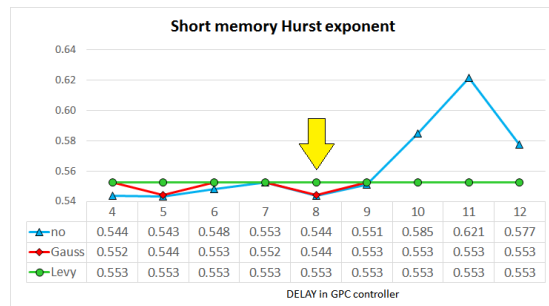
(a) Preregulowanie

(b) Czas sterowania

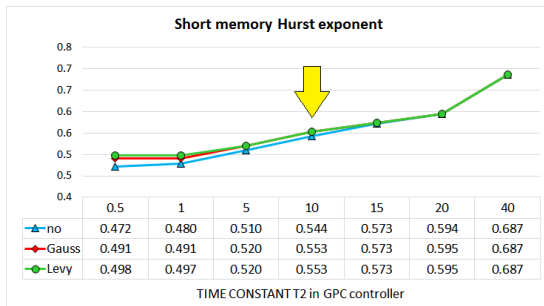
Rysunek 13: Wykresy zależności dla podstawowych wskaźników oceny sterowania



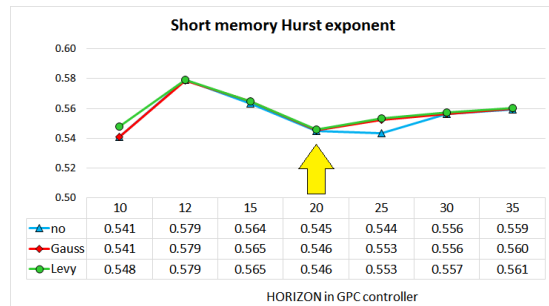
(a) Detekcja wzmocnienia



(b) Detekcja opóźnienia



(c) Detekcja dynamiki



(d) Detekcja horyzontu

Rysunek 14: Możliwości detekcji dla regulatora GPC za pomocą wykładnika Hursta

Wyniki potwierdzają wcześniejsze hipotezy. Charakter multi-persystentny przebiegu czasowego uchybu regulacji o dwu wykładnikach i jednym punkcie przełamania występuje w każdym przypadku. Potwierdzona jest główna obserwacja, że pojedynczy wykładnik Hursta jest błędnym założeniem. Zatem obserwacje będą prowadzone w krótkiej skali.

Wyniki potwierdzają wcześniejsze obserwacje na temat punktu przełamania. Pokazano, że zależy on od zewnętrznych warunków pracy pętli, jak na przykład zmienność wartości zadanej. Równocześnie wykres wykładnika Hursta o krótkim zasięgu bardzo dobrze odzwierciedla kształt płaszczyzny preregulowania. Równocześnie pokazano, że wartość

$H^{(1)} = 0.5$ nie odzwierciedla braku przeregulowania $\kappa \sim 0\%$. W rozważanym przypadku jest to wartość $H^{(1)} \approx 0.41$. Wynik stanowi symulacyjne, potwierdzenie, że *najlepsza* wartość wykładnika zależy od całego otoczenia, a w głównej mierze dynamiki układu obiekt–regulator, zakłóceń oraz korelacji wewnętrznych.

Badania również przeprowadzono dla regulatora predykcyjnego GPC. Tak jak we wcześniejszych sytuacjach, zarówno dla regulacji PID jak i GPC wykres R/S wykazuje punkt przełamania i dwa zasięgi długookresowe. Detekcja z wykładnikiem Hursta ma odmienny charakter niż w przypadku innych wskaźników. Zadanie nie polega na znalezieniu najmniejszej wartości. Literatura pokazuje, że ta wartość powinna wynosić około 0.5. Badania autora wcześniej zaprezentowane pokazują, że tak być nie musi. Wykrywanie jest możliwe dla wzmocnienia i dynamiki modelu wewnętrznego oraz horyzontu predykcji. Niestety nie otrzymano jednoznacznych wyników dla opóźnienia modelu (patrz Rysunek 14).

4.5 Niegaussowskie szacowanie zysku z usprawnienia sterowania

Zadanie szacowanie potencjalnych oszczędności z lepszej regulacji znajduje swoje odzwierciedlenie w badaniach naukowych od długiego czasu (przynajmniej od lat '80 [12]). Najczęściej wątek ten występował w połączeniu z argumentacją służącą uzasadnieniu zastosowania algorytmów automatyki zaawansowanej APC. Wypracowane rozwiązanie możemy spotkać w trzech wariantach: *same limit, same percentage* and *final percentage* [37, 49, 50]. Wszystkie one bazują na założeniu odnośnie gaussowskich właściwości zmiennej odpowiedzialnej za oszczędności.

Metoda polega na oszacowaniu rozkładu normalnego dla zmiennej procesowej, od której zależy ekonomika procesu, np. sprawność cieplna kotła zależy od temperatury spalin (strata kominowa). Szacunek oszczędności otrzymujemy za pomocą poniżej przedstawionego algorytmu [32]:

1. Wyznacz histogram zmiennej.
2. Dopasuj rozkład normalny do histogramu wyznaczając wartość średnią x_0 oraz odchylenie standardowe σ_0 .
3. Zakładamy, że wartości średnie (M_0 dla histogramu oryginalnego oraz M_1 dla rozkładu po modyfikacjach) odpowiadają rozkładom, które znajdują się w określonej i tej samej odległości od ustalonego ograniczenia (górnego bądź dolnego). Idea algorytmu polega na przesunięciu zwężonego rozkładu (poprawa sterowania oznacza zmniejszenie odchylenia standardowego) w kierunku ograniczenia.

$$M_1 = M_0 \cdot a \cdot (\sigma_0 - \sigma_1) \quad (13)$$

Przy założeniu poziomu zaufania 95% otrzymujemy wartość $a = 1.65$ wyznaczając wartość średnią rozkładu dla poprawionego systemu M_1 (13), przy czym odchylenie σ_0 dotyczy systemu oryginalnego, zaś σ_1 układu po modyfikacji.

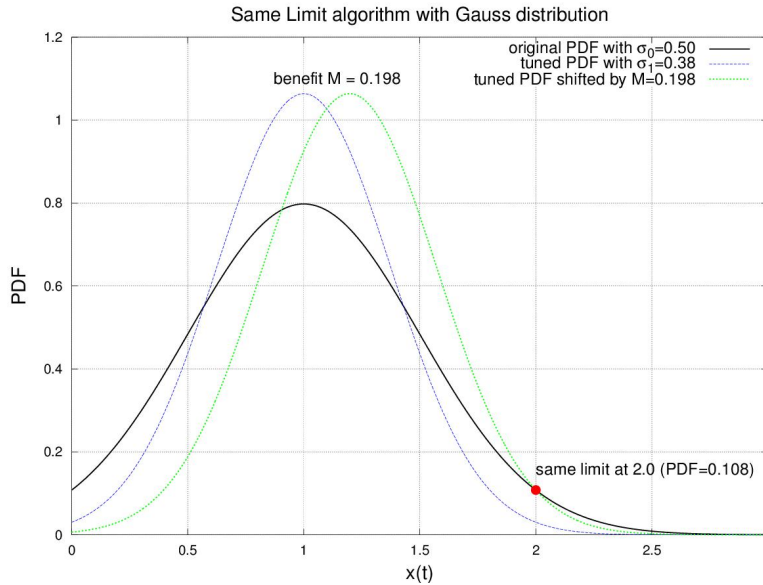
4. Ostatecznie procentowa poprawa jest wyznaczana (14).

$$\Delta M = 100 \cdot \frac{M_1 - M_0}{M_0} \quad (14)$$

Ustalmy punkt ograniczenia (dla ustalenia uwagi górnego) za pomocą parametru przesunięcia k : $x_1 = x_0 + k \cdot \sigma_0$. Lepsze sterowanie zmniejszyło szerokość rozkładu. Parametr c odzwierciedla tę poprawę i otrzymujemy $\sigma_1 = c \cdot \sigma_0$. Tym samym poprawa wynosi (15):

$$\Delta M = k \cdot \sigma_0 - c \cdot \sigma_0 \sqrt{2\left(\frac{k}{2} - \ln c\right)} \quad (15)$$

Rysunek 15 pokazuje reprezentację graficzną metody.



Rysunek 15: Metoda *same limit* dla rozkładu normalnego

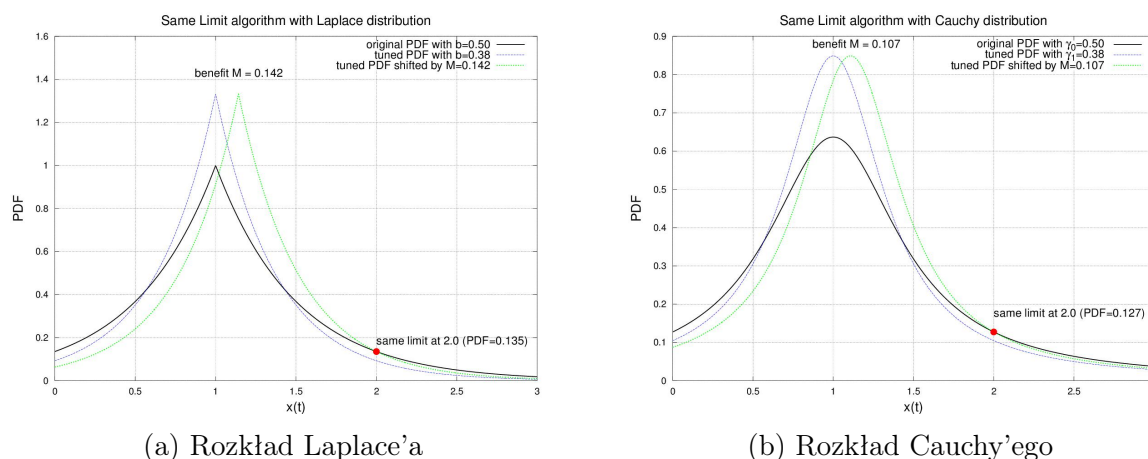
Analogiczne rozważania można przeprowadzić analitycznie dla rozkładów symetrycznych i dwu-parametrycznych Laplace'a i Cauchy'ego [H6]. W przypadku pierwszego z nich za zmienność odpowiada współczynnik skali b , zaś dla drugiego γ . Odpowiednie zależności oszacowania potencjalnej dla rozkładu Laplace'a (16) i Cauchy'ego (17) przedstawione są poniżej. Rysunki 16a oraz 16b przedstawiają odpowiednio reprezentację graficzną metod.

$$\Delta M^L = k \cdot b_0 - (c - b_0) \cdot (k - \ln c) \quad (16)$$

$$\Delta M^C = k \cdot \gamma_0 - \gamma_0 \sqrt{c(1-c)(1+k^2)} \quad (17)$$

Interesujące wyniki otrzymujemy w przypadku porównania metod. Załóżmy przykładowo $k = 2.0$, $c = 0.75$, $M_0 = 1.0$, $\sigma_0 = 0.5$ (linia ciągła czarna). Ograniczenie górne znajduje się w punkcie $x = 2.0$ dla wartości funkcji gęstości 0.106 . Poprawa szerokości rozkładu wynosi $\gamma_1 = 0.38$ (linia kreskowana niebieska). W wyniku otrzymanej zależności otrzymujemy możliwość poprawy o $\Delta M = 0.198$ linia zielona kropkowana).

Analogiczny przykład przeprowadzono dla dwu pozostałych rozkładów. Dla funkcji gęstości prawdopodobieństwa Laplace'a mamy $k = 2.0$, $c = 0.75$, $M_0 = 1.0$, $\gamma_0 = 0.5$. Wartość rozkładu dla ograniczenia wynosi 0.127 , poprawa zmienności $b_1 = 0.38$, zaś przesunięcie $\Delta M^L = 0.142$. W przypadku rozkładu Cauchy'ego otrzymujemy odpowiednio $k = 2.0$, $c = 0.75$, $M_0 = 1.0$, $\gamma_0 = 0.5$, 0.127 , $\gamma_1 = 0.38$ i $\Delta M^C = 0.107$.

Rysunek 16: Metoda *same limit* dla innych rozkładów

rozkład	ograniczenie	wartość dla ograniczenia	zysk
Gauss	$0.75 \cdot \sigma$	0.106	0.198
Cauchy	$0.75 \cdot \gamma$	0.127	0.107
Laplace	$0.75 \cdot b$	0.135	0.142

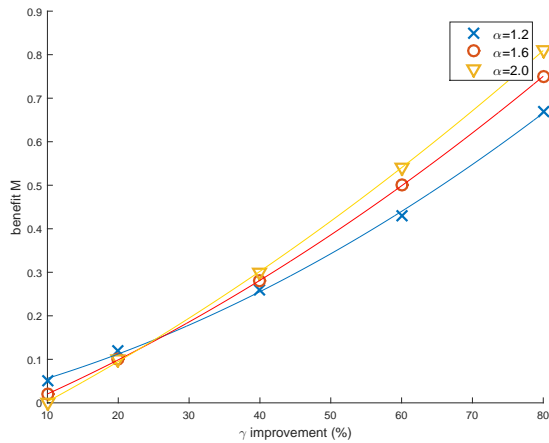
Tabela 3: Porównanie metod szacowania poprawy związanej z modernizacją sterowania

Porównanie otrzymanych wyników zaprezentowane jest w tabeli 3. Widzimy, że rozkład Gaussa daje najbardziej *optymistyczną* estymację, w przeciwieństwie do rozkładu Cauchy'ego sugerującego wynik *konserwatywny*, co z inżynierskiego punktu widzenia można nazwać rozwiązaniem *realistycznym*. Rozkład Laplace'a daje wynik pomiędzy. Warto zauważyć, że owa zwiększona estymata dla rozkładu Cauchy'ego jest omalże dwa razy większa – 85%. Jest to bardzo istotna różnica. Fakt ten można tłumaczyć znacznie grubszymi ogonami tego rozkładu w stosunku do funkcji gaussowskiej. Jest to bardzo istotny wynik. Nieuwzględnienie ogonów może skutkować znacznym prze-estymowaniem potencjału poprawy i późniejszymi problemami z uzasadnieniem niedotrzymanych zobowiązań.

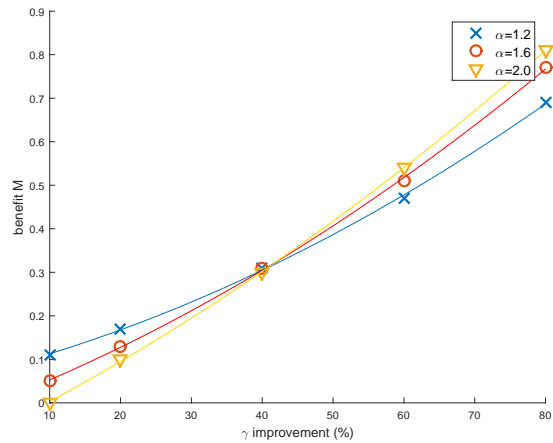
Odmienne podejście należy zastosować do rozkładu α -stabilnego. W przeciwieństwie do wcześniejszych ma on więcej stopni swobody, jako że opisany jest za pomocą czterech a nie dwu parametrów. Po drugie rozwiązanie analityczne nie jest dostępne. Tym samym wykorzystana została metoda optymalizacyjna [H11]. Większa liczba możliwych parametrów determinuje więcej potencjalnych scenariuszy.

Ewidentny jest wpływ współczynnika skali γ . Ale również parametr stabilności α oraz skośności β ma wpływ. Lepsze sterowanie nie tylko powinno zmniejszyć szerokość rozkładu, ale również sprowadzić współczynnik stabilności do wartości dla rozkładu nieskorelowanego czyli $\alpha = 2$ oraz symetrycznego, czyli $\beta = 0$.

Rozważono dwie potencjalnie możliwe sytuacje: rozkład niesymetryczny i różne scenariusze zmian stabilności w zależności od poprawy współczynnika skali (Rysunek 17) oraz analogiczne rozważania dla sytuacji, gdy jednocześnie rozkład się stał się symetryczny (Rysunek 18). Równocześnie pokazane jest kilka przykładowych zmian kształtów funkcji



Rysunek 17: Przewidywana poprawa M w funkcji współczynnika skali γ dla niezmiennego skośności $\beta = 0.1$ i różnych zmian stabilności α



Rysunek 18: Przewidywana poprawa M w funkcji współczynnika skali γ dla zmiany skośności na $\beta = 0$ i różnych zmian stabilności α

gęstości prawdopodobieństwa. Mała poprawa skali (10%) oraz brak zmiany stabilności funkcji ($\alpha = 1.2 \rightarrow 1.2$) znajduje się na Rysunku 19, podczas gdy Rysunek 20 przedstawia jednoczesną zmianę w kierunku funkcji nieskorelowanej $\alpha = 1.2 \rightarrow 2.0$. Rysunki 21 i 22 pokazują analogiczne zależności dla znaczącej poprawy skali o 80%. Podsumowanie tabelaryczne rezultatów dla przykładu asymetrycznego i symetrycznego znajduje się odpowiednio w Tabelach 4 i 5.

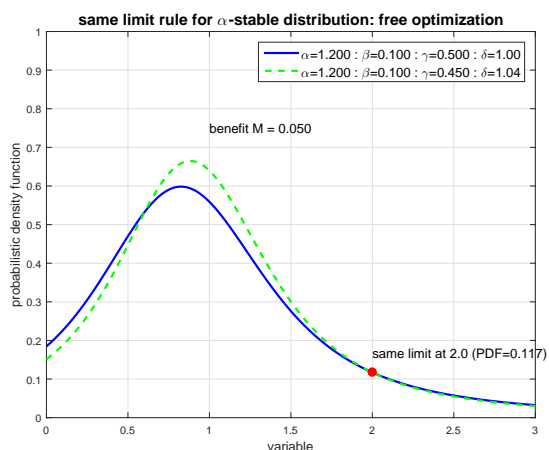
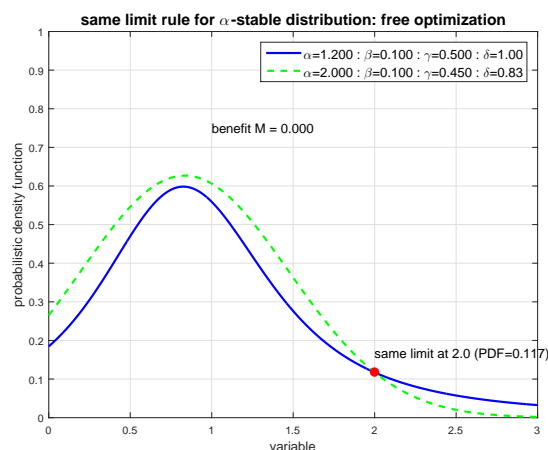
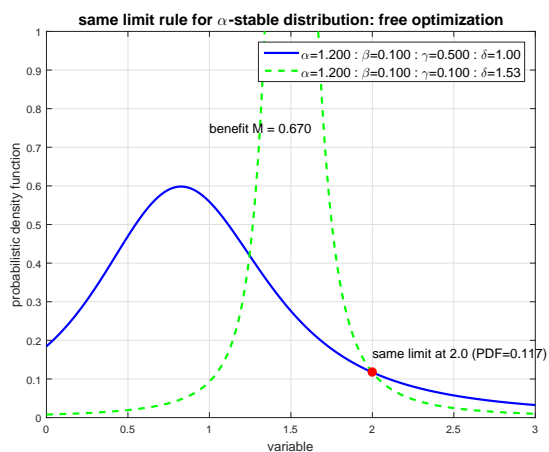
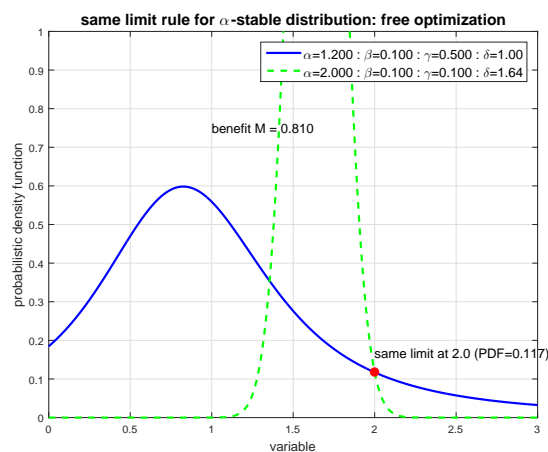
Tabela 4: Przewidywana poprawa M dla zmiany skośności na $\beta = 0$ i różnych zmian stabilności α

α	$\gamma = 0.45$		$\gamma = 0.40$		$\gamma = 0.30$		$\gamma = 0.20$		$\gamma = 0.10$	
	M	δ	M	δ	M	δ	M	δ	M	δ
1.2	0.11	0.9378	0.17	0.9979	0.31	1.1353	0.47	1.3034	0.69	1.5239
1.6	0.05	0.8760	0.13	0.9566	0.31	1.1357	0.51	1.3441	0.77	1.5954
2.0	0.00	0.8345	0.10	0.9282	0.30	1.1341	0.54	1.3691	0.81	1.6433

Tabela 5: Przewidywana poprawa M dla niezmiennego skośności $\beta = 0.1$ i różnych zmian stabilności α

α	$\gamma = 0.45$		$\gamma = 0.40$		$\gamma = 0.30$		$\gamma = 0.20$		$\gamma = 0.10$	
	M	δ	M	δ	M	δ	M	δ	M	δ
1.2	0.05	1.0396	0.12	1.0844	0.26	1.1925	0.43	1.3337	0.67	1.5313
1.6	0.02	0.8903	0.10	0.9674	0.28	1.1399	0.50	1.3427	0.75	1.5905
2.0	0.00	0.8345	0.10	0.9282	0.30	1.1341	0.54	1.3691	0.81	1.6433

Widzimy, że dla 10% zmiany γ i $\alpha = 1.2 \rightarrow 2.0$ żadna poprawa nie jest wykazywana.

Rysunek 19: 10% zmiana γ , $\alpha = 1.2 \rightarrow 1.2$ Rysunek 20: 10% zmiana γ , $\alpha = 1.2 \rightarrow 2.0$ Rysunek 21: 80% zmiana γ , $\alpha = 1.2 \rightarrow 1.2$ Rysunek 22: 80% zmiana $\gamma, \alpha = 1.2 \rightarrow 2.0$

W pozostałych scenariuszach zawsze pojawia się poprawa M . Widzimy również, że zależności na Rysunkach 17 i 18 przecinają się. Większa poprawa osiągana jest dla sytuacji persystentnych i małych popraw skali γ , podczas gdy przy dużych zmianach szerokości rozkładu lepsze rezultaty daje osiągnięcie rozkładu nieskorelowanego $\alpha \rightarrow 2$.

Powyższe wyniki pokazują, że lepsze sterowanie nie tylko da efekt poprzez proste zmniejszenie zmienności zmiennej, ale dodatkowo poprzez zmniejszenie persystencji czyli usunięcie wpływu korelacji, co może być osiągnięte np. przez odsprężnienie zakłóceń. Efekt ten będzie tym ważniejszy im lepiej zestroimy pętlę sterowania.

4.6 Podsumowanie prac

Prace składające się na jednotematyczny cykl obejmują zarówno analizy danych rzeczywistych jak i symulacyjne. Najważniejsze rezultaty są wymienione w poniższych punktach:

1. Uchyb sterowania zebrany podczas normalnej pracy pętli stanowi rozsądny sygnał

do oceny dynamicznej jakości regulacji.

2. Klasyczne metody opierające się na założeniu gaussowskiego charakteru sygnałów opisujących pętlę sterowania nie zawsze są adekwatne w warunkach rzeczywistych. Histogramy danych z przemysłu wskazują na częstsze występowanie cech gruboogonowych.
3. Silne zakłócenia występujące w procesach przemysłowych skutecznie ograniczają możliwości diagnostyki pętli regulacji – *efekt przestonienia*.
4. Współczynniki statystyczne rozkładu Cauchy’ego (parametr skali) oraz α -stabilnego (parametry skali oraz stabilności) wykazują wysoką skuteczność detekcji oraz odporność na zakłócenia. Szczególnie skala skutecznie zastępuje odchylenie standardowe.
5. Analiza fraktalna udostępnia dalsze narzędzia wspierające proces oceny sterowania. Miary persystencji, takie jak wykładnik Hursta są odporne na zakłócenia.
6. Szeregi czasowe uchybów regulacji cechują się występowaniem wielu nachyleń wykresu wpływu długookresowego R/S oraz punktów przełamania. Wykładnik Hursta jest odporny na wpływ zakłóceń.
7. Wykładnik Hursta dla krótszego zasięgu jest powiązany z dynamiczną jakością regulacji (analogia przeregulowania), wykładniki dla dłuższych zasięgów odnoszą się do długookresowych zależności zewnętrznych, podczas gdy położenie punktu przełamania uwzględnia charakter wartości zadanej oraz w pewnym sensie czas sterowania.
8. Skuteczność detekcji potwierdzono dla regulatora PID oraz dla algorytmu predykcyjnego GPC. Wybrane miary jakości umożliwiają wykrycie idealnych nastaw dla algorytmu PID oraz parametrów modelu wewnętrznego regulatora predykcyjnego: wzmocnienia, opóźnienia, dynamiki oraz wystarczającego horyzontu predykcji.
9. Przebiegi czasowe uchybów sterowania dla procesów przemysłowych posiadają charakter multi-fraktalny, który nie jest odtwarzany w badaniach symulacyjnych.
10. Należy być ostrożnym podczas szacowania potencjalnej poprawy z wdrożenia lepszego sterowania, jako w przypadku niegaussowskiego charakteru zmiennych i grubych ogonów rozkładu klasyczne podejście *the same limit* może być zbyt optymistyczne znacznie zawyżając przewidywania.
11. Analiza potencjału poprawy z wykorzystaniem rozkładu α -stabilnego potrafi uwzględnić potencjał bardziej realistycznie biorąc pod uwagę symetryzację uchybu jak też odsprzęganie zakłóceń.

Publikacje powiązane z jednotematycznym cyklem:

- [Hu1] J. Arabas, L. Białobrzęski, P. D. Domański, and K. Świrski. Advanced boiler control. In *Proceedings of IEEE International Conference on Methods and Models*

- in Automation and Robotics MMAR'98*, pages 521–526, Międzyzdroje, Polska, 1998.
- [Hu2] P. D. Domański, D. Misiurek, and K. Świrski. Superheater steam temperature control - fuzzy and neural approach. In *Proceedings of the VIth International Congress on Intelligent Techniques & Soft Computing, EUFIT'98*, pages 158–167, Aachen, Germany, 1998.
- [Hu3] P. D. Domański, A. Włoszek, M. Kucharski, D. Misiurek, and M. Rzewuski. Qualitative approach to the process modeling - fluidized bed boiler example. In *Proceedings of World Automation Congress WAC'98, 2nd Int. Symposium on Intelligent Automation and Control ISIAC'98*, pages –, Anchorage, Alaska, 1998.
- [Hu4] R. Neelakantan, P. D. Domański, and K. Świrski. Hybrid neural network model based control of a coal fired boiler. In *PowerGEN International '98*, Orlando, Florida, 1998.
- [Hu5] J. Gabor, D. Pakulski, P. D. Domański, and K. Świrski. Closed loop nox control and optimization using neural networks. In *IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control 2000*, pages 141–146, Brussels, Belgium, 2000.
- [Hu6] P. Schultz, Z. Golenia, J. Grott, P. D. Domański, and K. Świrski. Advanced emission control. In *Proceedings of Power GEN Europe 2000 Conference*, pages 171–178, Helsinki, Finland, 2000.
- [Hu7] J. Arabas and P. D. Domański. Soft computing for energy sector: from the lowest cost production to the best sale price. In *Materiały VI Krajowej Konferencji KAEiOG 2003*, pages 21–32, Łągów Lubuski, Polska, 2003.
- [Hu8] R. Jankowski, P. D. Domański, and K. Świrski. Optimization of a coal mill using a mpc type controller. In *Proceedings of IMECE'03, ASME International Mechanical Engineering Congress*, pages 1–11, Washington D.C., 2003.
- [Hu9] P. D. Domański, S. Plamowski, M. Warchoł, and K. Świrski. Sensor validation and recovery. In *Proceedings of International Conference on Complex Systems Intelligence and Modern Technological Applications CSIMTA'04*, pages 766–771, Cherbourg, France, 2004.
- [Hu10] P. D. Domański. Optimization projects in industry - much ado about nothing. In *Materiały VIII Krajowej Konferencji KAEiOG 2005*, Korbielów, Polska, 2005.
- [Hu11] K. Świrski, P. D. Domański, and J. Arabas. Predykcijny regulator z wewnętrznym modelem do ciągłej optymalizacji procesów przemysłowych. *Patent RP: PL 191344 B1*, 05 2006.
- [Hu12] R. Leimbach, W. Bratek, and P. D. Domański. Advanced modelling techniques to optimize steam temperature. In *Proceedings of 53rd Annual ISA-POWID Conference*, Summerlin, Nevada, 2010.

- [Hu13] P. D. Domański, R. Jankowski, and T. Lin. Achieving low NO_x levels with the combustion manager. In *Pennwell Conference Power-GEN Europe 2012*, Köln, Germany, 2012.
- [Hu14] P. D. Domański, J. Leppakoski, and E. Durando. Towards efficiency improvement of bagasse combustion in grate-fired boilers. In *Pennwell Conference PowerGEN Brazil 2013*, Sao Paulo, Brazil, 2013.
- [Hu15] P. D. Domański. Towards efficiency improvement of multifuel grate-fired boilers. In *Pennwell Conference Power-GEN Europe 2014*, Köln, Germany, 2014.
- [Hu16] P. D. Domański, S. Golonka, R. Jankowski, P. Kalbarczyk, and B. Moszowski. Nowoczesne struktury automatyki bazowej a poprawa efektywności ekonomicznej instalacji chemicznej. In *XXI Sympozjum Naukowo-Techniczne Chemia 2015*, Płock, Polska, 2015.

5 Omówienie pozostałej działalności naukowo-badawczej

5.1 Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych innych niż przedstawione w punkcie 2

W niniejszej części dokumentu zawarto opis najważniejszych wyników prac naukowo-badawczych niepowiązanych bezpośrednio z problematyką poruszana w pracach należących do jednotematycznego cyklu publikacji. Po rozprawie doktorskiej prace prowadzone były dwu wątkowo. Z jednej strony kontynuowana była działalność naukowa, ze szczególnym ukierunkowaniem na rozwiązania automatyki zaawansowanej wykorzystujące metody typu *soft computing* oraz wykorzystanie w tych układach metod ewolucyjnych [P28, P38].

Drugi wątek obejmuje działalność przemysłową. Prace te rozpoczęły się od analizy zagadnień związanych z projektowaniem, implementacją oraz oceną układów automatyki zaawansowanej opierającej się o struktury regulacji predykcyjnej MPC w energetyce ciepłej. Podstawowy nurt działań dotyczył stosowania układu regulacji predykcyjnej z nieliniową optymalizacją (NO) zastosowany do dynamicznego obniżania emisji tlenków azotu NO_x w kotle pyłowym typu OP-650 o mocy elektrycznej 200 MW [P22, P30]. Układ ten został pomyślnie zastosowany na trzech blokach Elektrowni Ostrołęka. Struktura optymalizacji dynamicznej została wkomponowana w sposób nadzorczy do istniejącej struktury regulacji wykorzystującej jedno- i dwu-pętlowe regulatory PID. Jej działanie umożliwiło znaczące obniżenie emisji tlenków azotu metodami wtórnymi poprzez optymalną dystrybucję paliwa i powietrza w komorze spalania.

W kolejnych wdrożeniach prace te zostały skutecznie rozszerzone na inne aspekty procesu spalania, tj. zwiększanie sprawności [P33, P35, P40] czy też inne rodzaje emisji (SO_2 , emisje widzialne) [P36, P42]. Podejście sprawdzone na polskich blokach energetycznych w następnej kolejności z sukcesem przeniesiona za granicę, z pierwszymi wdrożeniami na rynku amerykańskim (FP&L, MidAmerican, Midwest).

Pierwsze rozwiązania bazowały na obcej licencjonowanej technologii regulatora MPC [P21], [Hu4]. Doświadczenia wdrożeniowe oraz naukowe umożliwiły zaprojektowanie, zbu-

dowanie i przetestowanie własnej autorskiej technologii, która stanowiła podstawę późniejszych wdrożeń [Hu6].

Zaproponowane podejście pomyślnie wdrażano również na innych rodzajach kotłów węglowych, jak cyklonowe, z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym [P41, P48, P66, P70] oraz rusztowe [P67]. Rozwiązanie również implementowano na kotłach opalanych innymi rodzajami paliwa jak węgiel brunatny, gaz ziemny, olej, czy też biopaliwa. Podsumowaniem tego etapu działań jest patent [Hu11] na „*Predykcyjny regulator z wewnętrznym modelem do ciągłej optymalizacji procesów przemysłowych*”. Analogiczne, predykcyjne podejście do regulacji, zostało również pomyślnie zastosowane do innych procesów, jak na przykład optymalizacja młyna węglowego [P51].

Naturalnym przedłużeniem tych badań było stosowanie innych struktur automatyki zaawansowanej. Kontynuacją badań zawartych w przewodzie doktorskim była analiza stabilności wieloobszarowych rozmytych układów regulacji [P24, P34]. Jednocześnie autor uczestniczył w pracach rozwijających ten kierunek w stronę wypracowania lepszych metod rozmytego modelowania wieloobszarowego. I tak zaproponowane zostało podejście ewolucyjne [P43] oraz koewolucyjne [P20, P27, P28, P37].

Badania teoretyczne zostały poparte kilkudziesięcioma wdrożeniami w przemyśle energetycznym, jak na przykład układ sterowania dozowaniem kamienia wapiennego w celu obniżenia emisji dwutlenku siarki SO_2 [P25] oraz układ sterowania temperatury pary wylotowej [Hu2]. Kolejnym obszarem praktycznego stosowania metod heurystycznych w przemyśle były układy walidacji i odtwarzania pomiarów [Hu9] wykorzystujący rozmyte sieci neuronowe Kohonena.

Drugim obszarem prac badawczych były zagadnienia związane z zastosowaniem optymalizacji ekonomicznej w przemyśle. Tak jak poprzednie rozwiązania wkomponowywały się w warstwę sterowania podstawowego oraz nadzoru, to zagadnienia optymalizacyjne obejmowały obszar wyższego poziomu. W trakcie kilkunastu lat badań rozwiązano wiele interesujących i ważkich problemów. Dotyczyły one między innymi istotnego w energetyce zadania ERO (Energoozczędny Rozdział Obciążeń), które zostało rozwiązane z wykorzystaniem metod optymalizacji globalnej, a w głównej mierze metod ewolucyjnych [P38, P44]. Zbliżone podejście zostało zastosowane również do optymalizacji pracy układów produkcji skojarzonej parowo-gazowej [P46] czy też instalacji zdmuchiwania sadzy w pyłowym kotle węglowym [P64].

Wątek wykorzystywania metod optymalizacji globalnej znalazł miejsce również w innych badaniach, jak np. dotyczących metod uczenia rekurencyjnych sieci neuronowych [P45], projektowania i implementacji niestacjonarnych ewolucyjnych struktur regulacji [P56, P58] czy też rekonfiguracji sterowania [P62].

Inną dziedziną aktywności badawczej autora było wykorzystanie nowoczesnych narzędzi informatycznych połączonych z inteligentnymi metodami obliczeniowymi i użycie ich do wspomaganie procesów zarządczych w przemyśle. Opracowania dotyczące portali energetycznych pokazały możliwości zastosowań zarówno w energetyce [P47], przesyłce ropy i gazu [P57], prognozowaniu [P52], zarządzaniu ryzykiem [P60, P63], wsparciu procesów remontowych [P61] czy też zagadnieniach handlowych na rynku energii [P54, P55, P59]. W tym miejscu warto wskazać dwa z rozwiązywanych problemów: prognozowanie [P52] i zarządzanie ryzykiem [P60]. Są to wymagające zagadnienia naukowe integrujące metody z

różnych obszarów, jak np. modelowanie, sztuczna inteligencja, optymalizacja, estymacja, statystyka. W szczególności aspekty związane z modelowaniem i wykorzystaniem różnych statystyk przyczyniły się do rozwiązań proponowanych w obrębie niniejszego jednotematycznego cyklu publikacji.

Ciekawym uzupełniającym wątkiem badawczym było przetestowanie wykorzystania możliwości obliczeń równoległych na kartach graficznych GPGPU [P69]. Potencjał ten z pewnością znajdzie wykorzystanie w przyszłych badaniach.

Ostatnie prace obejmowały różnorakie aspekty praktyczne związane z adaptacyjnym modelowaniem procesów dynamicznych w strukturach zbliżonych do układu Hammersteina. Rozwiązania te pozwalają na adaptacyjny dobór części statycznej modelu [P71, P72]. Dalsze pogłębienie badań pozwoliło na zaproponowanie odtwarzania dynamicznego krzywej starzenia Lorentza dla urządzeń przemysłowych [P73].

Dzięki współpracy z wiodącymi dostawcami automatyki wdrożenia, w których uczestniczył autor były realizowane w wielu krajach na wielu kontynentach. Pierwsze wdrożenia miały miejsce w Polsce, ale już kolejne w USA. Większość realizowanych projektów odbywała się w tych dwu krajach, choć wiele ciekawych wdrożeń miało miejsce w Wielkiej Brytanii, Finlandii, Austrii, Turcji, Indiach, Rosji, Korei Południowej, Brazylii, Chinach, Singapurze, RPA, ...

Zaprezentowane powyżej rozwiązania przemysłowe przekładają się również na dorobek publikacyjny autora. Ponieważ obejmują one w głównej mierze rzeczywiste zastosowania praktyczne, publikacje w większości przypadków miały miejsce na branżowych konferencjach technicznych (krajowych i zagranicznych), takich jak np. PowerGEN, Chemia, INFO-ENERGETAB, Power Generation Summit, Power Transmission and Generation Forum, itp. Równocześnie, pomimo zawartości naukowo-badawczej prezentowanych rozwiązań, ograniczone były możliwości publikacji owych dokonań z perspektywy badawczej w czasopismach i na konferencjach naukowych. Niemniej, gdyby ich nie było, to proponowane rozwiązania nie powstałyby.

Wyszczególnienie ciekawszych i najbardziej znaczących projektów, w których uczestniczył autor przedstawiono w załączniku nr 6 do niniejszego wniosku pt. *Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki*.

5.2 Czynny udział w konferencjach i seminariach naukowych

Autor brał czynny udział w następujących konferencjach międzynarodowych i krajowych:

- Dortmund Fuzzy-Tage, Dortmund, Niemcy (1994) [P6]
- Advanced Summer Institute ASI'94 in Computer Integrated Manufacturing and Industrial Automation, Patras, Grecja (1994) [P7]
- Simulation, Modelling and Control, SMC, Zakopane, Polska (1995) [P12, P13]
- International Congress on Intelligent Techniques & Soft Computing, EUFIT, Aachen, Niemcy (1995, 1998) [P14], [Hu2]
- Krajowa Konferencja Algorytmy Ewolucyjne i Optymalizacja Globalna, KAEiOG (1996, 1997, 1999, 2000, 2001, 2003, 2005) [P20, P28, P37, P38, P43, P45], [Hu7, Hu10]

- IASTED/ISMM International Conference Modelling, Identification and Control, Innsbruck, Austria (1997) [P23]
- Konferencja Niskoemisyjne Techniki Spalania, Ustroń Zawodzie, Polska (1997, 1998) [P22, P32]
- IEEE Fuzzy Conference FUZZ, Barcelona, Hiszpania (1997) [P27]
- Sympozjum Naukowo-Techniczne ENERGOPOMIAR, Szczyrk, Polska (1997) [P25, P26]
- IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR, Międzyzdroje, Polska, (1998, 2016) [H2], [P73], [Hu1]
- World Automation Congress WAC, 2nd Int. Symposium on Intelligent Automation and Control ISIAC, Anchorage, AK, USA (1998) [Hu3]
- PowerGEN International Conference (1998, 2001) [Hu4], [P44]
- Krajowa Konferencja Kotłowa (1998, 2002) [P33, P48]
- Conference on Power Plant Emission Control and Monitoring Technologies, London, UK (2000) [P42]
- PowerGEN Europe Conference (2000, 2012, 2014) [Hu6, Hu13, Hu15]
- IASTED International Conference on Automation, Control and Information Technology, Nowosybirsk, Rosja (2002) [P46]
- NATO Regional Conference on Military Communications and Information Systems, Zegrze, Polska (2002) [P47]
- XVIII Zjazd Termodynamików, Warszawa, Polska (2002) [P49]
- 11 Sympozjum Systemy Informatyczne w Energetyce, INFOENERGETAB, Bielsko-Biała, Polska (2004) [P55]
- International Oil and Gas Conference, Zadar, Chorwacja (2006) [P57]
- 8th European Advanced Equipment Control / Advanced Process Control (AEC/APC) Conference, Drezno, Niemcy (2007) [P62]
- 12th Power Generation Summit, Bahrain (2007) [P59]
 - członek panelu dyskusyjnego: *Future Of Renewable Energy In The Middle East*
 - prowadzenie warsztatów: *Optimisation Projects For Power Generation*
- 7th Power Transmission and Generation Forum, Bahrain (2007) [P60, P61]

– członek panelu dyskusyjnego: *Environmental Impact Of Developing New Projects – Minimising And Mitigating The Environmental Impact Of Power Generation Operations*

- III Konferencja Naukowo-Techniczna pn. Nowoczesne technologie spalania węgla i paliw odpadowych, Szczyrk, Polska (2008) [P63]
- XII Sympozjum Naukowo-Techniczne, Energetyka - Bełchatów, Bełchatów, Polska (2010) [P65]
- Coal-GEN Europe Conference, Warszawa, Polska (2012) [P66]
- Power GEN Brasil Conference, Sao Paulo, Brazylia (2012) [Hu14]
- XXI Sympozjum Naukowo-Techniczne Chemia 2015, Płock, Polska (2014) [Hu16]
- 19th International Conference on System Theory, Control and Computing ICSTCC, Cheile Gradistei – Fundata, Rumunia (2015), [H1]
- Krajowa Konferencja Metody Heurystyczne i Algorytmy Ewolucyjne MHAЕ, Sulejów, Polska (2015) [P68]
- Konferencja Naukowo-Techniczna Automation, Warszawa, Polska (2015, 2016) [P69–P72]
- Krajowa Konferencja Automatyki, Polska (2017), [H11]
- American Control Conference, USA (2017), [H7]
przewodniczenie sesji: Estimation I
- IFAC World Congress (2017), [H6]

Autor był również współtwórcą Krajowej Konferencji Algorytmy Ewolucyjne i Optymalizacja Globalna, członkiem Komitetu Organizacyjnego wszystkich dwunastu edycji konferencji KAEiOG w latach 1996–2009 oraz Krajowej Konferencji Metody Heurystyczne i Algorytmy Ewolucyjne, MHAЕ 2015.

Pozostałe publikacje habilitanta:

- [P1] P. D. Domański. Investigating of EFPI (Expert For Process Identification) prepared for identification of plants and time series. Technical Report –, Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej, 1991.
- [P2] P. D. Domański. Knowledge-based intelligent controller: Fuzzy logic supervision of PID controller. Technical Report ESR-9212, Lehrstuhl für Elektrische Steuerung und Regelung, Ruhr-University Bochum, Germany, 1992.
- [P3] P. D. Domański. Process visualisation package LSO v3.0. Technical Report –, Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej, 1992.

- [P4] P. D. Domański. Application of linguistic variables in control and supervision. Technical Report –, Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej, 1993.
- [P5] P. D. Domański. Rozwój oprogramowania do symulacji lingwistycznych układów regulacji ICon v2.1. Technical Report –, Instytut Automatyki Politechniki Warszawskiej, 1993.
- [P6] P. D. Domański. Fuzzy logic non-stationary PID controller. In *4th Dortmund Fuzzy Days*, Dortmund, Germany, 1994.
- [P7] P. D. Domański. Fuzzy logic supervised non-stationary controllers. In *Advanced Summer Institute ASI'94 in Computer Integrated Manufacturing and Industrial Automation*, pages 275–282, Patras, Greece, 1994.
- [P8] P. D. Domański. Fuzzy logic supervised predictive controller. *IASTED Journal Control and Computers*, 22(2):51–57, 1994.
- [P9] P. D. Domański. Modelowanie lingwistyczne w projektowaniu układów regulacji. Technical Report –, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, 1994.
- [P10] P. D. Domański. Rozwinięcie oprogramowania algorytmów rzeczywistych dla laboratorium odwróconego wahadła. Technical Report –, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej, 1994.
- [P11] P. D. Domański. Układy do kart mikroprocesorowych. *Elektronizacja : podzespoły i zastosowania elektroniki*, 11:10, listopad 1994.
- [P12] P. D. Domański. A genetic approach to the linguistic modeling. In *Proceedings of Simulation, Modelling and Control, SMC'95*, volume 1, pages 218–223, Zakopane, Polska, 1995.
- [P13] P. D. Domański. Knowledge-based non-stationary predictive controller. In *Proceedings of Simulation, Modelling and Control, SMC'95*, volume 1, pages 224–229, Zakopane, Polska, 1995.
- [P14] P. D. Domański and J. Arabas. On generating the fuzzy rule base by means of genetic algorithm. In *Proceedings of the IIIrd International Congress on Intelligent Techniques & Soft Computing, EUFIT'95*, volume 1, pages 467–471, Aachen, Germany, 1995.
- [P15] P. D. Domański, W. Tadej, and J. Arabas. A comparison of the genetic and neural approaches to the fuzzy logic based modeling. In *Proceedings of MMAR'95*, volume 2, pages 687–690, Międzyzdroje, Polska, 1995.
- [P16] P. D. Domański. Wykorzystanie podejścia koewolucyjnego do budowy modelu rozmytego autopilota APC-1P samolotu PZL-Mewa. Technical Report 96-34, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej PW, 1996.

- [P17] P. D. Domański. Zastosowanie algorytmu koewolucyjnego do generowania reguł decyzyjnych w systemach rozmytych. Technical Report -, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej PW, 1996.
- [P18] P. D. Domański. *Zastosowanie metod jakościowych do modelowania i projektowania układów regulacji*. PhD thesis, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska, 1996.
- [P19] P. D. Domański, P. Kałuski, and M. Szpilewski. Algortmy genetyczne: imitacja natury w technice. *PC Magazine Po Polsku*, 11, listopad 1996.
- [P20] A. Włoszek and P. D. Domański. Application of the coevolutionary strategy to the rule generation in fuzzy systems. In *Materiały I Krajowej Konferencji KAEiOG 1996*, pages 203–210, Murzasichle, Polska, 1996.
- [P21] J. Arabas, L. Białobrzeski, T. Chomiak, P. D. Domański, K. Świrski, and R. Nelakantan. Pulverized coal fired boiler optimization and NOx control using neural networks and fuzzy logic. In *AspenWorld'97*, Boston, Massachusetts, 1997.
- [P22] J. Arabas, P. D. Domański, and K. Świrski. Zastosowanie sieci neuronowych przy optymalizacji pracy kotła pyłowego dla celów obniżenia emisji NOx. In *Konferencja Niskoemisyjne Techniki Spalania '97*, pages 289–297, Ustroń Zawodzie, Polska, 1997.
- [P23] P. D. Domański. Fuzzy neural approach to the tuning of control algorithms. In *IASTED/ISMM International Conference Modelling and Simulation '97*, pages 514–517, Pittsburgh, Pennsylvania, 1997.
- [P24] P. D. Domański, M. Brdyś, and P. Tatjewski. Fuzzy logic multi-regional controllers – design and stability analysis. In *European Control Conference '97*, pages 2700–2705, Brussels, Belgium, 1997.
- [P25] P. D. Domański, A. Włoszek, M. Kucharski, D. Misiurek, and M. Rzewuski. Modelowanie i sterowanie wykorzystujące rozmyte sieci neuronowe dla kotła z cyrkulacyjnym żłobem fluidalnym. In *Symposium Naukowo-Techniczne ENERGOPOMIAR '97*, pages 199–216, Szczyrk, Polska, 1997.
- [P26] K. Świrski, P. D. Domański, J. Arabas, L. Białobrzeski, and T. Chomiak. Optymalna regulacja kotła pyłowego dla celów obniżenia emisji i podwyższenia sprawności. In *Symposium Naukowo-Techniczne ENERGOPOMIAR '97*, pages 187–198, Szczyrk, Polska, 1997.
- [P27] A. Włoszek and P. D. Domański. Application of the coevolutionary strategy to the rule generation in fuzzy systems. In *IEEE FUZZ'97 Conference*, volume 1, pages 391–395, Barcelona, Spain, 1997.
- [P28] A. Włoszek, M. Rzewuski, and P. D. Domański. Zastosowanie podejścia koewolucyjnego do modelowania jakościowego - klasyczny układ rozmyty. In *Materiały II Krajowej Konferencji KAEiOG 1997*, pages 299–216, Rytro, Polska, 1997.

- [P29] J. Arabas, L. Białobrzeski, T. Chomiak, P. D. Domański, and K. Świrski. Optymalizacja kotła pyłowego i zmniejszenie emisji NOx przy wykorzystaniu sieci neuronowych - techniki soft- computing. *Energetyka*, 1:21–25, 1998.
- [P30] J. Arabas, L. Białobrzeski, P. D. Domański, and K. Świrski. Pulverized boiler optimization and NOx reduction by neural networks. In *Pragoregula '98 Masarykova akademie práce*, pages 61–69, Praha, Czech Republic, 1998.
- [P31] J. Arabas, P. D. Domański, and K. Świrski. Praktyczne aspekty modelowania i optymalizacji procesó w przemyślowych. *Pomiary-Automatyka-Kontrola*, 6:195–202, 1998.
- [P32] J. Arabas, P. D. Domański, and K. Świrski. Soft computing - wybrane zastosowania w energetyce. In *Konferencja Niskoemisyjne Techniki Spalania '98*, pages 7–26, Ustroń Zawodzie, Polska, 1998.
- [P33] P. D. Domański, J. Lewandowski, and K. Świrski. Optymalizacja pracy kotła przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych. In M. Krupa and M. Pronobis, editors, *Aktualne problemy budowy i eksploatacji kotłó: VIII Konferencja Kotłowa '98*, volume 2, pages 157–164. Politechnika Śląska, 1998.
- [P34] P. D. Domański, M. Brdyś, and P. Tatjewski. Design and stability of fuzzy logic multi-regional output controllers. *International Journal of Applied Mathematics & Computer Science*, 9(4):883–897, 1999.
- [P35] P. D. Domański, J. Lewandowski, and K. Świrski. Optymalizacja kotłó pyłowych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. In *Zeszyty Naukowe Prace Badawcze Instytutu Techniki Ciepłej*, volume 3, pages 9–24. Politechnika Warszawska, Warszawa, 1999.
- [P36] J. Lewandowski, P. D. Domański, A. Adamczyk, and K. Cira. Nowe możliwości sterowania kotłó dla celów obniżenia emisji substancji szkodliwych NOx, SO2, widzialne zanieczyszczenia (OPACITY). In *Prace Naukowe s. Mechanika*, volume 181, pages 152–166. Politechnika Warszawska, Warszawa, 1999.
- [P37] S. Plamowski and P. D. Domański. Coevolutionary strategy with hierarchical decomposition. In *Materiały III Krajowej Konferencji KAEiOG 1999*, pages 269–274, Potok Złoty, Polska, 1999.
- [P38] M. Rzewuski, J. Arabas, and P. D. Domański. Rozwiązanie problemu ekonomicznego rozdziału obciążeń przy wykorzystaniu wybranych algorytmó optymalizacji globalnej. In *Materiały III Krajowej Konferencji KAEiOG 1999*, pages 275–282, Potok Złoty, Polska, 1999.
- [P39] P. D. Domański. Stability analysis and industrial application of fuzzy logic multi-regional controllers. In J. Aracil and F. Gordillo, editors, *Stability Issues in Fuzzy Logic*, volume 181, pages 241–254. Physica-Verlag, Heidelberg, 2000.

- [P40] P. D. Domański. Zastosowanie metod soft computingu do minimalizacji emisji NO_x. In W. Kordylewski, editor, *Niskoemisyjne techniki spalania w energetyce*, pages 251–260. OWPW, Wrocław, 2000.
- [P41] P. D. Domański, K. Świrski, and W. Jedynak. Application of advanced control technologies to the emission control and boiler optimization. In *Proceedings of Distributed Control Systems 6th Meeting, DCS-6*, Miskolc, Hungary, 2000.
- [P42] P. D. Domański, K. Świrski, and J. J. Williams. Application of advanced control technologies to the emission control and optimization. In *Proceedings of Conference on Power Plant Emission Control and Monitoring Technologies*, London, UK, 2000.
- [P43] S. Plamowski and P. D. Domański. Evolutionary identification of NARMAX models. In *Materiały IV Krajowej Konferencji KAEiOG 2000*, pages 171–178, Łądek Zdrój, Polska, 2000.
- [P44] D. Bichler, R. Beveridge, and P. D. Domański. Optimal load dispatch for utilities. In *PowerGEN International 2001*, Las Vegas, Nevada, 2001.
- [P45] M. Strzelczyk and P. D. Domański. Global optimization based learning for recurrent neural networks. In *Materiały V Krajowej Konferencji KAEiOG 2001*, pages 223–230, Jastrzębia Góra, Polska, 2001.
- [P46] P. D. Domański, J. Arabas, K. Świrski, and M. Wegnerowska. Economic load dispatch for combined cycle cogeneration facility: comparison of different approaches. In *Proceedings of the IASTED International Conference on Automation, Control and Information Technology*, pages 130–135, Novosibirsk, Russia, 2002.
- [P47] P. D. Domański and K. Świrski. Industrial portal system as a platform for information, optimization and maintenance systems. In *Proceedings of NATO Regional Conference on Military Communications and Information Systems*, pages 157–166, Zegrze, Polska, 2002.
- [P48] P. D. Domański, K. Świrski, and J. Lewandowski. Wykorzystanie sieci neuronowych i optymalizacji w energetyce: porównanie doświadczeń Polski i USA. In W. B. Wojnar and A. W. Walewski, editors, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych, IX Konferencja Kotlewa*, volume 1, pages 143–164. Politechnika Śląska, 2002.
- [P49] K. Świrski, P. D. Domański, and J. Lewandowski. Modele empiryczne procesów w zastosowaniach dla instalacji energetycznych. In *Prace Naukowe - Politechnika Warszawska. Konferencje, z.22, XVIII Zjazd Termodynamików*, volume 4, pages 1229–1238. Politechnika Warszawska, 2002.
- [P50] P. D. Domański, S. Plamowski, and J. Leśniewski. An evolutionary algorithm for membership fuzzy function auto tuning. In *Proceedings of 18th IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pages 985–989, Houston, Texas, 2003.

- [P51] R. Jankowski, P. D. Domański, and K. Świrski. Optymalizacja pracy młyna węglowego. In *Prace Naukowe - Politechnika Warszawska. Konferencje, z.23, VI Konferencja Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej*, pages 137–149. OWPW Warszawa, 2003.
- [P52] J. Arabas and P. D. Domański. Gdy pomyłka pomyłce nierówna, czyli prognozowanie w realiach rynku energii. *Rynek terminowy*, pages 78–83, 2004.
- [P53] J. Arabas, P. D. Domański, G. Jarmoszewicz, and K. Świrski. Artificial intelligence for power sector. In *Proceedings of Second International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering*, pages 399–406, Gliwice, Polska, 2004.
- [P54] P. D. Domański and P. Kalbarczyk. Nowoczesne narzędzia wspomagające zarządzania energią elektryczną. In *Materiały IX Seminarium "Automatyka elektroenergetyczna - problematyka eksploatacji i modernizacji"*, Zawiercie, Polska, 2004.
- [P55] P. D. Domański and K. Świrski. Zintegrowane systemy zarządzania informacją techniczną i handlową: wspomaganie decyzji i bezpieczeństwo. In *Materiały 11 Sympozjum Systemy Informatyczne w Energetyce INFOENERGETAB 2004*, Bielsko-Biała, Polska, 2004.
- [P56] P. Kaczyński and P. D. Domański. Evolutionary predictive controller for ship control. In *Proceedings of IEEE ICSC Congress on Computational Intelligence Methods and Applications (CIMA 2005)*, pages 235–240, Istanbul, Turkey, 2005.
- [P57] P. D. Domański and P. Prokop. Industrial portal for oil & gas management. *Scientific and Expert Journal of the Croatian Association of the Petroleum Engineers and Geologists*, 3(1):7–16, 2006.
- [P58] P. Kaczyński and P. D. Domański. Controller adaptation using dynamic evolutionary algorithm. In *Prace Naukowe Elektronika z.156*, pages 179–188. OWPW Warszawa, 2006.
- [P59] P. D. Domański. CO2 emission trade management. In *12th Power Generation Summit*, Bahrain, 2007.
- [P60] P. D. Domański. Decision support including risk consideration for the grid network. In *7th Power Transmission and Generation Forum*, Bahrain, 2007.
- [P61] P. D. Domański. Predictive vs preventive maintenance - increasing profits and minimising losses through technology. In *7th Power Transmission and Generation Forum*, Bahrain, 2007.
- [P62] P. D. Domański. Reconfigurable control strategy: Evolutionary approach. In *Proceedings of 8th European Advanced Equipment Control / Advanced Process Control (AEC/APC) Conference*, Dresden, Germany, 2007.

- [P63] P. D. Domański. Zarządzanie bezpieczeństwem produkcji: efektywność a ryzyko. In *Materiały III Konferencji naukowo-technicznej pn. Nowoczesne technologie spalania węgla i paliw odpadowych*, Szczyrk, Polska, 2008.
- [P64] M. Strzelczyk, P. D. Domański, and M. Życki. Multicriterial soot-blower optimisation using neural models and fuzzy logic. *Engineering Intelligent Systems*, 16(1):47–50, 2008.
- [P65] P. D. Domański, A. Ossera, and M. Słoma. Optymalizacja wytwarzania: bezpieczeństwo i elastyczność. In *XII Sympozjum Naukowo-Techniczne, Energetyka - Bełchatów*, Bełchatów, Polska, 2010.
- [P66] P. D. Domański and J. Leppakoski. Advanced process control implementation of boiler optimization driven by future power market challenges. In *Pennwell Conference Coal-GEN Europe 2012*, Warsaw, Poland, 2012.
- [P67] P. D. Domański, J. Leppakoski, E. Durando, and R. Onofre. Melhoria de eficiencia na queimada bagaca em caldeira de grehla. In *I Congresso de Automacao e Inovacao Tecnologica Sucroenergetica*, Sao Paulo, Brazil, 2013.
- [P68] P. D. Domański. Epistemology: evolution or revolution. In *Proceedings of MHAE Conference*, Sulejów, Polska, 2015.
- [P69] P. D. Domański and M. Więclawski. Memory-based prediction of district heating temperature using GPGPU. In R. Szewczyk, C. Zieliński, and M. Kaliczyńska, editors, *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques*, volume 350, pages 33–42. Springer International Publishing, 2015.
- [P70] T. Janiuk and P. D. Domański. Evaluation of high efficiency operating rules for grate-fired boilers. In R. Szewczyk, C. Zieliński, and M. Kaliczyńska, editors, *Challenges in Automation, Robotics and Measuring Techniques, Part 1*, volume 440, pages 257–266. Springer International Publishing, 2016.
- [P71] K. Koniuszewski and P. D. Domański. Gradient approach to curve fitting with incomplete data. In R. Szewczyk, C. Zieliński, and M. Kaliczyńska, editors, *Challenges in Automation, Robotics and Measuring Techniques, Part 1*, volume 440, pages 277–289. Springer International Publishing, 2016.
- [P72] K. Koniuszewski and P. D. Domański. Practical aspects of hammerstein models for nonstationary and nonlinear processes. In R. Szewczyk, C. Zieliński, and M. Kaliczyńska, editors, *Challenges in Automation, Robotics and Measuring Techniques, Part 1*, volume 440, pages 103–114. Springer International Publishing, 2016.
- [P73] K. Koniuszewski and P. D. Domański. Reproduction of equipment lorentz attrition curve with kernel regression. In *Proceedings of IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR*, pages 912–917, Międzyzdroje, Polska, 2016.

5.3 Kierowanie projektami badawczymi lub udział w takich projektach

5.3.1 Udział w projektach

1. Projekt badawczo-rozwojowy - *Optymalna modernizacja Jednostki Produkcyjnej Nawozy w Grupie Azoty Zakłady Azotowe Kędzierzyn SA pod kątem zmniejszenia kosztów procesu wytwarzania nawozów azotowych w ciągu produkcyjnym od amoniaku, poprzez kwas azotowy i neutralizację - Etap I* w ramach projektu „Kompleksowy system optymalizacji dynamicznej i ekonomicznej procesu wytwarzania nawozów azotowych”. Okres realizacji: 05.2017-09.2018, kierownik prac ze strony IAIS PW.
2. Projekt badawczo-rozwojowy - *Koordinacja prac rozwojowych i nadzór naukowy nad wdrożeniem - Etap III* w ramach projektu „Kompleksowy system optymalizacji dynamicznej i ekonomicznej procesu wytwarzania nawozów azotowych”. Okres realizacji: 05.2017-05.2019, kierownik prac ze strony IAIS PW.
3. Projekt badawczo-rozwojowy - Opracowanie i wdrożenie zaawansowanego systemu sterowania (APC) dla instalacji wytwarzania amoniaku, których realizacja planowana jest w ramach programu sektorowego „INNOCHEM” finansowanego ze środków NCBR w ramach Działania 1.2 „Sektorowe programy B+R” Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020. Koordynator: Zakłady Azotowe Puławy, Grupa Azoty S.A. Okres realizacji: 01.2017-03.2019, kierownik prac ze strony IAIS PW.
4. Grant NCBiR - Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2007–2013, Priorytet 1, Badania i rozwój nowoczesnych technologii, działanie 1.4 (POIG.01.04.00-24-087/2013): SYPIA - System Patrolowania i Analizy. Koordynator: MSP Marcin Szender. Okres realizacji: 08.2014-12.2015, wykonawca.
5. Projekt badawczy MNiI (6 ZR9 2007 C/06956): Opracowanie, realizacja i wdrożenie systemu wspomagania decyzji handlowych na rynkach energii *8@decision*. Koordynator: Octagonet S.A. Okres realizacji: 08.2008-03.2010, wykonawca.
6. EC 6th Framework Programme, 3S project (Strategy for Software & Services, European Research Area): Joint European White Paper for R&D and Industry in the Service and Software Architectures, Infrastructures and Engineering. Okres realizacji: lata 2007–2009. Członek Rady Doradczej: European Community for Software & Software Services – Architectures, Infrastructures, Engineering.
7. Projekt badawczy MNiI (3 T11A 005 28): Wielozadaniowe algorytmy sterowania predykcyjnego, Politechnika Warszawska, Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej. Okres realizacji: 2005-2007, wykonawca.
8. PATIA grant: Opracowanie koncepcji układu regulacji obiektu laboratoryjnego z pomiarem wizyjnym. Okres realizacji: 1996, wykonawca.
9. PATIA grant Programu Doktoranckiego. Okres realizacji: 1995-1996, wykonawca.

10. PATIA grant: Zastosowanie metod zbiorów rozmytych do nadzoru pracy pneumatycznych napędów siłownikowych. Okres realizacji: 1995, wykonawca.

5.3.2 Udział w innych projektach przemysłowych

W latach 1997-2016 autor niniejszego opracowania, oprócz działalności naukowo-badawczej brał udział w kilkudziesięciu projektach wdrożeniowych systemów sterowania. Projekty te były realizowane w głównej mierze w przemyśle energetycznym i obejmowały zastosowanie automatyki zaawansowanej (regulacja predykcyjna MPC, wielo-obszarowe regulatory rozmyte, optymalizacja globalna) do poprawy procesu spalania oraz obniżania szkodliwych emisji gazowych (CO, NOx, SOx, pyły) z kotłów energetycznych opalanych paliwami kopalnymi (węgiel kamienny, brunatny, olej, gaz). Owe projekty były realizowane zarówno w Polsce jak i w innych krajach europejskich oraz w USA, Brazylii i Azji.

W ostatnich latach działalność ta została rozszerzona na inne branże, jak np. przemysł chemiczny. Prace ta zaowocowały współpracą naukowo-badawczą z zakładami przemysłowymi w Polsce. Przykładami tej współpracy są prace magisterskie realizowane pod nadzorem autora a rozwiązujące określone problemy badawcze w różnych zakładach przemysłowych. Poniżej zamieszczona jest lista tych prac.

1. mgr inż. Karol Koniuszewski: *Modelowanie i identyfikacja obiektu rzeczywistego na podstawie danych historycznych*, (2015) – praca zrealizowana dla Zakładu Azotowego Kędzierzyn-Koźle, Grupa Azoty S.A.
2. mgr inż. Patryk Rękawek: *Przygotowanie i walidacja nieliniowego modelu wymywania CO i CO2 do celu symulacji instalacji produkcji amoniaku*, (2016) – praca zrealizowana dla Zakładu Azotowego Kędzierzyn-Koźle, Grupa Azoty S.A.
3. mgr inż. Paweł Weremiuk: *Przygotowanie i walidacja nieliniowego modelu reaktora syntezy NH3 do celu symulacji instalacji produkcji amoniaku*, (2016) – praca zrealizowana dla Zakładu Azotowego Kędzierzyn-Koźle, Grupa Azoty S.A.
4. mgr inż. Michał Falkowski: *Identyfikacja nieliniowego modelu NARIMA kolumny atmosferycznej*, (2017) – praca zrealizowana dla ORLEN S.A.

5.4 Nagrody za osiągnięcia naukowe

Nagroda Prezesa Rady Ministrów:

2003 - nagroda zespołowa II stopnia za wybitne krajowe osiągnięcia naukowo-techniczne

Nagrody JM Rektora Politechniki Warszawskiej:

1996 - wyróżnienie rozprawy doktorskiej

1997 - nagroda indywidualna II stopnia za osiągnięcia naukowe

1999 - nagroda zespołowa II stopnia za osiągnięcia naukowe

2009 - nagroda zespołowa I stopnia za osiągnięcia naukowe

Konkurs Polski Produkt Przyszłości organizowany przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości:

2003 - laureat (zespołowy) VI edycji w kategorii „Technologia przyszłości”

5.5 Zbiorcze wskaźniki bibliometryczne

Wskaźniki bibliometryczne na podstawie bazy Web of Science (WoS) Cited Reference Search oraz Google Scholar:

- Sumaryczny Impact Factor (IF) jednotematycznego cyklu 11 publikacji przedstawionego w punkcie 2 wynosi **11.939**.
- Liczba publikacji w indeksowanych w bazie WoS – 22
- Liczba publikacji w indeksowanych w bazie Google Scholar – 51
- Liczba cytowań publikacji indeksowanych w bazie WoS (**bez autocytowań**) – 37 (17)
- Liczba cytowań publikacji indeksowanych w bazie Google Scholar (**bez autocytowań**) – 101 (65)
- Indeks Hirscha (h-indeks) opublikowanych prac według WoS – 3.
- Indeks Hirscha (h-indeks) opublikowanych prac według Google Scholar – 5.

Sumaryczna liczba punktów MNiSW dla jednotematycznego cyklu 11 publikacji wynosi **250 pkt**.

Wskaźniki wpływu (Impact Factor) oraz liczba punktów MNiSW są przyjęte zgodnie z rokiem publikacji poszczególnych artykułów.

Literatura

- [1] H. Cramer. On the composition of elementary errors. *Scandinavian Actuarial Journal*, 1:13–74, 1928.
- [2] T. W. Anderson and D. A. Darling. A test of goodness-of-fit. *Journal of the American Statistical Association*, 49:765–769, 1954.
- [3] S. S. Shapiro and M. B. Wilk. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3–4):591–611, 1965.
- [4] K. J. Astrom. Computer control of a paper machine-an application of linear stochastic control theory. *IBM Journal*, 11:389–405, 1967.
- [5] H. Lilliefors. On the kolmogorov-smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, 62:399–402, 1967.

-
- [6] B. B. Mandelbrot. Possible refinements of the lognormal hypothesis concerning the distribution of energy dissipation in intermittent turbulence. In M. Rosenblatt M. and C. Van Atta, editors, *Statistical Models and Turbulence*. Springer Verlag New York, 1972.
- [7] I. D. Hill, R. Hill, and R. L. Holder. Algorithm as 99: Fitting johnson curves by moments. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 25(2):180–189, 1976.
- [8] W. DeVries and S. Wu. Evaluation of process control effectiveness and diagnosis of variation in paper basis weight via multivariate time-series analysis. *IEEE Trans. Autom Control*, 23:702–708, 1978.
- [9] I. A. Koutrouvelis. Regression-type estimation of the parameters of stable laws. *Journal of the American Statistical Association*, 75(372):918–928, 1980.
- [10] D. Russel, J. Hanson, and E. Ott. Dimension of strange attractors. *Physical Review Letters*, 45(14):1175–1178, 1980.
- [11] J. Geweke and S. Porter-Hudak. The estimation and application of long memory time series models. *Journal of Time Series Analysis*, 4:221–238, 1983.
- [12] F. Tolfo. A methodology to assess the economic returns of advanced control projects. In *American Control Conference 1983*, pages 1141–1146. IEEE, 1983.
- [13] E. Tosatti and L. Pietrelli. Fractals in physics. In *Proc. of the Sixth Trieste International Symposium on Fractals in Physics, Italy*. North Holland, 1985.
- [14] T. Higuchi. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 31(2):277–283, 1988.
- [15] T. Harris. Assessment of closed loop performance. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67:856–861, 1989.
- [16] J. Haslett and A. E. Raftery. Space-time modelling with long-memory dependence: Assessing ireland’s wind power resource. *Journal of Applied Statistics*, 38:1–50, 1989.
- [17] J. F. Muzy, E. Bacry, and A. Arneodo. Wavelets and multifractal formalism for singular signals: Application to turbulence data. *Physical Review Letters*, 67(25):3515–3518, 1991.
- [18] U. Hassler. Regression of spectral estimators with fractionally integrated time series. *Journal on Time Series Analysis*, 14(4):369–380, 1993.
- [19] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. W. Wilson. Estimators for long-range dependence: an empirical study. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 2(1):1–15, 1994.

- [20] C. K. Peng, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger. Mosaic organization of dna nucleotides. *Physical Review E*, 49(2):1685–1689, 1994.
- [21] C. K. Peng, S. Havlin, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 5(1):82–87, 1995.
- [22] M.S. Taqqu, V. Teverovsky, and W. Willinger. Estimators for long-range dependence: an empirical study. *Fractals*, 03(04):785–798, 1995.
- [23] N. C. Kenkel and D. J. Walker. Fractals in the biological sciences. *COENOSES*, 11:77–100, 1996.
- [24] S. Jaffard. Multifractal formalism for functions. *SIAM Journal of Mathematical Analysis*, 28:944–970, 1997.
- [25] B. B. Mandelbrot, A. Fisher, and L. Calvet. A multifractal model of asset returns. Technical Report 1164, Cowles Foundation Discussion Paper, 1997.
- [26] Z. Nestic, G. A. Dumont, M. S. Davies, and D. Brewster. CD control diagnostics using a wavelet toolbox. In *Proceedings CD Symposium, IMEKO*, pages 120–125, 1997.
- [27] V. Teverovsky and M. S. Taqqu. Testing for long-range dependence in the presence of shifting means or a slowly declining trend using a variance type estimator. *The Journal of Time Series Analysis*, 18:279–304, 1997.
- [28] A. Horch and A. J. Isaksson. A modified index for control performance assessment. In *Proceedings of the 1998 American Control Conference*, pages 3430–3434, 1998.
- [29] Q. Li and D. L. Mills. Investigating the scaling behavior, crossover and anti-persistence of internet packet delay dynamics. *Seamless Interconnection for Universal Services. Global Telecommunications Conference GLOBECOM'99*, 3, 1999.
- [30] H-D. J. Jeong, D. McNickle, and K. Pawlikowski. Hurst parameter estimation techniques: A critical review. In *38th Annual ORSNZ Conference*, 2001.
- [31] V. S. L'vov, A. Pomyalov, and I. Procaccia. Outliers, extreme events, and multiscaling. *Physical Review E*, 63:056118, 2001.
- [32] M. K. Ali. Assessing economic benefits of advanced control. In *Process Control in the Chemical Industries*, pages 146–159, Chemical Engineering, Department, King Saud University: Riyadh, Kingdom of Saudi Arabia, 2002.
- [33] J. W. Kantelhardt, S. A. Zschiegner, and H. E. Stanley. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A*, 316:87–114, 2002.
- [34] T. Karagiannis, M. Faloutsos, and R. H. Riedi. Long-range dependence: now you see it, now you don't! *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM '02*, 3, 2002.

- [35] F. G. Shinskey. Process control: As taught vs as practiced. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41:3745–3750, 2002.
- [36] D. Koutsoyiannis. Climate change, the hurst phenomenon, and hydrological statistics. *Hydrological Science Journal*, 48(1):3–24, 2003.
- [37] K. R. Muske. Estimating the economic benefit from improved process control. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(20):4535–4544, 2003.
- [38] M. A. Paulonis and J. W. Cox. A practical approach for large-scale controller performance assessment, diagnosis, and improvement. *Journal of Process Control*, 13(2):155–168, 2003.
- [39] M. L. Brisk. Process control: potential benefits and wasted opportunities. In *5th Asian Control Conference*, volume 1, pages 10–16. IEEE, 2004.
- [40] M. A. A. S. Choudhury, A. Shoukat, S. L. Shah, and N. F. Thornhill. Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics. *Automatica*, 40(10):1719–1728, 2004.
- [41] A. J. Field, U. Harder, and P. G. Harrison. Measurement and modelling of self-similar traffic in computer networks. *IEE Proceedings-Communications*, 151(4):355–363, 2004.
- [42] R. G. Kavasserri and R. Nagarajan. Evidence of crossover phenomena in wind-speed data. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 51(11):2255–2262, 2004.
- [43] J. Schäfer and A. Cinar. Multivariable mpc system performance assessment, monitoring, and diagnosis. *Journal of Process Control*, 14(2):113–129, 2004.
- [44] N. F. Thornhill and S. L. Shah. New directions in control loop assessment and diagnosis. *Computing & Control Engineering Journal*, 16(4):18–22, 2005.
- [45] P. Axensten. Cauchy cdf, pdf, inverse cdf, parameter fit and random generator. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11749-cauchy/>, 2006.
- [46] R. G. Clegg. A practical guide to measuring the hurst parameter. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*, 7(2):3–14, 2006.
- [47] M. Jelali. An overview of control performance assessment technology and industrial applications. *Control Engineering Practice*, 14(5):441–466, 2006.
- [48] J. M. Bardet and P. Bertrand. Identification of the multiscale fractional brownian motion with biomechanical applications. *Journal of Time Series Analysis*, 28(1):1–52, 2007.
- [49] M. Bauer, I. K. Craig, E. Tolsma, and H. de Beer. A profit index for assessing the benefits of process control. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(17):5614–5623, 2007.

- [50] M. Bauer and I. K. Craig. Economic assessment of advanced process control – a survey and framework. *Journal of Process Control*, 18(1):2–18, 2008.
- [51] Y. F. Zhou and F. Wan. A neural network approach to control performance assessment. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*, 1:617–633, 2008.
- [52] R. Lopes and N. Betrouni. Fractal and multifractal analysis: A review. *Medical Image Analysis*, 13(4):634–649, 2009.
- [53] E. Serrano and A. Figliola. Wavelet leaders: A new method to estimate the multifractal singularity spectra. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388(14):2793–2805, 2009.
- [54] D. Sornette. Dragon-kings, black swans and the prediction of crises. *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, 2(1):1–18, 2009.
- [55] D. Wei and I. Craig. Development of performance functions for economic performance assessment of process control systems. In *AFRICON 2009*, pages 1–6, 2009.
- [56] H. Zhuo. Research of performance assessment and monitoring for multivariate model predictive control system. In *4th International Conference on Computer Science & Education*, pages 509–514, 2009.
- [57] S. Borak, A. Misiorek, and R. Weron. Models for heavy-tailed asset returns. In P. Cizek, K. Härdle, W., and R. Weron, editors, *Statistical tools for finance and insurance, 2nd edition*, pages 21–56. Springer, New York, 2011.
- [58] L. Kirichenko, T. Radivilova, and Z. Deineko. Comparative analysis for estimating of the hurst exponent for stationary and nonstationary time series. *Journal, International Information Technologies & Knowledge*, 5:371–387, 2011.
- [59] J.F. Smuts and A. Hussey. Requirements for successfully implementing and sustaining advanced control applications. In *ISA POWID 2011 Conference*, 2011.
- [60] C. L. E. Franzke, T. Graves, N. W. Watkins, R. B. Gramacy, and C. Hughes. Robustness of estimators of long-range dependence and self-similarity under non-gaussianity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 370(1962):1250–1267, 2012.
- [61] E. A. F. Ihlen. Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in matlab. *Frontiers in Physiology*, 3(141):1–18, 2012.
- [62] L. Li, Z. Li, Y. Zhang, and Y. Chen. A mixed-fractal traffic flow model whose hurst exponent appears crossover. In *2012 Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, pages 443–447. IEEE, 2012.
- [63] G. Oh, C. Eom, S. Havlin, W. S. Jung, F. Wang, H. E. Stanley, and S. Kim. A multifractal analysis of asian foreign exchange markets. *The European Physical Journal B*, 85(6):1–6, 2012.

- [64] B. Srinivasan and R. Rengaswamy. Automatic oscillation detection and characterization in closed-loop systems. *Control Engineering Practice*, 20(8):733–746, 2012.
- [65] B. Srinivasan, T. Spinner, and R. Rengaswamy. Control loop performance assessment using detrended fluctuation analysis (DFA). *Automatica*, 48(7):1359–1363, 2012.
- [66] A. Gupta, T. Mathur, K.S. Stadler, and E. Gallestey. A pragmatic approach for performance assessment of advanced process control. In *2013 IEEE International Conference on Control Applications*, pages 754–759, 2013.
- [67] L. F. Recalde, R. Katebi, and H. Tauro. PID based control performance assessment for rolling mills: A multiscale PCA approach. In *2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, pages 1075–1080, 2013.
- [68] M. Schlegel, R. Skarda, and M. Cech. Running discrete fourier transform and its applications in control loop performance assessment. In *2013 International Conference on Process Control (PC)*, pages 113–118, 2013.
- [69] Z. Sun, S. J. Qin, A. Singhal, and L. Megan. Performance monitoring of model-predictive controllers via model residual assessment. *Journal of Process Control*, 23(4):473–482, 2013.
- [70] L. Das, B. Srinivasan, and R. Rengaswamy. Data driven approach for performance assessment of linear and nonlinear kalman filters. In *2014 American Control Conference*, pages 4127–4132, June 2014.
- [71] E. Green, W. Hanan, and D. Heffernan. The origins of multifractality in financial time series and the effect of extreme events. *The European Physical Journal B*, 87(6):1–9, 2014.
- [72] N. Pillay and P. Govender. A data driven approach to performance assessment of PID controllers for setpoint tracking. *Procedia Engineering*, 69:1130–1137, 2014.
- [73] T. Spinner. *Performance Assessment of Multivariate Control Systems*. PhD thesis, Texas Tech University, 2014.
- [74] T. Spinner, B. Srinivasan, and R. Rengaswamy. Data-based automated diagnosis and iterative retuning of proportional-integral (PI) controllers. *Control Engineering Practice*, 29:23–41, 2014.
- [75] R. L. Duarte-Barros and S. W. Park. Assessment of model predictive control performance criteria. *Journal on Chemistry and Chemical Engineering*, 9:127–135, 2015.
- [76] H. Yuan. *Process Analysis and Performance Assessment for Sheet Forming Processes*. PhD thesis, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada, 2015.
- [77] J. Zhang, M. Jiang, and J. Chen. Minimum entropy-based performance assessment of feedback control loops subjected to non-gaussian disturbances. *Journal of Process Control*, 24(11):1660–1670, 2015.

- [78] M. Bauer, A. Horch, L. Xie, M. Jelali, and N. Thornhill. The current state of control loop performance monitoring – a survey of application in industry. *Journal of Process Control*, 38:1–10, 2016.
- [79] X. Gao, F. Yang, C. Shang, and D. Huang. A review of control loop monitoring and diagnosis: Prospects of controller maintenance in big data era. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(8):952–962, 2016.
- [80] F. He and J. Xu. A novel process monitoring and fault detection approach based on statistics locality preserving projections. *Journal of Process Control*, 37:46–57, 2016.
- [81] L. Luo, S. Bao, J. Mao, and D. Tang. Nonlinear process monitoring based on kernel global–local preserving projections. *Journal of Process Control*, 38:11–21, 2016.
- [82] J. Beran. *Statistics for Long-Memory Processes*. CRC Press, Boca Raton, 1994.
- [83] M. A. A. S. Choudhury, S. L. Shah, and N. F. Thornhill. *Diagnosis of Process Nonlinearities and Valve Stiction*. Advances in Industrial Control. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [84] H. E. Hurst, R. P. Black, and Y. M. Simaika. *Long-term storage: an experimental study*. Constable and Co Limited, London, 1965.
- [85] M. Jelali. *Control Performance Management in Industrial Automation: Assessment, Diagnosis and Improvement of Control Loop Performance*. Springer-Verlag, 2013.
- [86] B. B. Mandelbrot. *Les objets fractals: forme, hasard, et dimension*. Flammarion, 1975.
- [87] B. B. Mandelbrot and R. L. Hudson. *The Misbehavior of Markets: A Fractal View of Financial Turbulence*. Basic Books, New York, 2004.
- [88] A. Ordys, D. Uduehi, and M. A. Johnson. *Process Control Performance Assessment - From Theory to Implementation*. Springer-Verlag London, 2007.
- [89] E. E. Peters. *Chaos and Order in the Capital Markets: A New View of Cycles, Prices, and Market Volatility, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [90] M. Schröder. *Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise*. W. H. Freeman and Company, New York, NY, 1991.
- [91] D. E. Seborg, D. A. Mellichamp, T. F. Edgar, and F. J. Doyle. *Process dynamics and control*. Wiley, 2010.
- [92] N. N. Taleb. *Fooled by Randomness: The Hidden Role of Chance in Life and in the Markets*. Penguin Books, New York, 2001.