

POLITECHNIKA BYDGOSKA IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Aleksandra Czajkowska

**WYKORZYSTANIE FIZYKOCHEMICZNYCH MIAR
PROCESÓW EWOLUCJI STANU DEGRADACJI
W DIAGNOZOWANIU OBIEKTU ZŁOŻONEGO**

PROMOTOR

Prof. dr hab. inż. Bogdan ŻÓŁTOWSKI

WITPIS Sulejówek

UTH Warszawa

Bydgoszcz, 11 maja 2022

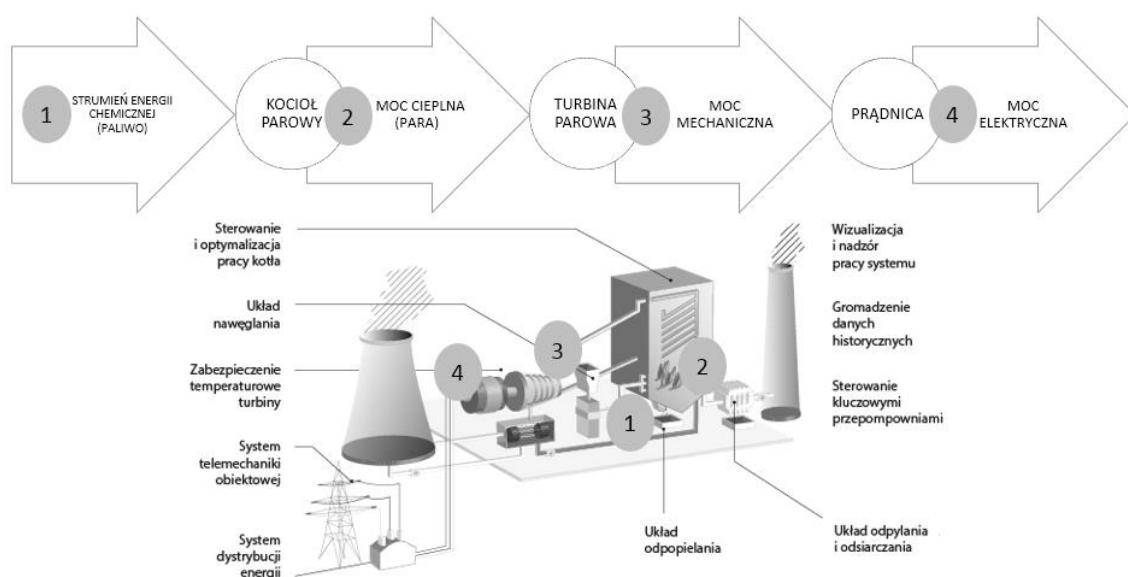
SPIS TREŚCI

1.	WSTĘP	3
2.	HIPOTEZA, CEL I ZAKRES PRACY	4
2.1.	HIPOTEZA BADAWCZA	5
2.2.	CEL GŁÓWNY PRACY I CELE SZCZEGÓŁOWE.....	5
2.3.	ZAKRES PRACY	6
3.	SKŁADOWE PROCESU ROZPOZNAWANIA STANU ELEKTROFILTRA	7
3.1.	PROCES ROZPOZNAWANIA STANU MASZYNY	7
3.2.	PROCEDURA OCENY STANU TECHNICZNEGO MASZYNY	7
3.3.	PROCEDURA GENEZOWANIA STANU TECHNICZNEGO MASZYNY	10
3.4.	PROCEDURA PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO MASZYNY.....	13
3.5.	ALGORYTM PROCESU ROZPOZNAWANIA STANU TECHNICZNEGO MASZYNY	14
4.	METODYKA BADAŃ	17
4.1.	ALGORYTM POSTĘPOWANIA BADAWCZEGO	17
4.2.	OBIEKT BADAŃ	19
4.3.	APARATURA BADAWCZA.....	21
4.4.	WARUNKI REALIZACJI EKSPERYMENTU	22
5.	WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA STATYSTYCZNA.....	25
5.1.	ALGORYTM WYZNACZANIA TESTU KONTROLI STANU TECHNICZNEGO I LOKALIZACJI USZKODZENIA ELEMENTÓW W ELEKTROFILTRZE	25
5.2.	OPTYMALIZACJA ZBIORU PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH	27
5.3.	GENEZOWANIE WARTOŚCI ZBIORU PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH ZA POMOCĄ WYBRANYCH METOD APROKSYMACJI I INTERPOLACJI.....	29
5.4.	WYZNACZENIE OPTYMALNEJ METODY PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO ELEKTROFILTRU	30
6.	PRZESŁANKI DO MODERNIZACJI EKSPLOATACJI OBIEKTU	31
7.	ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI	33
	LITERATURA.....	34

1. WSTĘP

Kwestia dbania o środowisko jest bardzo ważna, a spełnienie przez polski sektor energetyczny rygorystycznych norm narzuconych przez Unię Europejską i wytycznych zawartych w Rozporządzeniach Ministra Środowiska, odnoszących się do redukcji emisji NO_x , SO_x oraz pyłu, wymaga zastosowania odpowiednich technik oczyszczania i metod usprawniających proces oczyszczania gazów spalinowych [1-6].

Proces produkcji energii elektrycznej w elektrowniach ciepłych konwencjonalnych rozpoczyna się od dostarczenia paliwa (węgiel kamienny bądź brunatny) do kotła [7]. Paliwo spalane jest w specjalnie przystosowanych kotłach wytwarzających parę wodną o wysokiej temperaturze i wysokim ciśnieniu. W tym etapie energia chemiczna paliwa zostaje zamieniona na energię cieplną pary wodnej. Para dostaje się do turbiny, gdzie rozprężając się, wykonuje pracę mechaniczną (kolejna przemiana energii z cieplnej na mechaniczną) [8]. Otrzymana energia mechaniczna dostarczana jest do generatora, gdzie przetwarzana jest finalnie na moc elektryczną (rys. 1.1.).



Rys. 1.1. Przemiana energii chemicznej na moc elektryczną [9, 10]

W każdym etapie, wszystkim przemianom towarzyszą straty energii. Budowa elektrowni powinna zapewnić jak najniższy koszt otrzymywania energii elektrycznej i możliwie największą sprawność poszczególnych przemian energii chemicznej na moc elektryczną [11, 13]. Skutkiem ubocznym produkcji energii elektrycznej jest wytwarzanie gazów spalinowych [14]. Większość związków chemicznych znajdujących się w zanieczyszczonym medium (spalinach) jest niebezpieczna dla zdrowia człowieka oraz trująca dla środowiska naturalnego [15]. W gazach spalinowych wyróżnia się obecność takich związków chemicznych, jak: tlenki (O_2), w szczególności tlenek węgla (CO), dwutlenek siarki (SO_2), dwutlenek węgla (CO_2), dwutlenek azotu (NO_2), fluorowodór (HF) oraz czterochlorek węgla (CCl_4). W bloku energetycznym budowane są instalacje umożliwiające ochronę środowiska naturalnego przez emisją wyżej wymienionych toksycznych związków chemicznych do atmosfery i środowiska naturalnego [16, 17]. Pomiędzy kotłem energetycznym a kominem znajdują się instalacje do odsiarczania i odazotowania spalin oraz elektrofiltr [18]. Pył opuszczający elektrofiltr i gromadzony w lejach zsypanych to w ponad 80% $\text{PM}_{2,5}$. Urządzenia odpylające uniemożliwiają zatem przedostanie się szkodliwych cząstek stałych do środowiska naturalnego [19].

Pierwsze badania i patenty związane z odpylaczami elektrostatycznymi, popularnie nazywanymi elektrofiltrami, pochodzą z początków XX wieku [20]. Efektywny rozwój urządzeń nastąpił od 1970 roku, pod wpływem zaostrzenia norm dotyczących czystości powietrza. Pojawiły się nowe rozwiązania konstrukcyjne i lepiej poznano teorię elektrostatycznego odpylania. Prace w kolejnych dekadach

związane były nie tylko z uzyskaniem wysokiej skuteczności działania, ale także wysokiej niezawodności i dyspozycyjności tych urządzeń [21]. Tendencje rozwojowe tego obszaru skupiają się na poprawie ekonomiczności konstrukcji i działania urządzenia. Zasada działania odpylaczy elektrostatycznych nie zmieniła się od dziesięcioleci, lecz ich konstrukcja rozwija się w kierunku obniżenia masy, gabarytów przy jednoczesnej poprawie skuteczności odpylania. Elektrofiltry należą do najefektywniejszych odpylaczy stosowanych w przemyśle [22]. Tworzone są na bieżąco nowe patenty, które mają na celu modernizowanie i unowocześnienie dotychczasowych sposobów oczyszczania gazów spalinowych oraz samego urządzenia [23].

Diagnozowanie stanu technicznego maszyn krytycznych należy przeprowadzać w celu zachowania pełnej sprawności obiektu i nie dopuszczenia do występowania częstych awarii, prowadzących do wyłączenia urządzenia z eksploatacji. Ważne jest zastosowanie odpowiednich technik i metod do ciągłego prowadzenia nadzoru i monitorowania stanu technicznego maszyn krytycznych, aby zlokalizować wstępną fazę wystąpienia uszkodzeń podzespołów, zespołów, czy też elementów elektrofiltru [24-27].

Zachowanie sprawności elektrofiltru jest niezwykle ważna, ze względu na rolę jaką odgrywają elektrofiltry w procesie oczyszczania spalin z zanieczyszczeń. Najważniejszy wpływ na sprawność odpylania gazów spalinowych mają następujące czynniki: szybkość przepływu gazu, koncentracja pyłu w gazie, rezystywność pyłu oraz napięcie zasilania [28]. Sprawność elektrofiltru zależna jest w głównej mierze od prędkości przepływu gazu przez elektrody zbiorcze i ulotowe znajdujące się w komorze obiektu [29, 30]. Zależność jest taka, że wraz ze wzrostem ilości przepływającego przez elektrofiltr gazu sprawność jego zmniejsza się, natomiast, gdy ilość przepływającego gazu maleje sprawność elektrofiltru wzrasta. Stosowane w elektrofiltrach praktyczne prędkości przepływu wahają się w granicach od 0,4 do 2,5 m/s, zależnie od typu układu gazowo-pyłowego i żądanej skuteczności procesu odpylania spalin. Dla różnych rodzajów spalin (z węgla kamiennego, węgla brunatnego, spalanie odpadów, hutnictwo) projektuje się różne prędkości przepływu spalin [31]. Prędkość przepływu gazu musi być mniejsza od prędkości porywanego pyłu [32].

Zachowanie wysokiego poziomu sprawności elektrofiltru jest kluczowe z tego względu, że odpylacz elektrostatyczny można przypisać do grupy maszyn krytycznych, czyli do urządzeń, które nie posiadają rezerwowania, a poniesiony koszt inwestycyjny na ich zakup jest stosunkowo wysoki [33, 34]. Eksploatacja maszyn krytycznych wpływa w znaczący sposób na uzyskanie odpowiedniego prognozy wyniku ekonomicznego dla danego przedsiębiorstwa [35, 36]. Niezawodność obiektów krytycznych zostaje wymuszona przez utrzymanie ciągłości procesu produkcyjnego [37, 38].

2. HIPOTEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Tematyka rozprawy doktorskiej oparta jest na krajowych oraz zagranicznych źródłach literaturowych z następujących obszarów: energetyka zawodowa, funkcjonowanie bloków energetycznych, diagnozowanie stanu technicznego maszyn, strategii eksploatacji i utrzymania ruchu. Dodatkowo w rozprawie została ukazana istotność zachowania obiektu technicznego w możliwie najwyższej sprawności, na podstawie informacji wskazujących zasadę działania elektrofiltrów oraz w ujęciu ochrony środowiska naturalnego przed nadmierną emisją cząsteczek pyłowo-gazowych. W celu minimalizacji zagrożeń w fazie eksploatacji należy nadzorować zmiany stanu technicznego elektrofiltru.

Problematyka diagnozowania odpylacza elektrostatycznego związana jest z brakiem usystematyzowania ram czasowych przeprowadzania kontroli stanu technicznego obiektów po okresie gwarancyjnym oraz archiwizowania ustandaryzowanej listy kluczowych parametrów pracy dla każdego obiektu. Podstawowym celem diagnozowania stanu elektrofiltru powinno być przedstawienie ciągu przyszłościowych działań eksploatacyjnych umożliwiających przewidywanie wystąpienia sytuacji niekorzystnych w odpylaczu elektrostatycznym oraz zredukowanie ryzyka pojawienia się uszkodzeń, które ostatecznie doprowadzają do wyłączenia obiektu z dalszej eksploatacji (przejście w stan niezdatności).

2.1. HIPOTEZA BADAWCZA

Wskazany zakres problematyki i uzasadnienie wyboru tematu rozprawy doktorskiej pozwoliło na postawienie hipotezy, która brzmi następująco:

„Możliwe jest dozorowanie i wskazywanie zmian stanu technicznego elektrofiltru, bazując na analizie miar fizykochemicznych ewolucji procesu degradacji obiektu złożonego”.

Przeprowadzenie badań weryfikujących i potwierdzających sprecyzowaną hipotezę pracy polega na:

- analizie i krytycznej ocenie stanu wiedzy oraz techniki w zakresie problemów rozprawy;
- wnikliwej analizie dotychczasowych metod diagnozowania stanu technicznego elektrofiltrów;
- ocenie przebiegu obecnie realizowanych przeglądów, kontroli i modernizacji odpylaczy elektrostatycznych;
- analizie sygnałów diagnostycznych i wybór symptomów określających zależność pomiędzy uszkodzeniem danego podzespołu elektrofiltru a zmianami stanu podatności obiektu;
- przemysłowych badaniach stanu elektrofiltrów (miary i wartości sygnałów, cechy stanu obiektu, modele przyczynowo - skutkowe);
- opracowaniu procedur dla procesu rozpoznawania stanu elektrofiltru, stanowiących podstawy podejmowanych decyzji eksploatacyjnych obiektu;
- sformułowaniu przemysłowych zasad postępowania podczas realizacji procesu diagnozowania stanu technicznego elektrofiltrów;
- zaproponowaniu innowacyjnej strategii eksploatacji według stanu technicznego dedykowanej dla oceny efektywności eksploatacji elektrofiltrów;
- opracowaniu zaleceń dla systemu rejestracji uszkodzeń i awarii w odpylaczu elektrostatycznym (gromadzenie danych o uszkodzeniach wraz z przyczynami zajścia nagłych uszkodzeń).

2.2. CEL GŁÓWNY PRACY I CELE SZCZEGÓŁOWE

Biorąc pod uwagę przeprowadzoną analizę stanu wiedzy oraz wskazaną w pracy problematykę związaną z diagnozowaniem elektrofiltrów, sformułowano cele główne uzasadniające powód podjęcia rozprawy doktorskiej we wskazanym temacie:

- wybór parametrów stanu określających zależność pomiędzy rozwijającymi się uszkodzeniami elektrofiltru, a zmianami miar stanu urządzenia;
- opracowanie procedur rozpoznawania stanu technicznego elektrofiltru (ocena stanu, geneza, prognoza) i lokalizacji uszkodzeń;
- sformułowanie założeń dla dedykowanego systemu eksploatacji elektrofiltrów.

W rozprawie wskazano potrzebę opracowania nowej metodyki realizacji procesu diagnozowania stanu obiektu, przy zastosowaniu fizykochemicznych miar procesów ewolucji stanu podatności elektrofiltru. W ramach czynności prowadzących do osiągnięcia wymienionych powyżej celów głównych rozprawy doktorskiej wskazano:

- przedstawienie zaleceń dla systemu (bank danych) rejestracji uszkodzeń w odpylaczu elektrostatycznym (gromadzenie informacji o uszkodzeniach wraz z przyczynami ich zajścia i diagnostyką);
- określenie częstotliwości i zakresów czynności realizacji przeglądów obiektu dla strategii eksploatacji elektrofiltrów według stanu technicznego;
- doświadczalne zbadanie opracowanego algorytmu diagnozowania, który finalnie ma doprowadzić do określenia stanu aktualnego i przyszłego obiektu. Algorytm diagnozowania elektrofiltru opiera się na:
 - wyznaczeniu testu kontroli stanu technicznego i lokalizacji uszkodzenia obiektu;
 - genezowaniu i prognozowaniu stanu technicznego elektrofiltru;
 - opracowaniu wyników uzyskanych badań i ich analizie statystycznej.
- dokonanie oceny efektywności eksploatacji obiektów złożonych przy zastosowaniu: mierników efektywności i jakości, analizy SWOT oraz metody FMEA.

2.3. ZAKRES PRACY

Niniejsza rozprawa doktorska składa się z wstępu, ośmiu rozdziałów, zakończenia zawierającego wnioski oraz spisu literatury.

W rozdziale pierwszym przedstawiono wprowadzenie do tematyki rozprawy.

W rozdziale drugim przedstawiono teoretyczne aspekty obranego tematu pracy. Należało wskazać tematykę związaną z diagnozowaniem maszyn wraz z zawarciem informacji o utrzymaniu w zdadności maszyn w sektorze energetycznym. Na wstępie rozdziału omówiono elementy wchodzące w skład systemu eksploatacji obiektów technicznych, przy czym skupiono się na omówieniu działań związanych z procesem obsługi maszyn. Wspomniano również o najczęściej stosowanych strategiach eksploatacji obiektów technicznych, przechodząc płynnie do wskazania znaczenia funkcji sterującej diagnostyki „Dt” w eksploatacji maszyn. W rozdziale wskazano wpływ nowych regulacji i zmiany obowiązujących norm z zakresu ochrony środowiska naturalnego na polski sektor energetyczny.

W rozdziale trzecim przedstawiono hipotezę, cele główne oraz cele szczegółowe rozprawy doktorskiej. Omówienie problematyki z zakresu funkcjonowania oraz obsługi obiektów technicznych, wraz z wskazaniem uzasadnienia podjęcia tematu rozprawy, ma doprowadzić do ustandaryzowania czynności związanych z właściwym diagnozowaniem stanu technicznego elektrofiltru. Jeżeli w pracy zostaną uzyskane odpowiedzi, zostaną zaprezentowane rozwiązania sformułowanych problemów, będzie można uznać, że cele rozprawy doktorskiej na temat: „Wykorzystanie fizykochemicznych miar procesów ewolucji stanu degradacji w diagnozowaniu obiektu złożonego”, zostały osiągnięte.

W rozdziale czwartym wskazano, jakie rozporządzenia i normy w Polsce wpływają na poprawną eksploatację elektrofiltrów. Zaprezentowano proces degradacji i ewolucji stanu odpylacza elektrostatycznego, wraz z omówieniem stanu niezdatności ukazując najczęstsze przyczyny wystąpienia uszkodzenia czy też awarii w obiekcie. Ostatecznie dokonano analizy ryzyka i bezpieczeństwa elektrofiltru w ujęciu ochrony środowiska naturalnego, zdrowia oraz życia ludzi.

W rozdziale piątym przedstawiono proces rozpoznawania stanu technicznego elektrofiltru. Wskazano procedury dotyczące oceny, genezy oraz prognozy obiektu technicznego, przedstawiając ostatecznie algorytm postępowania podczas badania stanu elektrofiltru. Opracowanie metodyki oraz wytycznych rozpoznawania stanu technicznego, stanowi kluczowy etap do zaprezentowania nowych działań dla strategii eksploatacji elektrofiltrów według stanu technicznego

W rozdziale szóstym omówiono zasadę działania obiektu badań i wskazano metodyki określające etapy realizacji pomiarów diagnostycznych elektrofiltru. Sprecyzowano również listę niezbędnych narzędzi wykorzystywanych do badania obiektu i poboru próbek. Aktualnie obowiązujące metodyki odnoszą się głównie do określenia rozmiaru cząsteczek, czy też wielkości zanieczyszczeń znajdujących się w gazach odlotowych (za elektrofiltrem) czy też w odseparowanym pyłe. Ukazano istotność dodania trzech nowych metodyk, które pozwolą wskazać zmianę stan techniczny elektrofiltru, tym samym umożliwią głębszą analizę pracy obiektu.

W rozdziale siódmym określono granice stanu zdadności elektrofiltru opierając się na głównych zagadnieniach procesu rozpoznawania stanu technicznego. Wskazano istotność wyznaczenia zależności pomiędzy wystąpieniem symptomu a zmianą stanu technicznego maszyny oraz określenia wartości granicznych mierzonych symptomów. Przekroczenie wartości granicznej wskazanych w rozdziale krytycznych parametrów (miar fizykochemicznych) wskazuje wejście maszyny w stan przyspieszonego zużycia, cechującego się dużym prawdopodobieństwem awarii. W rozdziale przedstawiono również schemat wyznaczania procedur rozpoznawania stanu elektrofiltru, prowadzący do oceny, genezy i prognozy stanu technicznego odpylacza elektrostatycznego (modelowanie zależności przyczynowo-skutkowych).

W rozdziale ósmym pracy przedstawiono zasady dla proaktywnego diagnozowania stanu technicznego odpylaczy elektrostatycznych, bazującego na ocenie systemu eksploatacji elektrofiltrów, w oparciu o wybrane wskaźniki efektywności i jakości. Przeprowadzono również analizę SWOT, wskazując najważniejsze czynniki strategiczne charakteryzujące proces eksploatacji odpylaczy elektrostatycznych. Zastosowanie metody FMEA, pozwoliło przedstawić skutki uszkodzeń elementów krytycznych elektrofiltru oraz ich wpływ na skuteczność odpylania spalin. Na koniec dokonano oceny eksploatacji odpylaczy elektrostatycznych precyzując, jakie przesłanki określają moment wykonania modernizacji obiektu.

W zakończeniu rozprawy doktorskiej dokonano krytycznej analizy uzyskanych wyników,

wskazano dokonania autora w pracy oraz wytyczne do dalszych badań.

Pracę zamyka przegląd literatury ujęty na potrzeby realizacji niniejszej rozprawy, który głównie dotyczy obszarów energetyki zawodowej, ochrony środowiska, spalania paliw w blokach energetycznych, procesu eksploatacji oraz degradacji maszyn, metod diagnozowania stanu obiektów technicznych, modelowania procesów eksploatacji maszyn i funkcjonowania elektrofiltrów w sektorze energetycznym.

3. SKŁADOWE PROCESU ROZPOZNAWANIA STANU ELEKTROFILTRA

3.1. PROCES ROZPOZNAWANIA STANU MASZyny

Różnego typu działania diagnostyczne są obserwowane na każdym etapie cyklu życia maszyny, w zależności od stawianych wymagań w danej fazie. Diagnostyka jest dziedziną wiedzy, która wskazuje na elementy związane z procesem rozpoznawania stanu technicznego obiektów w czasie eksploatacji, bazując na danych historycznych określają pracę maszyny oraz ukazuje przyszłe działania obsługowe, jakie należy wykonywać, aby obiekt był w nieustannej gotowości. W diagnostyce technicznej obiektem badań może być zarówno cały obiekt bądź element. Cele diagnostyki do zachowania elektrofiltru w zdatności, mogą zostać spełnione poprzez [39-42]:

- analizę miar fizyczno-chemicznych, które mogą zostać wykorzystane jako środek przekazu o zachodzeniu zmiany stanu obiektów;
- przeprowadzenie badań wskazujących zbiór parametrów diagnostycznych (ustalenie symptomów stanu obiektu);
- opracowanie modelu diagnostycznego dla odpylacza elektrostatycznego bazującego na wybranych cechach stanu i parametrów diagnostycznych;
- określenie algorytmu procesu rozpoznawania stanu: ocena, geneza i prognoza stanów;
- wskazanie czynności dla działu utrzymania ruchu, w ramach postępowania praktycznego w czasie wykonywania badań diagnostycznych i w czasie oceny stanu obiektu.

Wskazanie czynności w ramach realizacji badań diagnostycznych mają zadanie określenie stanu maszyny w danej chwili, poprzez porównanie wartości parametrów dla stanu rzeczywistego (chwilowego) ze stanem wzorcowym. Efektem wskazanych celów jest spisanie procedur procesu rozpoznawania stanu technicznego elektrofiltru. Dokumenty zostały opublikowane przez autora niniejszej rozprawy, w artykułach naukowych, dlatego w dalszej części pracy zamieszczono streszczenia kluczowych informacji dla oceny, genezy i prognozy stanu technicznego elektrofiltru [40-44].

3.2. PROCEDURA OCENY STANU TECHNICZNEGO MASZyny

Zakres procedury obejmuje ocenę stanu technicznego maszyny (elektrofiltru), wykonywanej w trakcie eksploatacji oraz realizacji czynności kontrolnych mających na celu bieżącą analizę pracy obiektu oraz działania umożliwiające wykrycie uszkodzeń: zmęzeniowych, starzeniowych, losowych, niszczące elementy konstrukcyjne i mechaniczne elektrofiltru. Pierwszy etap oceny stanu technicznego oparty jest na podstawie przeprowadzenia oględzin i wykrycia awarii, uszkodzeń, defektów, zmian w procesie oczyszczania spalin w trakcie eksploatacji elektrofiltru. Najważniejsza na tym etapie jest realizacja poniższych działań przez wskazane grupy:

- diagnostyka awarii telefonicznie na podstawie wskazań natężenia oraz napięcie (Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
- diagnostyka awarii na obiekcie. Kontakt przez 24 godziny w nagłym przypadku awarii (Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
- wewnętrzna i zewnętrzna inspekcja elektrofiltrów w celu wykrycia przyczyny usterki (Mechanik Działu Utrzymania Ruchu wraz z Kierownikiem Działu Utrzymania Ruchu), w przypadku uszkodzeń uniemożliwiających dalszą eksploatację obiektu (niezdatność urządzenia);
- nadzór techniczny prac naprawczych na obiekcie (Za obszar odpowiada Wykonawca

Modernizacji/Naprawy);

- optymalizacja pracy urządzeń mechanicznych i elektrycznych (Wykonawca Modernizacji/Naprawy oraz Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
- zharmonizowane z procesem nastawienie zespołów zasilających w systemie sterowania elektrofiltrów z możliwością pracy w reżimie ze spalaniem (Wykonawca Modernizacji/Naprawy oraz Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
- wdrożenie procedury przeciwdziałaniu niesprawności elektrofiltrów w zależności od zachodzących zmian w procesie spalania (Kierownik Działu Utrzymania Ruchu);
- próba eksploatacyjna – testy i monitorowanie pracy elektrofiltrów (Wykonawca Modernizacji/Naprawy, Kierownik Działu Utrzymania Ruchu oraz Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
- raport techniczny z dokumentacją usunięcia przyczyny awarii lub niewłaściwej pracy (Wykonawca Modernizacji/Naprawy oraz Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego).

Ocena i nadzór techniczny wykonanej modernizacji elektrofiltru składa się z następujących etapów:

- planowanie przeglądów serwisowych i części zamiennych elektrofiltru (Kierownik Działu Utrzymania Ruchu);
- kompletny przegląd, inspekcja wewnątrz i na zewnątrz instalacji mechanicznych i elektrycznych elektrofiltrów, włącznie z uziemieniem, zespoły prostowników, systemy sterowania i regulacji wysokiego napięcia (Wykonawca Modernizacji/Naprawy oraz Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
- kalibracja pyłomierzy (Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
- przegląd instalacji odbioru pyłu z elektrofiltru (Kierownik Działu Utrzymania Ruchu wraz z Wykonawcą Modernizacji/Naprawy);
- na podstawie przeprowadzonego przeglądu opracowanie szczegółowego raportu z dokumentacją fotograficzną wraz z wyszczególnieniem zalecanych prac naprawczych, zaleceń modyfikacji, a nawet modernizacji czy usuwania uszkodzeń (Kierownik Działu Utrzymania Ruchu);
- sprawdzenie izolacji, włączów, kanałów spalin i instalacji odpielania przy użyciu kamery termowizyjnej z sensorem podczerwieni i laserem (Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
- nadzór techniczny robót naprawczych, remontu, modyfikacji. Uczestnictwo w rozruchu (Kierownik Działu Utrzymania Ruchu wraz z Wykonawcą Modernizacji/Naprawy);
- szczegółowa kontrola wykonanych robót remontowych, czystości izolatorów i wnętrza. Próba wysokiego napięcia na zimno przy optymalnych parametrach prostowników, test sprawności układów sterujących oraz ich optymalizacja pracy (Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
- dokonanie regulacji pracy elektrofiltrów, optymalizacja sterowników mikroprocesorowych po rozruchu i osiągnięciu nominalnych parametrów spalania (Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego).

Ocena stanu technicznego elektrofiltru powinna być również realizowana za pomocą algorytmu wyznaczania testu kontroli stanu technicznego i lokalizacji uszkodzenia elektrofiltru, który składa się z następujących etapów:

- akwizycja danych;
- optymalizacja zbioru wartości parametrów diagnostycznych (tylko w przypadku dużej liczebności zbioru Y , np. $m > 10$);
- porządkowanie zbioru danych poprzez określenie zbioru $\{s_i(\Theta_k), i=1, \dots, l; k=1, \dots, K\}$;
- badanie istotności zmian wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j(\Theta_k)\}$ w zależności od stanu $\{s_i = f(\Theta_k); \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$, tzn. który z parametrów diagnostycznych „najlepiej” opisuje stan NZU – s_i ;

a) za pomocą metody badania odległości pomiędzy przedziałami ufności średnich wartości

- parametrów diagnostycznych w przypadku badania grupy maszyn (liczba obiektów większa od 10). Odpowiednio przyjmuje się wartości: 1 – gdy test wykaże, że przedziały ufności średnich parametrów $\{\{y_{ji}\}(\Theta_1)\}$ i $\{\{y_{ji}\}(\Theta_k)\}$ nie mają punktów wspólnych oraz 0, gdy test odległości wykaże, że przedziały ufności średnich parametrów $\{\{y_{ji}\}(\Theta_1)\}$ i $\{\{y_{ji}\}(\Theta_k)\}$ mają punkty wspólne;
- b) za pomocą relacji zmienności wartości parametrów diagnostycznych w przypadku, gdy rozpatruje się pojedynczy obiekt grupy maszyn – zbiór wartości $\{y_j(\Theta_k)\}$. Odpowiednio przyjmuje się wartości: 1 oraz 0;
- c) w przypadku, gdy zbiór $\{s_i = f(\Theta_k)\}$ jest zbiorem wieloelementowym wyniki badań istotności zmian wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j(\Theta_k)\}$ w zależności od stanu $\{s_i = f(\Theta_k); \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$ są tożsame dla wszystkich stanów niezdatności urządzenia $\{s_i = f(\Theta_k)\}$.
- Wyznaczenie macierzy boolowskiej:
 - a) 1 – gdy zmiana stanu niezdatności urządzenia – s_i powoduje istotne zmiany wartości parametru diagnostycznego y_j ;
 - b) 0 – gdy zmiana stanu niezdatności urządzenia – s_i nie powoduje istotnych zmian wartości parametru diagnostycznego y_j .
 - Określenie optymalnej metody wyznaczania testu kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń w zależności od liczebności zbioru parametrów diagnostycznych i czasu pracy maszyny:
 - a) opracowanie optymalnej metody wyznaczania testu kontroli stanu maszyny:
Wyznaczenie testu kontroli stanu T_{KS} na podstawie macierzy boolowskiej – test T_{KS} jako wektor wartości logicznych (0, 1) parametrów diagnostycznych i tożsamy jemu wektor stanów: $\{(y_1, \dots, y_n, \dots, y_N)\} \Rightarrow S^0 \vee S^1 = \{(s_1, \dots, s_n, \dots, s_N)\}$ dla stanu zdatności maszyny S^0 i stanu niezdatności maszyny S^1 .
 - b) badanie wpływu czasu pracy maszyny na optymalny test diagnostyczny;
 - c) opracowanie optymalnej metody wyznaczania testu lokalizacji uszkodzeń maszyny:
Wyznaczenie testu lokalizacji uszkodzeń T_{LU} na podstawie macierzy boolowskiej – test T_{LU} jako wektor wartości logicznych $\langle 0, 1 \rangle$ parametrów diagnostycznych i tożsamy jemu wektor stanów: $\{(y_1, \dots, y_n, \dots, y_N)\} \Rightarrow S^1 = \{(s_1, \dots, s_n, \dots, s_N)\}$, przy czym:
 - a) jeżeli wartość logiczna wektora sprawdzeń parametru diagnostycznego przyjmuje wartość „1” – wartość parametru jest w przedziale wartości granicznej;
 - b) jeżeli wartość logiczna wektora sprawdzeń parametru diagnostycznego przyjmuje wartość „0” – wartość parametru jest poza przedziałem wartości granicznych.
 - Interpretacja wyników testów kontroli stanu elektrofiltru:
 - a) $T_{KS} = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_m\}$:
 - $\{0, \dots, 0, \dots, 0\}$ - elektrofiltr zdatny („0” oznacza, że wartość $y_j \neq y_{jg}$);
 - $\{1, \dots, 0, \dots, 0\}$ - elektrofiltr niezdatny („1” oznacza, że wartość $y_1 = y_{1g}$);
 - $\{1, \dots, 1, \dots, 0\}$ - elektrofiltr niezdatny („1” oznacza, że wartość $y_j = y_{jg}$);
 - $\{1, \dots, 1, \dots, 1\}$ - elektrofiltr niezdatny („1” oznacza, że wartość $y_m = y_{mg}$).
 - b) $T_{LU} = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_m\}$:
 - $\{1, \dots, 0, \dots, 0\}$ - elektrofiltr niezdatny, lokalizacja uszkodzenia – stan s_i („1” oznacza, że wartość $y_1 = y_{1g}$);
 - $\{1, \dots, 1, \dots, 0\}$ - elektrofiltr niezdatny, lokalizacja uszkodzenia – stan s_{i+1} („1” oznacza, że wartość $y_j = y_{jg}$);
 - $\{1, \dots, 1, \dots, 1\}$ - elektrofiltr niezdatny, lokalizacja uszkodzenia – stan s_{i+n} („1” oznacza, że wartość $y_m = y_{mg}$).
- Ocenę stanu technicznego elektrofiltru zamyka spis poniższych działań, dotyczących przebiegu modernizacji lub naprawy elektrofiltru:
- Wykonanie kwestionariusza informacyjno-technicznego elektrofiltru (Inżynier Działu Utrzymania Ruchu);
 - Wykonanie technicznych dokumentów przetargowych na wybranie Wykonawcy Modernizacji/ Naprawy (Inżynier Działu Utrzymania Ruchu wraz z Kierownikiem Działu Utrzymania Ruchu);
 - Wymiarowanie elektrofiltru (Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego);
 - Dobór i akceptacja materiałów. Kontrola jakości i specyfikacja materiałów (Kierownik Działu

Utrzymania Ruchu);

- Sprawdzenie i nadzór jakości oraz poprawności robót przy montażu i odbiorze elektrofiltru (Kierownik Działu Utrzymania Ruchu);
- Testy przy rozruchu (Wykonawca Modernizacji/Naprawy):

Po prawidłowym montażu oraz regulacji elektrofiltru należy wykonać tzw. ruch próbny, który trwa 72 godziny. Etap ten pozwala określić, czy została przywrócona zdatność urządzenia, czyli niezawodna praca elektrofiltru przy zakładanych wymaganiach i celach zawartych w umowie. Ruch próbny polega na przeprowadzeniu czynności weryfikujących zdolność realizacji ciągłej i bezawaryjnej pracy elektrofiltru. W czasie 72 godzin urządzenie ma za zadanie utrzymanie nominalnych parametrów realizacji procesu oczyszczania gazów spalinowych przy pełnym zakresie obciążeń kotła energetycznego. W przypadku prawidłowego przejścia testu podpisywany zostaje protokół odbioru. W przeciwnym wypadku niespełnienia wymagań zawartych w dokumentacji wykonuje się ponowny ruch próbny po uprzednim wyeliminowaniu przyczyn wcześniejszego niepowodzenia. Koszty usunięcia uszkodzenia ponosi wykonawca projektu. Zamknięcie wykonania przedsięwzięcia następuje po przekazaniu dokumentacji powykonawczej oraz dzienniczka budowy inwestorowi.

- Testy gwarancyjne (Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego):

Testy realizowane zgodnie z normą PN-Z-04030-7:1994 „Badanie zawartości pyłu. Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną”, określające następujące wartości parametrów:

- a) stężenie amoniaku w pyle spalinowym;
- b) stężenie pyłu przed i za elektrofiltrem (ocena skuteczności działania elektrofiltru);
- c) skład chemiczny emitowanego pyłu;
- d) strumień objętościowy spalin;
- e) zawartość tlenu w spalinach;
- f) zawartość wilgoci w spalinach;
- g) temperaturę spalin;
- h) emisję SO₂;
- i) emisję tlenku węgla;
- j) skład granulometryczny emitowanego pyłu.

- Testy i kontrole tuż przed upływem gwarancji (Firma Pomiarowo – Badawcza wykonująca badania dla obszaru energetycznego):

Testy i kontrole tuż przed upływem gwarancji są realizowane na zlecenie Inwestora, mając na uwadze wyniki wykonanej genezy, oceny i prognozy stanu technicznego elektrofiltru. Testy i kontrole tuż przed upływem gwarancji realizowane zgodnie z normą PN-Z-04030-7:1994 „Badanie zawartości pyłu. Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną”, określające wartości parametrów (lista wskaźników identyczna, jak w przypadku wyżej opisanych testów gwarancyjnych).

3.3. PROCEDURA GENEZOWANIA STANU TECHNICZNEGO MASZYN

Zakres procedury obejmuje genezę stanu technicznego elektrofiltru, wykonywanej podczas eksploatacji elektrofiltru. Innowacyjnym podejściem jest zastosowanie genezowania symptomowego, które umożliwia rejestrację wartości parametrów diagnostycznych elektrofiltru oraz stanów elektrofiltru w czasie eksploatacji. Użycie genezowania symptomowego pozwala określić na podstawie zgromadzonych danych oraz oględzin urządzenia, jaka była przyczyna oraz warunki powstania stanu niezdatności urządzenia. W celu poprawnego funkcjonowania nowoczesnych systemów obsługiwanie urządzeń z obszaru energetyki zawodowej istnieje potrzeba opracowania metodyki, która w przypadku niepełnej lub niepewnej historii parametrów diagnostycznych obiektu umożliwi szacowanie stanu urządzenia w czasie przeszłym eksploatacji (genezowania stanu maszyny).

Geneza stanu technicznego powinna być realizowana w pierwszej kolejności na podstawie rejestracji wartości parametrów diagnostycznych oraz stanów elektrofiltru w czasie eksploatacji. Szczegółowe działania wskazano poniżej:

- ciągle monitorowanie pracy elementów krytycznych:
 - a) elektrody ulotowe i zbiorcze;
 - b) strzepywacze elektrod ulotowych i elektrod zbiorczych;
 - c) ogrzewania lejów, izolatorów wsporczych czy obrotowych;
 - d) stanu czujników poziomu popiołu w lejach;
 - e) zespołów WN każdej strefy;
 - f) odbioru pyłu spod lejów (oddzielna instalacja).
- nieprzerwana realizacja pomiarów parametrów diagnostycznych elektrofiltru:
 - a) stężenie składników gazowych spalin SO_2 , NO_x , CO , H_2O , O_2 i pył;
 - b) strumień objętościowy spalin;
 - c) zawartość wilgoci w spalinach;
 - d) temperatura spalin;
 - e) temperatura we wnętrzu komory elektrofiltru;
 - f) ciśnienie statyczne.
- w trakcie zmiany z stanu zdadności maszyny na niezdatny, niezbędny pobór próbek pyłu oraz określenie:
 - a) uziarnienia pyłu;
 - b) zawartości: Cd, Cr, Ni, Pb, V, Cu, Al, As, Zn, H_2SO_4 , NH_3 , TOC (węgiel organiczny), TC (węgiel całkowity) udział części palnych i niepalnych.
- kompletacja wyników pomiarów, wykonanie niezbędnych obliczeń oraz określenie relacji pomiędzy zmianami wartości genezowanej parametru diagnostycznego z błędem genezy i wartością graniczną parametru diagnostycznego;
- określenie relacji pomiędzy zmianami wartości genezowanej parametru diagnostycznego z błędem genezy i wartością graniczną parametru diagnostycznego (Algorytm genezy stanu technicznego elektrofiltru według schematu szacowania wartości parametrów diagnostycznych):
 - a) akwizycja danych, w tym:
 - określenie zbioru wartości parametrów diagnostycznych w ujęciu funkcji czasu eksploatacji elektrofiltru, uzyskanych w trakcie przeprowadzania testów;
 - wybór wartości parametrów diagnostycznych, czyli wartości nominalnych oraz granicznych;
 - opracowanie zbioru stanów maszyny (elektrofiltru) uzyskanych w trakcie realizacji testów w określonym przedziale czasowym;
 - wyznaczenie zbioru wartości parametrów procesowych maszyny (elektrofiltru) w ujęciu funkcji czasu eksploatacji elektrofiltru, które należy określić podczas realizacji testów elektrofiltru (na podstawie wyników ciągłego pomiaru odpowiednio dobranych wielkości procesowych kontroluje się w sposób ciągły stany wytrzymałościowe głównych części elektrofiltru oraz ocenia stopień ich zużycia);
 - wyznaczenie zbioru wartości parametrów otoczenia maszyny (elektrofiltru) w ujęciu funkcji czasu eksploatacji elektrofiltru, które należy określić podczas realizacji testów elektrofiltru (parametry otoczenia, które wpływają na zmiany stanu elektrofiltru podczas eksploatacji, np. temperatura spalin na wlocie elektrofiltru, temperatura otoczenia, itp.);
 - określenie zbioru zdarzeń dodatkowych w ujęciu funkcji czasu eksploatacji elektrofiltru, w trakcie realizacji testów (zdarzenia dodatkowe nie będące składową pozostałych zbiorów, jednak mający istotny wpływ na poprawne funkcjonowanie maszyny – elektrofiltru).
 - b) optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych: poprzez obliczenie wartości funkcji kryterialnych oraz wag parametrów diagnostycznych na podstawie danych wejściowych dla wybranego obiektu (elektrofiltru) w Dedykowanym Systemie Diagnostycznym Elektrofiltru (DSDEF). Szczegółowo:
 - za pomocą metody korelacji wartości parametrów diagnostycznych ze stanem maszyny – elektrofiltru (z uwzględnieniem czasu eksploatacji elektrofiltru):
Istotą metody jest wybór parametru diagnostycznego dostarczającego największą informację o stanie maszyny (elektrofiltru). Im większe występuje powiązanie pomiędzy zmianą stanu technicznego maszyny (elektrofiltru) a wybranym parametrem diagnostycznym tym istotniejszy jest z

punktu widzenia krytyczności zebranych danych. Tym samym wytypowany wskaźnik powinien wykazywać się słabym korelacją z pozostałymi parametrami diagnostycznymi.

- za pomocą metody informacji parametrów diagnostycznych o stanie maszyny h_j :

Zbiór parametrów diagnostycznych wyznacza się za pomocą metody korelacji wartości parametrów diagnostycznych ze stanem maszyny (elektrofiltru) oraz metody ilości informacji parametrów diagnostycznych o stanie maszyny h_j . Dla każdego parametru diagnostycznego wyliczane są wartości współczynnika korelacji liniowej i wskaźnik ilości informacji. W celu wyboru zbioru parametrów diagnostycznych wykorzystuje się wartości wag w_j .

- za pomocą redukcji zbioru parametrów diagnostycznych poprzez zastosowanie metody „punktu idealnego” z grupy metod rozwiązań kompromisowych Pareto;
- wyznaczenie wartości wagi w_j :

Jako kryterium wyboru parametru diagnostycznego (parametrów diagnostycznych) należy przyjąć maksymalizację wartości wag w_j i dokonanie wyboru parametrów diagnostycznych według przyjętego kryterium. DSDEF umożliwia wytypowanie parametrów diagnostycznych według preferencji operatora systemu (Kierownika Działu Utrzymania Ruchu) oraz zaktualizowanie wartości wag dla nowych zbiorów wybranych parametrów diagnostycznych.

- c) genezowanie stanu elektrofiltru poprzez:

- wyznaczenie wartości genezowanej parametru diagnostycznego i błędu genezy (tylko dla notacji dyskretnej zdarzeń);
- określenie minimalnej odległości wartości genezowanej parametru diagnostycznego od jego wartości granicznej;
- przebadanie wpływu czynników eksploatacyjnych (liczba parametrów, liczebność szeregu czasowego) na genezę stanu;
- zwizualizowanie i zapis funkcji aproksymacji lub interpolacji dla wybranych parametrów wybranego elektrofiltru;
- oszacowanie przyczyny uszkodzenia maszyny na podstawie minimalnej odległości wartości genezowanej parametru diagnostycznego od jego wartości granicznej, wartości parametrów procesowych maszyny, wartości parametrów otoczenia oraz zdarzeń dodatkowych.

- d) szacowanie wartości genezowanej parametru diagnostycznego oraz określenie przyczyny wystąpienia przyczyny stanu niezdatności s_i w chwili badania elektrofiltru realizowane są za pomocą poniższego algorytmu:

- genezowanie wartości zbioru parametrów diagnostycznych $\{y_j^*\}$):
 - o za pomocą metody aproksymacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wraz z promieniem błędu aproksymacji „kanału błędowego” r_a metodami (metoda średniokwadratowa, metoda trygonometryczna);
 - o za pomocą interpolacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wraz z promieniem błędu interpolacji „kanału błędowego” $r_{j,int}$ metodami (metoda funkcji sklepanych 1, 2 i 3 stopnia);
 - o wybór metody według minimalnej lub maksymalnej wartości promienia błędu aproksymacji lub interpolacji (błąd dopasowania);
- analiza przyczyny wystąpienia stanu $s_i(T_{LU})$:
 - o prezentacja zbioru $\{s_i(\Theta_k), i=1, \dots, 1; k=1, \dots, K\}$;
 - o określenie punktu wspólnego „kanału błędowego” wyznaczonego przez promień błędu $r_j^* = \max(r_{j,a}, r_{j,i})$ i wartość graniczną parametru diagnostycznego y_j^* w chwili $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$, co oznacza, że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s_i było „chwilowe pojawienie” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
 - o określenie większej liczby punktów wspólnych „kanału błędowego” wyznaczonego przez promień błędu $r_j = \max(r_{j,a}, r_{j,i})$ i wartości granicznej parametru diagnostycznego y_j^* w chwilach $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$ oznacza, że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s_i był „narastający rozwój” stanu s_i w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
 - o w przypadku braku punktów wspólnych określenie minimalnej odległości „kanału błędowego” od wartości granicznej w chwili $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$, co oznacza, że prawdopodobną przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s_i było „chwilowe niepełne pojawienie się” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;

- analiza tożsamości zbioru stanów $\{s_i (\Theta_k), k=1, \dots, K\}$ i zlokalizowanego przez T_{LU} stanu s_i w celu określenia przyczyny jego wystąpienia w kontekście otrzymanych ewentualnych „punktów wspólnych” lub minimalnej odległości „zbliżeń”.
- realizacja pomiarów grawimetrycznych stężenia zapylenia spalin za elektrofiltrem;
- archiwizowanie i gromadzenie danych na temat, wcześniej wskazanych parametrów diagnostycznych oraz elementów krytycznych;
- zbieranie materiałów i informacji na temat przyczyn wystąpienia usterek elementów znajdujących się we wnętrzu komory elektrofiltru oraz obudowy elektrofiltru wraz z wykonaniem serii zdjęć ilustrujących stan faktyczny poszczególnych mechanizmów, części znajdujących się we wnętrzu komory elektrofiltru oraz obudowy elektrofiltru. Niezbędne jest również zanotowanie daty i lokalizacji wystąpienia uszkodzenia. Informacje niezbędne do generowania danych za pomocą algorytmu genezy stanu technicznego elektrofiltru według schematu szacowania wartości parametrów diagnostycznych.
- gromadzenie danych na temat przyczyn wystąpienia usterek zespołów wysokiego napięcia każdej strefy elektrofiltru wraz z wykonaniem serii zdjęć ilustrujących stan faktyczny poszczególnych części. Niezbędne jest również zanotowanie daty i lokalizacji wystąpienia uszkodzenia. Informacje niezbędne do generowania danych za pomocą algorytmu genezy stanu technicznego elektrofiltru według schematu szacowania wartości parametrów diagnostycznych.
- zbieranie materiałów i informacji na temat przyczyn wystąpienia usterek systemu pracy odbioru pyłu spod lejów (z uwzględnieniem stanu czujników poziomu popiołu w lejach) wraz z wykonaniem serii zdjęć ilustrujących stan faktyczny poszczególnych mechanizmów i części znajdujących się w systemie odbioru pyłu. Niezbędne jest również zanotowanie daty i lokalizacji wystąpienia uszkodzenia. Informacje niezbędne do generowania danych za pomocą algorytmu genezy stanu technicznego elektrofiltru według schematu szacowania wartości parametrów diagnostycznych.
- cykliczne wykonywanie oględzin podczas eksploatacji elektrofiltru. Bieżące monitorowanie stanu technicznego elementów elektrofiltru oraz sprawdzanie obiektu pod kątem odnalezienia elementów uszkodzonych w wyniku korozji czy też zużycia. Niezbędne jest również zanotowanie daty i lokalizacji wystąpienia korozji czy też zużycia. Informacje niezbędne do generowania danych za pomocą algorytmu genezy stanu technicznego elektrofiltru według schematu szacowania wartości parametrów diagnostycznych.
- raportowanie po wykonaniu oględzin elektrofiltru. Raportowanie odbywa się poprzez pogrupowanie poszczególnych symulacji, których głównym celem jest porównanie otrzymanych wyników oraz czytelne zobrazowanie danych poprzez rysowanie wybranych szeregów w formie wykresów liniowych, wraz z możliwością przedstawienia wyników przeprowadzanych symulacji w formie tabelarycznej.

3.4. PROCEDURA PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO MASZINY

Zapewnienie prawidłowej eksploatacji urządzeń technicznych wymaga wiedzy o aktualnym stanie technicznym, stopniu zużycia poszczególnych podzespołów elektrofiltru oraz stopniu zużycia wykorzystanych w elektrofiltrze materiałów eksploatacyjnych. W celu minimalizacji zagrożeń wynikających ze zmiany stanu technicznego, należy kontrolować urządzenie pomiędzy czynnościami obsługowymi oraz zadbać o właściwe rozplanowanie czynności nadzorujących pracę obiektu. Podstawowym celem procedury prognozy stanu technicznego elektrofiltru jest przedstawienie ciągu zadań niezbędnych do przedstawienia informacji o kształtowaniu się zaistniałych w przeszłości zdarzeń podczas eksploatacji elektrofiltru, aby na podstawie zebranych danych móc przewidywać wystąpienie sytuacji niekorzystnych w elektrofiltrze, w przyszłości (usterki i uszkodzenia elektrofiltru grożące wyłączeniem obiektu z eksploatacji). Prognoza stanu technicznego elektrofiltru powinna zostać oparta na wartościach parametrów diagnostycznych, stanów obiektu w czasie eksploatacji oraz wykonanych modernizacji i napraw. Szczegółowo, proces prognozowania stanu elektrofiltru składa się z etapów:

- utworzenie wzorca procesu diagnozowania elektrofiltru w przestrzeni zebranych symptomów i zgromadzonych informacji na temat pracy elementów krytycznych wybranych w czasie

procesu genezowania stanu;

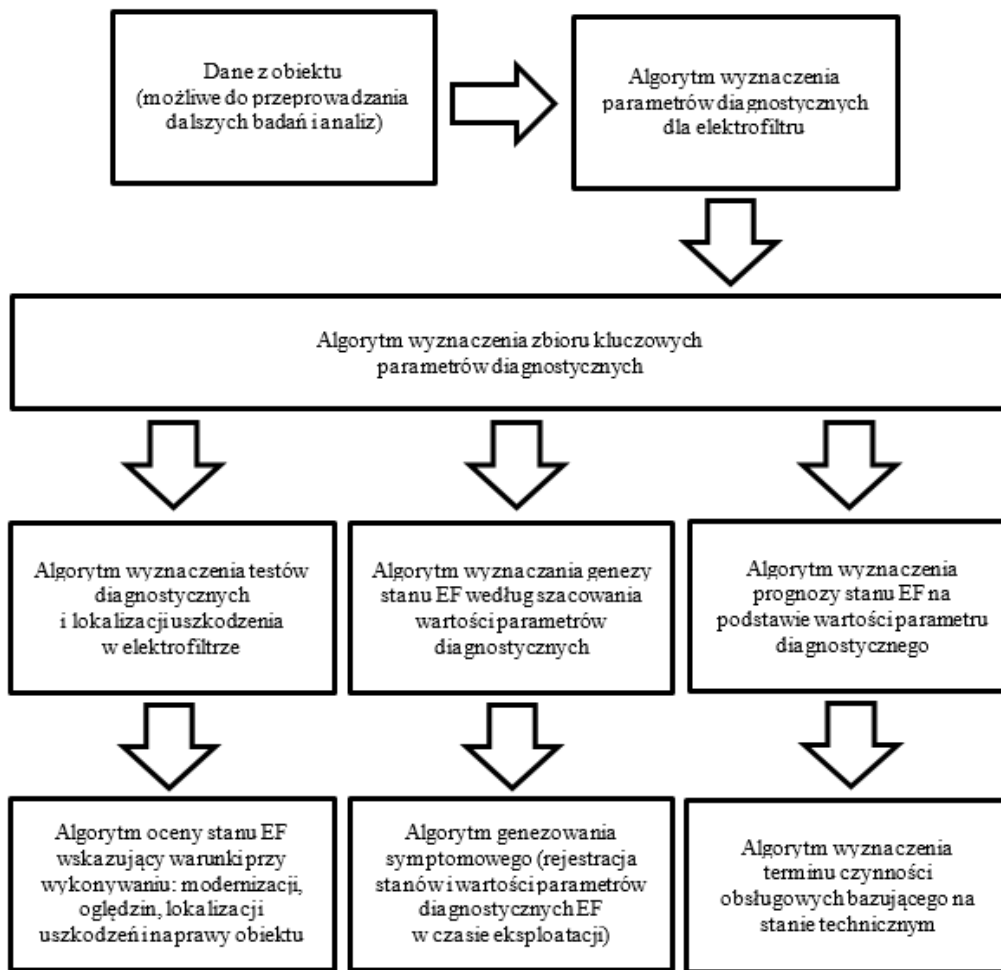
- wnikliwa analiza procesu diagnozowania elektrofiltru, na podstawie określonych parametrów diagnostycznych elektrofiltru w czasie genezy stanu;
- tworzenie wzorca procesu diagnozowania elektrofiltru musi opierać się o informacje na temat przebiegu realizowanych czynności modernizacyjnych, naprawczych obiektu i dokumentacji zawierającej genezę stanu technicznego elektrofiltru oraz jego ocenę;
- gromadzenie lokalnych wartości miary podobieństwa między stanami chwilowymi i wzorcem w postaci szeregów czasowych;
- generowanie modelu prognostycznego stanu technicznego elektrofiltru również w oparciu o zastosowanie algorytmu prognozy stanu technicznego elektrofiltru;
- obliczanie prognoz wartości miary prawdopodobieństwa na podstawie zebranych danych dotyczących pracy, modernizacji i napraw elektrofiltru;
- formułowanie wniosków prognostycznych o przyszłych stanach wybranych mechanizmów i części wchodzących w skład badanego obiektu – elektrofiltru.

Szczegółowo, algorytm prognozy stanu technicznego elektrofiltru składa się z:

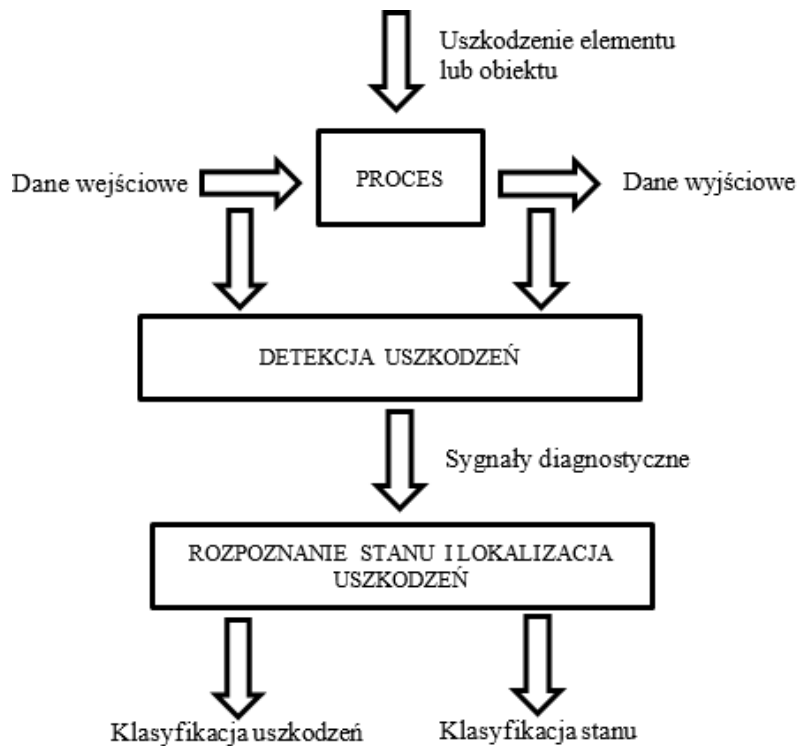
- prognozowania wartości parametru diagnostycznego y_j^* :
 - a) za pomocą metody adaptacyjnej Browna – Mayera rzędu 1 (B-M1) z współczynnikiem $\alpha = (0,1-0,9)$ dla horyzontu prognozy $\tau = 3\Delta Q$ wyznaczonej dla przedziału czasu (Q_1, Q_b) – metoda stosowana w przypadku występowania prawie stałego poziomu zmiennej prognozowanej oraz niewielkich wahań przypadkowych;
 - b) za pomocą metody adaptacyjnej Holta z współczynnikiem $\alpha = (0,05-0,3)$ i $\beta = (0,4-0,9)$ dla horyzontu prognozy $\tau = 3\Delta Q$ wyznaczonej dla przedziału czasu (Q_1, Q_b) – metoda stosowana w przypadku, gdy szereg czasowy wykazuje występowanie trwałych tendencji czasowych;
 - c) za pomocą metod analitycznych (liniowa, wykładnicza, potęgowa drugiego i trzeciego rzędu) dla horyzontu prognozy $\tau = 3\Delta Q$ wyznaczonej dla przedziału czasu (Q_1, Q_b) – metoda umożliwi znalezienie funkcji trendu, która spełniając zadane kryteria optymalnie dopasuje się do szeregu czasowego zmiennej, która jest prognozowana (ważną kwestią jest dobór odpowiedniej postaci analitycznej funkcji trendu);
 - d) wyznaczenie terminu następczej obsługi i diagnozowania maszyny Θ_d :
 - dla którego nie wystąpi przekroczenie wartości granicznej parametru diagnostycznego y_{gr} przez granicę przedziału błędu prognozy wyznaczoną przez promień r_σ – Θ_{d1} za pomocą metody poziomowania błędu prognozy dla promienia błędu prognozy r_σ (dla poziomu istotności $\beta_1 = 0,05$; $\beta_2 = 0,1$);
 - dla którego nie wystąpi przekroczenie wartości granicznej parametru diagnostycznego y_{gr} przez prognozowaną wartość parametru diagnostycznego – Θ_{d2} za pomocą metody poziomowania wartości granicznej parametru diagnostycznego ($y_{jg1} = y_{jg}$; $y_{jg1} = y_{jg} + \gamma(y_{jn} - y_{jg})$ dla $y_{jn} > y_{jg}$ oraz $y_{jg1} = y_{jg}$; $y_{jg1} = y_{jg} - \gamma(y_{jg} - y_{jn})$ dla $y_{jg} > y_{jn}$), np. dla $\gamma = 0,1$;
 - wystąpi przekroczenie wartości granicznej parametru diagnostycznego y_{gr}^* przez wartość parametru diagnostycznego w czasie Θ_d – wyznaczenie terminu następczego obsługiwaną i diagnozowania maszyny: $\Theta_d^* = \min(\Theta_{d1}, \Theta_{d2})$.

3.5. ALGORYTM PROCESU ROZPOZNAWANIA STANU TECHNICZNEGO MASZINY

Cykl postępowania w ramach określenia wskazanych procedur rozpoznawania stanu technicznego obiektu został zaprezentowany szczegółowo na poniższym schemacie (rys. 3.5.1.). Dodatkowo, w celu lepszego zobrazowania działań zawartych w omówionych procedurach, opracowano model postępowania w czasie diagnozowania obiektu, który bazuje na rozpoznawaniu stanu technicznego (rys. 3.5.2).



Rys. 3.5.1. Schemat wyznaczania procedur rozpoznawania stanu elektrofiltru [opracowanie własne]



Rys. 3.5.2. Algorytm diagnozowania obejmujący proces rozpoznawania stanu obiektu [opracowanie własne]

Przypominając, algorytm realizacji procesu rozpoznawania stanu elektrofiltru zawiera następujące etapy:

- ocena stanu technicznego powinna być przeprowadzana na podstawie:
 - a) oględzin i wykrycia awarii, uszkodzeń, defektów, zmian w procesie oczyszczania spalin w trakcie eksploatacji elektrofiltru;
 - b) weryfikacji nadzoru technicznego wykonanej modernizacji elektrofiltrów;
 - c) etapów inżynierii projektu modernizacji lub naprawy obiektu;
 - d) algorytmu wyznaczania testu kontroli stanu technicznego i lokalizacji uszkodzenia obiektu w ramach, którego należy dokonać:
 - przygotowania danych w odpowiedniej formie do dalszej analizy;
 - optymalizacja zbioru wartości parametrów diagnostycznych (tylko w przypadku dużej liczebności zbioru Y , np. $m > 10$);
 - porządkowanie zbioru danych poprzez określenie zbioru $\{s_i(\Theta_k), i=1, \dots, l; k=1, \dots, K\}$;
 - badanie istotności zmian wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j(\Theta_k)\}$ w zależności od stanu $\{s_i = f(\Theta_k); \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$, tzn. który z parametrów diagnostycznych „najlepiej” opisuje stan niezdatności urządzenia – s_i ;
 - wyznaczenie macierzy boolowskiej:gdzie: 1 – gdy zmiana stanu niezdatności urządzenia s_i powoduje istotne zmiany wartości parametru diagnostycznego y_j ; 0 – gdy zmiana stanu niezdatności obiektu s_i nie powoduje istotnych zmian wartości parametru diagnostycznego y_j ;
 - określenie optymalnej metody wyznaczania testu kontroli stanu i lokalizacji uszkodzeń w zależności od liczebności zbioru parametrów diagnostycznych i czasu pracy maszyny.
 - e) wyznaczenie testu kontroli stanu T_{KS} i lokalizacji uszkodzeń T_{LU} na podstawie macierzy boolowskiej;
 - f) interpretacja wyników testów kontroli stanu elektrofiltru.
 - geneza stanu technicznego powinna być realizowana na podstawie:
 - a) rejestracji wartości parametrów diagnostycznych oraz stanów elektrofiltru w czasie eksploatacji;
 - b) analizy pracy kluczowych elementów obiektu;
 - c) weryfikacji przyczyn wystąpienia uszkodzeń z prowadzonych raportów;
 - d) określenie relacji pomiędzy zmianami wartości genowanej parametru diagnostycznego z błędem genezy i wartością graniczną parametru diagnostycznego, w tym:
 - akwizycja danych;
 - optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych, poprzez obliczenie wartości funkcji kryterialnych oraz wag parametrów diagnostycznych;
 - szacowanie wartości genowanej parametru diagnostycznego oraz określenie przyczyny wystąpienia stanu niezdatności s_i w chwili badania, za pomocą aproksymacji i interpolacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) , według przyjętych zależności i wskazaniem błędu dopasowania;
 - e) analiza przyczyny wystąpienia stanu $s_i (T_{LU})$ poprzez:
 - prezentację zbioru $\{s_i(\Theta_k), i=1, \dots, l; k=1, \dots, K\}$;
 - określenie punktu wspólnego „kanału błędowego” wyznaczonego przez promień błędu $r_j^* = \max(r_{j,a}, r_{j,i})$ oraz wartość graniczną parametru diagnostycznego y_j^* w chwili $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$, co oznacza, że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s_i było „chwilowe pojawienie” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
 - określenie większej liczby punktów wspólnych „kanału błędowego” wyznaczonego przez promień błędu $r_j = \max(r_{j,a}, r_{j,int})$ i wartości granicznej parametru diagnostycznego y_j^* w chwilach $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$ oznacza, że przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s_i był „narastający rozwój” stanu s_i w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
 - w przypadku braku punktów wspólnych określenie minimalnej odległości „kanału błędowego” od wartości granicznej w chwili $\Theta_s \in (\Theta_1, \Theta_b)$, co oznacza, że prawdopodobną przyczyną wystąpienia zlokalizowanego stanu s_i było „chwilowe niepełne pojawienie się” się tego stanu w czasie (Θ_1, Θ_b) ;
 - analizę tożsamości zbioru stanów $\{s_i(\Theta_k), k=1, \dots, K\}$ i zlokalizowanego przez T_{LU} stanu s_i w celu określenia przyczyny jego wystąpienia w kontekście otrzymanych ewentualnych „punktów wspólnych”

lub minimalnej odległości „zbliżeń”.

- prognoza stanu technicznego przeprowadzana na podstawie:
 - a) rejestracji wartości parametrów diagnostycznych, stanów elektrofiltru w czasie eksploatacji oraz wykonanych modernizacji i napraw elektrofiltru;
 - b) prognozowanie wartości parametru diagnostycznego y_j^* za pomocą niżej wskazanych sposobów i według kryteriów zgodnych z zaprezentowaną w rozprawie procedurą prognozy stanu:
 - metody adaptacyjnej Browna – Mayera;
 - metody adaptacyjnej Holta;
 - metod analitycznych (liniowa, wykładnicza, potęgowa drugiego i trzeciego rzędu);
 - wyznaczenie terminu następnego obsługiwanego i diagnozowania maszyny Θ_d .

Weryfikacja działań związanych z procesem rozpoznawania stanu umożliwia opracowanie zasad i czynności w obszarach: wyboru kluczowych parametrów diagnostycznych, oceny, genezy i prognozy stanu obiektu. Przekroczenie wartości kluczowych parametrów diagnostycznych, w czasie eksploatacji elektrofiltru, wskazuje moment, w którym rozpoczął się proces przyspieszonego zużycia (rozwój degradacji) uwarunkowany dużym prawdopodobieństwem wystąpienia awarii obiektu.

4. METODYKA BADAŃ

Przeprowadzona w rozprawie analiza literatury oparta została na krajowych i zagranicznych źródłach, z zakresu energetyki zawodowej, diagnozowania stanu technicznego maszyn, strategii eksploatacji oraz utrzymania ruchu oraz na informacjach związanych bezpośrednio z budową i zasadą działania elektrofiltrów, w ujęciu ochrony środowiska naturalnego. W dalszej części rozdziału zostanie zaprezentowany algorytm postępowania badawczego, ukazujący ścieżkę rozwiązania problemu badawczego, doprowadzający do opracowania zasad dla strategii eksploatacji elektrofiltru według stanu technicznego.

4.1. ALGORYTM POSTĘPOWANIA BADAWCZEGO

Planowanie badań ujętych w niniejszej pracy obejmowało przeprowadzenie następujących etapów:

- Dokonanie charakterystyki obiektu badań i obszaru badań.

W ramach tego punktu skupiono się na weryfikacji aktualnego stanu wiedzy oraz problematyki w zakresie obranego tematu rozprawy. Finałem było ustalenie zagadnień, które należało rozwinąć i uściślić, poprzez przeprowadzenie szczegółowej analizy obszaru, dotyczącego diagnozowania elektrofiltrów. Zweryfikowane zostały dotychczasowe metody stosowane przez dział utrzymania ruchu, w czasie eksploatacji odpylaczy elektrostatycznych. Rzetelnie oceniono przebieg aktualnie realizowanych przeglądów, kontroli i modernizacji elektrofiltrów. Na podstawie wykonanych powyższych zadań możliwe było wskazanie zbioru parametrów określających obiekt badań. W ramach przewidzianych czynności dokonano jeszcze weryfikacji sygnałów diagnostycznych i wyboru symptomów, które wskazały zależność pomiędzy wystąpieniem uszkodzenia danego elementu elektrofiltru a zmianą stanu technicznego.

- Przemysłowe badania stanu elektrofiltru.

Celem przeprowadzonych badań było wskazanie: miar i wartości sygnałów diagnostycznych, stanów granicznych wybranych parametrów oraz dokonanie klasyfikacji stanu zdadności oraz niezdatności badanych obiektów. Opracowano procedury dla procesu rozpoznawania stanu elektrofiltru, które stanowią podstawę podczas podejmowania decyzji eksploatacyjnych. Wykonane czynności finalnie doprowadzają do wyznaczenia modeli przyczynowo-skutkowych, których celem jest ukazanie powiązania pomiędzy wszystkimi wyznaczonymi wielkościami wejściowymi a wielkościami wyjściowymi.

Na koniec wskazano zalecenia do archiwizacji danych, na temat cykliczności występowania uszkodzeń w elektrofiltrze wraz z przyczynami zajścia nagłych niepożądanych zjawisk.

- Analiza wyników.

Określono zasady dla proaktywnego diagnozowania stanu technicznego odpylaczy elektrostatycznych, które opierają się na analizie danych historycznych eksploatacji elektrofiltrów, z zastosowaniem metody FMEA, mierników jakości i efektywności. Schemat postępowania badawczego został przedstawiony poniżej (rys. 4.1.1.).

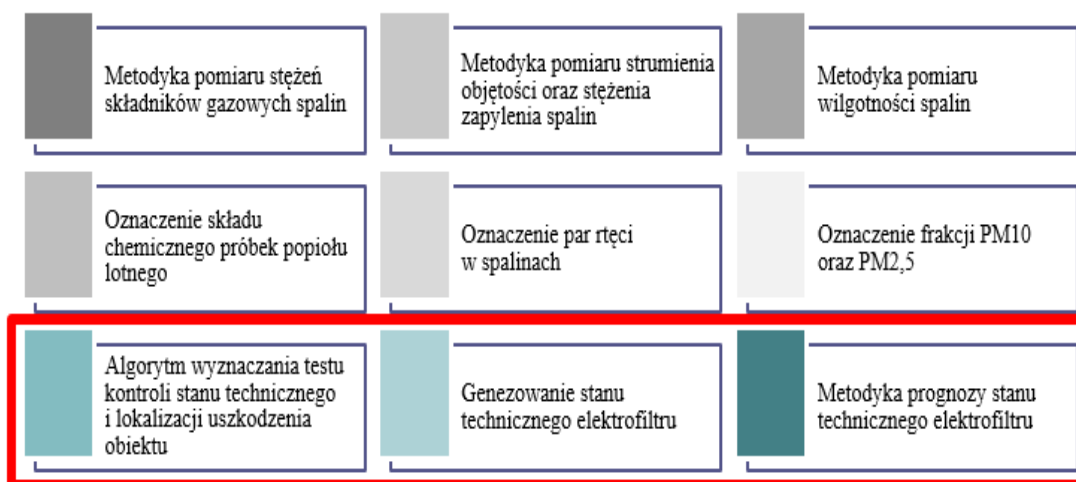


Rys. 4.1.1. Schemat postępowania badawczego ukierunkowany na opracowanie nowej strategii eksploatacji elektrofiltrów według stanu technicznego [opracowanie własne]

Należy również wspomnieć, że podczas przeprowadzania badań, mających na celu wskazanie zachowania wysokiego poziomu skuteczności odpylania spalin z pyłu w elektrofiltrze, używane są metodyki, które odnoszą się do poboru próbek popiołu lotnego oraz spalin. W stosowanych normach i aktach prawnych widnieje również lista, określająca parametry wyposażenia pomiarowo-badawczego. Laboratoria przeprowadzające badania pod kątem określenia zawartości zanieczyszczeń pyłowo-gazowych w popiele lotnym i spalinach, stosują próby, wskazujące [45]:

- zawartość w popiele lotnym substancji: arsen, chrom, cynk, kadm, miedź, nikiel ołów, rtęć oraz ich związki;
- zawartość w spalinach substancji: chlor, fluor, rtęć oraz ich związki;
- zawartość w spalinach i popiele lotnym: benzeno, benzo(a)pirenu, benzo(b)fluorantenu, benzo(k)fluorantenu, indeno(1, 2, 3-cd) piren;
- stężenia składników gazowych spalin, zgodnie z normami:
 - a) NO_x – PN-EN 14792:2017-04;
 - b) CO – PN-EN 15058:2017-04;
 - c) CO₂ – ISO 12039:2001;
 - d) O₂ – PN-EN 14789:2017-04;
 - e) SO₂ – PN-EN 14791:2017-04;
 - f) zawartość pary wodnej (wilgotność spalin)– PN-EN 14790:2017-04.
 - oznaczenie składu chemicznego próbek popiołu lotnego według normy PN EN 14385:2005;
 - oznaczenie rtęci całkowitej w spalinach w postaci rtęci gazowej wykonuje się wg. normy PN-EN 13211:2006;
 - oznaczenie frakcji PM10 oraz PM2.5 pyłu według ISO 13320:2009.

Wymienione powyżej metodyki badań w większości odnoszą się do określenia rozmiaru cząstek pyłowo-gazowych, czy też poziomu zawartości zanieczyszczeń, znajdujących się w gazach odlotowych oraz w odseparowanym pyłe (rys. 4.1.2.).



Rys. 4.1.2. Metody badań wskazujące kompleksową analizę pracy elektrofiltru [opracowanie własne]

W wyniku przeprowadzonej analizy badań określających skuteczność procesu odpylania spalin w elektrofiltrach, wskazano potrzebę aktualizacji bieżących metod o dodanie trzech nowych sposobów, odnoszących się do procesu rozpoznawania stanu odpylacza elektrostatycznego. Zastosowanie dziewięciu wskazanych metod badań pozwoli w szerokim zakresie badać zachodzące zmiany stanu technicznego elektrofiltru oraz umożliwi głębszą analizę procesu odpylania spalin, przy zachowaniu niezawodności obiektu.

4.2. OBIEKT BADAŃ

Zasada działania elektrofiltrów opiera się na wykorzystaniu oddziaływania pola elektrostatycznego na cząsteczki ciał stałych, zawieszonych w gazie spalinowym. Wyróżnia się obecność ziaren pyłu oraz kropeł mgły (aerazol) w zanieczyszczonym gazie [46-48]. W komorze elektrofiltru aktywną przestrzeń, odpowiadającą za wytworzenie pola elektrostatycznego, tworzą elektrody ulotowe (wysokonapięciowe) oraz zbiorcze (osadce). Wspomniane elementy umiejscowione są w komorze odpylacza elektrostatycznego naprzemiennie. Najczęściej elektrody ulotowe zbudowane są z cienkich rur z przyspawanymi elementami, służącymi do emisji jonów (elektroda „gwoździowa”). Natomiast elektrody zbiorcze z reguły są wykonane z blachy, w formie równoległe ułożonych pionowych płyt (elektrody płytowe).

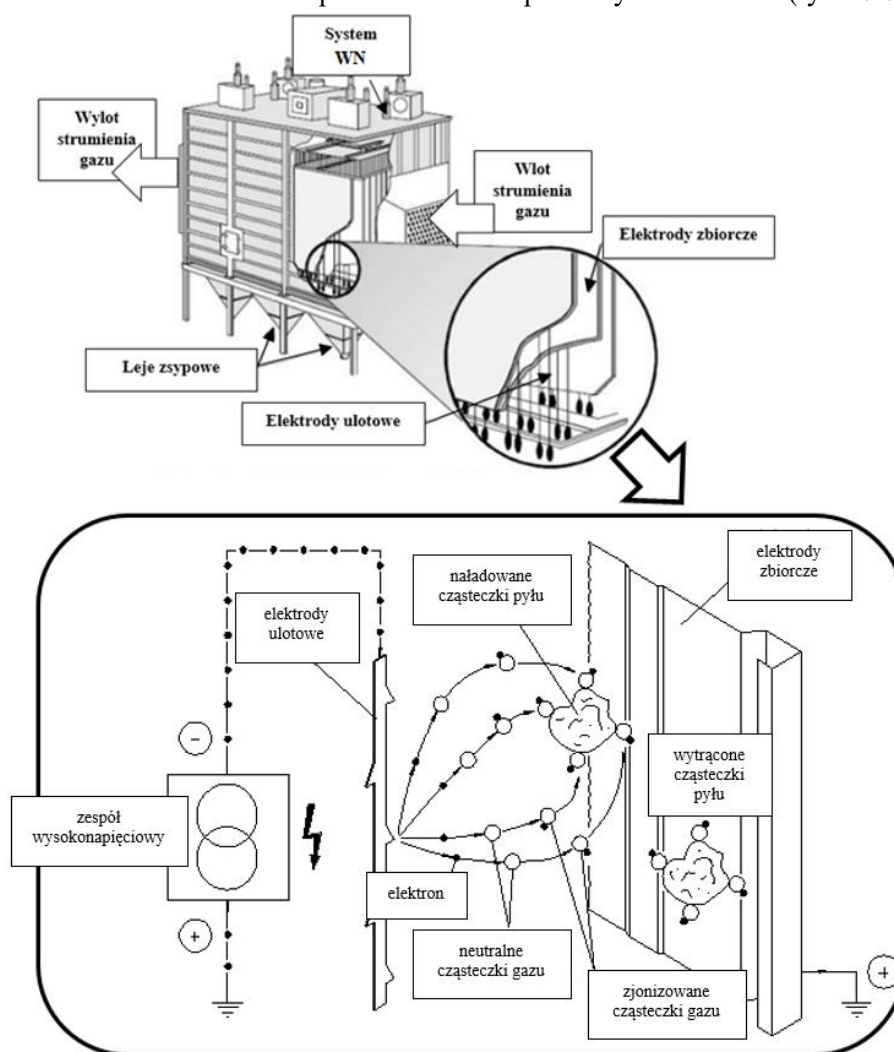
Zadaniem elektrod ulotowych jest wytworzenie wysokiej gęstości prądu ulotu o równomiernym rozkładzie i zagwarantowanie wysokich wartości natężenia pola elektrycznego. Do elektrod ulotowych doprowadzone jest bardzo wysokie stałe napięcie o ujemnej polaryzacji (do 110kV). Elektrody wysokonapięciowe są odseparowane od uziemionej komory obiektu, dzięki zastosowaniu konstrukcji nośnej, osadzonej jest na izolatorach zawieszeniowych [49]. Elektrody zbiorcze zamocowane są do elementów komory odpylacza elektrostatycznego, dzięki czemu również posiadają potencjał uziemienia. Strumień odpylanego gazu (drobiny pyłu i aerazol) doprowadzany jest kanałami spalinowymi do wnętrza komory elektrofiltru [50, 51]. Silne jednokierunkowe pole elektrostatyczne wytwarzane jest pomiędzy elektrodami ulotowymi a zbiorczymi. Drobinom omawianych zanieczyszczeń zostają przechwycone i jonizowane w wyniku przepływu strumienia gazów spalinowych przez wytworzone pole elektrostatyczne. Jonizowanie drobin pyłu i aerozolu odbywa się według następującego procesu:

- w wyniku przekroczenia ustalonego poziomu wartości napięcia (około 30 [kV]) przyłożonego do elektrod ulotowych, obserwowane jest wystąpienie zjawiska ulotu, które jest źródłem emisji jonów ujemnych (elektronów);
- uwolnione elektrony przemieszczają się do elektrod o przeciwnej biegunowości (elektrod zbiorczych);
- następuje jonizacja cząsteczek zawartych w gazach spalinowych, w wytworzonej aktywnie przestrzeni pomiędzy elektrodami ulotowymi i zbiorczymi;

- wychwycone cząsteczki przyciągane są do elektrod zbiorczych pod wpływem działania sił pola elektrycznego;
- finalnie odseparowane cząsteczki z gazu tworzą na elektrodach zbiorczych warstwę pyłu.

W kolejnym kroku następuje cykliczne uderzanie młoteczków strzepujących w elektrody zbiorcze. Zastosowanie systemu strzepującego pozwala na usunięcie warstwy zgromadzonego pyłu na elektrodach osadczych. Strzepywanie poszczególnych rzędów płyt elektrod zbiorczych możliwe jest w wyniku uzyskania wyższej wartości siły ścinającej od siły przyciągania elektrostatycznego [51, 52]. Konstrukcja systemu elektrod osadczych w komorze elektrofiltru zabezpiecza przed ponownym przechwyceniem cząsteczek popiołu przez przepływający strumień gazu.

Budowa i kształt elektrod zbiorczych wraz z wykorzystaniem przepon w lejach, pozwala ograniczyć do minimum wystąpienie niekorzystnego zjawiska powtórnego unoszenia się pyłu oraz porywania popiołu do wnętrza komory obiektu. Stosowane zabezpieczenie wpływa znacząco na poziom skuteczności odpylania gazów [53]. Należy wskazać, iż znikoma ilość pyłu może osadzać się także na elektrodach ulotowych. Biorąc to pod uwagę elektrody ulotowe wyposażone są również w system strzepywania. Oddzielone cząstki stałe od elektrod zbiorczych i ulotowych, w wyniku oddziaływania siły grawitacji, opadają do lejów na popiół (zbiorniki znajdujące się w dolnej części elektrofiltru). Popiół znajdujący się w lejach transportowany jest niezależnym układem do zbiorników. Stosowanie wielostrefowej budowy elektrofiltru pozwala na podłączenie każdej strefy do osobnego zespołu zasilania (odrębne systemy wysokiego napięcia), daje to możliwość dostosowania napięcia w każdej strefie, do panujących warunków gazowo-pyłowych. Tym samym otrzymywana jest wyższa wartość skuteczności odpylania niż w przypadku zasilania całego obiektu z jednego źródła wysokiego napięcia. Zasada działania elektrofiltru została zaprezentowana na poniższym schemacie (rys. 4.2.1.).



Rys. 4.2.1. Zasada działania elektrofiltru [opracowanie własne]

Biorąc pod uwagę stan fizyczny cząstek pyłu wyróżnia się elektrofiltry suche bądź mokre. Stosowanie suchej lub mokrej instalacji do odpylania gazów zależne jest od przyjętych w bloku energetycznym technologii oczyszczania gazów (instalacji do odsiarczania i odazotowania spalin) oraz od wyznaczonego poziomu skuteczności odpylania spalin, do uzyskania przez instalację. Główne etapy oczyszczania gazów spalinowych przez elektrofiltry suche to: wytworzenie pola elektrostatycznego, ładowanie cząsteczek pyłu i aerozolu, osadzanie pyłu na elektrodach zbiorczych, gromadzenie popiołu w lejach zsypanych. W literaturze wyróżniany jest podział elektrofiltrów ze względu na konstrukcję [54]:

- układ stref ładowania i zbierania (z rozdzielonymi strefami ładowania oraz zbierania, oraz ze strefami ładowania i zbierania połączonymi we wspólnym polu elektrycznym);
- kierunek przepływu gazu w elektrofiltrze (o pionowym i poziomym przepływie gazu);
- układ geometryczny pola elektrycznego (z układem płaskim oraz współśrodkowym);
- ilość stref odpylania (jednostrefowe i wielostrefowe);
- ilość pól elektrycznych (jednopolowe oraz wielopolowe);
- ilość sekcji (jednosekcyjne i wielosekcyjne).

W blokach energetycznych do oczyszczania spalin stosowane są również filtry workowe oraz cyklony, jednak używane są w przypadku, gdy zastosowanie elektrofiltrów jest technologicznie niemożliwe. Jedną z głównych zalet odpylaczy elektrostatycznych, w porównaniu do innych stosowanych metod oczyszczania spalin z pyłu jest zdolność do wychwytywania cząstek o bardzo małych wymiarach.

4.3. APARATURA BADAWCZA

W poniższej tabeli zostało zaprezentowane zestawienie wyposażenia pomiarowo-badawczego znajdującego się w firmie Energopomiar (tab. 4.3.1.). Wymieniony sprzęt jest niezbędny podczas pomiarów stężeń wskaźników emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych.

Tabela 4.3.1. Zestawienie wyposażenia pomiarowo-badawczego [55]

Lp.	RODZAJ WPB	Zakres pomiarowy + niepewność	CRM	Nr WPB
1.	Analizator wielogazowy HORIBA PG350E NO _x CLD; CO NDIR; CO ₂ NDIR; O ₂ PMD	NO – 335 ±7,2 mg/m ³ _{US} CO – 125 ±6,0 mg/m ³ _{US} CO ₂ – 20 ±0,31 %obj.S O ₂ – 25 ±0,20 %obj.S	NO – 242 mg/m ³ _{US} ±1,0% cert. 1359 CO – 125 mg/m ³ _{US} ±1,0% cert. 11735 CO ₂ – 9,90 %obj.S ±1,0% cert. 1335 O ₂ – 7,99 %obj.S ±1,0% cert. 1324 Laboratorium SIAD, Lat No 143	P6MV9ESD
2.	Pyłomierz grawimetryczny EMIOTEST E3114	Pył – 100 ±4,7 mg/m ³	N/d	15.01.401.16
3.	Rurka spiętrzająca typu „S”	Prędkość – 21 m/s	N/d	7474
4.	Czujnik temperatury typu NiCr-NiAl (K)	Temp. – 120°C temp. – 300°C	N/d	02/08; 14/17; 03/08; 07/14 ; 18/03; 16/03

cd. tabeli 4.3.1.

Lp.	RODZAJ WPB	Zakres pomiarowy + niepewność	CRM	Nr WPB
5.	Miernik temperatury Czaki EMT-302	Temp. – 800°C	N/d	3490; 4375
6.	Mikromanometr typu MPR-4	□ p – 1600 Pa	N/d	EP/2015/005; EP/2015/006
7.	Manometr typu U-rurka	□ p – 4900 Pa	N/d	U-27; U-28
8.	Gazomierz wodny Ritter TG1/5	Strumień objętościowy gazu – 120 dm ³ /h	N/d	053BJ7D; 053BI7D
9.	Waga Radwag XA 52.4Y	Masa – 52 g	Wzorzec masy GRAMET – 20 g kl. E ₂ cert. 129/W/14 AP 043	543406
10.	Waga RADWAG WPS 720	Masa – 700 g	Wzorzec masy RADWAG – 500 g kl. F ₂ cert. 126/W/14 AP 043	20781
11.	Termohigrobarometr LAB-EL LB-701	Temp. – -40÷+85°C p abs. – 700÷1100 hPa wilgotność – 0÷99%	N/d	LB/177

Do realizacji celów badawczych, oprócz wymienionego sprzętu pomiarowo-badawczego konieczne jest zastosowanie specjalistycznego oprogramowania. Oszacowanie wyników opisanych wcześniej w metodyce oceny, genezy i prognozowania stanu technicznego elektrofiltrów opiera się na zastosowaniu odrębnych algorytmów, w tym celu niezbędne jest zastosowanie następujących programów: Microsoft Excel, Visual Basic for Applications (VBA), Solver oraz Scilab. Użycie wymienionych programów da możliwość porównania wyników otrzymanych z zastosowanego algorytmu oceny, genezy oraz prognozy stanu technicznego elektrofiltrów.

4.4. WARUNKI REALIZACJI EKSPERYMENTU

Wszystkie badane wielkości składników w popiele oraz gazach spalinowych muszą być realizowane, zgodnie ze wskazanymi metodykami i normami, przy zastosowaniu z góry określonych narzędzi dla danej metody (tab. 4.4.1.).

Tabela 4.4.1. Zestawienie Polskich Norm i obowiązujących aktów prawnych, którymi posługują się laboratoria, realizujące badania na zlecenie sektora energetycznego [55]

Lp.	Numer normy/aktu prawnego Rok opublikowania	Tytuł normy/aktu prawnego
1	PN-Z/04030-7: 1994	Ochrona czystości powietrza. Badania zawartości pyłu. Pomiar stężenia i strumienia masy pyłu w gazach odlotowych metodą grawimetryczną.

cd. tabeli 4.4.1.

2	PN-EN 13284-1 styczeń 2007	Emisja ze źródeł stacjonarnych - Oznaczanie masowego stężenia pyłu w zakresie niskich wartości. Część 1: Manualna metoda grawimetryczna.
3	PN-ISO 10396: marzec 2001	Emisja ze źródeł stacjonarnych. Pobieranie próbek do automatycznego pomiaru stężenia składników gazowych.
4	PN-ISO 7935: październik 2000	Emisja ze źródeł stacjonarnych. Oznaczanie stężenia masowego dwutlenku siarki. Charakterystyki sprawności automatycznych metod pomiarowych.
5	PN-ISO 10849: sierpień 2000	Emisja ze źródeł stacjonarnych. Oznaczanie stężenia masowego tlenków azotu. Charakterystyki sprawności automatycznych metod pomiarowych.
6	ISO 12039:2001	Stationary source emissions – Determination of carbon monoxide, carbon dioxide and oxygen - Performance characteristics and calibration of automated measuring systems.
7	PN-EN 14181	Emisja ze źródeł stacjonarnych. Zapewnienie jakości automatycznych systemów pomiarowych.
8	PN-EN 14792:2006	Emisja ze źródeł stacjonarnych - Oznaczanie stężenia masowego tlenków azotu (NO _x) - Metoda referencyjna: chemiluminescencyjna.
9	PN-EN 15058: październik 2006	Emisja ze źródeł stacjonarnych - Oznaczenie stężenia masowego tlenku węgla (CO) - metoda referencyjna: spektrometria niedyspersyjna w podczerwieni.
10	PN-EN 14789: kwiecień 2006	Emisja ze źródeł stacjonarnych - Oznaczenie stężenia objętościowego tlenu (O ₂) - metoda referencyjna: paramagnetyzm.
11	PN-EN 14790:2006E	Stacjonarne źródła emisji – Oznaczanie pary wodnej w przewodach kominowych.
12	Dz. U. z dnia 7 listopada 2014, poz. 1542	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2014 w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody.
13	Dz. U. z dnia 7 listopada 2014, poz. 1546	Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2014 w sprawie standardów emisyjnych dla niektórych rodzajów instalacji, źródeł spalania paliw oraz urządzeń spalania lub współspalania odpadów.
14	Dz. U. 2001, nr 62, poz. 627	Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (wraz z późniejszymi zmianami) - tekst jednolity z dnia 30 października 2014.

Przeliczenia mierzonych wskaźników emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych realizowane są za pomocą następujących wzorów (metodyka referencyjna – SRM):

$$C_{USR} = C_m \times \frac{T_m}{T_{ref}} \times \frac{p_{ref}}{p_m} \times \frac{100}{(100 - Wg)} \times \frac{(21 - O_{2ref})}{(21 - O_{2m})} \quad (4.4.1)$$

W przypadku zaistnienia konieczności skorygowania dryfu mierzonych instrumentalnie stężeń wskaźników emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych, stosowany jest następujący algorytm:

$$C_{kor} = \frac{C - (B(t_0) + Dryf(B) \times t)}{(A(t_0) + Dryf(A) \times t)} \quad (4.4.2)$$

Aby uzyskać pierwotne dane pomiarowe wyrażone w [ppm] dla stężeń substancji gazowych mierzonych instrumentalnie przez SRM, laboratoria pomiarowo-badawcze kierują się następującymi współczynnikami przeliczeniowymi:

- $mg_{CO}/m^3 = 1,25 \times ppm_{CO}$;
- $mg_{NO}/m^3 = 1,34 \times ppm_{NO}$;
- $mg_{NO_2}/m^3 = 2,05 \times ppm_{NO_2}$.

W zależności od zastosowanych analizatorów SRM i AMS, pierwotne stężenia wskaźników emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych mierzone instrumentalnie przedstawione są w następujących warunkach dla analizatorów:

- tzw. zimnych, z osuszaniem próbki spalin - 273,15K, 1013,25hPa, $H_2O=0,0\%$;
- tzw. gorących, bez osuszania próbki spalin - 273,15K, 1013,25hPa, $H_2O=rzeczywiste$.

W przypadku spalania paliw stałych (węgiel kamienny i brunatny) do obliczenia całkowitej emisji pyłu (TSP) do powietrza stosowane są poniższe wzory [53]:

$$E_p = B * \frac{w_p * \alpha_A * (100 - \eta)}{100} \quad (4.4.3)$$

$$E_p = B * \frac{w_p * \alpha_A * (100 - \eta)}{(100 - k_p)} \quad (4.4.4)$$

gdzie: E_p – emisja pyłu całkowitego [kg]; B – wartość spalonego paliwa [Mg]; w_p – wskaźnik unosu pyłu [kg/Mg paliwa]; η – sprawność urządzenia odpylającego [%]; α_A – współczynnik wpływu zawartości popiołu w paliwie na poziom emisji pyłu (wielkość bezwymiarowa); k_p – zawartość części palnych w pyłe [%].

Następnym ważnym parametrem obliczanym dla instalacji oczyszczających spaliny jest wartość całkowita emisji sadzy [53]:

$$E_s = B * \frac{w_s * \alpha_A * (100 - \eta)}{100} \quad (4.4.5)$$

gdzie: E_s – emisja całkowita sadzy [kg]; w_s – wskaźnik unosu pyłu [kg/Mg paliwa].

W przypadku oczyszczania spalin z cząstek pyłowo-gazowych należy również wyliczyć emisję SO_2 , NO_2 , CO , CO_2 oraz benzo(a)piranu z poniższych wzorów:

$$E_{SO_2} = B * \frac{w_{SO_2} * \alpha_A * (100 - \eta)}{100} \quad (4.4.6)$$

gdzie: E_{SO_2} – emisja całkowita SO_2 [kg]; w_{SO_2} – wskaźnik unosu SO_2 [kg/Mg paliwa].

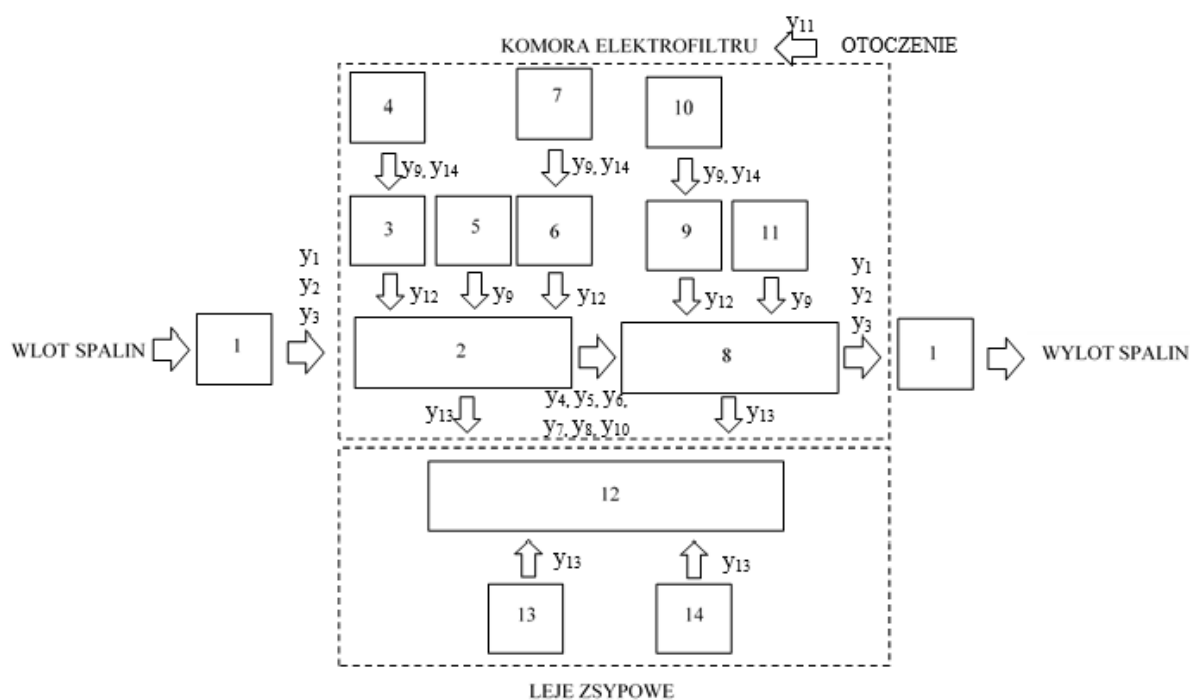
$$E_i = B * \frac{w_i * (100 - \eta_i)}{100} \quad (4.4.7)$$

gdzie: E_i – emisja całkowita i-tego zanieczyszczenia (NO_2 , CO , CO_2 oraz benzo(a)piranu) [kg]; w_i – wskaźnik unosu i-tego zanieczyszczenia [kg/Mg paliwa].

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA STATYSTYCZNA

5.1. ALGORYTM WYZNACZANIA TESTU KONTROLI STANU TECHNICZNEGO I LOKALIZACJI USZKODZENIA ELEMENTÓW W ELEKTROFILTRZE

Prowadzone badania rozpoczęły się od dokonania oceny stanu technicznego elektrofiltru za pomocą algorytmu wyznaczania testu kontroli stanu technicznego i lokalizacji uszkodzenia przy zastosowaniu macierzy boolowskiej. Poniżej przedstawiono zasadę budowy testu diagnostycznego metodą macierzy boolowskiej na przykładzie elektrofiltru składającego się z elementów e_1, \dots, e_{14} , współdziałających według struktury funkcjonalnej przedstawionej na Rysunku 5.1.1.



Rys. 5.1.1. Struktura funkcjonalna oczyszczania spalin w systemie odpylania – elektrofiltr [opracowanie własne]
1. Dyfuzor/Konfuzor, 2. Elektrody ulotowe, 3. Izolatory, 4. System ogrzewania, 5. System zasilania elektrod ulotowych, 6. System strzepujący elektrod ulotowych, 7. Zasilanie systemu strzepującego elektrod ulotowych, 8. Elektrody zbiorcze, 9. System strzepujący elektrod zbiorczych, 10. Zasilanie systemu strzepującego elektrod zbiorczych, 11. System zasilania elektrod zbiorczych, 12. Zbiorniki popiołu (leje zsypane), 13. System ogrzewania lejów zsypanych, 14. System sygnalizujący poziom popiołu.

Dla opracowanej struktury funkcjonalnej oczyszczania spalin w systemie odpylania wskazano poniższe parametry diagnostyczne, dla których zostanie przeprowadzony test kontroli stanu technicznego i lokalizacji uszkodzenia w elektrofiltrze:

- y_1 : stężenie pyłu w gazie suchym;
- y_2 : stężenie SO_2 ;
- y_3 : stężenie NO_2 ;
- y_4 : procentowa zawartość wilgoci w gazie
- y_5 : temperatura wodnego punktu rosy gazu;
- y_6 : strumień objętości spalin;
- y_7 : prędkość przepływu spalin;
- y_8 : temperatura spalin w kanale;
- y_9 : napięcie zespołów zasilających strefy elektrofiltru;
- y_{10} : ciśnienie w komorze elektrofiltru;
- y_{11} : ciśnienie otoczenia;

- y_{12} : temperatura panująca w górnej części elektrofiltru;
- y_{13} : temperatura w dolnej części elektrofiltru;
- y_{14} : natężenie zespołów zasilających strefy elektrofiltru.

W analizowanym przypadku badanie istotności zmian wartości parametrów diagnostycznych $\{y_j(\Theta_k)\}$ zostanie przeprowadzone w zależności od stanu $\{s_i = f(\Theta_k); \Theta_k \in (\Theta_1, \Theta_b)\}$, aby wskazać który z parametrów diagnostycznych „najlepiej” opisuje stan niezdatności elektrofiltru – s_i . Działanie zrealizowano za pomocą wskazania relacji zmienności wartości parametrów diagnostycznych reprezentującego elektrofiltru dla grupy analizowanych obiektów – zbiór wartości $\{y_j(\Theta_k)\}$. Odpowiednio przyjmuje się wartości: 1 oraz 0.

Dla podanego wyżej systemu odpylania spalin wyznaczono testy kontroli sprawności obiektu i lokalizacyjny uszkodzeń. Zbiór $\Pi = \{\pi_j\}$, sprawdzeń składa się z czternastu elementów, przy czym sprawdzenie π_1 polega na kontroli wartości parametru diagnostycznego y_1, \dots, y_{13} . Dla grafu przedstawionego na Rysunku 5.1.1., składającego się z elementów krytycznych elektrofiltru $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{14}\}$, $j = 1, \dots, 14$ oraz parametrów diagnostycznych $y_j = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_{13}\}$, $j = 1, 2, \dots, 14$ współdziałających ze sobą według schematu funkcjonalnego, stan jest charakteryzowany zbiorem 14 elementów $S_i = \{s_0, s_1, \dots, s_{14}\}$, $i = 0, 1, \dots, 14$. Przez s_0 oznaczono stan pełnej zdadności systemu odpylania spalin, kolejno s_N oznacza niezdatność elementu e_j itd. Zbiór sprawdzeń składa się z 14 sprawdzeń, przy czym sprawdzenie π_j oznacza kontrolę parametru wyjściowego z y -tego elementu. Na podstawie przyjętej struktury funkcjonalnej opracowano tablicę stanów (tab. 5.1.2). Poszczególne stany, w których może znaleźć się system odpylania spalin wyrażone są za pomocą czternastocyfrowych liczb binarnych, które obrazują sposób funkcjonowania diagnozowanego systemu, miejsce jedynek odpowiada numerowi elementu niezdatnego. W kolumnach rezultatów sprawdzeń π_j :

- 1 – gdy zmiana stanu niezdatności maszyny – s_i powoduje istotne zmiany wartości parametru diagnostycznego y_j ;
- 0 – gdy zmiana stanu niezdatności maszyny – s_i nie powoduje istotnych zmian wartości parametru diagnostycznego y_j .

Tabela 5.1.2. Tabela stanów systemu odpylania [opracowanie własne]

ZBIÓR STANÓW		ZBIÓR SPRAWDZEŃ													
		π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}	π_{12}	π_{13}	π_{14}
s_0	00000000000000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_1	10000000000000	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
s_2	01000000000000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
s_3	00100000000000	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
s_4	00010000000000	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
s_5	00001000000000	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
s_6	00000100000000	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
s_7	00000010000000	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
s_8	00000001000000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
s_9	00000000100000	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
s_{10}	00000000010000	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
s_{11}	00000000001000	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
s_{12}	00000000000100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
s_{13}	00000000000010	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
s_{14}	00000000000001	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1

Tablice stanów stanowią źródło dla budowy testów diagnostycznych do kontroli stanu systemu (T_{KS}) oraz do lokalizacji uszkodzeń w systemie (T_{LU}). W trakcie analizy zbudowano macierz boolowską – test T_{LU} jako wektor wartości logicznych $\langle 0, 1 \rangle$ parametrów diagnostycznych i tożsamy jemu wektor stanów: $\{(y_1, \dots, y_n, \dots, y_N)\} \Rightarrow S^1 = \{(s_1, \dots, s_n, \dots, s_N)\}$, przy czym:

- jeżeli wartość logiczna wektora sprawdzeń parametru diagnostycznego przyjmuje wartość „1” – wartość parametru jest w przedziale wartości granicznej;
- jeżeli wartość logiczna wektora sprawdzeń parametru diagnostycznego przyjmuje wartość „0” – wartość parametru jest poza przedziałem wartości granicznych.

Analizując dalej, w przypadku, gdy dla danego testu (np.: s_j, s_N), tworzy się element równy 0 z układu par 1-0, natomiast układy 0-0 i 1-1 dają ostatecznie w teście wartość 1. Do budowy testu

kontroli stanu systemu (T_{KS}) tworzy się podzbiór stanów $S_i = \{s_0, s_1, \dots, s_{14}\}$, $i = 0, 1, \dots, 14$, za pomocą par sprawdzeń (s_0, s_N) (tab. 5.1.3.). Do opracowania testu lokalizacji uszkodzeń w systemie (T_{LU}) tworzy się podzbiór par stanów (s_j, s_N). Dla struktury funkcjonalnej oczyszczania spalin w systemie odpylenia sporządzono macierz dla testu kontroli stanu systemu – T_{KS} oraz dla testu lokalizacji uszkodzeń w systemie – T_{LU} . Wartość 0 w kolumnach rezultatów sprawdzeń oznaczają rozróżnialność stanu za pomocą danego sprawdzenia π_j (rezultat sprawdzenia zależy od stanu), a 1 nierozróżnialność stanu za pomocą danego sprawdzenia (rezultat sprawdzenia π_j nie zależy od stanu systemu). Interpretacja wyników testów kontroli stanu systemu odpylenia:

- a) $T_{KS} = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_m\}$:
- $\{0, \dots, 0, \dots, 0\}$ - elektrowfiltr zdatny („0” oznacza, że wartość $y_j \neq y_{jg}$);
 - $\{1, \dots, 0, \dots, 0\}$ - elektrowfiltr niezdatny („1” oznacza, że wartość $y_1 = y_{1g}$);
 - $\{1, \dots, 1, \dots, 0\}$ - elektrowfiltr niezdatny („1” oznacza, że wartość $y_j = y_{jg}$);
 - $\{1, \dots, 1, \dots, 1\}$ - elektrowfiltr niezdatny („1” oznacza, że wartość $y_m = y_{mg}$).
- b) $T_{LU} = \{y_1, \dots, y_j, \dots, y_m\}$:
- $\{1, \dots, 0, \dots, 0\}$ - elektrowfiltr niezdatny, lokalizacja uszkodzenia – stan s_i („1” oznacza, że wartość $y_1 = y_{1g}$);
 - $\{1, \dots, 1, \dots, 0\}$ - elektrowfiltr niezdatny, lokalizacja uszkodzenia – stan s_{i+1} („1” oznacza, że wartość $y_j = y_{jg}$);
 - $\{1, \dots, 1, \dots, 1\}$ - elektrowfiltr niezdatny, lokalizacja uszkodzenia – stan s_{i+n} („1” oznacza, że wartość $y_m = y_{mg}$).

Tabela 5.1.3. Macierz stanu do testu kontroli stanu systemu odpylenia [opracowanie własne]

PODZBIÓR PAR STANÓW (s_0, s_N)	ZBIÓR SPRAWDZEŃ													
	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6	π_7	π_8	π_9	π_{10}	π_{11}	π_{12}	π_{13}	π_{14}
s_0, s_1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
s_0, s_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
s_0, s_3	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
s_0, s_4	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
s_0, s_5	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0
s_0, s_6	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
s_0, s_7	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0
s_0, s_8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
s_0, s_9	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
s_0, s_{10}	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0
s_0, s_{11}	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0
s_0, s_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
s_0, s_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
s_0, s_{14}	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

W wyniku analizy macierzy stanów systemu odpylenia przedstawionej w Tabeli 5.1.3. wyznacza się test diagnostyczny do kontroli stanu systemu odpylenia, który przyjmuje postać $T_{KS} = \{\pi_j\}$, test obejmuje zatem tylko sprawdzenie pierwsze. W dalszej kolejności na podstawie analizy macierzy stanu do testu lokalizacji uszkodzeń w systemie odpylenia, wyznacza się test diagnostyczny do lokalizacji uszkodzeń w systemie, który przyjmuje postać $T_{LU} = \{\pi_1, \dots, \pi_{14}\}$ czyli test obejmuje również 14 sprawdzeń.

5.2. OPTIMALIZACJA ZBIORU PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH

Biorąc pod uwagę możliwości wskazane w procedurze genezowania stanu technicznego elektrowfiltru, do zoptymalizowania zbioru parametrów diagnostycznych, wytypowano metodę wyznaczenia wagi (w_j), ponieważ może okazać się najprostszą do zaimplementowania w systemie sterowania pracą odpylacza elektrostatycznego oraz najbardziej przystępną do stosowania przez pracowników zajmujących się kontrolowaniem procesu oczyszczania spalin i monitorowania stanu

instalacji odpylania spalin. Jako główne kryterium wyboru parametrów diagnostycznych, przyjęto maksymalizację wartości (skala w_j od 0 do 5, gdzie 0 – brak, 1 – niski, 5 – wysoki). Następnie dokonano wyboru parametrów diagnostycznych według przyjętych kryteriów (tab. 5.2.1.).

Tabela 5.2.1. Optymalizacja zbioru parametrów diagnostycznych, na podstawie wag (w_j) i ustalonych kryteriów [opracowanie własne]

Parametr diagnostyczny	Kryteria				Suma
	Wpływ zmiany wartości parametru na zmianę stanu elektrofiltru	Wpływ zmiany wartości parametru na proces oczyszczania spalin z pyłu	Wpływ parametru na otoczenie, w przypadku awarii maszyny	Dostępność do danych (archiwizacja)	
y ₁ : stężenie pyłu w gazie suchym	5	5	5	5	20
y ₂ : stężenie SO ₂	5	3	5	5	18
y ₃ : stężenie NO ₂	4	1	5	5	15
y ₄ : procentowa zawartość wilgoci w gazie	5	5	0	5	15
y ₅ : temperatura wodnego punktu rosy gazu	5	5	0	3	13
y ₆ : strumień objętości spalin	2	4	0	3	9
y ₇ : prędkość przepływu spalin	5	5	0	5	15
y ₈ : temperatura spalin w kanale	5	4	0	5	14
y ₉ : napięcie zespołów zasilających strefy elektrofiltru	4	5	0	1	10
y ₁₀ : ciśnienie w komorze elektrofiltru	3	2	0	0	5
y ₁₁ : ciśnienie otoczenia	3	2	0	5	10
y ₁₂ : temperatura panująca w górnej części elektrofiltru	4	2	0	0	6
y ₁₃ : temperatura w dolnej części elektrofiltru	4	2	0	0	6
y ₁₄ : natężenie zespołów zasilających strefy elektrofiltru	4	5	0	1	10

Przyjęto, że należy odrzucić parametry diagnostyczne, które uzyskały sumę punktów poniżej 10. Jako główne kryterium wykluczające dany wskaźnik, wskazano brak dostępu do danych. Na ten moment parametry y₁₀, y₁₂ oraz y₁₃ nie są w ogóle monitorowane w elektrorowniach, zatem nie można prawidłowo przeprowadzić genezy i prognozy stanu technicznego biorąc pod uwagę wskazane miary. Zmienne parametrów y₉ oraz y₁₄ nie są w odpowiedni sposób archiwizowane, często brakuje dostępu do danych historycznych tych wskaźników bądź nie jest utrzymywana cykliczność gromadzenia informacji (różne okresy). Biorąc powyższe pod uwagę, parametry y₉ oraz y₁₄ również zostały odrzucone do dalszej analizy. Wskazana metoda wyznaczenia wagi (w_j) pozwala na wytypowanie parametrów diagnostycznych według preferencji operatora systemu (Kierownika Działu Utrzymania Ruchu) oraz daje możliwość szybkiego zaktualizowania wartości wag dla nowych zbiorów wybranych parametrów diagnostycznych.

5.3. GENEZOWANIE WARTOŚCI ZBIORU PARAMETRÓW DIAGNOSTYCZNYCH ZA POMOCĄ WYBRANYCH METOD APROKSYMACJI I INTERPOLACJI

Genezowanie wartości zbioru parametrów diagnostycznych może być realizowane (tab. 5.3.1.):

- za pomocą metody aproksymacji wartości parametru diagnostycznego $\{y_j^*\}$ w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wraz z promieniem błędu aproksymacji „kanału błędowego” r_a metodami (metoda średniokwadratowa, metoda trygonometryczna);
- za pomocą interpolacji wartości parametru diagnostycznego y_j^* w przedziale czasu (Θ_1, Θ_b) wraz z promieniem błędu interpolacji „kanału błędowego” $r_{j,int}$ metodami (metoda funkcji sklepanych 1, 2 i 3 stopnia);
- wybór metody według minimalnej lub maksymalnej wartości promienia błędu aproksymacji lub interpolacji (błąd dopasowania).

Tabela 5.3.1. Zestawienie danych uzyskanych w programie Excel dla genezowania wartości zbioru parametrów diagnostycznych y_1 , y_2 i y_3 , wybranymi metodami aproksymacji, dla elektrofiltrów nr 1-5 [opracowanie własne].

	Liczebność szeregu czasowego	Metoda genezowania nr 1	Wartość współczynnika korelacji liniowej R^2 (dla metody nr 1)	Metoda genezowania nr 2	Wartość współczynnika korelacji liniowej R^2 (dla metody nr 2)
parametr diagnostyczny y_1 : „Stężenie pyłu w gazie suchym”, w warunkach umownych, w przeliczeniu na $O_2=6\%$					
Elektrofiltr nr 1	12	Aproksymacja metodą średniokwadratową	0,21	Aproksymacja trygonometryczna	0,23
Elektrofiltr nr 2	10		0,03		0,06
Elektrofiltr nr 3	9		0,42		0,81
Elektrofiltr nr 4	11		0,06		0,81
Elektrofiltr nr 5	11		0,02		0,55
parametr diagnostyczny y_2 : „Stężenie SO_2 ”, w warunkach umownych, w przeliczeniu na $O_2=6\%$					
Elektrofiltr nr 1	12	Aproksymacja metodą średniokwadratową	0,27	Aproksymacja trygonometryczna	0,69
Elektrofiltr nr 2	10		0,07		0,58
Elektrofiltr nr 3	8		0,62		0,93
Elektrofiltr nr 4	11		0,22		0,47
Elektrofiltr nr 5	11		0,23		0,57
parametr diagnostyczny y_3 : „Stężenie NO_2 ”, w warunkach umownych, w przeliczeniu na $O_2=6\%$					
Elektrofiltr nr 1	12	Aproksymacja metodą średniokwadratową	0,01	Aproksymacja trygonometryczna	0,55
Elektrofiltr nr 2	10		0,29		0,88
Elektrofiltr nr 3	9		0,80		0,85
Elektrofiltr nr 4	11		0,00		0,39
Elektrofiltr nr 1	12		0,01		0,55

Z uzyskanych wyników można wywnioskować, że najlepiej odzwierciedlającą zmienne rzeczywiste parametrów diagnostycznych y_1 , y_2 oraz y_3 jest model genezowania wartości zbioru parametrów diagnostycznych y_1 , y_2 i y_3 , za pomocą aproksymacji trygonometrycznej. Na podstawie informacji zawartych w tabeli 5.3.1. można zaobserwować, że:

- dla parametru y_1 liczebność szeregu czasowego powinna zawierać się w przedziale: 9 lub 11 elementów, wtedy uzyskano najlepsze dopasowanie genezowania wartości otrzymane w wyniku zastosowania aproksymacji trygonometrycznej (współczynnik korelacji liniowej R^2 uzyskano na poziomie wynoszącym 0,81);
- dla parametru y_2 liczebność szeregu czasowego powinna zawierać się w przedziale: 8, wtedy uzyskano najlepsze dopasowanie genezowania wartości otrzymane w wyniku zastosowania aproksymacji trygonometrycznej (współczynnik korelacji liniowej R^2 uzyskano na poziomie wynoszącym 0,93);
- dla parametru y_3 liczebność szeregu czasowego powinna zawierać się w przedziale: 9 lub 11) elementów, wtedy uzyskano najlepsze dopasowanie genezowania wartości otrzymane w wyniku zastosowania aproksymacji trygonometrycznej (współczynnik korelacji liniowej R^2 uzyskano na średnim poziomie wynoszącym 0,865).

5.4. WYZNACZENIE OPTIMALNEJ METODY PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO ELEKTROFILTRU

Ścieżka wyboru właściwej metody prognozowania dla przyjętych parametrów diagnostycznych elektrofiltru została wykonana w algorytmie prognozy stanu technicznego odpylacza elektrostatycznego. Wartości prognoz dla parametrów diagnostycznych uzyskano za pomocą metod:

- a) adaptacyjnej Browna – Mayera rzędu 1 (B-M1) z współczynnikiem $\alpha = (0,1-0,9)$ dla horyzontu prognozy $\tau=3\Delta Q$ wyznaczonej dla przedziału czasu (Q_1, Q_b) – metoda stosowana w przypadku występowania prawie stałego poziomu zmiennej prognozowanej oraz niewielkich wahań przypadkowych;
- b) adaptacyjnej Holta z współczynnikiem $\alpha = (0,05-0,3)$ i $\beta = (0,4-0,9)$ dla horyzontu prognozy $\tau=3\Delta Q$ wyznaczonej dla przedziału czasu (Q_1, Q_b) – metoda stosowana w przypadku, gdy szereg czasowy wykazuje występowanie trwałych tendencji czasowych;
- c) analitycznych (liniowa, wykładnicza, potęgowa drugiego i trzeciego rzędu) dla horyzontu prognozy $\tau=3\Delta Q$ wyznaczonej dla przedziału czasu (Q_1, Q_b) – metoda umożliwia znalezienie funkcji trendu, która spełniając zadane kryteria optymalnie dopasuje się do szeregu czasowego zmiennej, która jest prognozowana (ważną kwestią jest dobór odpowiedniej postaci analitycznej funkcji trendu).

Analiza polegała na zidentyfikowaniu metody prognozowania, w której uzyskano najniższe wartości błędów ex post (tab. 5.4.1.).

Tabela 5.4.1. Zestawienie metod prognozowania dla parametru diagnostycznego y_1 : „Stężenie pyłu w gazie suchym w warunkach umownych w przeliczeniu na $O_2=6\%$ [mg/m^3]”, dla elektrofiltrów nr 1-5 oraz porównanie uzyskanych błędów ex post [opracowanie własne]

	Elektrofiltr nr 1	Elektrofiltr nr 2	Elektrofiltr nr 3	Elektrofiltr nr 4	Elektrofiltr nr 5
Metoda prognozowania	Metoda średniej ruchomej ważonej, dla $k=5$				
Liczba pomiarów (n)	108	103	75	103	102
RMSE	90,69	204,79	210,89	121,61	191,36
RMSPE	5,24	4,60	4,64	5,04	3,84
MAPE	2,62	2,38	2,81	1,96	1,90
Metoda prognozowania	Metoda średniej ruchomej prosta, dla $k=3$				
Liczba pomiarów (n)	110	105	77	105	104
RMSE	97,30	230,36	299,82	130,72	199,79
RMSPE	6,00	5,19	5,48	5,91	4,30
MAPE	2,74	2,48	3,00	2,06	1,99
Metoda prognozowania	Metoda adaptacyjna Holta z wyznaczonym współczynnikiem $\alpha = (0,3)$ oraz $\beta = (0,4)$				
Liczba pomiarów (n)	113	113	113	113	113
RMSE	65,88	149,46	193,42	89,55	136,61
RMSPE	5,62	3,27	2,54	5,16	3,30
MAPE	6,69	8,36	9,13	5,91	7,56
Metoda prognozowania	Metoda wykładnicza Browna – Mayera 1 (B-M1) z miarą współczynnika $\alpha = 0,9$				
Liczba pomiarów (n)	113	108	80	108	107
RMSE	23,80	225,30	11,83	110,62	22,21
RMSPE	0,16	4,11	0,30	5,34	0,15
MAPE	5,12	7,20	4,08	5,45	5,10

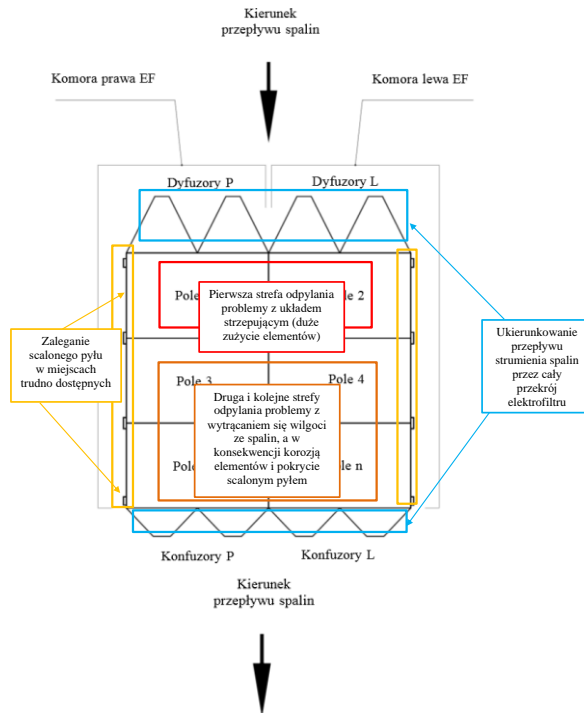
Wyniki zaprezentowane w powyższej tablicy wskazują, że najniższe wartości błędów MAPE ex post uzyskał model prognozy oparty na metodzie średniej ruchomej ważonej (dla parametru $k=5$). Zastosowanie wykładniczej metody średniej ruchomej ważonej okazało się być najkorzystniejszą metodą wśród wszystkich analizowanych przypadków, dla badanego parametru diagnostycznego y_1 . Niska wartość błędów MAPE ex post świadczy, że uzyskane wartości prognozy są bardzo dokładne.

6. PRZESŁANKI DO MODERNIZACJI EKSPLOATACJI OBIEKTU

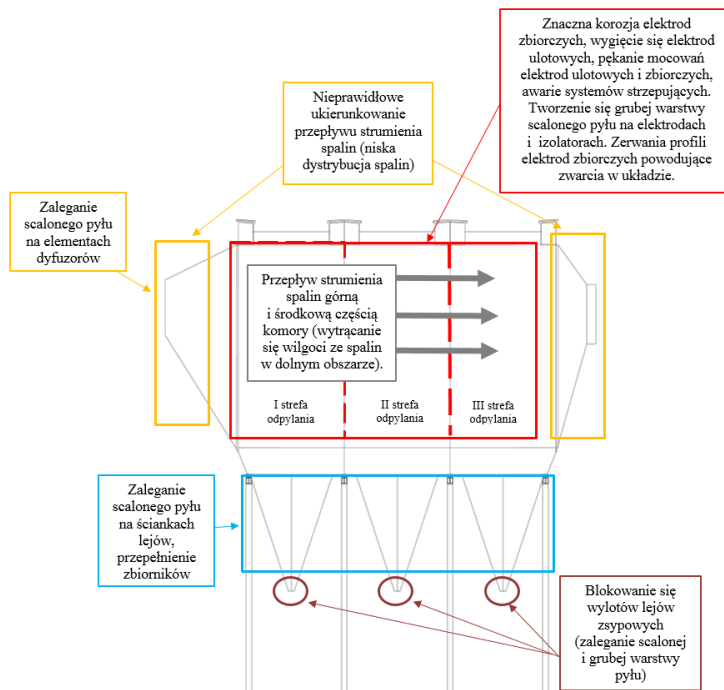
W wyniku przeprowadzonych analiz oraz badań dotyczących procesu rozpoznawania stanu technicznego elektrofiltru, wskazano istotność wykonywania weryfikacji uszkodzeń odpylacza elektrostatycznego, z wyróżnieniem elementów krytycznych obiektu, wpływających na poprawną realizację procesu oczyszczania spalin z pyłu. Należy mieć na uwadze, że na pracę elektrofiltrów wpływa wiele parametrów fizykochemicznych, w tym również skład chemiczny paliw, stosowanych do procesu spalania.

Zmiana składu fizykochemicznego popiołu lotnego znacząco wpływa na pracę elektrofiltrów. Dotyczy to powstawania osadów (zawilgocony popiół lotny) na elementach kierowniczych, elektrodach ulotowych i zbiorczych urządzenia, w wyniku czego w tych miejscach powstaje korozja wżerowa. W niektórych weryfikowanych obiektach zaobserwowano znaczący wpływ parametrów popiołu, na pracę układów odpopielania (występowanie zwarć popiołowych). W trakcie analizy dostrzeżono podatność niektórych elementów elektrofiltrów na uszkodzenia, spowodowane panującymi warunkami pracy kotła i rodzaju zastosowanego paliwa do spalania.

W odpylaczach elektrostatycznych oczyszczających gaz, pochodzący ze spalania węgla kamiennego, największe problemy odnotowano w utrzymaniu prawidłowego przepływu strumienia spalin przez całą komorę elektrofiltru. Zazwyczaj przepływ strumienia spalin przebiegał po linii najmniejszego oporu, omijając dolną część komory elektrofiltru. W tych miejscach lokalizowane było cykliczne wytrącanie się wilgoci ze spalin, która powoduje rozwój korozji elementów wchodzących w skład wyposażenia komory obiektu. Odnotowano również zużycie elementów układu strzepującego elektrod ulotowych czy zbiorczych, w pierwszej strefie odpylania. Uszkodzenia takie jak korozja elektrod zbiorczych i ulotowych, zaleganie cienkiej warstwy pyłu na elementach znajdujących się we wnętrzu komory elektrofiltru (np. oba rodzaje elektrod, izolatory wsporcze i obrotowe), czy zużycie elementów układu strzepującego elektrod zbiorczych oraz ulotowych, przeważnie były wynikiem normalnej eksploatacji elektrofiltrów. Wdrożenie działań związanych z procesem rozpoznawania stanu technicznego pozwoli na minimalizowanie skutków wad oraz głównych uszkodzeń w elektrofiltrze (rys. 6.1. i 6.2).



Rys. 6.1. Lokalizacja głównych uszkodzeń w elektrofiltrach – rzut z góry [opracowanie własne]



Rys. 6.2. Lokalizacja głównych uszkodzeń w elektrofiltrach – przekrój poprzeczny komory obiektu [opracowanie własne]

7. ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI

Prawidłowa identyfikacja i nadzorowanie zmian stanu technicznego maszyn, opiera się na podstawach fizycznych zjawisk zużyciowych oraz wskazania przyczyny rozwoju procesów starzeniowych w obiekcie technicznym. Znajomość funkcjonowania danej maszyny oraz jej budowy również wpływa na dokładność przeprowadzonych czynności, w ramach realizacji procesu rozpoznania zmiany stanu technicznego maszyn. Weryfikowanym w pracy obiektem był elektrofiltr, który jak to zostało wykazane, należy do grupy maszyn krytycznych. Dodatkowo biorąc pod uwagę umiejscowienie odpylacza elektrostatycznego w bloku energetycznym i jego rolę w procesie oczyszczania spalin, skupiono się na zidentyfikowaniu przyczyn rozwoju stanu degradacji. Elektrofiltr umożliwia wychwytywanie cząstek pyłowo-gazowych pochodzących z energetycznego spalania paliw, tym samym chroni otoczenie przed nadmierną emisją zanieczyszczeń, w postaci pyłu.

Obecnie przeglądy techniczne elektrofiltrów realizowane są cyklicznie jedynie w trakcie okresu gwarancyjnego. Po okresie gwarancyjnym przeglądy realizowane są tylko na zlecenie inwestora, w oparciu o losowy rozkład uszkodzeń oraz ze względu na wysokie koszty realizacji badań. Wskazany obszar stanowił podstawę do ustandaryzowania działań, którego następstwem było opracowanie zalecanych procedur badania parametrów odnoszących się do oceny, genezy i prognozy stanu elektrofiltrów.

Celem badań było wskazanie rozwiązania problemu badawczego, który został sformułowany w następujący sposób:

„Możliwe jest wskazanie zmian stanu technicznego elektrofiltru, bazując na analizie miar fizykochemicznych ewolucji procesu degradacji obiektu złożonego”.

Przyjęta hipoteza badawcza znalazła potwierdzenie w zebranych materiale oraz przeprowadzonych badaniach. Przedstawione w niniejszej pracy działania i szczegółowość ich wykonania, stanowią podstawy nowej metodyki realizacji procesu diagnozowania stanu technicznego elektrofiltru, przy zastosowaniu fizykochemicznych miar procesów ewolucji stanu zdatności instalacji do oczyszczania spalin z pyłu. W pracy przedstawiono szczegółowe zalecenia dla systemu rejestracji awarii, z uwzględnieniem lokalizacji uszkodzeń w odpylaczu elektrostatycznym. Informacje o uszkodzeniach wraz z określeniem przyczyn ich zajścia oraz dalsza diagnostyka, zostały opracowane na podstawie doświadczalnych badań algorytmu diagnozowania.

Biorąc pod uwagę obecnie dostępne dane (w tym również te podlegające archiwizacji), możliwe było prawidłowe zidentyfikowanie 7 parametrów diagnostycznych, które w dalszej części stanowiły podstawę do przeprowadzenia genezy i prognozy stanu technicznego elektrofiltru. Wyróżnione zostały poniższe miary fizykochemiczne:

- y_1 : stężenie pyłu w gazie suchym;
- y_2 : stężenie SO_2 ;
- y_3 : stężenie NO_2 ;
- y_4 : procentowa zawartość wilgoci w gazie;
- y_5 : temperatura wodnego punktu rosy gazu;
- y_6 : strumień objętości spalin;
- y_7 : prędkość przepływu spalin;
- y_8 : temperatura spalin w kanale.

Wskazano również, że wybrane parametry diagnostyczne są zależne od siebie. Jako przykład można wskazać, że wytrącanie się wilgoci ze spalin może wynikać z niedostatecznej wartości prędkości spalin. Skroplona para wodna w połączeniu z tlenkami siarki i azotu, zawartymi w spalinach, dają kwasy (siarkowy i azotowy), które wpływają negatywnie na powierzchnie elementów wewnętrznych komory elektrofiltru. W przypadku pozostałych parametrów diagnostycznych y_9 , y_{10} , y_{11} , y_{12} , y_{13} oraz y_{14} , zaobserwowano problem z dostępnością do danych bądź też ich prawidłową archiwizacją.

Analizując przeprowadzone badania wskazano kolejne obszary oraz działania, które należałoby w dalszej kolejności dokładnie zgłębić bądź zrealizować poniższe punkty:

- Przebadanie pozostałych metod optymalizacji zbioru parametrów diagnostycznych, w szczególności

metody „punktu idealnego” należącego do grupy rozwiązań kompromisowych Pareto.

- Szczegółowa analiza zaproponowanych modeli prognozowania z uwzględnieniem zależności prognozy od godzin pracy elektrofiltru.
- Zaimplementowanie otrzymanych wyników do programów diagnostycznych, stosowanych w sektorze energetycznym.
- Zbadanie stosowanych paliw do opalania kotłów (w sektorze energetycznym), celem wskazania materiałów opałowych, cechujących się największą wilgotnością.
- Analiza zawartości cząstek pyłowo-gazowych w strumieniu spalin w zależności od stosowanego paliwa do opalania kotła (w sektorze energetycznym).
- Zamodelowanie konstrukcji elektrofiltru w programie inżynierskim, z uwzględnieniem budowy dyfuzora oraz konfuzora, zawierającego elementy sterowania strumieniem spalin, w tym wykonanie prototypu obiektu (w odpowiedniej skali) i porównanie uzyskanych wyników.

LITERATURA

- [1] Action Plan for Energy Efficiency, Realising the Potential, Brussels, 19-10-2006 COM (2006) 545 final, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0545:FIN:EN:PDF>
- [2] Archives of Waste Management and Environmental Protection, vol. 18 issue 1(2016)
- [3] Benitez J., Process engineering and design for air pollution control, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1993
- [4] GREEN PAPER: A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy, Brussels, 8.3.2006, s. 17-18
- [5] IEA, Energy Policies of IEA Countries, Poland, 2016 Review, <http://www.iea.org/publications/freepublications/>
- [6] IEA, Energy Policies of IEA Countries, Polish 2016 Review, Executive Summary Polish, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EnergyPoliciesofIEACountriesPolish2016ReviewExecutiveSummaryPolish.pdf>
- [7] Batmunkh S, Battogtokh Z, Modeling an electrostatic precipitator (ESP) with ESPVI 4.0W, Second International Forum on Strategic Technology IFOST, 2007, s. 650–653
- [8] Zaporowski B., Technologie wytwarzania energii elektrycznej dla polskiej elektroenergetyki, Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal, t. 18, z. 4 (2015), s. 29-44
- [9] Krogulec N., Spalanie odpadów przemysłowych, Ochrona powietrza, nr 1 (1994)
- [10] Pawlik M., Zaawansowane technologicznie bloki energetyczne – Nowe wyzwania, Energetyka, sierpień 2013, s. 595-596
- [11] Chudy P., Czachor K.: Poradnik metodyczny w zakresie PRTR dla Instalacji spalania paliw – wykonany na zlecenie GIOŚ – Umowa z dnia 26.10.2007 r. Nr DliO-20/2007
- [12] Krogulec N., Spalanie odpadów przemysłowych, Ochrona powietrza, nr 1 (1994)
- [13] Redakcja, Rekordowe ceny uprawnień do emisji CO₂, <http://biznesalert.pl/rekordowe-ceny-uprawnien-emisji-co2/>
- [14] Buekens A, Schroyens K., Pollution Control Technologies – Vol. I - Dust Collection, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 2008, s. 207-209
- [15] Załączniki do rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 10 sierpnia 2012, http://www2.mz.gov.pl/wwwfiles/ma_struktura/docs/zal1_10sierpnia_20120814.pdf
- [16] Czajkowska A., Instalacje w blokach energetycznych chroniące środowisko naturalne przed emisją SO_x, NO_x, CO_x generowanych podczas spalania paliw, Energetyka na skalę XXI w. – osiągnięcia i perspektywy, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL, ISBN 978-83-65932-17-4, Lublin 2018, s. 82-94
- [17] Pawlik M., Zaawansowane technologicznie bloki energetyczne – Nowe wyzwania, Energetyka, sierpień 2013, s. 595-596
- [18] Pentol–Enviro Polska Sp. z o.o., Kondycjonowanie spalin jako alternatywa dla budowy nowego elektrofiltru – dotychczasowe doświadczenia i perspektywy, 2012

- [19] Czembor P., Rutkowska-Subocz E.: Dyrektywa o emisjach przemysłowych 2010/75/UE – mechanizmy derogacyjne dla obiektów energetycznego spalania, https://www.cire.pl/pliki/2/rutkowska_subocz_czembor_ied.pdf
- [20] Haviland R. P., Niezawodność urządzeń technicznych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1968, s. 150
- [21] Praca zbiorowa pod redakcją MIGDAŁSKIEGO J., Inżynieria Niezawodności, Akademia Techniczno-Rolnicza Bydgoszcz, Bydgoszcz, 1992, 98 – 100 (1992)
- [22] Adamiec-Wójcik I, Nowak A, Wojciech S. Comparison of Methods for Modelling Vibrations of Collecting Electrodes in Dry Electrostatic Precipitators, *Archive of Mechanical Engineering*, volume 60, 431 – 449 (2013)
- [23] United States Patent Application Publication, Ribera Salcedo, Process of electrostatic recirculation for dedusting and gas cleaning and device thereof; 22 March 2012; US 2012/0067214 A1.7
- [24] Brzezińska A., Diagnostowanie obiektu złożonego na podstawie stanu technicznego elektrofiltrow, Książka Artykułów Konferencji Naukowej „Nauka, Badania, Rozwój”, Wydawnictwo Fundacji Promovendi, ISBN: 978-83-949065-2-8, Warszawa 2017, s. 5-17
- [25] Czajkowska A., Dozorowanie pracy elektrofiltrow w bloku energetycznym w ujęciu wyboru odpowiedniej strategii eksploatacji maszyn, *Energetyka na skalę XXI w. – osiągnięcia i perspektywy*, Wydawnictwo Naukowe TYGIEL, ISBN 978-83-65932-17-4, Lublin 2018, s. 71-81
- [26] Legutko S., Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń, Wydawnictwo szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2004, s. 7-9
- [27] Lewandowski J., Procesy decyzyjne w niezawodności i eksploatacji obiektów technicznych o ciągłym procesie technologicznym, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 151 – 153 (2008)
- [28] Fuliful F. K., Hamood A. A., Collection Efficiency of Wire – Duct Electrostatic Precipitator, LAP Lambert Academic Publishing, 2017, s. 11-20
- [29] Babcock & Wilcox: Quality Electrostatic Precipitator Technology, Parts and Service, str. 16-19
- [30] Batmunkh S, Battogtokh Z, Modeling an electrostatic precipitator (ESP) with ESPVI 4.0W, Second International Forum on Strategic Technology IFOST, 2007, s. 650–653
- [31] Szczepańska J., Emisja głównych zanieczyszczeń, *Powietrze*, t. 3, www.wios.lodz.pl/files/docs/r11xiiiixpowie%20trze.pdf, s. 106
- [32] Brzezińska A., Systemy IT wspierające polski sektor energetyczny w działaniach proekologicznych, *Rynek Energii*, Nr 2 (135), 2018, s. 38-43
- [33] Brzezińska A., Żółtowski B., Badanie słabych ogniw obiektu złożonego, *Postępy w Inżynierii Mechanicznej*, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, ISSN 2300-3383, Bydgoszcz 2016, 8, 4, 21-34
- [34] Napiórkowski J., Drożyner P., Mikołajczak P., Rychlik A., Szczyglak P., Ligier K., Podstawy Budowy i eksploatacji pojazdów i maszyn, Uniwersytet Warmińsko – Mazurski w Olsztynie, Olsztyn, 299 – 310 (2013)
- [35] Żółtowski B., Landowski D., Przybyliński B., Projektowanie Eksploatacji Maszyn, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji - Państwowego Instytutu Badawczego, 2012, s. 212-215
- [36] Żółtowski B., Żółtowski M., Zarządzanie jakością procesu eksploatacji maszyn, *Artykuł naukowy*, 1036 – 137 (2013)
- [37] Antos K., Pacana A., Wskaźnikowa ocena efektywności funkcjonowania maszyn na przykładzie wybranego przedsiębiorstwa-studium przypadku, 540 – 541 (2016)
- [38] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sustainable Production and Consumption Unit, European IPPC Bureau, Final Draft, June (2016)

- [39] Czajkowska A., 2018. Measurements emissions of pollutant-gas in power units - Pomiary emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych w blokach energetycznych. National Scientific Conference „Novel Trends of Polish Science”. Zakopane
- [40] Czajkowska A., 2018. Metody genezowania stanu technicznego elektrofiltru w celu lokalizacji uszkodzeń. Rynek Energii. 6(139). s. 70-76
- [41] Czajkowska A., 2018. Nowe podejście do oceny stanu technicznego obiektów złożonych z sektora energetycznego, Rynek Energii, , Lublin, 4 (137), s. 14-21
- [42] Czajkowska A., 2019. Prognozowanie prawidłowego funkcjonowania obiektów w sektorze energetycznym. Rynek Energii. 4(143). s. 21-25
- [43] Czajkowska A., 2018. Nowe podejście do oceny stanu technicznego obiektów złożonych z sektora energetycznego. Rynek Energii. 4. 137. s. 14-21
- [44] Czajkowska A., 2019. Elementy systemu eksploatacji obiektów krytycznych. Rynek Energii. 3(142). s. 36-42
- [45] Czajkowska A., Bożejewicz D., 2019. Review of recovery methods of waste from industry and power plant service. Rynek Energii. 6 (145). s. 67-76
- [46] Mazur M., Teisseyre M., 1977. Podstawy teorii i konstrukcji urządzeń odpylających. Odpylacze cyklonowe i elektrostatyczne. Politechnika Wroclawska, Wrocław
- [47] Parker K. 2003. Electrical operation of electrostatic precipitators. The Institution of Electrical Engineers. London
- [48] Redecam Group, Electrostatic Precipitators, link: <http://www.redecam.com/electrostatic-precipitators/>
- [49] Ziedan H. A., 2016. Modeling of Corona Discharge in Wire-duct Electrostatic Precipitators. LAP Lambert Academic Publishing. s. 35-44
- [50] Jędrusik M., Świerczok A., 2012. Design Efficiency of ESP. Air Pollution – Monitoring, Modelling. Health and Control. Croatia. s. 197-199
- [51] Materiały firmy Pentol–Enviro Polska Sp. z o.o. 2012. Kondycjonowanie spalin jako alternatywa dla budowy nowego elektrofiltru – dotychczasowe doświadczenia i perspektywy
- [52] United States Patent Application Publication, 22 March 2012. Ribera Salcedo. Process of electrostatic recirculation for dedusting and gas cleaning and device thereof. US2012/0067214 A1.7.
- [53] Nowak A., 2011. Modelowanie i pomiary drgań elektrod osadczych elektrofiltrów suchych. ATH Bielsko-Biała
- [54] Tracz P., Biały L., Waclawiak K., 2016. Directions of improvements of modern electrostatic precipitators. Archives of Waste Management and Environmental Protection. Volume 18 (1). s. 45-60
- [55] Dokumentacja udostępniona od firmy Zakłady Pomiarowo - Badawcze Energetyki „ENERGOPOMIAR” Sp. z o.o.