

Analiza metod detekcji anomalii na podstawie przebiegu kursów instrumentów finansowych

Aleksandra Dzieńiszewska

Eryk Warchulski

Abstract



Figure 1: alt text

Wprowadzenie

Celem niniejszego dokumentu jest przedstawienie wstępnych założeń dotyczących realizacji projektu analizy algorytmów detekcji anomalii w szeregach czasowych, tj. TSAD (z ang. **time series anomaly detection**). W jego ramach zostanie omówiona domena problemu, tj. przebiegi wartości instrumentów finansowych na różnych typach rynków, model zjawiska detekcji anomalii oraz plan eksperymentów. Opisane zostaną również metryki jakości uzyskiwanych rozwiązań jak i źródło pozyskiwanych danych.

Kursy instrumentów finansowych

Przebieg kursów instrumentów finansowych jak na przykład kursów akcji spółek lub indeksów giełdowych jest fundamentem działania inwestorów na rynkach. Jego zachowanie determinuje strategie oraz ryzyko inwestycyjne. W związku z powyższym faktem kursy akcji są szczególnie interesujące nie tylko dla bezpośrednich aktorów rynkowych, ale również ekonomistów lub statystyków, którzy opracowują modele zachowań tych kursów lub rynków w ogólności. Współcześnie bardzo dużo uwagi poświęca się zagadnieniom predykcji przyszłych wartości kursów, co stanowi złożony i trudny problem, biorąc pod uwagę fakt, że jedna z dominujących teorii rynkowych, tj. EFM (z ang. **efficient-market hypothesis**) uważa za niemożliwe dokonywanie przydatnych predykcji [RandomWalk] przyszłych kursów, a ponadto uznaje się, że rynki finansowe nie są obojętne na predykcje jak np. pogoda [Sapiens]. Niemniej jednak problem predykcji przyszłych wartości kursów nie jest jedynym zagadnieniem, które ma praktyczne znaczenie. Możliwość odróżnienia niestandardowych fluktuacji kursów i tym samym punktów odstających może stanowić istotną informację dla inwestorów i zaangażować dedykowane takim zdarzeniom procesy biznesowe. Szczególnie istotne wydaje się to z punktu widzenia zautomatyzowanych rynków giełdowych, w których akcje podejmowane przez aktorów (systemy decyzyjne) mierzone są w milisekundach, a dane giełdowe mogą być traktowane jako strumieniowe [HFT-wiki]. Wówczas wykrycie anomalii i jej odpowiednie obsłużenie wydaje się być krytyczne dla gracza rynkowego.

W ramach realizacji projektu użyte zostaną łącznie dwa zbiory danych, na które składają się przebiegi kursów instrumentów finansowych. Jeden z nich będzie pochodził z rzeczywistego rynku finansowego, a drugi z rynku wirtualnego. Motywacją takiego podejścia jest chęć zaobserwowania zachowania się rynku w świecie, w którym na wartość kursu wpływa bardzo duża liczba czynników jawnych lub niejawnych, oraz w świecie, w którym zbiór możliwych akcji podejmowanych przez aktorów jest znacząco ograniczony oraz sam świat ma raczej charakter statyczny i iteracyjny. Ponadto dodatkową motywacją za skorzystaniem z danych pochodzących z rynku wirtualnego jest łatwość określenia zdarzeń, które powodują nagłe zmiany przebiegu kursu – co zostanie bardziej szczegółowo opisane w podsekcji poświęconej temu rynkowi.

Rynki rzeczywiste

Indeks giełdowy WIG20 jest statystyką (średnia ważona kapitalizacją spółek) obrazującą zmianę cen akcji dwudziestu największych spółek akcyjnych notowanych na Warszawskiej Giełdzie Papierów Wartościowych. Wartość indeksu pozwala ocenić inwestorom ogólny kierunek zmian cen i stan rynku.

Przebieg indeksu WIG20 w wybranym przedziale czasowym pokazany jest na rysunku poniżej.

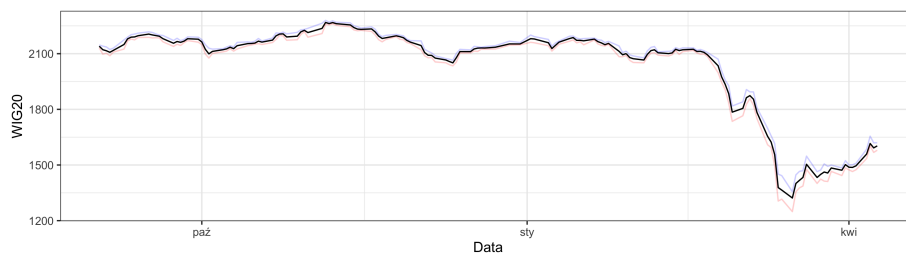


Figure 2: alt text

Rynki wirtualne

WoW Token jest przedmiotem w grze MMO-RPG (*Massively multiplayer online role-playing game*) *World of Warcraft*, który przez gracza może zostać wykorzystany w następujące sposoby:

- gracz może kupić token za rzeczywistą walutę (USD, GBP, EUR, TWD, KRW), a następnie sprzedać go w umieszczonym w grze domu handlowym (*Auction House*)
- gracz może kupić token, płacąc fikcyjną walutą obowiązującą w świecie *World of Warcraft* (dalej G), a następnie wymienić go na przedłużenie abonamentu gry lub wymienić go na bon w internetowym sklepie wydawcy gry.

Kurs wymiany G/USD jest stały i wynosi 20^1 natomiast kurs tokena w świecie gry jest zmienny i zależy głównie od podaży i popytu [[@wtoken-info](#)].

Przebieg ceny tokena w grze na serwerach europejskich w wybranym czasie jest pokazany na poniższym rysunku.

Zadanie detekcji anomalii

W rozdziale tym zostanie zdefiniowany w ogólny sposób problem detekcji anomalii w szeregach czasowych. Konkretyzacja ogólnych pojęć zdefiniowanych poniżej zostanie przedstawiona w rozdziale dotyczącym algorytmów detekcji.

Przez zadanie detekcji anomalii w trakcie realizacji projektu będziemy rozumieć następujący problem:

Szereg czasowy niech $(X_i)_{i \in T}$ będzie procesem stochastycznym określonym na pewnej przestrzeni probabilistycznej, a zbiór indeksów T będzie interpretowany jako zbiór chwil czasowych jednakowo odległych od siebie. Realizację tego procesu, tj. uporządkowany zbiór $\{x_t\}_{t=1, \dots, N}$, będziemy nazywać szeregiem czasowym. Nie zakładamy ponadto niczego względem

¹To samo tyczy się jakiegokolwiek innej waluty rzeczywistej.

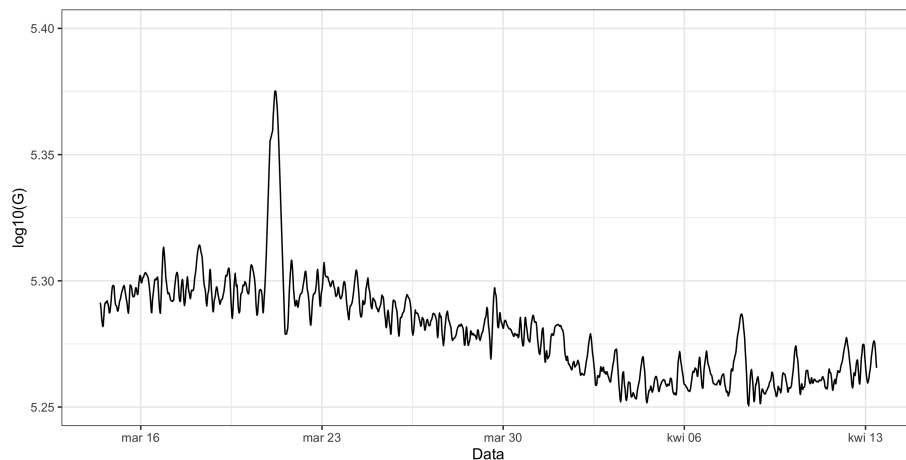


Figure 3: alt text

stacjonarności tego szeregu lub rozkładu prawdopodobieństwa, z którego jest on generowany poza faktem, że jego nośnikiem jest zbiór liczb rzeczywistych \mathcal{R} .

Anomalia Anomalią w szeregu czasowym będziemy nazywali punkt w tym szeregu x_k , który według przyjętego kryterium *odstaje* od pozostałych punktów w najbliższym sąsiedztwie x_{k-s}, \dots, x_{k+s} (anomalia lokalna) lub względem wszystkich punktów w szeregu (anomalia globalna). Kryterium *odstawiania* jest silnie zależne od kontekstu i procedury detekcji anomalii. Często przyjmowane kryterium wygląda następująco [ad_review]:

$$|x_t - s(\{X_t\})| > \tau$$

przy czym $s(\{X_t\})$ jest pewną statystyką.

Detekcja anomalii Detekcją anomalii będziemy nazywali procedurę, pozwalającą wykryć w szeregu czasowym zbiór indeksów punktów uznawanych za anomalię:

$$AD: \{X_t\} \rightarrow T_{Asub}T.$$

Algorytmy detekcji anomalii

W rozdziale tym zostaną opisane algorytmy służące do detekcji anomalii, które w ramach projektu zamierzamy zbadać. Opis ten nie będzie zawierał dokładnego pseudokodu, a jedynie pewien formalizm matematyczny, który pozwala zobrazować idee stojące za omawianymi metodami. Ponadto wskazane i omówione zostaną parametry tych metod.

Omawiane metody

MAD

Metoda *MAD*, tj. *median absolute deviation* jest stosunkowo prostym sposobem detekcji anomalii opartym na oknie kroczącym (z ang. *_moving window*) o długości k . Dla każdego punktu metoda estymuje dwie rzeczy:

1. medianę w oknie
2. bezwzględne odchylenie mediany.

Model można sformalizować w następujący sposób:

dla każdego punktu szeregu czasowego x_i liczona jest wielkość

$$MAD_i = \text{median}_i[x_i - \text{median}_j(X_j)].$$

Następnie każdy punkt szeregu czasowego porównywany jest z odpowiadającą mu wartością MAD_* – jeśli wartość bezwzględna różnicy między tym punktem, a wartością MAD jest większa od ustalonego progu, to punkt jest klasyfikowany jako anomalia. W nawiązaniu do rozdziału poprzedzającego [r3] podane tam kryterium w sposób ogólny konkretyzuje się do postaci:

$$|x_t - MAD_t| > \tau.$$

STL-ESD

Metoda STL (z ang. *Seasonal-Trend decomposition using Loess*) opiera się na dekompozycji addytywnej szeregu czasowego na trzy składowe w następującej formie

$$x_t = \tau_t + s_t + r_t, t = 1, \dots, N$$

gdzie x_t jest obserwowaną wartością szeregu czasowego, τ_t jest składową trendu, s_t składową sezonowości, a r_t składową rezyduów. Dekompozycja taka jest dedykowana szeregom czasowym z zauważalnymi wolnozmiennymi fluktuacjami sezonowości oraz szybkozmiennymi zmianami składowej trendu [weng-gao]. Zakłada się ponadto, że składowa rezyduów zawiera całą pozostałą informację o szeregu czasowym – m.in. szum. Można to sformalizować w następujący sposób:

$$r_t = a_t + \epsilon_t$$

przy czym składowa ϵ_t jest składową szumu, a a_t modeluje poszukiwane anomalie w postaci nagłych przyrostów wartości (t.zw. *peak*ów). Dekompozycja STL jest procedurą iteracyjną i szczegółowo zostanie opisana w dokumentacji końcowej projektu. Na potrzeby tego dokumentu należy zaznaczyć, że wynikiem dekompozycji jest składowa a_t , a składowa:

- szumu ϵ_t jest usuwana wskutek operacji filtracji (ang. *denoising*) przy pomocy średniej/medianie kroczącej lub probabilistycznemu wygładzaniu eksponencjalnego (PEWMA) [PEWMA], co pozwala uzyskać sygnał postaci

- trendu τ_t jest usuwana wskutek operacji detrendyzacji, która w najprostszym wariancie sprowadza się do zastosowania operatora różnicowego $\nabla x_t = x_t - x_{t-1}$ lub do filtrów kroczących
- sezonowości s_t , która jest usuwana w standardowym standardzie metody STL przy pomocy LOESS (ang. *locally estimated scatterplot smoothing*), tj. metody łączącej działanie średniej kroczącej z regresją wielomianową [stl-origin].

STL zawiera trzy parametry sterujące metodą:

1. n_p liczbę obserwacji, która jest rozważana w każdym cyklu wyliczania składowej sezonowości
2. n_i liczbę iteracji wewnętrznej pętli algorytmu
3. n_o liczbę iteracji pętli zewnętrznej

oraz trzy lub więcej parametrów sterujących detrendyzacją, usunięciem szumu oraz ekstrakcją sezonowości.

Po otrzymaniu składowej a_t stosowany jest test statystyczny ESD (z ang. *Extreme Studentized Deviate*), w który służy do wykrycia anomalii w próbie o rozkładzie *asymptotycznie* normalnym. Jest on uogólnieniem testu Grubbs'a, w którym rozkład normalny próby jest warunkiem koniecznym. Test ESD rozważa dwie hipotezy

H_0 : w próbie $\{a_1, \dots, a_n$ nie ma punktów odstających (anomalii) H_1 : w próbie $\{a_1, \dots, a_n$ jest co najwyżej K punktów odstających.

i -ta statystyka testowa ESD wyliczana jest w następujący sposób:

$$T_i^{ESD} = \frac{\max_i |a_i - \bar{a}|}{\sigma}$$

gdzie \bar{a} oznacza średnią z próby, a σ odchylenie standardowe z próby. Po wyliczeniu T_i^{ESD} usuwana jest z próby obserwacja maksymalizująca licznik i liczona jest kolejna statystyka testowa na podstawie zmodyfikowanej próby.

Po wyliczeniu $\{T_i^{ESD}\}_{i=1, \dots, K}$ wyliczane są wartości krytyczne testu λ_i będące funkcją rozkładu t-studenta z $N - i$ stopniami swobody.

Liczbę anomalii w próbie znajduje się przez podanie największego i takiego, że $T_i^{ESD} > \lambda_i$.

W kontekście definicji procedury detekcji anomalii podanej [r3] należy wybrać z próby i największych elementów i ich znaczniki umieścić w zbiorze T_A .

Dekompozycja szeregu czasowego przez algorytm STL znajduje się na poniższym obrazku.

CAD k-NN

Metoda CAD k-NN (z ang. *Conformal Anomaly Detection k-Nearest Neighbours*)

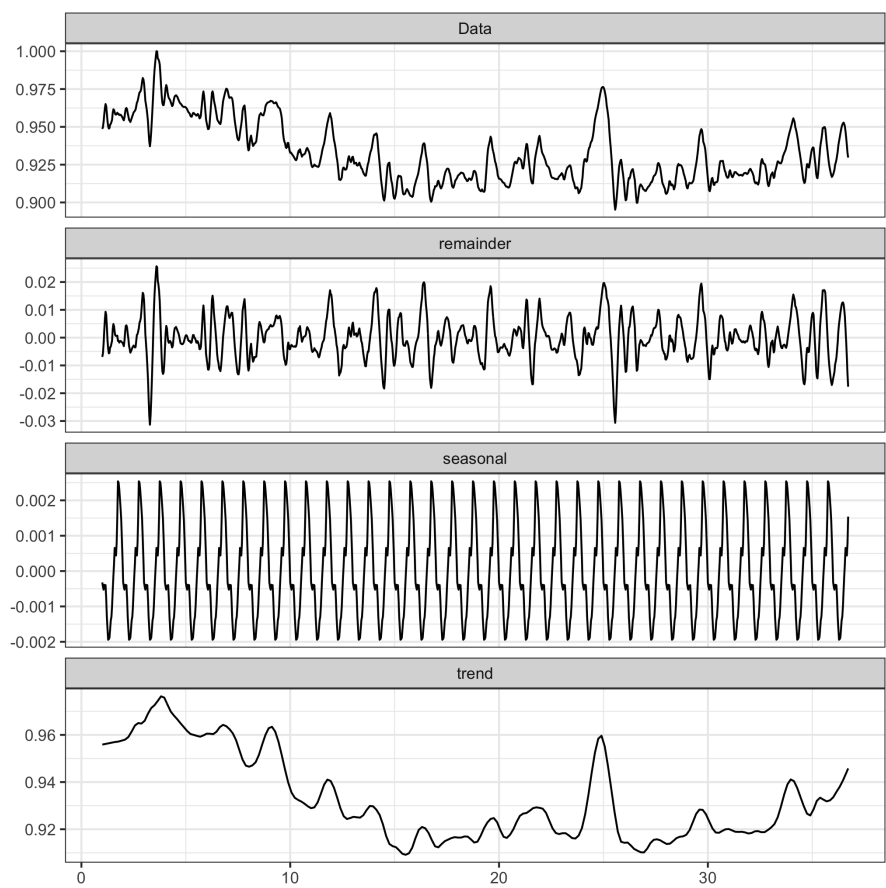


Figure 4: alt text

Las izolacyjny

Algorytm ten wybiera losową wartość podziału w przedziale między maksymalną a minimalną wartością cechy. w ten sposób dzielony jest cały zakres wartości cechy. W efekcie powstaje drzewo binarne w którym, ilość podziałów wymagana do wyizolowania próbki jest równa odległości od liścia do korzenia. Funkcją decyzyjną jest ta odległość, uśredniona względem drzew lasu. Jest ona miarą czy dana próbka jest anomalią czy nie.

$$s(x, n) = 2^{\frac{-E(h(x))}{c(n)}}$$

gdzie $E(h(x))$ jest uśrednioną względem wszystkich drzew długością ścieżki (ilością węzłów) prowadzącej od liścia do korzenia, $c(n)$ jest średnią długością ścieżki w drzewie, a n jest ilością węzłów drzewa. \ Próbki będące anomaliami zwykle wymagają mniejszej ilości podziałów aby przejść z przenia do liści. Gdy funkcja $s(x, n)$ osiąga wartości bliskie 1 to badany punkt z dużym prawdopodobieństwem jest anomalią, jeśli natomiast osiąga wartości bliskie 0.5 to punkt jest normalny. \ Dane zostaną poddane standaryzacji przez odjęcie wartości średniej i podzielenie przez odchylenie standardowe. Nie wymagają one innych operacji wykonywanych w oknie czasowym przy zastosowaniu tej metody. Algorytm ten ma jeden parametr - rate. Kontroluje on jaka część próbek średnio będzie uznawanych za anomalię. Przyjmuje wartości z zakresu $[0, 1]$. Parametr ten zostanie dobrany eksperymentalnie.

Metody spektralne

Charakterystyka zbiorów danych

Zbiory danych użyte do analizy działania algorytmów zostały częściowo omówione w rozdziale [r2]. W niniejszym rozdziale zostaną wskazane źródła, z których pochodzą dane, oraz podana zostanie krótka charakterystyka tych danych.

Kompletna analiza statystyczna danych, na którą będzie składało się zbadanie rozkładu danych, autokorelacji szeregu czasowego lub jego innych właściwości jak stacjonarność zostanie umieszczona w dokumentacji końcowej.

WIG20

Historyczne dane WIG20 dostępne są do pobrania ze strony stooq.pl z interwałem:

- dziennym
- tygodniowym
- miesięcznym
- kwartalnym
- rocznym.

Dane pobierane są w formacie CSV i nie zawierają wartości brakujących. Struktura zbioru danych przedstawiona jest na poniższym obrazku.


```

Rows: 2,143
Columns: 2
$ price <int> 195600, 195037, 194398, 193379, 192695, 192146, 191602, 191378,...
$ time <dtm> 2020-03-14 10:30:21, 2020-03-14 10:50:21, 2020-03-14 11:10:21,...

```

Figure 5: alt text

Należy jednak zaznaczyć, że rozważaną w projekcie wartością szeregu czasowego jest uśredniona wartość indeksu z wartości otwarcia, zamknięcia oraz wartości najmniejszej i największej danej sesji.

Wartości indeksu WIG20 dostępne są od 16 kwietnia 1991 do dnia dzisiejszego (02.04.2020) z tą uwagą, że nie we wszystkich przypadkach zachowany jest wymagany interwał, co jest zaznaczone na rysunku poniżej.

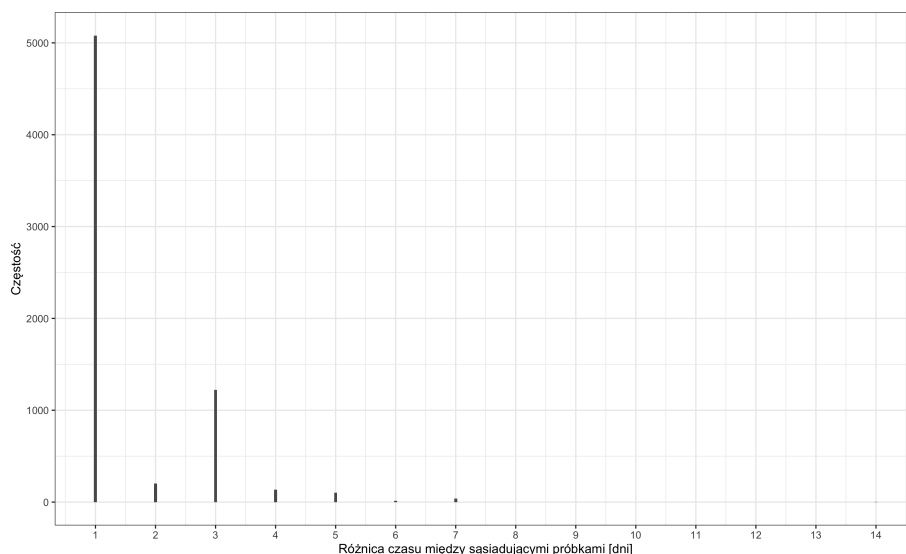


Figure 6: alt text

W związku z tym do badań zostanie użyty najdłuższy podciąg, w którym odstęp między danymi wynosi jedną dobę.

WoW Token

Historyczne kursy tokena dostępne są na stronie wowtokenprices.com. Serwis udostępnia API, które umożliwia pobranie danych z kwantem 20-minutowym, które nie zawierają wartości brakujących, od początku istnienia tokena, tj. od roku 2015. Kurs tokena różni się między regionami, w których znajdują się serwery. Dostępnych jest 5 regionów, tj.

1. europejski

2. amerykański
3. chiński
4. tajwański
5. koreański.

W ramach projektu interesujące będą tylko dane z regionu europejskiego.

Struktura zbioru danych z ostatniego miesiąca widoczna jest na poniższym obrazku.

```
Rows: 2,143
Columns: 2
$ price <int> 195600, 195037, 194398, 193379, 192695, 192146, 191602, 191378,...
$ time <dtm> 2020-03-14 10:30:21, 2020-03-14 10:50:21, 2020-03-14 11:10:21,...
```

Figure 7: alt text

Plan badań

Celem projektu jest zbadanie i porównanie metod detekcji anomalii w szeregach czasowych przy pomocy danych scharakteryzowanych we wcześniejszych rozdziałach.

Przyjęta metodologia zakłada, że zadanie detekcji anomalii zostanie potraktowane jak zadanie klasyfikacji binarnej. Oznacza to, że przykłady w zbiorze danych zostaną oznaczone flagą, która informuje o tym czy dany przykład jest anomalią czy też nie.

Przydział flagi będzie odbywał się na dwa sposoby:

1. autorzy manualnie wybiorą podzbiór zdarzeń, których zajście spowodowało znaczny przyrost lub spadek indeksu/wartości tokena i oznaczą je jako anomalie. Przykłady takich zdarzeń są następujące:

- * kryzys gospodarczy z 2008 roku (ogłoszenie upadłości przez bank _Lehman Brothers_) (WIG20)
- * rozpoczęcie stanu epidemicznego w Polsce w związku z pandemią koronawirusa SARS-CoV-2 (WIG20)
- * atak Iranu na bazy wojskowe USA na początku 2020 roku (WIG20)
- * zwiększenie współczynnika przyrostu zdobywanego doświadczenia o 100% (WoW Token)
- * wydanie nowej części gry _World of Warcraft_ (WoW Token).

2. do zbiorów danych zostaną wprowadzone anomalie w sposób losowy.

Dzięki takiemu podejściu możliwe będzie porównanie metod detekcji w dość ogólnym kontekście (dane równie dobrze mogłyby być syntetycznie generowane) oraz sprawdzenie jak metody radzą sobie z wykrywaniem anomalii, które odpowiadają przełomowym zdarzeniom i mają odzwierciedlenie na rynkach.

Porównanie modeli odbędzie się przy pomocy trzech miar:

1. precyzji $P = \frac{S \cap G}{S}$
2. odzysku (z ang. *recall*) $R = \frac{S \cap G}{G}$

3. miary F-1 $F = 2 \frac{PR}{P+R}$ będącej średnią harmoniczną P i R

przy czym S jest zbiorem poprawnie rozpoznanych anomalii, a G jest zbiorem wszystkich anomalii w zbiorze danych.

Ponadto zbadane zostaną różne nastawy parametrów sterujących użytych metod jak:

- sposób dokonywania dekompozycji sygnału w metodzie STL
 - zastąpienie składowej trendu medianą [adts-cloud]
 - użycie różnych metod usunięcia szumu, tj. np. SMA oraz PEWMA
- wpływ szerokości okna na działanie metody MAD
- wpływ wielkości kolejki strojenia (`__calibration queue`), długości zbioru referencyjnego oraz parametru metody NN na działanie algorytmu CAD k-NN.