

Wrocław University of Science and Technology
Faculty of Geoengineering, Mining and Geology

Ph.D. Thesis

**A method of comprehensive assessment of the
operational efficiency of machines and predictive
maintenance based on data from the monitoring
system**

Paweł Śliwiński

Supervisor:

Prof. dr hab. inż. Radosław Zimroz

Wrocław, June 2023

Politechnika Wrocławska
Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

Rozprawa doktorska

**Metoda kompleksowej oceny efektywności
eksploatacyjnej maszyn i predykcyjnego utrzymania
ruchu na podstawie danych z systemu monitoringu**

Paweł Śliwiński

Promotor:
prof. dr hab. inż. Radosław Zimroz

Wrocław, Czerwiec 2023

Zakres

1	Wprowadzenie	3
1.1	Definicja problemu	4
1.2	Zakres pracy	5
1.3	Wykaz ważniejszych oznaczeń oraz skrótów	8
2	Analiza stanu wiedzy	11
2.1	Stan wiedzy	11
2.1.1	Cyfryzacja w górnictwie	12
2.1.2	Analiza potrzeb informacyjnych w kontekście procesów	20
2.1.3	Analiza efektywności	26
2.1.4	Monitorowanie procesów technologicznych wykorzystujących SMG	34
2.1.5	Diagnostyka maszyn	38
2.1.6	Inwentaryzacje wybranych zasobów w przedsiębiorstwie	47
2.1.7	Analiza możliwości wykorzystania danych w systemach informacyjnych do budowania informacji zarządczych	61
2.2	Wkład autora w rozwój dziedziny	66
3	Cele ogólne i szczegółowe pracy	69
4	Prace eksperymentalne	72
4.1	Eksperymenty i symulacje numeryczne	72
4.2	Eksperymenty w warunkach laboratoryjnych	72
4.3	Eksperymenty w warunkach dołowych	76
4.3.1	Eksperymenty w kontrolowanych warunkach dołowych	76
4.3.2	Eksperymenty długoterminowe	88
4.4	Pozyskanie i przygotowanie zestawów danych z systemu monitoringu pod kątem długoterminowej analizy wybranych parametrów	91

4.4.1	Przygotowanie surowych próbek danych do właściwych badań	92
5	Metody analityczne i wyniki badań	95
5.0.1	Wielowymiarowe analizy danych w środowisku hurtowni danych	96
5.1	Analiza efektywności pracy maszyny ze sprzęgiem lock-up	97
5.2	Monitorowanie procesów technologicznych	104
5.2.1	Analiza procesu wiercenia	105
5.2.2	Analiza procesu odstawy	117
5.2.3	Monitorowanie procesu zabudowy obudowy kotwowej z wykorzystaniem techniki laserowej	141
5.3	Elementy diagnostyki maszyn	144
5.3.1	Diagnostyka silnika SMG na podstawie ciśnienia oleju	146
5.3.2	Diagnostyka elementów układu przeniesienia napędu maszyny na podsta- wie pomiaru temperatur	160
5.3.3	Diagnostyka uszkodzeń tarczy flex-plate w układzie napędowym ładowarki przegubowej LKP 1601B na połączeniu koła zamachowego z przekładnią hydrokinetyczną	163
5.3.4	Procedura tworzenia Rejestru Zdarzeń Eksploatacyjnych	181
6	Implementacje i wdrożenia	185
6.1	Wdrożenie analityki dla procesu odstawy oponowej urobku na podstawie danych z systemu antykolizji	186
6.2	Operacyjna ocena parametrów pracy maszyn na podstawie podstawowych staty- styk dla monitorowanych parametrów	189
6.3	Analityka stanu maszyn na podstawie komunikatów o błędach zapisanych przez sterowniki cyfrowe	195
6.4	Wdrożenie analityki dla potrzeb testów ładowarki przegubowej Epiroc ST14B z napędem elektrycznym zasilanym bateryjnie	198
6.5	Kokpity - analityka procesów produkcji górniczej	202
7	Podsumowanie i wnioski	205
	Bibliografia	212

Podziękowania

Realizacja niniejszej pracy doktorskiej nie byłaby możliwa bez wsparcia i pomocy wielu dobrych ludzi, których spotkałem na swojej drodze. Pragnę gorąco podziękować: profesorowi Radosławowi Zimrozowi – promotorowi rozprawy doktorskiej – za nieocenione wsparcie naukowe, życzliwość oraz doskonałą nawigację, która bez wątpienia pomogła mi w przeprowadzeniu badań oraz napisaniu końcowego tekstu rozprawy.

Kolegom z Oddziałów Mechanicznych w kopalniach, dla których ciężkiej, odpowiedzialnej, niebezpiecznej pracy mam wielki szacunek - za ogromne wsparcie merytoryczne, inspiracje, cenne uwagi i pomysły, pomoc w organizacji zjazdów na dół i przygotowanie eksperymentów dołowych. W szczególności chciałbym podziękować Tomaszowi Kaniewskiemu, Wojciechowi Słoce, Tomaszowi Wojtalikowi, Adamowi Ardelowi, Danielowi Kapuście oraz Tomaszowi Wolańskiemu.

Kolegom z Oddziału COPI - Tomaszowi Jankowskiemu i Kamilowi Gładyszowi, z którymi na co dzień współpracuję w zakresie utrzymania i rozwoju obszaru informacyjnego hurtowni danych EKSPERT - za profesjonalizm, zaangażowanie we współpracę przy wdrożeniach nowych algorytmów analitycznych oraz pomoc w opracowaniu raportów. Kolegom z ośrodków naukowych, z którymi prowadzę współpracę przy realizacji prac badawczo-rozwojowych – za wsparcie merytoryczne w zakresie zastosowania różnego rodzaju narzędzi i metod badawczych. Szczególne wyrazy uznania kieruję dla dr inż. Pawła Stefaniaka, z którym mam przyjemność współpracować od wielu lat. Dziękuję za ogromne zaangażowanie, inspiracje, cenne uwagi, a także za krytyczne spojrzenie na moje pomysły oraz wyniki badań.

Konstruktorom maszyn górniczych, z KGHM ZANAM, Mine Master, Sandvik, Epiroc - za wsparcie merytoryczne, cenne uwagi oraz dobrą wolę przy testowaniu proponowanych przeze mnie modyfikacji oprogramowania rejestratorów do monitoringu SYNAPSA. W szczególności chciałbym podziękować Tomaszowi Dziakowi, Andrzejowi Baranowi, Lesławowi Ostapów, Łukaszowi Sareckiemu, Dominikowi Sawickiemu i Jackowi Kucharskiemu.

Kolegom z Pionu Górnictwa w Centrali - za chęć dzielenia się wiedzą oraz doświadczeniami. Nie sposób Was wszystkich wymienić z imienia i nazwiska. Praca z Wami to czysta przyjemność!

Dr inż. Mirosławowi Lewickiemu - opiekunowi pracy - za konsultacje merytoryczne oraz wsparcie organizacyjne. Zespołowi koordynatorów programu Doktoraty Wdrożeniowe w KGHM – za możliwość przystąpienia do programu oraz wsparcie organizacyjne w trakcie jego trwania.

Nie mniejsze podziękowania pragnę złożyć całej mojej rodzinie, która wspierała moje wysiłki i motywowała mnie do działania. Przede wszystkim chciałbym podziękować: mojej żonie Alicji – za jej obecność w moim życiu, wsparcie duchowe, motywację, cierpliwość, wiarę w moje możliwości oraz wyrozumiałość w chwilach słabości. Mojemu synowi Mateuszowi za konsultacje

w dziedzinie matematyki, a także pomoc techniczną przy składaniu tekstu pracy. Moim rodzicom, Marii i Bolesławowi – to głównie dzięki nim mam szansę realizować swoje pasje oraz zdobywać kolejne osiągnięcia. Dziękuję Wam za wszystko.

Rozdział 1

Wprowadzenie

Rozwój technologii pomiarowych i analitycznych, automatyzacja i robotyzacja procesów przemysłowych, wzrost świadomości pracowników i wymuszenie większej odpowiedzialności pracodawcy za bezpieczeństwo znacząco wpłynęły na współczesne zakłady przemysłowe. Szczególnie widoczne jest to w sektorze samochodowym. Branża wydobywcza także podlega tym wpływom. Należy również wspomnieć o wyeksponowanych problemach środowiskowych i o coraz trudniejszej dostępności do zasobów, zwłaszcza tych w górnictwie podziemnym. Globalizacja rynku i wzrastająca konkurencyjność w sektorze górnictwa wymuszają działania związane z implementacją rozwiązań technologicznych dotyczących poprawy efektywności produkcji, bezpieczeństwa pracowników, ochrony środowiska itd. Nowoczesne technologie pomiarowe, metody analizy danych, techniki analizy obrazów, wykorzystanie tzw. sztucznej inteligencji, komputerowe wspomaganie podejmowania decyzji itp. pozwalają na przyspieszenie i obiektywizację procesu podejmowania decyzji. Co więcej, informacja, na podstawie której decyzje zostały podjęte, może być współdzielona na różnych szczeblach organizacji, a także dla różnych działów przedsiębiorstwa. Kopalnia podziemna to złożony organizm, w którym wydzielono odpowiednie komórki, pionny itd. w celu sprawnej organizacji pracy. Niestety, podział ten, z jednej strony całkowicie uzasadniony, jest jednocześnie problematyczny, gdyż decyzje podejmowane przez np. mechaników mogą być w sprzeczności z działaniami elektryków. Często istotne dane znajdują się poza "technologicznymi" pionami (np. departament osobowy, zakupów itd.). Wykorzystanie danych pomiarowych do zbudowania operacyjnej informacji zarządczej jest istotne dla przedsiębiorstwa wewnątrz, ale może mieć znaczenie także dla współpracujących podmiotów (z grupy kapitałowej i poza nią).

1.1 Definicja problemu

Główną hipotezą w rozprawie jest wykazanie możliwości i przydatności w codziennej eksploatacji szeroko pojętej technologii pomiarowej i metod analitycznych do generowania informacji zarządczej. Ponieważ procesy technologiczne w górnictwie podziemnym rud miedzi są dość złożone, a dane, które systemy pomiarowe potrafią dziś zarejestrować, są mieszaniną informacji i wielu zakłóceń, wyodrębnienie informacji z "surowego" sygnału wymaga zastosowania zaawansowanych narzędzi analitycznych. Dodatkowo, informacja o procesie jest często skomplikowaną sekwencją czasową danych (tak jak np. w zapisie EKG), w związku z czym porównanie dwóch cykli roboczych wymaga zaawansowanej parametryzacji wyodrębnionej informacji, podzielonej na poszczególne realizacje cyklu roboczego. Poziom złożoności tak zdefiniowanych zadań analitycznych do tej pory był skuteczną przeszkodą w ich wdrażaniu. Wiodącą sentencją rozprawy jest idea fuzji danych dostępnych w przedsiębiorstwie i wykonania wielowymiarowej analityki na potrzeby obranego celu cząstkowego. Wdrażane innowacje zwykle wiążą się z oceną skuteczności, wpływem na organizację produkcji, bezpieczeństwo pracy itd. Narzucanie jednej perspektywy w ocenie skutków danej innowacji jest niepełne. Dane rozwiązanie często pomaga jednym, ale dezorganizuje pracę innych. Często pozornie negatywny efekt końcowy przynosi całościowo dużo korzyści. Brak sukcesu we wdrażaniu danej innowacji może wynikać z niepełnego obrazu sytuacji, nieuwzględnienia pewnych czynników, które pozornie są nieistotne.

Powiązanie różnych typów danych i zastosowanie zaawansowanych metod analitycznych umożliwia zbudowanie mechanizmów wspomaganie decyzji dla kadry kierowniczej średniego i wyższego szczebla. Decyzje te są obiektywne i oparte na wielowątkowych działaniach. Bez komputerowego wsparcia i przetworzenia danych w informację zarządczą, podejmowanie decyzji w warunkach tak dużej niepewności i zmienności danych w praktyce jest działaniem bardzo trudnym.

Aby wykazać słuszność postawionej tezy, w rozprawie przedstawiono wybrane procesy technologiczne i wybrane zadania analityczne:

- Metoda analizy danych eksploatacyjnych z systemu pomiarowego pozwalająca ocenić efektywność implementacji układu lock-up.
- Metoda analizy danych eksploatacyjnych z systemu pomiarowego pozwalająca identyfikować cykle w procesie kotwienia (zabudowy obudowy kotwowej w stropie wyrobiska).
- Metoda analizy danych eksploatacyjnych z systemu pomiarowego pozwalająca ocenić parametry dla procesu wiercenia (wiercenie otworów strzałowych).
- Metoda analizy danych eksploatacyjnych z systemu pomiarowego pozwalająca identyfikować cykle technologiczne w procesie odstawy (wóz odstawczy).

- Metoda analizy danych eksploatacyjnych z systemu pomiarowego pozwalająca identyfikować stan techniczny silnika spalinowego na podstawie długoterminowej analizy ciśnienia oleju.
- Metoda analizy danych eksploatacyjnych z systemu pomiarowego pozwalająca wykrywać anomalie w układzie przeniesienia napędu sprowadzające się do uszkodzeń tarczy flex-plate w układzie napędowym ładowarki przegubowej LKP 1601B na połączeniu koła zamachowego z przekładnią hydrokinetyczną.
- Koncepcja metody automatycznego generowania wpisów do „Rejestru zdarzeń eksploatacyjnych dla SMG” w hurtowni danych, z zastosowaniem narzędzi do text miningu do analizy zapisów w formularzach elektronicznych systemu eRaport, wykorzystywanego do potwierdzania prac przy maszynach.

Wyniki prowadzonych prac badawczych zostały w wielu aspektach wdrożone w praktyce. Opracowano nowe raporty oparte na danych z monitoringu SMG oraz innych dostępnych systemów, które zostały udostępnione dla szerokiego grona użytkowników w Oddziałach Górniczych oraz Centrali. Zakres tematyczny raportów dotyczy:

- oceny stanu technicznego maszyny, na podstawie statystyk percentyli dla monitorowanych parametrów eksploatacyjnych oraz danych o błędach zgłaszanych przez systemy autodiagnostyki,
- oceny kultury obsługi maszyny przez operatora,
- oceny organizacji pracy maszyn w oddziałach wydobywczych,
- prezentacji wskaźników wydajności dla operacji zabudowy obudowy kotwowej oraz wiercenia otworów strzałowych.

1.2 Zakres pracy

Niniejsza rozprawa obejmuje siedem rozdziałów wraz ze spisem literatury i jest ustrukturyzowana następująco.

W rozdziale 2 przedstawiono stan wiedzy w zakresie szeroko pojętej cyfryzacji sektora górnictwa. Następnie omówiono trzy główne obszary badań dotyczące: problematyki analiz efektywności, monitorowania procesów technologicznych związanych z pracą samojezdnych maszyn górniczych i wreszcie diagnostyki maszyn. Dodatkowo dokonano przeglądu zasobów pomiarowo-analitycznych i informacyjnych (bazy danych) oraz omówiono podstawowe funkcjonalności tych zasobów w kontekście wykorzystania ich do budowy operacyjnej informacji zarządczej. W podsumowaniu wyeksponowano rolę Autora w wielu działaniach związanych z problematyką rozprawy

(kierowanie pracami rozwojowymi w KGHM, współpraca z ośrodkami naukowymi, wizyty studyjne itd.).

W rozdziale 3 zdefiniowano ogólną tezę pracy wraz z towarzyszącymi jej celami szczegółowymi. W rozumieniu Autora teza rozprawy ma charakter strategiczny, natomiast operacyjnie realizowane są cele cząstkowe, które finalnie składają się w całość, potwierdzając słuszność przyjętej tezy.

W rozdziale 4 omówiono zrealizowane prace eksperymentalne. Dane opisujące procesy technologiczne są podstawą tej rozprawy. Pozyskanie danych w warunkach normalnej eksploatacji w przedsiębiorstwie górniczym, w kopalni podziemnej, jest wyzwaniem nawet dla pracownika tej firmy. Na potrzeby badań wykorzystywano trzy rodzaje prac eksperymentalnych.

Pierwszym typem były eksperymenty symulacyjne - mające na celu testowanie pewnych koncepcji analitycznych, wykonywanie analiz statystycznych, symulacje Monte Carlo itd. Modele użyte w symulacjach były inspirowane danymi eksploatacyjnymi, ale pozbawionymi zakłóceń spotykanych w rzeczywistości. Nie uwzględniają również innych czynników trudnych do przewidzenia na etapie symulacji. Ze względu na ich ograniczoną przydatność na kolejnych etapach badań, większość badań symulacyjnych nie została zamieszczona w rozprawie.

Drugą grupą prac eksperymentalnych były dedykowane badania dołowe, zorganizowane w celu przetestowania układu akwizycji danych, weryfikacji wiedzy pozyskanej z analiz danych wcześniejszych itd. Zaletą tego typu badań jest pozyskanie danych w warunkach kontrolowanych. Operator maszyny wykonuje dokładnie to, co zostało zaplanowane w eksperymencie. Często eksperymenty takie były filmowane. Budowanie wiedzy w takim przypadku jest relatywnie łatwe.

Celem rozprawy jest opracowanie metod działających w rzeczywistych warunkach procesu przemysłowego, odpornych na zakłócenia. Trzecią grupą badań eksperymentalnych jest zatem akwizycja danych w warunkach normalnej eksploatacji. Eksperymenty tego typu zwykle są długoterminowe, obejmują różne miejsca pracy, różnych operatorów oraz różne zadania (niekiedy "modelowe" procesy). Potwierdzenie skuteczności metod analitycznych na takich zestawach danych daje szansę na wdrożenie metod do codziennej praktyki.

W rozdziale 5 przedstawiono opracowane metody i wyniki uzyskane po zastosowaniu metod analitycznych do danych opisanych w poprzednim paragrafie. Opracowane metody odpowiadają celom szczegółowym pracy.

W rozdziale 6 przedstawiono przykładowe implementacje rozwiązań w używanych przez przedsiębiorstwo systemach informatycznych.

Rozdział 7 podsumowuje całość rozprawy. Zawiera część ogólną i wnioski szczegółowe. Badania dotyczące wykorzystania danych z różnych źródeł do budowania informacji zarządczej mają

ogromne perspektywy. W tej części rozprawy przedstawiono również subiektywną wizję Autora co do kierunków dalszych prac.

1.3 Wykaz ważniejszych oznaczeń oraz skrótów

ADBULE - wodny roztwór mocznika stosowany w branży motoryzacyjnej jako reduktor w celu rozłożenia w katalizatorze SCR szkodliwych dla środowiska tlenków azotu

AC 500/1000V - napięcie sieci prądu przemiennego dostępne do zasilania urządzeń energomechanicznych w wyrobiskach podziemnych KGHM

BREAKP - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, ciśnienie hamowania

B+R - działalność badawczo-rozwojowa

CMMS - system wsparcia zarządzania utrzymaniem ruchu

CAN - interfejs służący do przesyłania danych bezpośrednio z pojazdowej magistrali, która jest szeregową siecią przesyłu cyfrowych informacji pomiędzy urządzeniami elektronicznymi w pojeździe

DPF - filtr cząstek stałych, odpowiedzialny za oczyszczanie spalin z cząstek sadzy i popiołu

DTR - dokumentacja techniczno-ruchowa, w tym instrukcja obsługi

DR_PROGR - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, postęp wiercenia, wartość chwilowa

ENGCoolT - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, temperatura cieczy chłodzącej

ENGRPM - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, prędkość obrotowa silnika

ENGTPS - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, pozycja pedału przyspieszenia

ENGOILP - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, ciśnienie oleju silnika spalinowego

ETL - to skrót od nazwy procesu, którego zadaniem jest ekstrakcja danych z systemu źródłowego (Extract), następnie przekształcenie danych do pożądanej formy lub struktury (Transform). Ostatnim etapem procesu ETL jest wprowadzenie (Load) przekształconych danych do repozytorium (najczęściej bazy danych), z którego będą dostępne do wykorzystania przez aplikacje klienckie.

FEDDR - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, kierunek posuwu narzędzia

FMI - Failure Mode Identifier: numer błędu wg normy SAE J1939, drugi człon kodu opisujący objaw usterki

FUELUS - zmienna: chwilowe zużycie paliwa

GC - Wydział Maszyn Dołowych w Oddziałach Górniczych

GROILP - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, ciśnienie oleju przekładniowego

GROILT - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, temperatura oleju przekładniowego

HYDOILP - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, ciśnienie oleju hydraulicznego

HYDOILT - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, temperatura oleju hydraulicznego

HYDDFEDP - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, ciśnienie w układzie posuwu narzędzia

HYDDIMPP - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, ciśnienie w układzie udaru wiertarki
HYDDRPMP - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, ciśnienie w układzie obrotów wiertarki

IT - technologie informatyczne

KGHM - KGHM Polska Miedź SA

KGHM Cuprum - KGHM Cuprum sp. z o.o. Centrum Badawczo - Rozwojowe

KGHM ZANAM - KGHM ZANAM SA

KMC - komora maszyn ciężkich w kopalniach KGHM

LF - lokalizacja funkcjonalna, struktura hierarchiczna wykorzystywana w module PM systemu SAP, do przypisania numeru kopalnianego maszyny

LK - grupa maszyn: ładowarki produkcyjne LK2 do LK4 stosowane o operacji załadunku i odstawy (ładowarki przegubowe)

lock-up - blokada mechaniczna sprzęgła hydrokinetycznego, załączana automatycznie

LIDAR - (ang. Light Detection and Ranging) metoda pomiaru odległości poprzez oświetlenie celu światłem laserowym i pomiar odbicia za pomocą czujnika

MTBF - średni czas pracy do momentu wystąpienia awarii

MTTR - średni czas naprawy, po wystąpieniu awarii

OCR - One Control Room

PCA - analiza głównych składowych, jedna ze statystycznych metod analizy czynnikowej

RPCA - wariant analizy PCA, umożliwia redukcję liczby zmiennych metodą odpornych na obserwacje odstające składowych głównych

SAP ERP - oprogramowanie firmy SAP do kompleksowego zarządzania przedsiębiorstwem (funkcjonuje również nazwa mySAP)

SAP BW - oprogramowanie firmy SAP, biznesowa hurtownia danych

SCR - filtry selektywnej redukcji katalitycznej (selective catalytic reduction) w systemach oczyszczania spalin silników Diesla

SELGEAR - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA - wybrany bieg

SG - grupa maszyn: spycharki gąsienicowe

SIWZ - specyfikacja istotnych warunków zamówienia

SMG - samojezdne maszyny górnicze

SPEED - zmienna w systemie monitoringu SYNAPSA, prędkość

SPN - (Suspect Parameter Numbers): numer błędu wg normy SAE J1939, pierwszy człon kodu opisujący usterkę

Standard rejestratora - dokument: "Standard rejestratora do monitoringu samojezdnych maszyn

górnictwa (SMG) w KGHM Polska Miedź SA”.

SW - rejon „Sieroszowice” w kopaniu „Polkowice-Sieroszowice”

SWB - grupa maszyn: wozy do obrywki

SWK - grupa maszyn: wozy kotwiące (SWK, SWKA, SWKF)

SWW - grupa maszyn: wozy wierzące

SWT - grupa maszyn: pojazdy transportowe (SWTM, SWTS, SWTD)

TCO - ang. Total Cost of Ownership (całkowity koszt posiadania)

WEBI - narzędzie Web Intelligence będące częścią Platformy SAP Business Objects

WAAC - średni ważony koszt kapitału

WLAN - sieć lokalna, w której połączenia między urządzeniami sieciowymi zrealizowano bez użycia przewodów

WO - grupa maszyn: wozy odstawcze do 20 ton

WOS - grupa maszyn: wozy odstawcze powyżej 20 do 40 Mg

WOW - grupa maszyn: wozy odstawcze powyżej 40 Mg

ZG - zakłady górnicze

Rozdział 2

Analiza stanu wiedzy

2.1 Stan wiedzy

Materiał przedstawiony w rozprawie w ocenie autora posiada znamiona pracy interdyscyplinarnej, gdyż obejmuje różne aspekty działalności górniczej, przeplatanej z najnowszymi rozwiązaniami IT, inżynierią mechaniczną i technikami pomiarowymi. Motywacją do powstania tej pracy niewątpliwie jest dynamiczna transformacja sektora górniczego, wyrażona implementacją technologii cyfrowych. Dlatego też obecna sekcja dotyczy stanu wiedzy w zakresie cyfryzacji w górnictwie, dzięki której możliwe jest rozważanie obiektywnej analizy efektywności, monitorowania procesów technologicznych czy diagnostyki maszyn (ang. predictive maintenance). Tematy te są przedmiotem rozważań w kolejnych podrozdziałach analizy stanu wiedzy przedstawionej w dysertacji. Przegląd stanu wiedzy dopełnia podrozdział związany z inwentaryzacją informacji dostępnych w bazach danych systemów informatycznych funkcjonujących w KGHM. Zweryfikowano możliwości wykorzystania fuzji danych z różnych źródeł dla opracowania wielowymiarowych analiz. Cyfryzacja dotarła do sektora surowcowego w Polsce wiele lat temu i KGHM jest jednym z liderów cyfrowej transformacji w górnictwie. Zbudowane doświadczenie w grupie kapitałowej i posiadana infrastruktura techniczna, w tym specjalizowane systemy informacyjne i dedykowane narzędzia analityczne, wymagają odpowiedniego usystematyzowania pod kątem realizacji celów zdefiniowanych w rozprawie.

Autor rozprawy, uczestnicząc w procesie cyfryzacji KGHM od wielu lat poprzez udział w różnych projektach badawczych i ekspertyzach oraz współpracę naukową z jednostkami badawczymi i uczelniami, również pozostawił po sobie dorobek naukowy.

2.1.1 Cyfryzacja w górnictwie

Koncepcje inteligentnej kopalni rozważano w krajach skandynawskich już na początku tego stulecia. Kilka kluczowych projektów angażujących liderów przemysłowych i akademickich europejskiego sektora surowcowego zrealizowano z sukcesem w minionych dekadach. Projekty I2Mine, SMIFU, MAMMA, SIMS, Illumination to przykłady współpracy nauki z przemysłem. Utworzenie platformy surowcowej, Europejskiego Partnerstwa "EIP for Raw Materials", ogłoszenie mapy drogowej dla sektora surowcowego w Europie, powołanie Wspólnoty Wiedzy i Innowacji EIT KIC Raw Materials to działania europejskich instytucji naukowych, państwowych i biznesu, służące rozwojowi technologicznemu sektora górniczego w Europie.

W Polsce w roku 2010 Kicki i Dyczko zaproponowali w pracy [1] koncepcję automatyzacji i monitoringu procesu produkcyjnego w kopalni podziemnej. Tematyka cyfryzacji w górnictwie była przedmiotem wielu edycji konferencji naukowych, zwłaszcza Szkoły Eksploatacji Podziemnej organizowanej przez Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN.

W ostatnich latach liczba prac dotyczących cyfryzacji i cyfrowej transformacji górnictwa lawinowo wzrosła [2–12]. Rozwiązania proponowane w literaturze dotyczą wielu aspektów, takich jak robotyzacja procesów, robotyka inspekcyjna [13], cyfryzacja modelowania i planowania produkcji [14], automatyzacja, autonomizacja maszyn, wykorzystanie technologii VR/AR [15], wykorzystania technologii cyfrowych do poprawy bezpieczeństwa pracowników [16, 17], technologie cyfrowych bliźniaków [18], monitorowanie pracy maszyn [19], metody utrzymania ruchu (predictive maintenance [20]), metody process miningu [21–23] itd.

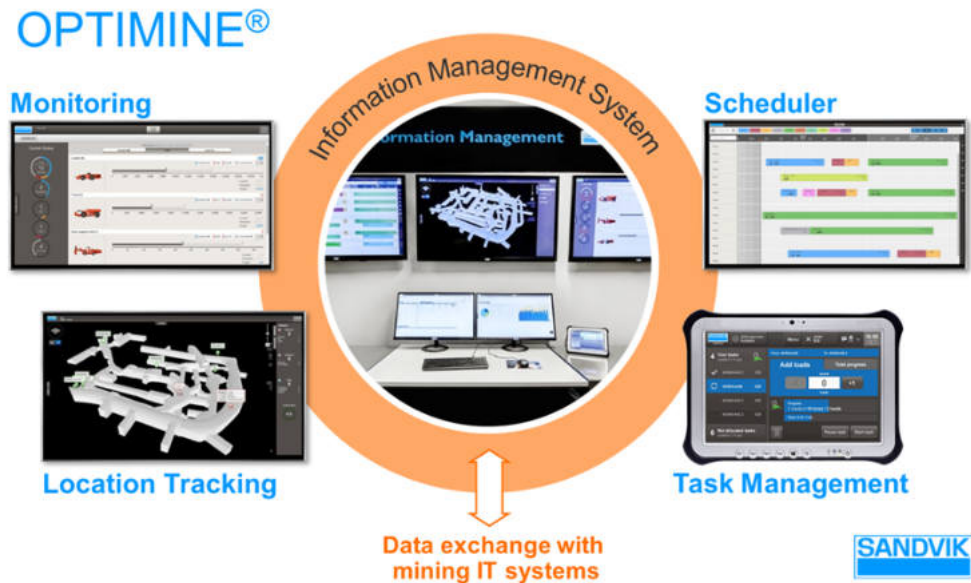
Jednym z trendów w cyfryzacji górnictwa jest jego elektryfikacja. W pracy [24] rozważano możliwości elektryfikacji ładowarek i wozów odstawczych. Zastosowanie takich technologii jest obecnie testowane w KGHM. Eliminacja silników Diesla dużej mocy w maszynach dołowych pozwoli znacząco zredukować obecność szkodliwych gazów (np NO_x [25]).

Następnym krokiem jest autonomizacja maszyn, czyli praca maszyn bez operatorów [26].

Cyfryzacja górnictwa, w tym koncepcja inteligentnej kopalni, realizowana między innymi poprzez rozwój i wdrażania technologii Internetu Rzeczy (ang. Internet of Things - IoT), zaawansowanej analityki dla dużych zbiorów danych (ang. BIG DATA), techniki zarządzania parkiem maszynowym w oparciu o pomiary i analitykę (ang. Predictive Maintenance) czy technologii robotycznych (robotyzacja procesów technologicznych, wykorzystanie robotów do zastosowań inspekcyjnych) staje się już nie tylko globalnym trendem, ale i w zasadzie standardem w nowoczesnym górnictwie. Jak już wspomniano, duże koncerny górnicze takie jak JSW, Bogdanka czy KGHM Polska Miedź SA, uruchomiły dedykowane programy badawcze w tym zakresie. Wiodące kompanie górnicze na świecie (Rio Tinto, Codelco, BHP i inni) inwestują w infrastrukturę IT na

powierzchni i pod ziemią oraz tworzą centra związane z zaawansowaną analityką danych procesowych. Niestety, w kopalni głębinowej panują wyjątkowo trudne warunki pracy, a procesy technologiczne mają złożony charakter [27]. Dane pozyskane za pomocą różnych systemów SCADA wymagają odpowiedniego przetwarzania wstępnego tj. walidacji, czyszczenia, ponownego próbkowania, segmentacji, filtrowania, detekcji, aproksymacji itp. [28–30]. Dopiero po walidacji dane poddawane są właściwym analizom.

Problematyka cyfryzacji górnictwa jest tematem zainteresowań nie tylko jednostek naukowych lub użytkowników końcowych (kopalń). Istnieje olbrzymi rynek, na którym firmy globalne oferują konkretne technologie. ABB, Honeywell, Sandvik, Siemens i wiele innych firm proponuje gotowe rozwiązania zapewniające monitorowanie i optymalizację procesów technologicznych w górnictwie. Przykładem takiego rozwiązania jest propozycja firmy Sandvik. Na Rysunku 2-1 przedstawiono model cyfrowego zarządzania kopalnią opracowany w firmie Sandvik.



Rysunek 2-1: Cyfrowe zarządzanie kopalnią - system Optimine firmy Sandvik (źródło: prezentacja firmy Sandvik)

System Optimine integruje informacje z systemów, które w wielu kopalniach występują jako samodzielne byty:

- monitoring parametrów pracy maszyn;
- śledzenie położenia maszyn w wyrobiskach podziemnych;
- planowanie i harmonogramowanie wydobywania;
- operacyjne zarządzanie zadaniami.

Efektywność procesu górniczego w nowoczesnym przedsiębiorstwie górniczym o wysokim stopniu mechanizacji procesów technologicznych zależy w dużej mierze od efektywnego wykorzystania parku maszynowego. Firma Sandvik w ramach Optimine proponuje taki system. Jego koncepcję pokazano na Rysunku 2-2.



Rysunek 2-2: Optimine - schemat poglądowy monitoringu maszyn (źródło: prezentacja firmy Sandvik)

Na Rysunku 2-3 przedstawiono modelowe raporty systemu, na których użytkownik może ocenić poszczególne parametry procesu, takie jak uzyskana produktywność, wykorzystanie maszyn, alerty o sytuacjach nietypowych, czy wreszcie zarejestrowane sygnały z maszyn.



Rysunek 2-3: Raporty: produktywność, wykorzystanie maszyn, alerty, wykresy dla wybranych surowych sygnałów (źródło: prezentacja firmy Sandvik)

Autor miał możliwość zapoznania się z implementacją systemu Optimine podczas wizyty referencyjnej w kopalni Chelopech (Bułgaria). Kopalnia zlokalizowana jest około 70 km na wschód od Sofii, prowadzi podziemne wydobywanie rudy miedzi i złota. Na Rysunku 2-4 przedstawiono zdjęcia z wizji lokalnej przy wiertnicy wyposażonej w system monitoringu Optimine. Komponenty systemu zostały oznaczane cyframi od 1 do 3:

1. system wspomaganie wiercenia otworów strzałowych;
2. ekran systemu "Task Manager", na którym operator widzi komunikaty od dyspozytora, jeśli ma opóźnienie w realizacji zadań, wyświetla się ikona żółwia, jeśli pracuje za szybko, wyświetla się ikona zająca;
3. transmiter sygnału Wi-Fi z wyrobiska do wnętrza, gdzie pracowała wiertnica.



Rysunek 2-4: Wizyta referencyjna: kopalnia Chelopech w Bułgarii (źródło: opracowanie własne)

Jeśli uwzględnimy kryterium poziomu wydobywania i umaszynowania (Rysunek 2-5), kopalnia Chelopech nie jest porównywalna z Oddziałami Górniczymi KGHM. Jednakże wdrożone metody zarządzania procesem produkcji są na najwyższym światowym poziomie.

Modern underground equipment

Mobile equipment:

- production – 21 units
- auxiliary – 42 units
- service – 54 units
- 4 Production drill rigs
- 4 Development drill rigs
- 6 Front-end loaders
- 7 Dump Trucks
- IBM Maximo implemented since January 1, 2012 with 7.5.0.3 version
- IBM Maximo is integrated with Maximo Mobile, Sun 6, Algosys, PI Historian, Hermes, Hecpoll, SMS
- IBM Maximo new version 7.6.0.7 in 2017

Rysunek 2-5: Informacja o infrastrukturze maszyn górniczych oraz infrastrukturze systemów IT wykorzystywanych w kopalni Chelopech w Bułgarii (źródło: prezentacja firmy Dundee Precious Metals)

Proces urabiania i transportu poziomego urobku do punktów wysypowych na przenośniki taśmowe w Oddziałach Górniczych KGHM od początku eksploatacji, realizowany jest przy zastosowaniu samojezdnych maszyn górniczych. Ze względu na liczbę maszyn i koszty zakupu, utrzymania, eksploatacji itd. udział kosztów wykorzystania maszyn SMG w produkcji górniczej jest znaczący. W latach od 1970 do 2000, kanony stosowane w konstrukcji maszyn bazowały w całości na rozwiązaniach mechanicznych - „analogowych”. Rozwiązania konstrukcyjne SMG bazowały na komponentach takich jak:

- silnik Diesla z wtryskiem sterowanym mechanicznie,
- brak systemów oczyszczania spalin,
- przekładnia hydrokinetyczna (tzw. zmiennik momentu obrotowego),
- skrzynia biegów sterowana mechanicznie (ewentualnie elektrozawory sterowane manualnie),
- hydraulika robocza sterowana klasycznymi rozdzielaczami,
- zestaw wskaźników analogowych do kontroli podstawowych parametrów układów maszyny; przykład analogowego kokpitu zaprezentowano na Rysunku 2-6.

Maszyny charakteryzowały się większym współczynnikiem przewymiarowania konstrukcji, czego konsekwencją była większa masa własna w stosunku do ładowności użytecznej. Ocena stanu technicznego była relatywnie prosta dla operatorów i służb dozoru mechanicznego w kopalni. Ograniczała się do wizualnych oględzin podzespołów maszyny pod kątem wycieków i uszkodzeń mechanicznych oraz luzów.

- wartości bieżących sygnałów przetwarzane przez sterownik, np. obroty silnika, temperatura i ciśnienie oleju;
- wartości sygnałów zadane przez operatora, np. czujnik TPS (pedał gazu), hamulec zasadniczy, wysterowanie elektrozaworów sterujących pracą układu roboczego;
- wartości zmiennych obliczanych przez sterownik, np. % max. momentu obrotowego silnika, chwilowa wartość zużycia paliwa;
- kody błędów z autodiagnostyki. Kodowane usterek jest ustandaryzowane - szczegóły określa norma SAE J1939. Każdy rodzaj błędu opisany jest specyficznym kodem SPN oraz statusem błędu FMI.

Opisane powyżej rozwiązania są stosowane, między innymi, w ładowarkach produkcji KGHM ZANAM – LKP1601B, LKP0903. W takich przypadkach zabudowa rejestratora sprowadza się do podłączenia urządzenia do magistrali CAN, montażu instalacji antenowej i ewentualnie zabudowy dodatkowych czujników (np. czujnik ciśnienia oleju hydraulicznego w układzie roboczym, opcjonalny monitoring parametrów opon). Koszt techniczny instalacji jest relatywnie niski.



Rysunek 2-7: Kokpit operatora maszyny "cyfrowej" - ładowarka kołowo-przegubowa LKP 1601B, produkcji KGHM ZANAM (źródło: instrukcja DTR)

Oprócz rozwoju elektroniki pomiarowej, warto również odnotować gwałtowny spadek kosztów przechowywania danych w związku z intensywnym rozwojem sieci transmisyjnych, światłowodowych i Wi-Fi pod ziemią w KGHM. Zarejestrowanie i przechowywanie danych przestało być problemem technicznym.

Kolejnym nurtem w cyfryzacji przemysłu jest niezwykle rozwój narzędzi do analiz dużych zbiorów danych – big data. Postępująca cyfryzacja maszyn górniczych i wdrażanie rozwiązań mechatronicznych w połączeniu z rozwojem systemów analitycznych dla informatyki przemysłowej

umożliwiają zastosowanie nowych metod analizowania efektywności procesów, monitorowania jakości procesu oraz diagnostyki stanu technicznego urządzeń.

2.1.2 Analiza potrzeb informacyjnych w kontekście procesów

Jako punkt wyjścia w celu określenia potrzeb informacyjnych przeprowadzono identyfikację procesów, dla których informacja z monitoringu parametrów pracy maszyn w Oddziałach Górniczych KGHM mogłaby mieć potencjalne zastosowanie.

Optymalizacja organizacji pracy maszyn

Potrzeba dotyczy oceny wykorzystania zasobu produkcyjnego, który materializuje się w postaci sprawnej maszyny z obsługą operatorską. Koszt krańcowy udostępnienia każdej kolejnej maszyny do produkcji wraz z obsługą operatora jest wysoki. Dane z monitoringu mogą posłużyć jako obiektywny materiał dla weryfikacji wskaźnika zaplanowanego obłożenia sprzętu pod kątem optymalnego wykorzystania dostępnego czasu pracy w oddziale wydobywczym oraz dostosowania zadania produkcyjnego do możliwej do uzyskania wydajności pracy maszyny. Za planowanie, organizację pracy maszyn w kopalniach odpowiadają służby dozoru górniczego.

W kopalniach ustala się wskaźnik ilościowy planowanego obłożenia maszyn dla każdego oddziału wydobywczego, dla każdej zmiany roboczej w tzw. "dni czarne" (od poniedziałku do piątku). W Tabeli 2.1 zaprezentowano przykład planu dla Rejonu SW w Oddziale ZG Polkowice Sieroszowice. Liczba przyporządkowanych maszyn jest przydzielana w sztukach, dla typów ustalanych w klasyfikacji stanowisk kosztów dla SMG. Na poziomie zarządzania operacyjnego, wskaźnik realizacji planowanego obłożenia maszyn dla oddziałów wydobywczych ma priorytetowe znaczenie przy podsumowaniu wyników produkcji dla każdej zmiany oraz doby w kopalni.

Z punktu widzenia oceny organizacji pracy SMG, po wywiadach z kluczowymi użytkownikami maszyn, potwierdzono zakres oczekiwanych informacji:

- **Dyspozycyjny czas pracy maszyny w oddziale**, liczony od momentu pojawienia się maszyny na oddziale wydobywczym do momentu zjazdu do komory mechanicznej lub miejsca wymiany maszyn między zmianami. Ze względu na postęp frontów eksploatacyjnych, długość dróg dojazdowych z komór mechanicznych wykazuje tendencję rosnącą. Wpływa to na skrócenie efektywnego czasu pracy maszyn na frontach eksploatacyjnych.
- **Rzeczywisty czas pracy**, bez przestoju spowodowanych problemami z organizacją pracy, np. brakiem zabudowanego stropu lub brakiem zasilania.
- **Liczba cykli roboczych** dla każdego typu maszyn w oddziale wydobywczym: suma, średni czas trwania cyklu, odchylenie standardowe dla wskaźnika średniego czasu trwania cyklu.

Wymienione wskaźniki obliczane są dla każdej maszynozmiany w oddziale i zapisywane w kosztach informacyjnych hurtowni danych. Agregacja oraz uśrednianie danych są realizowane za pomocą funkcji obliczeniowych w raportach WEBI.

Tabela 2.1: Planowane obłożenie maszyn dla Oddziału ZG Polkowice-Sierszowice

Planowany wskaźnik obłożenia maszyn podstawowych do produkcji:

Oddział ZG Polkowice Sierszowice: Reojn SW1

<u>Oddziały</u>	<u>LK2</u>	<u>LK3</u>	<u>WOS</u>	<u>SWW</u>	<u>SWK</u>	<u>SWKF</u>	<u>SWB</u>	<u>SG</u>	<u>Razem</u>
G-12		3	3	1	0	2	1	0	10
G-41	2	1	3	2		2	1	1	12
G-51	0	3	3	2	1	2	1	0	12
G-52	0	4	3	2		3	0	0	12
G-54		4	4	2		3	1	1	15
Plan Zm I	2	15	16	9	1	12	4	2	61
G-12		3	3	2	1	2	1	0	12
G-41	2	2	3	2		3	0	0	12
G-51	0	4	3	2	1	2	0	1	13
G-52	0	3	3	2		2	1	0	11
G-54		4	4	2		3	1	0	14
Plan Zm II	2	16	16	10	2	12	3	1	62
G-12		3	2	1	0	2	1	0	9
G-41	2	1	4	3		2	1	1	14
G-51	0	4	3	2	0	3	1	0	13
G-52	0	3	2	2		3	1	1	12
G-54		4	5	2		3	1	1	16
Plan Zm III	2	15	16	10	0	13	5	3	64
G-12		3	3	2	1	2	0	1	12
G-41	3	1	3	2		3	0	0	12
G-51	0	3	3	2	0	2	1	0	11
G-52	0	3	3	2		3	1	1	13
G-54		5	4	2		3	1	0	15
Plan Zm IV	3	15	16	10	1	13	3	2	63
Razem	12	76	80	49	5	63	18	10	313

(Opracowano na podstawie danych z systemu eRaport)

Ocena efektywności pracy maszyn/operatora

Poza organizacją pracy maszyn, kluczowe znaczenie dla efektywności wykorzystania sprzętu mają umiejętności praktyczne operatora, nominalne parametry techniczne używanego sprzętu, stan techniczny oraz warunki pracy. Dla maszyn, które są objęte monitoringiem, ustalono zakres wskaźników:

Wskaźniki charakteryzujące proces wiercenia otworów strzałowych, maszyny z grupy SWW:

- długość i liczba odwierconych otworów – suma, średnio na zmianę,
- średni czas wiercenia pojedynczego otworu na zmianę,
- średnica koronki wiertniczej,
- zużycie narzędzi wiertniczych,
- zużycie energii elektrycznej – suma, średnio na metr bieżący otworu.

Wskaźniki charakteryzujące proces zabudowy obudowy kotwowej (nie dotyczy kotew liniowych), maszyn z grupy SWK:

- liczba zabudowanych kotew,
- długość kotwy,
- typ kotwy: rozprężne lub wklejane,
- średni czas zabudowy jednej kotwy,
- zużycie energii elektrycznej - suma, średnio na 1 kotew.

Wskaźniki charakteryzujące prace ładowarek produkcyjnych (LK2, LK3, LK4):

- liczba załadowanych wozów, wskazana identyfikacja numeru ładowanego wozu,
- liczba kursów do punktu wysypu urobku na przenośnik taśmowy, długość drogi odstawy, wskazana identyfikacja lokalizacji punktu wysypu,
- liczba kursów dla operacji realokacji skały płonnej w wyrobiskach, długość drogi odstawy,
- zużycie paliwa.

Dla każdej z wymienionych operacji wskazany jest pomiar masy urobku lub skały płonnej.

Wskaźniki charakteryzujące prace wozów do odstawy urobku (WO, WOS, WOW)

- liczba załadowanych łyżek, wskazana identyfikacja numeru maszyny ładującej,
- liczba kursów do punktu wysypu urobku na przenośnik taśmowy, długość drogi odstawy, wskazana identyfikacja lokalizacji punktu wysypu.

Diagnostyka techniczna maszyn

Informacje z monitoringu maszyn powinny mieć zastosowanie do:

1. **optymalizacji procesu planowanej obsługi maszyn**, na podstawie informacji o rzeczywistym czasie pracy, dodatkowo ważonej danymi dotyczącymi wskaźników opisujących obciążenie układów roboczych maszyny - zakłada się możliwość udostępnienia danych do wykorzystania w systemie CMMS;
2. **monitorowania temperatur i ciśnień w układach maszyny** podczas pracy - istotnym uzupełnieniem dla tych danych będzie informacja z systemu lokalizacji, np. analiza temperatur piast podczas jazdy z urobkiem po upadowych;
3. **analizy przyczyn awarii maszyn** (szczegółowe dane o awariach, zakresie i kosztach związanych z przywróceniem sprawności maszyny są dostępne w systemie CMMS);
4. **oceny efektywności technicznej i ekonomicznej dla remontów** kompletnych maszyn oraz regeneracji wybranych podzespołów:
 - silnika spalinowego,
 - zmiennika momentu,
 - skrzyni biegów,
 - mostów napędowych,
 - wiertarek hydraulicznych,
 - wieżyczek dla maszyn wierząco-kotwiących,
 - ogumienia,
 - oceny efektywności regeneracji narzędzi wiertniczych.

Ocena jakości obsługi maszyn przez operatorów

Zasady obsługi maszyn są opisane w instrukcjach DTR. Dotyczy to zachowania ustalonych przedziałów wartości dla temperatury dla płynów eksploatacyjnych oraz ciśnienia w układach. W celu zachowania tych parametrów konieczne jest umiejętne dozowanie obciążenia dla maszyny podczas każdego cyklu roboczego, aby nie dopuszczać do długich cykli przekroczenia temperatury, które destrukcyjnie wpływają na żywotność uszczelnień w układach.

Opisując potrzeby w tym obszarze, przyjęto podział maszyny na odpowiednie układy:

- **silnik spalinowy**: stosowanie odpowiedniej procedury, związanej z dozowaniem obciążenia silnika:
 - w fazie rozruchu (silnik zimny/ciepły),
 - w trakcie pracy maszyny,
 - przed zatrzymaniem (dotyczy w szczególności zatrzymania w pełni rozgrzanego lub przegrzanego silnika – zabezpieczenie smarowania turbosprężarki),

- monitorowanie reakcji operatora w przypadku sygnalizacji wystąpienia błędów i/lub alarmów dotyczących przekroczenia nominalnych parametrów pracy silnika (np. temperatury cieczy w układzie chłodzenia),
- monitorowanie poziomu płynów eksploatacyjnych (chłodnica, miska olejowa, zbiornik ADBLUE),
- **układ przeniesienia napędu:**
 - ocena techniki jazdy, w szczególności właściwego doboru przełożeń w trakcie pracy (np. przy "fedrunku" ładowarką) i na drogach dojazdowych,
 - identyfikacja sytuacji przeciążania układu, np. przełączanie kierunku jazdy pod obciążeniem - wskaźnik sumarycznej liczby wystąpień nieprawidłowych przełączeń,
 - monitorowanie poziomu oleju – sygnalizacja niskiego poziomu,
 - monitorowanie temperatury piast (obrazuje obciążenie hamulców) – wskaźnik przekroczenia temperatury,
- **układ hamulcowy** - ze względu na ciężar maszyn (np. ładowarek i wozów odstawczych od 30 do 80 Mg z ładunkiem), oraz znaczne wartości upadków na trasach przejazdu, układ hamulcowy jest poddawany wysokim obciążeniom. Potwierdzono potrzebę monitorowania użycia tego układu:
 - monitorowanie użycia układów wspomagających działanie hamulca zasadniczego (tzw. hamulec górski) – czas i miejsce użycia,
 - identyfikacja nieprawidłowych praktyk polegających na hamowaniu bez odjęcia „pedału gazu”,
- **hydraulika układu roboczego:**
 - monitorowanie poziomu oleju hydraulicznego,
 - weryfikacja, czy po uruchomieniu na początku zmiany roboczej operator odczekał odpowiedni czas na wstępne rozgrzanie oleju hydraulicznego,
 - monitorowanie przekroczeń temperatury oleju hydraulicznego w układzie roboczych,
- **operowanie łyżką** - w instrukcji DTR ładowarek określono optymalny z punktu widzenia obciążenia węzłów maszyny sposób nabierania urobku, m.in.:
 - odpowiednie przełożenie skrzyni biegów,
 - sposób operowania łyżką – zalecana jest identyfikacja stanu nadmiernego docisku łyżki do spągu, występującego w dłuższych przedziałach czasu, typowego dla praktyk urabiania mechanicznego,
- **wiercenie** (dotyczy operacji wiercenia otworów strzałowych oraz otworów pod zabudowę kotew):

- sprawdzenie wystąpienia fazy zawierania otworu,
- identyfikacja zakleszczenia narzędzia,
- identyfikacja wyboczenia narzędzia,
- identyfikacja parametrów dla poszczególnych otworów: długość, średnica, zgodność z metryką strzałową (funkcjonalność oferowana przez zaawansowane systemy np. prod. Beaver Control),
- identyfikacja problemów ze spadkiem ciśnienia wody wykorzystywanej do przepłuczki (jeśli jest wykorzystywana) – pomiar czasu, kiedy ciśnienie przepłuczki spadło poniżej minimalnego poziomu,
- weryfikacja właściwego podparcia maszyny na podporach hydraulicznych,
- **zabudowa obudowy kotwowej**
 - zliczanie kotew,
 - monitorowanie momentu dokręcania kotew,
 - monitorowanie zachowania odpowiedniego czasu oczekiwania na związanie kleju (dla kotew wklejanych),
 - weryfikacja właściwego podparcia maszyny na podporach hydraulicznych,
- **zasilanie napędu elektrycznego hydrauliki roboczej z sieci AC 500/100V**
 - identyfikacja problemów ze spadkiem napięcia zasilania 500V dla napędu elektrycznego hydrauliki roboczej – pomiar czasu, kiedy napięcie zasilania spadło poniżej ustalonego minimalnego poziomu,
 - identyfikacja nieprawidłowych praktyk polegających na manewrowaniu maszyną w przodkach bez wyłączenia zasilania AC 500/1000V,
- **monitorowanie parametrów pracy baterii zasilających napęd elektryczny maszyn**
 - poziom napięcia,
 - natężenie prądu przy ładowaniu i rozładowaniu,
 - wskaźnik procentowy poziomu naładowania baterii,
 - temperatura baterii,
- **monitorowanie parametrów pracy napędu elektrycznego maszyn**
 - obroty silnika,
 - natężenie prądu przy pracy oraz rekuperacji energii,
 - zużycie energii elektrycznej
 - rekuperacja (odzysk) energii przy hamowaniu.
- **monitoring pracy opon**

Koszty dotyczące zużycia opon, w szczególności dla maszyn do załadunku i odstawy urobku

(rozmiar 26-29 cali), mają istotny udział w kosztach eksploatacji GC. Nośność opon dla większości typów maszyn jest na limicie określonym przez producenta. Dlatego niezmiernie istotne jest utrzymywanie zalecanego ciśnienia.

Oprócz uszkodzeń mechanicznych, zidentyfikowano zakres parametrów do monitorowania:

- monitorowanie poprawnego ciśnienia opon,
- monitorowanie temperatury opon,
- monitorowanie przebiegu opon - [zmiana], [h], [km]; wskaźniki obliczane dla każdej zmiany roboczej w referencji do numeru maszyny oraz miejsca montażu (PP - prawy przód, itd. LP, PT, LP),
- identyfikacja wystąpienia uślizgu kół.

Wskazana jest identyfikacja miejsca zabudowy opony: PP, LP, PT, LT oraz indywidualne kodowanie opon, które mogą być w trakcie eksploatacji zamieniane miejscami na tej samej maszynie, montowane na innych maszynach, a także wysyłane do naprawy (czujniki ciśnienia mają indywidualne kody identyfikacji, które są wykorzystywane przy programowaniu zmiennych).

2.1.3 Analiza efektywności

Analiza efektywności pracy maszyn, jak i efektywności procesów technologicznych czy wręcz całości procesu produkcyjnego, jest przedmiotem rozważań wielu badaczy. Jest oczywiste, że w przypadku projektu górniczego, ze względu na długi czas życia projektu oraz skalę przedsięwzięcia finansowego zagadnienie efektywności jest kluczowe.

Sayadi i inni zaproponowali wyznaczenie kosztu eksploatacji z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi analitycznych, takich jak wielokrotna regresja i analiza składowych głównych [31]. Paraszczak i inni [32] zaproponowali do wyliczania całkowitej efektywności maszyny takie składowe jak dostępność, wykorzystanie i wydajność produkcji. W pracy [33] rozważał on również kierunki działań mające na celu maksymalizację wydajności maszyn w kopalni podziemnej. Gustafson wyróżnia dwie grupy czynników wpływających na efektywność pracy maszyn dołowych: czynniki techniczne i eksploatacyjne [34].

Tematyka analiz efektywności pracy maszyn w kopalniach KGHM, była przedmiotem wielu badań naukowych oraz wdrożeń. W pracy Dyczko i innych [35] zaproponowano system decyzyjny do poprawy efektywności pracy maszyn i redukcji kosztów produkcji. Idea tego pomysłu jest ściśle związana z wdrożeniem systemu informacyjnego EKSPERT SMG w KGHM (rok 2003), który pełni funkcję źródła danych. W zakresie prac nad optymalizacją i rozszerzeniem funkcjonalności

systemu EKSPERT KGHM współpracował w formule prac badawczo–rozwojowych z zespołem IGSMiE PAN w Krakowie. Efekty opisano w wielu publikacjach naukowych, między innymi [36]. W wielu publikacjach i pracach B+R poruszana jest kwestia optymalizacji procesu transportu poziomego urobku. W zakresie projektu „Adaptacja i implementacja metodologii Lean w warunkach KGHM Polska Miedź SA”, opracowano prototypowy model symulacyjny odstawy urobku z robót przygotowawczych na przykładzie kopalni ZG Lubin [37]. W zakresie operacji odstawy oponowej wykorzystano dane z hurtowni danych EKSPERT SMG.

Od roku 2014, w Oddziałach Górniczych KGHM do oceny efektywności ekonomicznej SMG jest wykorzystywana metoda oparta na modelu TCO, który został zaadoptowany do warunków i procesów w firmie. Pierwotnie, metoda Total Cost of Ownership została opracowana w latach 70-tych XX wieku, a następnie w 1997 roku udoskonalona przez firmę doradcą Gartner Group (USA) jako model szacowania wszystkich kosztów, jakie mogą wystąpić w cyklu życia systemu informatycznego, poczynając od pozyskania systemu, jego użytkowania i utrzymania, aż po jego likwidację. Do dnia dzisiejszego metoda ta doczekała się licznych modyfikacji dla różnorodnych obszarów prowadzonych działalności. Jedną z nich jest metoda TCO, odnosząca się do obiektów technicznych takich jak: maszyny, urządzenia oraz elementy infrastruktury technicznej, w której na całkowity koszt posiadania składają się koszty: zakupu, instalacji w miejscu użytkowania, uruchomienia, eksploatacji, utrzymania oraz likwidacji. Zbilansowany całkowity koszt posiadania, jako wartość bezwzględna, odnoszony jest do jednostki obiektu technicznego lub jako wartość względna, do usługi powstałej z wykorzystaniem obiektu technicznego. Metoda TCO, zastosowana w obszarze maszyn górniczych, powinna służyć jako jedno z narzędzi do oceny efektywności użytkowania maszyn górniczych w Oddziałach Górniczych KGHM Polska Miedź SA oraz powinna być wykorzystywana w postępowaniach przetargowych mających na celu wybór dostawców maszyn górniczych dla Oddziałów Górniczych KGHM Polska Miedź SA. Model całkowitego kosztu posiadania w obszarze maszyn górniczych został dostosowany do specyfiki i otoczenia, w jakim są użytkowane maszyny górnicze w Oddziałach Górniczych oraz do standardu ewidencji i rozliczania kosztów maszyn górniczych, stosowanego w KGHM Polska Miedź SA Model TCO jest wykorzystywany w procesach decyzyjnych przy:

1. Wyborze typów i dostawców maszyn dołowych w procedurach przetargowych.
2. Doborze efektywnych rodzajów i typów maszyn górniczych.
3. Monitorowaniu efektywności użytkowanych rodzajów i typów maszyn górniczych [38].
4. Analizowaniu trendów zmian w stosowanych strategiach eksploatacyjnych i utrzymania w sprawności technicznej maszyn górniczych.
5. Identyfikowaniu i optymalizowaniu obszarów związanych z użytkowaniem maszyn górniczych, wymagających poprawy ich efektywności.

1. Rodzaj i źródło danych wejściowych

W Tabeli 2.2 przedstawiono składniki i elementy wykorzystywane w modelu TCO dla obszaru maszyn górniczych w KGHM:

a) Dane prognozowane - wykorzystywane w analizach TCO służących do oceny nowych maszyn górniczych według modelu A.

- dane deklarywane przez oferenta, w złożonej ofercie na dostawę maszyn
- dane określone na podstawie odpowiednich wskaźników historycznych (np. wydajność, koszty jednostkowe itp.)

- dane planistyczne (np. planowane kalendarze produkcji, planowana ilość produkcji itp.)

b) Dane historyczne - wykorzystywane w analizach TCO służących do oceny obecnie prowadzonej gospodarki maszyn górniczych według modelu B i C.

- dane kosztowe pochodzące z systemu SAP ERP
- dane wydajnościowe pochodzące z systemu SAP ERP
- dane kosztowe pochodzące z systemu CMMS
- dane eksploatacyjne pochodzące z systemu CMMS
- wskaźniki eksploatacyjne obliczone w hurtowni danych SAP BW
- wskaźniki niezawodnościowe obliczone w hurtowni danych SAP BW

c) Parametry pomocnicze

- średni ważony koszt kapitału (WACC) – wskaźnik finansowy informujący o minimalnej wymaganej stopie zwrotu, przy której opłaca się firmie realizować projekty, na podstawie którego istnieje możliwość określenia stopy dyskontowej umożliwiającej przeliczenie przyszłej wartości na jej wartość bieżącą. Wykorzystywany w analizach TCO służących do oceny nowych maszyn górniczych według modelu A.

Tabela 2.2: Składniki i elementy modelu TCO w obszarze maszyn górniczych

Kategoria	Składniki modelu		Jm.	Model TCO		
	Grupa	Rodzaj		A	B	C
Koszty	Koszty zakupu	Cena zakupu ¹	[PLN]	X		
		Cena dodatkowych opcji ¹	[PLN]	X		
	Koszty eksploatacji	Koszty pracy operatorów z Działu GC ²	[PLN]	X	X	X
		Koszty paliwa	[PLN]	X	X	X
		Koszty olejów eksploatacyjnych	[PLN]	X	X	X
		Koszty ogumienia, w tym:	[PLN]	X	X	X
		koszty opon	[PLN]	X		
		Koszty energii elektrycznej ³	[PLN]	X		
		Koszty pozostałych materiałów	[PLN]			X
	Koszty utrzymania ruchu	Koszty amortyzacji bilansowej	[PLN]		X	X
		Koszty pracy własnych służb serwisowych	[PLN]	X	X	X
		Koszty części zamiennych i mat. reg.	[PLN]	X	X	X
		Koszty usług serwisowych ⁴ , w tym:	[PLN]	X	X	X
		koszty przeglądów okresowych	[PLN]	X		
		Koszty usług remontowych obcych	[PLN]	X	X	X
		Koszty usług remontowych własnych	[PLN]		X	X
		Koszty usług konserwacyjnych	[PLN]			X
	Koszty pośrednie	Koszty świadczeń wydz. pomoc.	[PLN]		X	X
		Koszty zakupu materiałów	[PLN]			X
		Koszty innych usług obcych	[PLN]			X
Rozliczone koszty wspólne		[PLN]			X	
Rozliczone koszty magazynów części		[PLN]			X	
Rozliczone koszty magazynów paliw		[PLN]			X	
		Koszty inne niewymienione	[PLN]			X
Produktywność	Parametry produktywności zgodnie z podstawowym charakterem pracy	Ilość urobku (dla maszyn ładująco-odstawczych)	[Mg]	X	X	X
		Długość otworów (dla maszyn wierząco-kotwiących)	[mb]	X	X	X
		Efektywny czas pracy	[Ma.zm]	X	X	X
		Osobokilometr (tylko dla pojazdów transportowych)	[os.km]	X		
Eksploatacja	Wskaźniki eksploatacyjne	Wskaźnik dyspozycyjności maszyn	[%]	X	X	X
		Wskaźnik wykorzystania maszyn (tylko w dniach roboczych zwykłych)	[%]		X	X
Niezawodność	Wskaźniki niezawodnościowe	Wskaźnik MTBF ²	[Ma.zm]		X	X
Inne elementy	Średni ważony koszt kapitału	Wskaźnik WACC	[%]	X		
	Zużycie oleju napędowego	Jednostkowe zużycie oleju napędowego	[litr/Ma.zm] [litr/km] ⁵	X	X	X
	Kalendarz produkcji	Ilość dni roboczych zwykłych i świąt.	[dni]	X	X	X
	Plan produkcji	Ilość urobku w.w.	[Mg]	X	X	X
	Koszty braku dostępności maszyn	Koszty wynikające z równoważenia wskaźnika dyspozycyjności	[PLN]	X	X	X

(Opracowano na podstawie materiałów KGHM)

Definicje i źródła danych składników modelu TCO w obszarze maszyn górniczych:

- a) Koszty zakupu maszyn
- b) Koszty użytkowania maszyn
- Koszty eksploatacji w PLN

- Koszty pracy operatorów maszyn z Działu GC
- Koszty paliwa
- Koszty olejów eksploatacyjnych
- Koszty ogumienia
- Koszty pozostałych materiałów
- Koszty utrzymania ruchu w PLN
 - Koszt amortyzacji bilansowej
 - Koszty pracy własnych służb serwisowych
 - Koszt części zamiennych i materiałów regenerowanych
 - Koszt usług serwisowych
 - Koszt usług remontowych obcych
 - Koszt usług remontowych własnych
 - Koszt usług konserwacyjnych
 - Koszt świadczeń wydziałów pomocniczych

c) Produktywność maszyn

Produktywność ładowarek produkcyjnych oraz wozów odstawczych

Podstawową jednostką produktywności ładowarek produkcyjnych oraz wozów odstawczych jest [Mg] urobku, a produktywność określana jest jako suma ilości odstawionych na punkty wysypowe i załadowanych na wozy odstawcze [Mg] urobku. Formuła wyliczenia:

Produktywność = ilości Mg w odstawie + ilości Mg w załadunku + ekwiwalent ilości Mg, gdzie:

- ilości Mg w odstawie = ilość kursów * pojemność organu roboczego * ciężar właściwy urobku (1,8)
- ilości Mg w załadunku = ilość łyżek * pojemność organu roboczego * ciężar właściwy urobku (1,8)

Produktywność wozów wierzących

Podstawową jednostką produktywności wozów wierzących jest [mb] długość wykonanego otworu, a produktywność określana jest jako suma długości odwierconych otworów.

Formuła wyliczenia:

Produktywność = długość odwierconych otworów + ekwiwalent ilości mb gdzie:

długość odwierconych otworów = ilość otworów * średnia długość otworów

Produktywność wozów kotwiących

Podstawową jednostką produktywności wozów kotwiących jest [mb] długość wykonanego otworu, a produktywność określana jest jako suma długości odwierconych otworów. Formuła wyliczenia:

Produktywność = ilość mb otworów przy kotwieniu + ilość mb otworów przy wierceniu + ekwiwalent ilości mb gdzie:

ilość mb otworów przy kotwieniu = ilość zabudowanych kotew * średnia długość kotew (z tabeli mapowania kodów robót przy kotwieniu i długości kotew)

ilość mb otworów przy wierceniu = ilość otworów * średnia długość otworów

Produktywność pojazdów transportowych [os.km]

Podstawową jednostką produktywności pojazdów transportowych jest [os.km], czyli osobokilometr, a produktywność określana jest jako iloczyn ilości przejechanych kilometrów i nominalnej ilości przewożonych osób.

Formuła wyliczenia:

Produktywność = ilość kilometrów * nominalna ilość przewożonych osób gdzie:

Ilość kilometrów jest odczytywana z liczników kilometrów i rejestrowana w dokumentach EMM systemu CMMS

Nominalna ilość przewożonych osób określana jest z wartości cechy lokalizacji funkcjonalnych (LF) pojazdów transportowych klasy SWTM, SWTS, SWTD „Ilość przewożonych osób”

Produktywność pozostałych maszyn

Podstawową jednostką produktywności pozostałych maszyn jest [Ma.zm], a produktywność określana jest jako suma ilości maszynozmian efektywnej pracy wyrażonej w „godzinach”.

Formuła wyliczenia:

Produktywność = ilość maszynozmian efektywnej pracy gdzie:

Ilość maszynozmian efektywnej pracy to ilość Ma.zm w jednostce wykonania pracy przez maszynę.

d) Wskaźniki eksploatacyjne

- Wykorzystanie (Praca) w dniach zwykłych w [%]

Parametr liczony jako iloraz ilości maszynozmian [Ma.zm] przebywania w stanach [PRD] do sumarycznej ilości maszynozmian [Ma.zm] przebywania w stanach [PRD], [DSP], [NPP], [NAP], [AWR] w dniach zwykłych (kwalifikowanych w module HR-TM systemu SAP ERP jako „1”) dla maszyn podlegających zmianowej rejestracji w dokumentach ewidencji maszyn (EMM) systemu CMMS komór maszynowych, tj. będących w module PM systemu SAP ERP w statusie użytkownika [SPRA], [OBCA], [TEST].

- Dyspozycyjność (Praca+Gotowość) w [%]

Parametr liczony jako iloraz ilości maszynozmian [Ma.zm] przebywania w stanach [PRD] i [DSP] do sumarycznej ilości maszynozmian [Ma.zm] przebywania w stanach [PRD], [DSP], [NPP], [NAP], [AWR] we wszystkich zmianach produkcyjnych dla maszyn podlegających zmianowej rejestracji w dokumentach ewidencji maszyn (EMM) systemu CMMS komór maszynowych, tj. będących w module PM systemu SAP ERP w statusie użytkownika [SPRA], [OBCA], [TEST].

e) Wskaźniki niezawodnościowe (parametr informacyjny pomocniczy)

- MTBF (średni czas pomiędzy awariami) w [Ma.zm]

Miernik liczony jako iloraz sumy czasów przebywania w stanach zdatności (MTTF) oraz w stanach niezdatności (MTTR) i ilości tzw. bloków przebywania maszyn w tych stanach, traktowanej jako liczba zdarzeń. Miernik ten określany jest przy pomocy prowadzonej ewidencji maszyn (EMM) systemu CMMS komór eksploatacji maszyn dołowych, tj. będących w module PM systemu SAP ERP w statusie użytkownika [SPRA], [OBCA].

Wskaźnik MTTF (z ang. Mean Time To Failure) oznacza średni czas do uszkodzenia (awarii) maszyny. Wskaźnik MTTR (z ang. Mean Time To Repair) oznacza średni czas naprawy maszyny.

f) Inne parametry

- Średni ważony koszt kapitału (WACC) w [%]

Wskaźnik finansowy wskazujący minimalną wymaganą stopę zwrotu, przy której opłaca się firmie realizować projekty. Przy pomocy tego wskaźnika określana jest stopa dyskontowa, na podstawie której możliwe jest przeliczenie przyszłej wartości na jej wartość bieżącą.

Źródło danych: aktualna decyzja Komitetu Ryzyka Rynkowego

- Jednostkowa ilość pobranego paliwa [litr/Ma.zm] lub [litr/km]

Średnia ilość oleju napędowego pobranego do maszyn górniczych dokumentami RW, zarejestrowana na odpowiednich zleceniach eksploatacyjnych (CO) maszyn górniczych w odniesieniu do ilości przepracowanych maszynozmian [litr/Ma.zm] lub do ilości przejechanych kilometrów przez pojazdy transportowe [litr/km].

Źródło danych: hurtownia danych SAP BW

- Kalendarz produkcji

Ilość dni roboczych zaplanowanych w kalendarzu produkcji, w Rocznym planie produkcji lub Wieloletnim planie produkcji Oddziału Górniczego.

Źródło danych: plany produkcji Oddziałów Górniczych

- Plan produkcji

Ilość produkcji własnej urobku w.w. w dniach roboczych, zaplanowanej w Rocznym planie produkcji lub Wieloletnim planie produkcji Oddziału Górniczego.

Źródło danych: plany produkcji Oddziałów Górniczych

- Koszty braku dostępności maszyn w [PLN]

Koszt określany dla zrównoważenia różnic w osiągniętych wartościach wskaźnika dyspozycyjności porównywanych ze sobą typów i/lub rodzajów maszyn górniczych. Koszt ten powinien być określany na poziomie sumy składników kosztowych pojawiających się w kalkulacji.

Formuła wyliczenia:

Koszt braku dostępności = suma kosztów * wsk. korygujący

Gdzie:

$$\text{Wskaźnik korygujący} = \frac{(D_1 - D_2)}{D_2} \cdot 100\%,$$

D_1 – wartość wskaźnika dyspozycyjności maszyny 1

D_2 – wartość wskaźnika dyspozycyjności maszyny 2

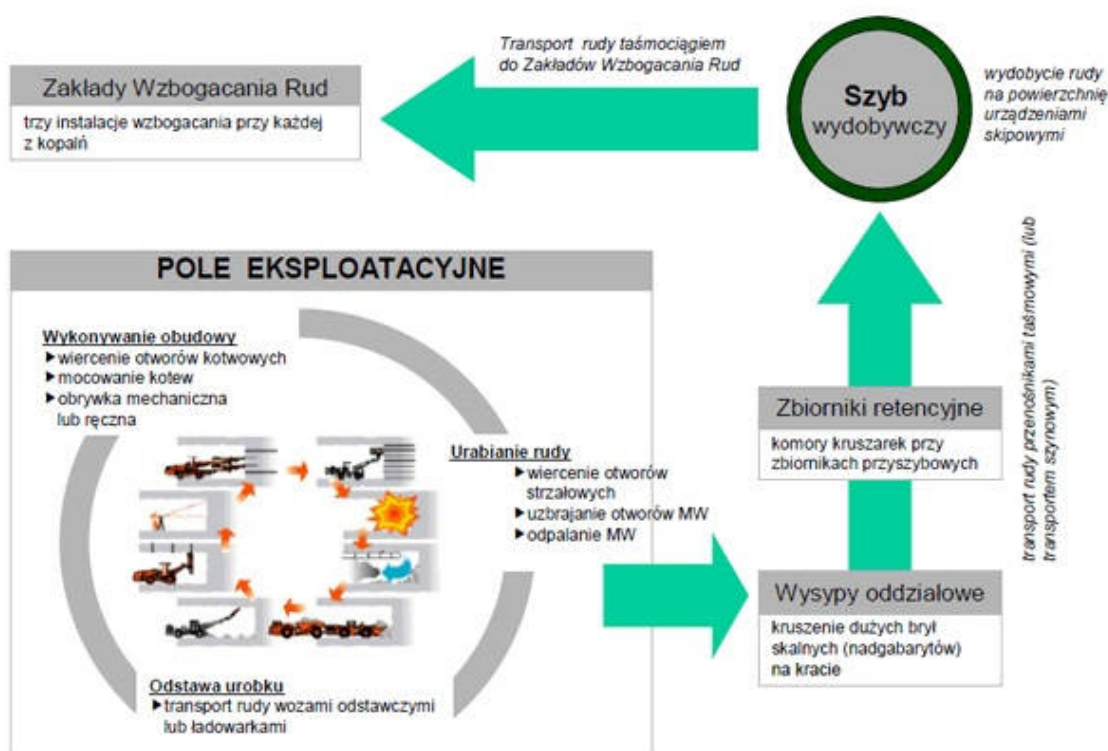
Model analityki TCO w KGHM został odwzorowany w postaci zestawu raportów analitycznych w hurtowni danych EKSSERT SMG. Akwizycja obliczeń w raportach inicjowana jest cyklicznie, po rozliczeniu księgowym wyników kolejnego miesiąca. Dane wsadowe dla procesów ETL w hurtowni danych pochodzą z ewidencji SAP, z wielu modułów funkcjonalnych. W zakresie wskaźników związanych z kosztami jest to rozwiązanie optymalne. Jakość danych wsadowych wykorzystywanych do obliczenia wskaźników wydajności oraz dyspozycyjności budzi często wątpliwości. Wynika to z faktu, że źródłem danych o ilości wykonanej pracy oraz czasie pracy maszyny są raporty sztygarskie. Możliwości weryfikacji precyzji oszacowania podawanych wskaźników są w praktyce ograniczone.

Celem pracy jest zastąpienie danych pochodzących z oszacowania inżynierskiego danymi z monitoringu pracy maszyn SYNAPSA, bez elementu uznaniowości człowieka. Na kartach kolejnych rozdziałów opisano doświadczenia praktyczne w tym zakresie.

2.1.4 Monitorowanie procesów technologicznych wykorzystujących SMG

W procesie wydobywania urobku (Rysunek 2-8) wykorzystuje się samojezdne maszyny górnicze. Dotyczy to w szczególności wymienionych operacji technologicznych:

- wiercenia otworów strzałowych: SWW, SWWD;
- uzbrajania otworów ładunkami wybuchowymi: SWS, SWSA;
- wykonywania obudowy kotwowej: SWK, SWKA, SWKF;
- dokonywania obrywki w przodkach i w wyrobiskach SWB;
- odstawy oponowej (maszyny LK2, LK3, LK4, WO, WOS, WOW) urobku do wyspów oddziałowych na przenośniki taśmowe.

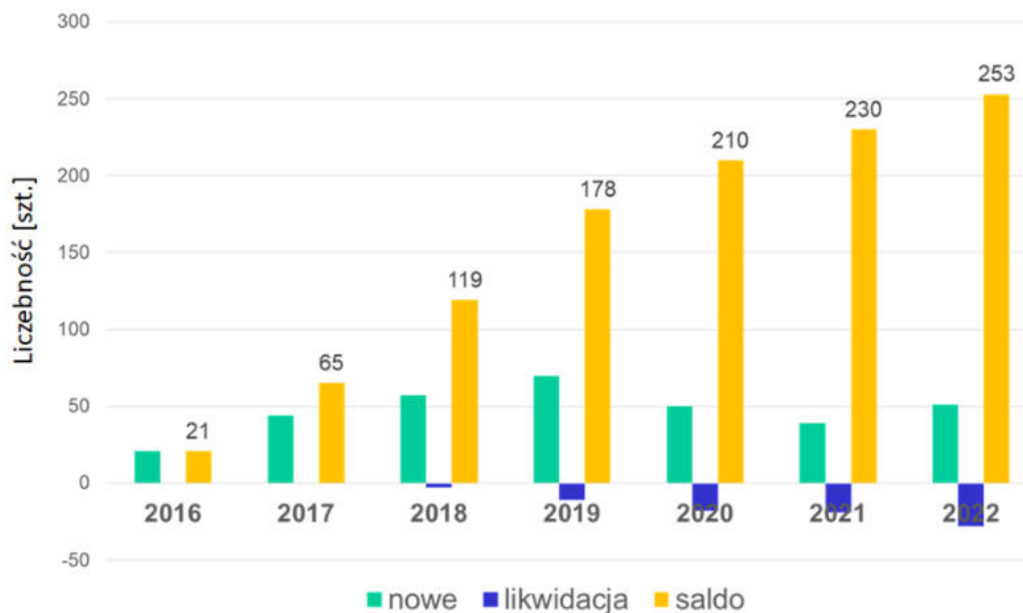


Rysunek 2-8: Procesy technologiczne związane z wydobywaniem rudy (źródło: <https://kgmh.com/pl/biznes/procesy/wydobycie-rud>)

KGHM Polska Miedź jest prekursorem w zakresie stosowania techniki monitoringu parametrów pracy samojezdnych maszyn górniczych w wyrobiskach podziemnych. W zakresie projektu SYNAPSA, realizowanego od 03.06.2013 do 30.06.2016, zweryfikowano założenia i możliwości implementacji docelowego rozwiązania w zakresie monitoringu i lokalizacji maszyn. Użytkowano zdolność rejestracji i transmisji danych technologicznych dla populacji maszyn w trzech

Oddziałach Górniczych. Osiągnięto zdolność tworzenia i udostępniania raportów dla ustalonych grup użytkowników. Po zakończeniu fazy pilotażowego wdrożenia systemu SYNAPSA, powołano Zespół Koordynacyjny ds. monitoringu SMG, odpowiedzialny za utrzymanie i rozwój funkcjonalności po starcie produkcyjnym. Systemy monitoringu SMG oferowane obecnie na rynku (np. Optimine Sandvik), pojawiły się kilka lat po starcie projektu SYNAPSA.

Na Rysunku 2-9 przedstawiono dynamikę wzrostu populacji maszyn z monitoringiem w kolejnych latach funkcjonowania systemu SYNAPSA.



Rysunek 2-9: Populacja maszyn z monitoringiem SYNAPSA w Oddziałach Górniczych KGHM (opracowanie własne)

Zarówno użytkownicy maszyn w Oddziałach Górniczych, jak i producenci potwierdzają wartość informacji pozyskiwanych z monitoringu. Mimo stosunkowo zmiennej sytuacji ekonomicznej, populacja maszyn z monitoringiem utrzymuje się na poziomie ponad 200 sztuk (stan na koniec I kwartału roku 2023), a producenci wykazują inicjatywę w zakresie doskonalenia instalacji i rozbudowy zestawu rejestrowanych parametrów.

Na Rysunku 2-10 przedstawiono schemat funkcjonalny systemu SYNAPSA. W zakresie projektu SYNAPSA powołano zespół wdrożeniowy, w interdyscyplinarnym składzie reprezentowanym przez:

- mechaników, odpowiedzialnych za udostępnienie maszyn;
- górników, odpowiedzialnych za organizację pracy maszyn;
- pracowników departamentów automatyki i łączności, odpowiedzialnych za uruchomienie transmisji danych z SMG;

- informatyków - specjalistów od przemysłowych baz danych oraz hurtowni danych.

Zespół opracował dokument "Standard rejestratora do monitoringu samojezdnych maszyn górniczych (SMG) w KGHM Polska Miedź SA". Standard jest niezbędny dla KGHM ze względu na dywersyfikację dostawców maszyn. Wymagania standardu są załącznikiem do dokumentacji SIWZ w procedurze wyboru dostawców maszyn. Wymagania techniczne określone w standardzie są cyklicznie weryfikowane i aktualizowane. Jest to uzasadnione przez czynnik postępu technicznego w budowie maszyn (cyfryzacja, elektromobilność) oraz wysoką dynamiką rozwoju potrzeb informacyjnych w KGHM. Standard definiuje proces akwizycji i transferu danych z maszyn do centralnego repozytorium danych (baza Wonderware Historian). W zakresie monitoringu maszyn (SYNAPSA) można wyróżnić następujące podstawowe procesy:

- Akwizycja sygnałów – proces realizowany przez rejestrator zabudowany na maszynie. Bieżące odczyty sygnałów są zapisywane w buforze pamięci, jako odpowiednie wartości zmiennych próbkowanych z określoną częstotliwością. Zawartość bufora jest cyklicznie transmitowana przy wykorzystaniu sieci WLAN do serwerów na powierzchni; minimum raz na dobę.
- Transmisja danych - przy wykorzystaniu biznesowej sieci WLAN, wydzielonej z sieci technicznej Oddziałów Górniczych.
- Konsolidacja danych w centralnym repozytorium - przemysłowa baza danych Wonderware Historian.
- Transformacje danych na poziomie hurtowni danych – tzw. procesy ETL. Zasilenie kostek informacyjnych hurtowni danych EKSPERT informacjami (obliczonymi wskaźnikami), których źródłem są dane z monitoringu oraz lokalizacji maszyn.
- Raportowanie informacji – przygotowanie informacji odpowiadającej potrzebom zidentyfikowanych grup użytkowników.

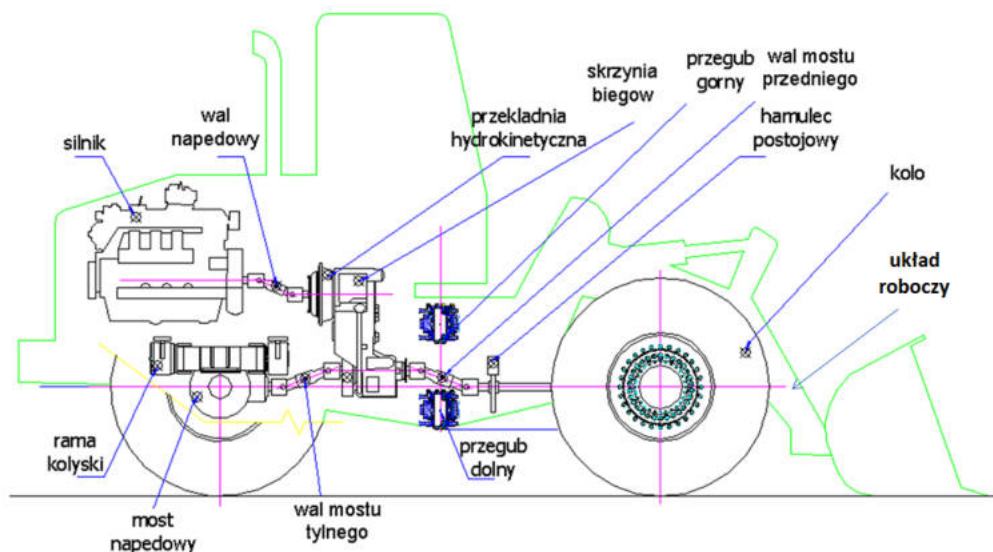


Rysunek 2-10: SYNAPSA - Transformacja danych w informację
(źródło: dokumentacja wdrożeniowa projektu SYNAPSA)

Jak już wspomniano, dynamiczny rozwój systemów pomiarowych i transmisji danych umożliwił rozwój metod do analizy procesów. Za prekursora process miningu uważa się Van der Aalsta [39]. W pracy [21, 23] przedstawiono przegląd rozwiązań w zakresie aplikacji w górnictwie. Brzychczy zaproponowała [22] metody przetwarzania danych z systemów informatycznych przedsiębiorstwa (dane dostarczane są w postaci tzw. dzienników zdarzeń) w celu wykrywania anomalii w przebiegu procesu. Koncepcja "process mining" daje bardzo szerokie możliwości. W pracy [40] Al-Chalabi zaproponował metodę predykcji czasu życia wiertnicy górniczej z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej. Chatterjee [41] zaproponował procedurę szacowania niezawodności maszyny SMG przy użyciu sztucznej sieci neuronowej, opartej na algorytmie genetycznym. Cheng [42] zastosował techniki data miningu do oceny systemu wentylacji w kopalni. Mkhwanazi [43] zajmował się optymalizacją wykorzystania maszyn SMG w procesie odstawy, a Segopolo [44] optymalizacją wozów do transportu węgla pod ziemią. Fourie [45] przestawił studium przypadku, w którym zaprezentował szereg inicjatyw mających na celu poprawę wydajności sprzętu, co przełożyło się na kompleksowy plan naprawczy dla kopalni, a to pozwoliło osiągnąć planowaną wydajność.

2.1.5 Diagnostyka maszyn

Diagnostyka maszyn obecnie przeżywa rozkwit, a jej zastosowania są bardzo szerokie. Ze względu na złożoną budowę samojezdnej maszyny górniczej (Rysunek 2-11), w niniejszej rozprawie przedstawione zostaną tylko wybrane metody diagnostyczne opracowane dla samojezdnych maszyn górniczych.



Rysunek 2-11: Uproszczony schemat ładowarki z wyróżnionymi głównymi układami (opracowanie własne)

Warto odnotować, że w przypadku samojezdnych maszyn górniczych stosowanych w kopalni podziemnej jak dotąd nie stosuje się powszechnie używanej w innych maszynach diagnostyki drganiowej (wykrywanie nieprawidłowej pracy wałów uszkodzenia w takich elementach, jak przekładnie zębate czy łożyska toczne). Diagnostyka maszyn w tym przypadku ogranicza się do wykrywania nieprawidłowości na podstawie kodów błędów silnika lub zmiennych dostępnych w ramach zainstalowanych systemów monitorowania (patrz rozdział 2.1.6, Inwentaryzacje wybranych zasobów w przedsiębiorstwie). Autor prowadził badania dotyczące wykrywania różnych form nieprawidłowej pracy i uszkodzeń elementów czy układów maszyny.

Diagnostyka na podstawie pomiaru ciśnienia oleju w silniku

Procedury utrzymania floty samojezdnych maszyn górniczych (SMG) eksploatowanych w kopalniach podziemnych są niezwykle istotne. Aby osiągnąć wymagany poziom wydajności, nowoczesna obsługa techniczna jest wspierana przez pokładowe systemy monitoringu i zaawansowaną analitykę. System monitoringu próbkuje dane co 1 s lub rzadziej w zależności od typu zmiennej, a mierzone wartości są zapisywane w pamięci lokalnej. Na Rysunkach od 2.7 do 2.11 przedstawiono szczegółową konfigurację procesu akwizycji danych dla poszczególnych układów. Po zmianie, gdy maszyna wraca do tzw. komory maszynowej, dane są automatycznie przesyłane przez Wi-Fi do serwera na powierzchni (do centrum przechowywania i przetwarzania danych). Specyficzna analiza jest wykonywana automatycznie, a niektóre raporty są dostępne za pośrednictwem strony internetowej. Niestety, zmienne te są bardzo specyficzne i wykazują zróżnicowaną charakterystykę, co wymaga zastosowania różnych algorytmów do ich analizy. Do tej pory proste porównanie z wartością progową jest stosowane np. w przypadku danych o temperaturze, próbkowanych z niską częstotliwością. W tej części rozprawy omówiono problematykę związaną z pomiarem ciśnienia oleju silnikowego. Podstawą wszelkich analiz jest potrzeba wykrycia punktu zmiany reżimu (nazywanego też anomalią), automatycznej interpretacji danych oraz przekazania prostych informacji odpowiednim pracownikom. Ciśnienie oleju silnikowego bardzo różni się np. od danych dotyczących temperatury. Jest to zmienna o stosunkowo wysokiej zmienności. Waha się od zera do ok. 700 kPa. Ustalono, że rozkład procesu jest bardziej informacyjny niż proste wartości poszczególnych próbek. Na podstawie samego surowego sygnału trudno wyciągać wnioski. Analiza stanu wiedzy została przeprowadzona w kontekście proponowanego rozwiązania. Maszyny SMG są powszechnie stosowane w przemyśle wydobywczym i mają krytyczne znaczenie dla procesu produkcyjnego. Istnieje wiele artykułów dotyczących różnych aspektów SMG. Większość z nich koncentruje się na analizie niezawodności [41, 46–50], przewidywaniu i ocenie awarii maszyn [51], miarach wydajności/efektywności pracy maszyn [43, 52–55], analizie wykorzystania, optymalizacji, analizie produkcji [43, 56, 57], ocenie ryzyka [58], szacowania czasu życia [59] itp. Zaledwie kilka prac dotyczyło monitorowania stanu [60–64], aspektów technicznych i operacyjnych związanych z maszynami SMG [26, 34, 65, 66], pomiaru wyjściowego momentu obrotowego, identyfikacji reżimów pracy [67–72] itp. Maszyny SMG są wyposażone w pokładowe systemy monitorowania, które służą zarówno do celów kontrolnych, jak i konserwacyjnych. Otrzymanie rzeczywistych danych z maszyny otwiera wiele możliwości ich analizy.

Ze statystycznego punktu widzenia, rozpatrywany problem związany jest z segmentacją danych, która jest silnie powiązana z detekcją punktu zmiany reżimu (w języku angielskim funkcjonuje też określenie "structural break point detection"). W ostatnich latach w literaturze pojawiło

się wiele prac poświęconych metodom segmentacji do różnych zastosowań. Do interesujących zastosowań można zaliczyć: monitorowanie stanu [73, 74] (gdzie zaproponowano metodę wykrywania punktów zmiany reżimu opartą na technice regresji adaptacyjnej w celu rozpoznania zmiany reżimu pracy w drganiach kruszarki rudy miedzi oraz metodę lokalnych maksimów w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej do wykrywania zmiany reżimu w drganiach łożysk), sygnały biomedyczne (np. elektrokardiogram) [75–79] (gdzie wykorzystano ukryte modele Markowa, średnią ruchomą i filtr Savitzky'ego-Golaya, analizę cepstralną, transformatę falkową, segmentację opartą na obwiedniach itp.), analizę mowy [80–82] (gdzie omówiono nieliniową analizę mowy opartą na wieloskalowym formalizmie mikrokanonicznym, adaptację algorytmu Appela i Brandta, innowacyjny (Shur) filtr adaptacyjny), ekonometrię [83, 84] (gdzie zastosowano model przełączania reżimów) i sygnały sejsmiczne [85–89] (gdzie m.in. do segmentacji sygnału sejsmicznego w celu wyodrębnienia zdarzeń sejsmicznych zostały użyte: skumulowana suma funkcji gęstości prawdopodobieństwa Gaussa, modele Markowa z przełączaniem reżimów, jak również empiryczny drugi moment danego surowego sygnału). Wiele metod segmentacji opiera się na prostych statystykach w dziedzinie czasu (skumulowanych danych podniesionych do kwadratu lub drugiego momentu empirycznego) [90–93]. Jednak można również znaleźć metody oparte na reprezentacji danych w różnych dziedzinach, takie jak czas-częstotliwość [74, 94]. Skuteczne metody segmentacji stosowane w naukach fizycznych, (m.in. metody oparte na tzw. statystyce rekurencyjnej) zaproponowano także w pracach [95–99]. Zaproponowana w artykule metoda opiera się na stosunkowo prostych statystykach, jednak stosuje się je do charakterystyki danych opisujących rozkład w zmianie roboczej.

Problem omawiany w rozprawie można także potraktować jako diagnozę procesu (wykrywanie błędów w procesie). Przez dziesięciolecia opracowano różne podejścia do wykrywania i diagnozowania usterek w danych procesowych. Można je podzielić na trzy główne kategorie: podejścia oparte na danych (data-driven), podejścia oparte na głębokiej wiedzy (deep knowledge) i podejścia oparte na modelach analitycznych (model-based) [100]. Metody oparte na modelu analitycznym i głębokiej wiedzy w dużym stopniu polegają na fundamentalnej wiedzy o procesie [100]. Niestety, w rzeczywistych danych bardzo trudno jest przedstawić model procesu, ponieważ zmienność ciśnienia jest zależna od zachowania operatora, środowiska, wykonywanego zadania itp. Uwzględnienie warunków otoczenia, złożoności procesu technologicznego, wpływu operatora itd. powoduje, że dane należy rozpatrywać jako silnie niegaussowskie, nieliniowe i niestacjonarne. Metody "data-driven" odnoszą się w szczególności do metod, które opierają się wyłącznie na danych operacyjnych bez użycia wiedzy o procesie. Podejścia oparte na danych uczą się na podstawie historii i nie nakładają żadnych wymagań na modele ani na wiedzę ekspercką [100].

Monitorowanie procesów oparte na danych lub statystyczne monitorowanie procesów stosuje wielowymiarowe statystyki i metody uczenia maszynowego do wykrywania i diagnozowania usterek w procesach przemysłowych [101]. Do diagnozy procesu zastosowano różne warianty PCA, takie jak rekurencyjna PCA (RPCA), dynamiczna PCA (DPCA) i jądrowa PCA (KPCA). Główną ideą jest to, że struktura PCA zmieni się, gdy w danych pojawi się odbiegająca od normy sytuacja. Również dla podejść opartych na danych zastosowano metody oparte na ukrytym modelu Markowa, dynamicznej sieci neuronowej, analizie składowych itd. Szczegółowo ten problem został przedstawiony w [100]. W kontekście analizy w czasie rzeczywistym można rozważyć dwa podejścia: decyzje „próbka po próbce” lub decyzje „segment po segmencie”. W pierwszym przypadku możemy porównać amplitudę przychodzącej próbki z progami lub sprawdzić, czy próbka należy do tego samego rozkładu co poprzednie próbki. Można również szukać predefiniowanych zdarzeń (wartość zerowa, linia płaska, min/max, wykrywanie wartości odstających itp.) [102]. Zastosowanie tego podejścia w naszym przypadku jest bardzo trudne. W drugiej z wymienionych technik można wykorzystać bardziej wiarygodne podejścia statystyczne; zamiast próbek można porównywać statystyki lub rozkłady. To podejście uznano za wiarygodniejsze w rozważanym problemie. W metodzie testowane jest, czy średnia wartość oszacowana z co najmniej dwóch nowych próbek różni się od historycznej.

Należy również wspomnieć, że istnieje klasa rozwiązań opartych na eksploracji danych, które można tu zastosować, na przykład grupowanie szeregów czasowych [103], wykrywanie anomalii w szeregach czasowych [104–106] oraz eksploracja procesów [107].

Ciekawe podejście można znaleźć w [108], gdzie wykorzystano historyczne dane SCADA dla normalnych warunków z turbin wiatrowych do uczenia wielowarstwowego modelu sieci w celu wyodrębnienia relacji między zmiennymi SCADA. Sieć była trenowana dla zdrowego przypadku, zatem model nie będzie w stanie zrekonstruować rzeczywistych danych, jeśli dane wejściowe będą nieprawidłowe. W ten sposób sygnał rezydualny będzie osiągał wartości znacznie wyższe, a anomalia będzie łatwa do zauważenia.

Diagnostyka na podstawie analizy pomiaru temperatury

Ocena stanu technicznego na podstawie pomiaru temperatury jest powszechnie stosowana w diagnostyce maszyn [109–111]. Systemy monitorowania bardzo często wyposażone są w tory pomiarowe ze względu na dużą dostępność czujników do pomiaru temperatury i relatywnie niskie częstotliwości próbkowania (nie ma potrzeby rejestrować temperatury silnika 25 tysięcy razy na sekundę, tak jak to się robi w przypadku pomiaru drgań). W górnictwie pomiar temperatury jest wykorzystywany do monitorowania kluczowych elementów napędów maszyn i urządzeń takich jak przenośniki taśmowe [112, 113], maszyny wyciągowe [114] i kombajny górnicze [115]. Temperaturę rejestruje się na węzłach łożyskowych, także w silnikach elektrycznych [116]. Temperaturę rejestruje się również w celach monitorowania sytuacji pożarowych [117]. Pomiar temperatury jest także wykorzystywany - poprzez zastosowanie metod termowizyjnych - do inspekcji trasy przenośnika taśmowego. W samojezdnych maszynach górniczych analizowanych w rozprawie, pomiar temperatury jest realizowany na potrzeby kilku układów. Rejestruje się temperatury oleju silnika [62], oleju w przekładni [61], płynu chłodzącego [64], powietrza na dolocie silnika, oleju hydraulicznego (zmiennie ENGOILT, GROILT, ENGCOOLT, INTEKET, HYDOILT), dodatkowo monitoruje się temperaturę opon i temperaturę w kabinie operatora. Przegrzewanie się układów w maszynach jest podstawowym problemem eksploatacyjnym, dlatego pomiar temperatury w maszynach górniczych jest tak istotny. Dodatkowo należy podkreślić skrajnie trudne warunki pracy maszyn SMG. W warunkach eksploatacji w wyrobiskach podziemnych maszyny pracują na granicy dopuszczalnych parametrów temperatury powietrza. Ze względu na zawodnienie wyrobisk, dużą wilgotność powietrza i zapylenie problem stanowi utrzymanie należytej czystości chłodnic (cieczy, oleju, powietrza doładowującego - tzw. intercoolera). Maszyny są dostosowane do niskich wyrobisk, toteż chłodnice są umieszczone nisko, co ekspozuje je na zanieczyszczenie błotem. Często problemy z przegrzewaniem się podzespołów SMG są spowodowane niskimi poziomami mediów eksploatacyjnych w układach maszyny, mianowicie:

- oleju silnikowego,
- oleju w skrzyni biegów,
- płynu chłodniczego.

Problem dotyczy szczególnie układu hydraulicznego maszyn, gdzie ryzyko wystąpienia przecieków jest najwyższe (przecieki siłowników, uszkodzenia przewodów hydraulicznych).

Kolejnym wyzwaniem w eksploatacji maszyn SMG jest przegrzewanie hamulców. Masa obciążonych maszyn dochodzi do 63 Mg (LK4). Wiele wyrobisk jest prowadzonych po upadach, zatem przy pracy w odstawie urobku układ hamulcowy jest mocno obciążony. Standardowym rozwiązaniem jest stosowanie układów „mokrych”, gdzie okładziny hamulcowe są zanurzone w oleju.

Ważne jest monitorowanie prędkości jazdy maszyn oraz weryfikacja, czy operatorzy aktywują funkcję hamowania silnikiem. W czasie wizji lokalnych sztygarzy wskazali na nieprawidłowe praktyki operatorów, które polegają na hamowaniu bez ujmowania pedału gazu. Operatorzy tłumaczą to potrzebą utrzymania obrotów silnika dla zapewnienia wydajnej pracy pomp hydraulicznych. W przypadku maszyn starszych generacji, wyposażonych w pompy zębate, teza ta ma częściowe uzasadnienie – układ hydrauliczny skrętu z tzw. orbitrolem szybciej odpowiada na ruch kierownicy. Dla maszyn nowych generacji, wyposażonych w pompy hydrauliczne tłoczkowe o zmiennym wydatku z regulatorem, ciśnienie jest utrzymywane w szerokim zakresie prędkości obrotowych silnika. W zestawie zmiennych monitoringu dostępne są dane o pozycji pedału gazu - ENGTPS oraz pedału hamulca - TRNBPS.

Kolejne zagadnienie to przegrzewanie opon, dotyczące głównie opon o rozmiarze 29 cali, montowanych w ładowarkach LK4 oraz wozach WOW. Nośność opon dla większości typów maszyn jest zbliżona do limitu określonego producenta. Dlatego niezmiernie istotne jest utrzymywanie zalecanych przez producenta wartości ciśnienia. Maszyny nie posiadają amortyzowanego zawieszenia.

Podczas jazdy z obciążeniem karkas opony pracuje, uwalnia się energia cieplna. Przy odstawie urobku na długich dystansach (powyżej 1000 metrów), emisja ciepła może doprowadzić do rozwulkanizowania opony.



Rysunek 2-12: Przykład uszkodzenia opony na skutek przegrzania - rozwarstwienie (opracowanie własne)

Proces rozwarstwienia przekładek w początkowych stadiach nie jest widoczny przy oględzinach koła, co utrudnia diagnozowanie problemu. W historii eksploatacji maszyn odnotowano przypadki eksplozji, część z nich niestety miała tragiczne konsekwencje dla pracowników.

Jako dodatkowa opcja wyposażenia maszyn z oponami 29-calowymi oferowany jest zdalny monitoring parametrów eksploatacyjnych ogumienia: ciśnienia oraz temperatur. Na Rysunku 2-13 przedstawiono dwa rodzaje czujników stosowane w maszynach KGHM ZANAM. Czujniki firmy Continental nie spełniły oczekiwań (problemy z przyklejaniem czujników wewnątrz opony). Zostały zastąpione przez system firmy VALOR (czujniki mocowane wewnątrz obręczy za pomocą magnesów). Dane o parametrach pracy ogumienia są przesyłane do pulpitu operatora i do rejestratora.



Rysunek 2-13: Czujniki do monitoringu ciśnienia i temperatury opon z transmisją bezprzewodową. (źródło - dokumentacja techniczna KGHM ZANAM)

Systemy diagnostyki pokładowej maszyn

Nowoczesne maszyny górnicze zaprojektowane według „filozofii cyfrowej” posiadają rozbudowane układy auto diagnostyki (system OBD- On Board Diagnostics). System OBD zapisuje błędy w formie kodów, których zbiór jest nazywany DTC (ang. Diagnostic Trouble Codes - Diagnostyczne Kody Usterek). Rejestr kodów można odczytać z pomocą specjalnego czytnika podłączonego pod gniazdko diagnostyczne OBD. Zgodnie z wymaganiami Standardu monitoringu SMG w KGHM, rejestratory są podłączane do gniazda OBDII. Zapisują usterki sygnalizowane przez sterowniki silnika i skrzyni biegów. Sterownik silnika (ang. ECU – Engine Control Unit) w czasie rzeczywistym analizuje prace elementów sterowania nie tylko pod względem występowania

uszkodzenia, ale również ze względu na sprawdzanie, czy zapewniają one utrzymanie emisji szkodliwych składników spalin poniżej dopuszczalnych wartości. Sterownik skrzyni biegów umożliwia jazdę w trybie automatycznym lub w trybie manualnym, steruje też załączaniem blokady mechanicznej konwertera lock-up, jeśli jest zamontowana w maszynie. W trybie manualnym są aktywne zabezpieczenia przed przeciążaniem skrzyni biegów, między innymi przed nieprawidłowym przełączeniem kierunku jazdy bez zatrzymania maszyny.

Sterowniki cyfrowe silnika i skrzyni biegów kontrolują parametry pracy układów, między innymi temperatury oraz ciśnienia. Przesyłają odpowiednie odczyty na szynie OBDII do pulpitu operatora i do rejestratora monitoringu. W przypadku wystąpienia przekroczeń generują alerty w postaci odpowiednich kodów błędów SPN, wskazujących konkretne układy oraz kodów FMI opisujących objawy usterki. Liczba kodów FMI jest ograniczona w praktyce do 16. Liczba kodów SPN może osiągnąć setki kombinacji, szczególnie dla najnowocześniejszych silników spełniających normę emisji spalin STAGE IV. Dane o błędach mają zastosowanie do operacyjnej diagnostyki stanu technicznego maszyn. Jednak ich interpretacja wymaga doświadczenia, wypracowania umiejętności ustalania rangi błędu, oddzielania błędów o niskim statusie – tzw. żółtych alarmów, od błędów o krytycznym znaczeniu. Zazwyczaj zajmują się tym doświadczeni pracownicy serwisów zewnętrznych posiadający dedykowane urządzenia diagnostyczne dla konkretnych procesów silnika.

Diagnostyka połączeń mechanicznych silnik-zmiennik momentu w układzie przeniesienia napędu na podstawie pomiaru prędkości obrotowej o zwiększonym próbkowaniu

Na etapie wdrażania systemu monitoringu, jedno z kluczowych pytań dotyczyło częstotliwości próbkowania w układzie pomiarowym. Jest oczywiste, że ze względu na dynamikę zjawisk w różnych układach, zapotrzebowanie na częstotliwość pobierania próbek jest bardzo różne. Zmiany momentu obrotowego oraz ciśnień w układach roboczych należą do zmiennych o dużej dynamice. Wspomniane wcześniej temperatury należą raczej do grupy danych wolnozmiennych. W przypadku rozważanym w tym rozdziale okazało się, że zmienność procesów zachodzących w połączeniu mechanicznym silnika i zmiennika momentu jest tak duża i szybka, że żaden z rejestrowanych parametrów nie "reagował" na występujące krytyczne uszkodzenie. W celu szczegółowej diagnozy problemu inżynierowie KGHM ZANAM udostępnili surowe próbki sygnału ENGRPM (obroty silnika). Dane z wyjścia kalkulatora wtrysku (moduł ECU) były próbkowane z częstotliwością 50Hz. Pozwoliło to zidentyfikować specyficzne zachowania zmiennej ENGRPM. Prędkość obrotowa jest wykorzystywana w diagnostyce od wielu lat, zazwyczaj w charakterze pomocniczym (np. w diagnostyce drganiowej na podstawie pomiaru prędkości obrotowej ustalano rzeczywiste wartości częstotliwości uszkodzeń, przy zmiennych warunkach obciążenia segmentowano dane tak, aby porównywać wartości cech diagnostycznych dla tych samych warunków pracy itd.). W ostatnich latach grupa badaczy z INSA Lyon we Francji zaproponowała wykorzystanie pomiaru chwilowej prędkości obrotowej do detekcji mikrozaburzeń w przebiegu sygnału, związanych z lokalnymi uszkodzeniami w łożyskach tocznych [118–120]. W układzie przeniesienia napędu maszyny SMG, do wykrywania niestabilnych zachowań skutkujących zerwaniem połączenia silnika ze zmiennikiem (uszkodzenie mechaniczne) wykorzystano sygnał prędkości obrotowej o próbkowaniu na poziomie $dt=10ms$.

2.1.6 Inwentaryzacje wybranych zasobów w przedsiębiorstwie

Problematyka badań prezentowanych w pracy dotyczy wykorzystania danych z systemu monitoringu parametrów pracy maszyn – SYNAPSA, udostępnionego produkcyjnie od lipca 2016 roku. Niemniej jednak, w celu uzyskania szerokiego kontekstu dla prowadzonych analiz, warto wykorzystać potencjał danych z innych systemów użytkowanych w KGHM, gdzie ewidencja/rejestracja danych jest prowadzona w referencji do maszyny. Dotyczy to w szczególności wymienionych poniżej systemów:

- mySAP - system klasy ERP, uruchomiony w roku 2000 (podstawowe moduły), zakończenie wdrożenia w roku 2003 (moduł HR);
- D7i – system klasy CMMS (INFOR), uruchomiony jako wsparcie dla modułu PM systemu mySAP, dla obszaru samojezdných maszyn dołowych. Uruchomiono w 2012 roku;
- eRaport - zestaw formularzy elektronicznych dla służb dozoru w Oddziałach Górniczych. Uruchomiono w roku 2014;
- monitoring SYNAPSA. Uruchomiono produkcyjnie w roku 2016;
- system lokalizacji PORTAS. Uruchomiono produkcyjnie w roku 2014 (w zakresie projektu SYNAPSA). Użytkowany lokalnie w rejonie szybu SG O/ZG Pol-Sier;
- system wspierania operatora w zakresie antykolizji. Uruchomiono produkcyjnie w roku 2021;
- APO-BDG – Aplikacja Planowo-Odbiorowa Baza Danych Geologicznych.

mySAP - system klasy ERP

Podstawowym źródłem danych w KGHM jest system mySAP, który jest podzielony na moduły funkcjonalne, dedykowane do kompleksowej obsługi procesów gospodarczych w spółce. Z punktu widzenia zakresu pracy, istotne dane są dostępne w wymienionych poniżej modułach:

- SAP MM (Materials Management) – Gospodarka Materiałowa;
- SAP PM (Plant Maintenance) – moduł SAP dla remontów i utrzymania ruchu;
- SAP FI-AA (Asset Accounting) – Majątek Trwały: ewidencja środków trwałych, SMG są przypisane do grupy 511*, wg klasyfikacji GUS;
- SAP HR-TM – moduł kadrowo- płacowy. Rejestracja pracy operatorów SMG, prowadzona w referencji do numeru maszyny;
- SAP CO-OM (Overhead Cost Management) – moduł kontrolingu.

Ewidencja zużycia materiałów pobieranych z magazynów kopalni (tzw. dokumenty RW) z dekretacją na maszynę (nr zlecenia) lub grupę maszyn w komorze (nr MPK – miejsca powstawania

kosztów). Podstawowym atrybutem w obrocie magazynowym jest unikatowy indeks materiału. W Tabeli 2.3 przedstawiono przykładowe pozycje indeksów dla silników Diesla napędzających SMG. W kodzie indeksu materiałowego zawarte są następujące informacje:

- grupa materiałowa: M07090100;
- nr kolejny pozycji materiału w zakresie grupy: 0013;
- wyróżnik pochodzenia materiału: A nowy, R regenerowany, N złom.

Dla każdej pozycji dokumentu RW podawana jest ilość oraz wartość materiału oraz obiekt dekretacji kosztów. Najczęściej jest to jedno z dwóch stałych zleceń przypisanych dla każdej maszyny.

Tabela 2.3: Ewidencja zużycia materiałów dot. SMG w module MM mySAP

lp	Material	Opis materiału
1	M07090100-0013-N	SILNIK T-SWT500404 300 Tdi LAND ROVER
2	M07090100-0014-A	SILNIK WYSOKOPRĘŻ CUMMINS 4BTAA3.9C-125
3	M07090100-0014-N	SILNIK WYSOKOPRĘŻ CUMMINS 4BTAA3.9C-125
4	M07090100-0014-R	SILNIK WYSOKOPRĘŻ CUMMINS 4BTAA3.9C-125
5	M07090100-0027-N	SILNIK QSB6.7-C190 CUMMINS
6	M07090100-0028-N	SILNIK WYSOKOPR T-SWT106945 LAND ROVER
7	M07090100-0029-N	SILNIK WYSOKOPR TCD3.6L4
8	M07090100-0034-A	SILNIK QSB4.5-C130 CUMMINS
9	M07090100-0034-N	SILNIK QSB4.5-C130 CUMMINS
10	M07090100-0037-A	SILNIK OM460LA SPALINOWY
11	M07090100-0037-N	SILNIK OM460LA SPALINOWY

(opracowanie własne)

W aspekcie kosztowym, każda pozycja dokumentów RW ma przypisany rodzaj kosztów, grupę kont 411* oraz wartość w PLN, patrz Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Ewidencja zużycia materiałów dot. SMG w module MM mySAP

Lp.	Grupa asortymentu dla zużycia materiałów		Dekretacja dokumentów księgowych
1	<u>Materiały eksploatacyjne</u>		
1.1	4112900000	Inne paliwa i oleje	Zlecenie maszyny, koszty eksploatacji, moduł CO
1.2	4113000000	Ogumienie	Zlecenie maszyny, koszty eksploatacji, moduł CO
1.3	4113700000	Olej napędowy	Zlecenie maszyny, koszty eksploatacji, moduł CO
2	<u>Materiały utrzymania ruchu</u>		
2.1	4113500000	Części zamienne i materiały remontowe	Zlecenie maszyny, koszty utrzymania , moduł PM
2.2	4113600000	Materiały po regeneracji	Zlecenie maszyny, koszty utrzymania , moduł PM
2.3	4114600000	Pozostałe materiały	Zlecenie maszyny, koszty utrzymania , moduł PM
3	<u>Materiały zużywane w procesie produkcji</u>		
3.1	4111400000	Materiały strzelnicze.	MPK oddziałów strzelniczych, dotyczy pracy maszyn z grupy SWS
3.2	4111500000	Mat. Obudowy górniczej	MPK oddziałów wydobywczych, dotyczy pracy maszyn z grupy SWK
3.3	4113200000	Materiały wiertnicze	MPK oddziałów maszyn dołowych (GC), dotyczy pracy maszyn z grupy SWW

(opracowanie własne)

W module PM SAP prowadzona jest ewidencja usług w zakresie serwisowania maszyn przez serwisy obce w ujęciu syntetycznym. Szczegółowa ewidencja jest procedowana w systemie zewnętrznym klasy CMMS (INFOR D7i). Potencjał wykorzystania danych z modułu PM pozwala na:

- odwzorowanie wymiaru organizacyjnego dla przypisania maszyny (tzw. lokalizacji funkcjonalnej w nomenklaturze modułu PM); wymiary: kopalnia, rejon, oddział, komora mechaniczna,
- ewidencję podstawowych danych dot. parametrów technicznych, tzw. „klasyfikację cech dla lokalizacji funkcjonalnej”,
- odwzorowanie kluczy identyfikujących maszynę w innych modułach systemu mySAP.

Podstawowe atrybuty w konfiguracji maszyny przedstawiono w Tabeli 2.5.

Tabela 2.5: Atrybuty SMG w module PM mySAP

lp.	Atrybut PM	Przykładowa wartość	Komentarz
1	Oznaczenie	LADOWARKA LKP-0903	Oznaczanie maszyny
2	Zakład planowania	ZKR1	Identyfikator kopalni, ZKR1: O/ZG Rudna, ZKL1: O/ZG Lubin, ZKP1 O/ZG Polkowice - Sierszowice
3	Zlecenie stałe PM	135600002146	Numer zlecenia w module PM agregującego koszty utrzymania SMG
4	Zlecenie stałe CO	131200001988	Numer zlecenia w module CO agregującego koszty eksploatacji SMG
5	Lokalizacja funkcjonalna	LK3 -475/R	Odpowiednik numeru kopalnianego maszyny. Podstawowy klucz identyfikujący maszynę . Wykorzystywany do łączenia danych z różnych obszarów: mySAP, Monitoring SYNAPSA, system lokalizacji PORTAS, eRaport, system wspierania operatora w zakresie antykolizji.
6	Lokalizacja	C-24	Lokalizacja komory macierzystej dla SMG
7	Status użytkownika	SPRA	Status użytkownika: SPRA – sprawiana maszyna na stanie kopalni DEPW – depozyt wewnętrzny INST – maszyna w instalacji NOBC - maszyny wynajmowane niedostępna OBCA – maszyny wynajmowane dostępne TEST – maszyna w testach (prototypy) REMT – maszyna oddana do remontu LIKW – maszyna zlikwidowana,
8	Status systemu	UTW	Kod oznacza maszyny prawidłowo skonfigurowane w bazie PM
9	Skt. akt. trw.	51100006268	Numer środka trwałego wg ewidencji SAP
10	Rok produkcji	2020	
11	Miesiąc produkcji.	06	
12	Dziata od	2020-07-10	
13	MPK	135306215	Kod MPK , ostatnie 4 znaki oznaczają grupę maszyn, wg tzw. układu stanowiskowego kosztów w KGHM
14	Zmienione dnia	2021-03-11	Data ostatniej zmiany konfiguracji SMG.
15	Producent skt. akt. trw.	KGHM ZANAM	Producent maszyny

(opracowanie własne)

W module kontrolingu CO-OM mySAP prowadzona jest ewidencja i rozliczanie kosztów gospodarki SMG w Oddziałach Górniczych. W układzie kont księgi głównej, Wydział Maszyn Dołowych jest wyodrębniony ewidencyjnie i rozliczeniowo, jako produkcja pomocnicza. Podstawowymi obiektami dekretacji kosztów w module kontrolingu są miejsca powstawania kosztów – MPK. W każdym Oddziale KGHM tworzona jest rozbudowana sieć MPK przypisanych do specjalnej struktury, tzw. hierarchii standardowej. Logika budowania hierarchii standardowej uwzględnia dwa wymiary: strukturę organizacyjną oraz standaryzowane procesy dla Oddziałów głównego ciągu technologicznego KGHM Polska Miedź SA (GCT). Wymiar procesowy opisany jest w Modelu Ewidencji Kosztów wg układu stanowiskowego. W zakresie struktur MPK dla obszaru samojezdnych maszyn dołowych, logika kodowania uwzględnia:

- wymiar organizacyjny: kopalnia (2 znaki od lewej strony) rejon (następne 3);

- procesy realizowane przy zastosowaniu SMG (ostanie 4 znaki), zasady kodowania przedstawiono w Rysunku 2.6. Lista grup maszyn w tabeli jest ograniczona do maszyn podstawowych wg klasyfikacji KGHM.

Przykładowo, kod MPK 135016215:

- 13 - wymiar organizacyjny: kopalnia: "Zakłady Górnicze RUDNA",
- 502 - wymiar organizacyjny: rejon: "Oddział C2",
- 6215 - wymiar procesowy - stanowisko kosztów : „ładowarki łyżk. o poj. łyżk. od 4 do 7m³ - ŁK3”.

Tabela 2.6: Układ stanowisk kosztów dla grupowania SMG w KGHM

L.p.	MASZyny PODSTAWOWE		
	skrót:	kod:	opis:
1	<u>Grupa: ładowarki produkcyjne</u>		
1.1	ŁK2	6214	ładowarki kołowe pow. 2,5 do 4 m ³
1.2	ŁK3	6215	ładowarki kołowe pow. 4 do 7 m ³
1.3	ŁK4	6216	ładowarki kołowe pow. 7 m ³
2	<u>Grupa: Wozy odstawcze</u>		
2.1	WO	6211	Wozy odstawcze do 20 t
2.2	WOS	6212	Wozy odstawcze pow. 20 do 40 t
2.3	WOW	6213	Wozy odstawcze pow. 40 t
3	<u>Grupa: Wozy wierzące</u>		
3.1	SWW	6231	Wozy wierzące do 3,5 m długości otworu
3.2	SWWD	6232	Wozy wierzące pow. 3,5 m długości otworu
4	<u>Grupa: Wozy kotwiące</u>		
4.1	SWK	6221	Wozy kotwiące bez podajnika kotew (standardowe)
4.2	SWKA	6222	Wozy kotwiące z podajnikiem kotew (automatyczne)
4.3	SWKF	6223	Wozy kotwiące z układem roboczym Fletcher
5	<u>Grupa: Wozy do obrywki</u>		
5.1	SWB	6261	Wozy do obrywki
6	<u>Grupa: Spycharki gąsienicowe</u>		
6.1	SG	6251	Spycharki gąsienicowe

(opracowanie własne na podstawie dokumentu „Zasady ewidencji kosztów według układu stanowiskowego w Zakładach Górniczych KGHM Polska Miedź SA”)

CMMS - system wspierający utrzymanie ruchu

W roku 2003 uruchomiono moduł PM systemu mySAP, gdzie została skonfigurowana ewidencja usług serwisów zewnętrznych w zakresie obsługi SMG w KGHM. Na etapie wdrożenia procesu

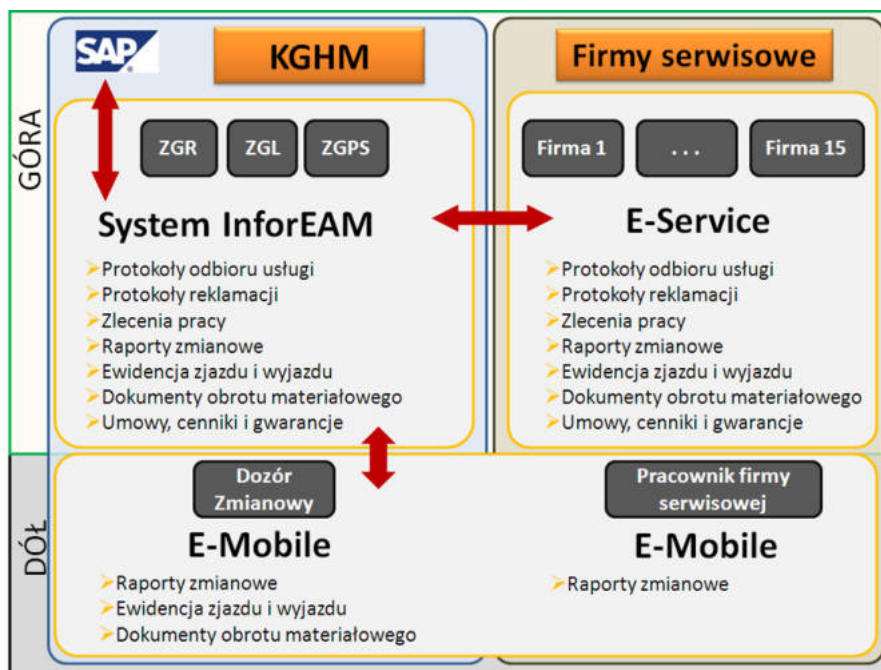
w module PM okazało się, że odwzorowanie skomplikowanych procedur generowania i potwierdzania dokumentów zgodnie z zapisami formalnymi umów zawieranych przez Oddziały KGHM na świadczenie usług w zakresie serwisowania maszyn nie było możliwe w systemie SAP. W związku z tymi ograniczeniami nie udało się zaimplementować elektronicznego obiegu dokumentów.

Potrzeba wprowadzenia systemu wspomagającego utrzymanie ruchu maszyn górniczych została uzasadniona występowaniem dysonansu pomiędzy kosztami organizacyjnymi związanymi z obsługą procedur, a ograniczonymi możliwościami efektywnego wykorzystania informacji gromadzonej w formie elektronicznej. Celem projektu była optymalizacja procesu obsługi i utrzymania maszyn górniczych w Oddziałach KGHM poprzez wdrożenie oprogramowania klasy CMMS (ang. Computerised Maintenance Management Systems) do obsługi informatycznej serwisowania maszyn dołowych, które przyczyni się do optymalizacji kosztów utrzymania poprzez celowe i skuteczne wydatkowanie środków finansowych na realizację niezbędnych czynności profilaktyczno-przegładowych i naprawczych maszyn, a także do poprawy bezpieczeństwa i wydajności pracy. Ustalono zakres funkcjonalności dla dedykowanego rozwiązania:

- wykorzystanie elektronicznej ewidencji prac realizowanych przez serwisy obce oraz własne służby utrzymania w ramach jednego systemu i wyeliminowanie dokumentów papierowych (zapis danych bezpośrednio w systemie po zakończeniu prac na zmianie);
- systemowe zarządzanie obrotem materiałowym, elementami umów z firmami świadczącymi usługi serwisowe, dokumentacją i gwarancjami maszyn oraz systemową kontrolę dostaw i prac realizowanych przez serwisy obce;
- automatyzację procesu rozliczenia zakupu usługi serwisowej dla wszystkich dostawców zewnętrznych;
- wykorzystywanie tworzonej bazy historii serwisowej poszczególnych maszyn dołowych dla potrzeb efektywnej współpracy z dostawcami tych maszyn (proponując poprawę niezawodności), jak również dla poprawy programów eksploatacyjnych tych maszyn;
- automatyzację księgowania kosztów usług serwisowych w SAP dzięki integracji z systemem SAP.

Na Rysunku 2-14 przedstawiono schemat pogładowy relacji pomiędzy aplikacjami systemu CMMS, który wdrożono w KGHM. **InforEAM** to aplikacja główna, dedykowana dla pracowników Działów Maszyn Dołowych na powierzchni kopalni. Pełni funkcję zaawansowanego narzędzia do kompleksowej obsługi procesów utrzymania ruchu, wspomaganie zarządzania maszynami dołowymi oraz raportowania. **E-Mobile** to aplikacja do pracy mobilnej z uproszczonym procesem wprowadzania danych wraz z realizacją podstawowych funkcji operacyjnych w warunkach dołowych.

Dedykowana jest dla dozoru zmianowego KGHM oraz dla pracowników firm serwisowych wykonujących czynności serwisowo-naprawcze przy maszynach górniczych. **E-Service** to aplikacja umożliwiająca udostępnianie wybranych elementów systemu zewnętrznym firmom serwisowym (dostawcom usług), współpracującym z Oddziałami Górniczymi.



Rysunek 2-14: System CMMS: zakres integracji między aplikacjami (źródło: dokumentacja wdrożeniowa systemu w KGHM).

APO-BDG - Aplikacja Planowo-Odbiorowa Baza Danych Geologicznych

Oprogramowanie wdrożone w roku 2011, wykorzystywane w działach geologicznych i mierniczych kopalni. Funkcjonalność aplikacji została zaprojektowana na potrzeby wewnętrzne KGHM, obejmuje kluczowe procesy:

1. szacowanie parametrów złoża (baza opróbowania geologicznego, parametryzacja złoża)
2. planowanie wieloletniej produkcji górniczej - APZ (wielkości wydobycia, parametry jakościowe produkcji)
3. planowanie miesięcznej produkcji górniczej (wielkości wydobycia, parametry jakościowe produkcji)
4. rozliczanie miesięcznej produkcji górniczej (odbiory mierniczo-geologiczne)

Na etapie inwentaryzacji źródeł danych, w pierwszej kolejności mogą mieć zastosowanie dane z miesięcznego rozliczenia produkcji, opisane wg atrybutów *kopalnia, rejon, oddział, pole eksploatacyjne*:

- wydobycie urobku, waga wilgotna ogółem – analizy dla operacji załadunku i odstawy urobku, maszyny LK oraz WO,
- ilość urobku z postępu - analizy dla operacji wiercenia otworów strzałowych, maszyny SWW,
- ilość realokowanej skały płonnej – analizy dla operacji gospodarki skałą płonną, maszyny LK,
- powierzchnia odsłoniętego stropu – analizy dla operacji zabudowy obudowy kotwowej, maszyny SWK.

eRaport - system raportowania produkcji górniczej






System eRaport gromadzi dane operacyjne z procesu wydobycia i utrzymania ruchu kopalni od poziomu sztygara zmianowego. Zapewnia możliwość wprowadzania danych w miejscu ich powstania na stanowiskach przygotowanych w wyrobiskach podziemnych z dostępem do sieci LAN. Jego wdrożenia skróciło czas poświęcany przez dozór na wypełnianie papierowych formularzy, często dopiero po wyjeździe z dołu w biurach. Dzięki zapewnieniu komunikacji stanowisk z serwerem systemu, uzyskano bardzo szybki dostęp do wprowadzonych informacji. Pozwala to na realne zarządzanie procesami w trakcji prowadzenia zmiany. Etap wdrożenia raportowania dla produkcji Górniczej został zakończony w roku 2017. W marcu 2021 uruchomiono raportowanie operacyjne dla utrzymania ruchu wydziałów maszyn dołowych. Po uruchomieniu eRaportu część ewidencji, która pierwotnie była prowadzona w systemie SAP (moduł HR-TM) oraz w systemie CMMS została przeniesiona do nowego systemu przy zachowaniu reguł spójności wymaganych przez systemy nadrzędne. Pierwotnie model zasilania hurtowni danych EKSPERT (SMG), SYNAPSA odwoływał się do ewidencji w systemie SAP oraz CMMS (aktualizacja danych jeden raz na dobę). Ze względu na fakt, że eRaport oferuje możliwość aktualizacji danych zdecydowanie szybciej, podjęto decyzję, aby część krytycznych informacji importować bezpośrednio z bazy danych systemu eRaport. Okazało się, że zakres danych wprowadzanych do formularzy eRaport ewoluje. Pojawiły się nowe dane, które nie były dostępne w systemie SAP oraz CMMS. Dotyczy to zakresu prac związanych z utrzymaniem ruchu maszyn w komorach maszyn ciężkich oraz planowanego obłożenia maszyn. Aktualnie do hurtowni danych EKSPERT SMG eksportujemy dane z 4 formularzy eRaport.

- **„Prace wykonane”** – zawiera informacje o zakresie prac związanych z procesem utrzymania ruchu przez własne służby serwisu z KMC;
- **„Rozliczenie pracy maszyn”** - zawiera informacje odnośnie realizacji planowanego obłożenia maszyn dla oddziałów wydobywczych obsługiwanych przez KMC;

- „Rozliczenie pracowników” – struktura danych analogiczna jak w formularzu nadrzędnym w module HR-TM SAP, wykorzystujemy możliwość szybszej aktualizacji danych;
- „Plan pracy maszyn” – dane o planowanym obciążeniu maszyn.

SYNAPSA - system monitoringu parametrów pracy SMG

Systemu SYNAPSA to podstawowe źródło danych dla zakresu badań opisanych w pracy. Każda maszyna wysyła pliki z danymi. Każdy plik zawiera godzinową próbkę danych. Transmisja jest inicjowana najczęściej podczas tankowania maszyny. Maszyny LK oraz WO tankują dwa razy na dobę, SWW oraz SWK jeden raz na dobę. Na rysunku 2-15 przedstawiono przekład kodowania nazewnictwa plików wg specyfikacji Standardu monitoringu.

Nazwa	Data modyfikacji	Typ	Rozmiar
 KRDSMG_LK4__468R_20201116_00-01.csv	2020-11-16 03:11	Plik wartości oddz...	3 612 KB
 KRDSMG_LK4__468R_20201116_01-02.csv	2020-11-16 03:11	Plik wartości oddz...	3 656 KB
 KRDSMG_LK4__468R_20201116_02-03.csv	2020-11-16 03:11	Plik wartości oddz...	3 656 KB
 KRDSMG_LK4__468R_20201116_03-04.csv	2020-11-16 03:11	Plik wartości oddz...	3 673 KB
 KRDSMG_LK4__468R_20201116_04-05.csv	2020-11-16 05:40	Plik wartości oddz...	1 885 KB

Rysunek 2-15: przykład kodowanie nazewnictwa plików - maszyna LK4 468R (opracowanie własne)

Zakres monitorowanych parametrów - zmiennych jest ustandaryzowany. Lista zmiennych podzielona jest na układy. Dla każdej zmiennej określone są: kod, opis, jednostka miary, częstotliwość zapisu do pliku w formacie CSV oraz funkcja wymagana do agregacji (średnia, minimum, maksimum lub suma). W Tabelach od 2.7 do 2.11 przedstawiono zestawy wymaganych zmiennych dla monitorowanych układów.

Tabela 2.7: Silnik spalinowy: lista wymaganych zmiennych

LP	Parametr	Opis parametru	J.M.	agregacja zapisu zmiennej	
				częstot.	funkcja
1.1	ENGERR	błędy silnika spalinowego - szyna CAN (nr_błędu/status)	— / —	1 s	jeśli błąd wystąpi
1.2	ENGRPM	prędkość obrotowa silnika	rpm	1 s	średnia
1.3	ENGHOURS	licznik godzin pracy silnika spalinowego narastająco	godz	900 s	max
1.4	ENGCOOLT	temperatura cieczy chłodzącej silnik spalinowy	°C	900 s	średnia
1.5	ENGOILT	temperatura oleju silnika spalinowego	°C	900 s	średnia
1.6	ENGOILP	ciśnienie oleju silnika spalinowego	kPa	300 s	średnia
1.7	FUELUS	chwilowe zużycie paliwa (co 1 sek)	l/h	1 s	średnia
1.8	INTAKEP	ciśnienie doładowania silnika spalinowego	kPa	5 s	max
1.9	INTAKET	temperatura powietrza na dolocie silnika spalinowego	°C	15 s	średnia
1.10	ENGTPS	wychylenie pedału gazu	%	1s	max

(źródło: dokument „Standard rejestratora” wersja 6.0)

Tabela 2.8: Układ przeniesienia napędu: lista wymaganych zmiennych

LP	Parametr	Opis parametru	J.M.	agregacja zapisu zmiennej	
				częstot.	funkcja
2.1	GROILT	temperatura oleju skrzyni biegów/zmiennika momentu	°C	15 s	średnia
2.2	GROILP	ciśnienie oleju zasilania skrzyni biegów	kPa	1 s	średnia
2.3	SPEED	prędkość średnia (co 1 sek),	km / h	1 s	średnia
2.4	SELGEAR	kierunek jazdy (przód/tył) i aktualny bieg	#DZIEL/0!	1 s	średnia
2.5	SWITCHMOVE	przełączenie kierunku jazdy pod obciążeniem	0/1	1s	jeśli błąd wystąpi
2.6	BREAKP	ciśnienie hamowania	kPa	1 s	średnia
2.7	HYDDRV	załączony napęd dodatkowy piast	0/1	5 s	max
2.8	GEARERR	błędy sterownika skrzyni biegów (APC)-szyna CAN (nr błędu -SPN /status - FMI)	— / —	1 s	jeśli błąd wystąpi
2.9	TRNAUT	skrzynia biegów, praca w trybie automatycznym	0/1	1s	max
2.10	TRNBPS	pozycja pedału hamulca	%	1s	max

(źródło: dokument „Standard rejestratora” wersja 6.0)

Zmienna SWITCHMOVE została usunięta z zestawu od wersji 6.0

Tabela 2.9: Wiercenie: lista wymaganych zmiennych zmiennych

LP	Parametr	Opis parametru	J.M.	agregacja zapisu zmiennej	
				częstot.	funkcja
5.1	DR_NUM	liczba odwierconych otworów (w tym otwory pod kotwy)	szt.	30 s	max
5.2	DR_LENG	długości odwierconych otworów	m	30 s	max
5.3	DRILLDIA	średnica narzędzia: parametr wprowadzany manualnie na panelu rejestratora	mm	1800 s	wart chwilowa
5.4	DR_HOURS	czas pracy wiertarki	godz.	900 s	max
5.5	HYDDFEDP	ciśnienie w układzie posuwu narzędzia	MPa	1 s	średnia
5.6	HYDDIMPP	ciśnienie w układzie uderzenia wiertarki - dot. wiertarek udarowych	MPa	1 s	średnia
5.7	HYDDRPM	ciśnienie w układzie obrotów wiertarki	MPa	1 s	średnia
5.8	DR_PROGR	postęp wiercenia - wartość chwilowa	m	1 s	średnia
5.9	FEEDDR	kierunek posuwu narzędzia	1/0/-1	1 s	wart chwilowa
5.10	PRPISTDEP	ciśnienie tłoka amortyzacji wiertarki	MPa	1s	max

(źródło: dokument „Standard rejestratora” wersja 6.0)

Tabela 2.10: Zabudowa obudowy kotwowej: lista wymaganych zmiennych

LP	Parametr	Opis parametru	J.M.	agregacja zapisu zmiennej	
				częstot.	funkcja
6.1	BOLDTP	rodzaj kotwy - parametr wprowadzany manualnie na panelu rejestratora (E - ekspans; G - klej)	E/G	1800 s	wart chwilowa
6.2	BOLDTORQ	moment dokręcania kotwy	Nm	180 s	max
6.3	BOLDQNT	ilość zabudowanych kotew	szt.	180 s	max
6.4	BOLDDL	długość kotwy (wskaźnik z dokładnością 0,1 metra)-	m	1800 s	max

(źródło: dokument „Standard rejestratora” wersja 6.0)

Tabela 2.11: Zasilanie elektryczne AC: lista wymaganych zmiennych

LP	Parametr	Opis parametru	J.M.	agregacja zapisu zmiennej	
				częstot.	funkcja
7.1	SUPPLYVT	napięcie zasilania napędu elektrycznego hydrauliki roboczej	V	60 s	średnia
7.2	ELECTRCON	sumaryczne zużycie energii elektrycznej	kWh	900 s	max
7.3	TMELMOTOR	czas pracy silnika elektrycznego głównego pompy hydraulicznej	godz.	900 s	max

(źródło: dokument „Standard rejestratora” wersja 6.0)

Parametr, który jest szczególnie trudny do pomiaru, to waga urobku na łyżce ładowarki oraz na skrzyni ładunkowej wozu do odstawy urobku. W zakresie projektu SYNAPSA przetestowano kilka rozwiązań układu ważenia na ładowarkach przegubowych. Ze względu na koszty układu oraz konieczność częstej kalibracji w warunkach dołowych podjęto decyzję o rezygnacji z tej opcji monitoringu dla maszyn LK. Dla maszyn WO z szufladą przesuwaną nie udało się opracować metody bezpośredniego pomiaru wagi załadowanego urobku.

Oprócz standardowej listy zmiennych, praktykuje się dodawanie do zestawu nowych pozycji. Dotyczy to głównie testów prototypów nowych maszyn, szczególnie projektów KGHM ZANAM. Dla potrzeb testów maszyn LKP 1701 oraz LKP 1001 aktywowano dodatkowe zmienne:

- INCLINX , INCLINY czujnik przechyłu maszyny,
- TEMPAC, SPEEDAC dodatkowe zmienne dla weryfikacji wydajności układu klimatyzacji.

Wprowadzenie do testowej eksploatacji pierwszych maszyn z napędem elektrycznym zasilanych bakteryjnie wymagało dostosowania listy monitorowanych zmiennych. Na Rysunku 2-16 przedstawiono ładowarkę Epiroc ST14B, wyposażoną w dwa niezależne silniki elektryczne. Dla tej konfiguracji układu napędu elektrycznego wprowadzono dodatkowe zmienne:

- BATTERT - temperatura pakietu baterii,
- BATTERV - napięcie pakietu baterii,
- CURRENT - natężenie prądu w obwodzie głównym zasilania z baterii,
- CHARGEL - poziom naładowania baterii,
- ENCONS - zużycie energii pakietu baterii,
- ENGELDT - temperatura silnika napędzającego hydraulikę roboczą,
- ENGELHT - temperatura silnika napędu układu jazdy.

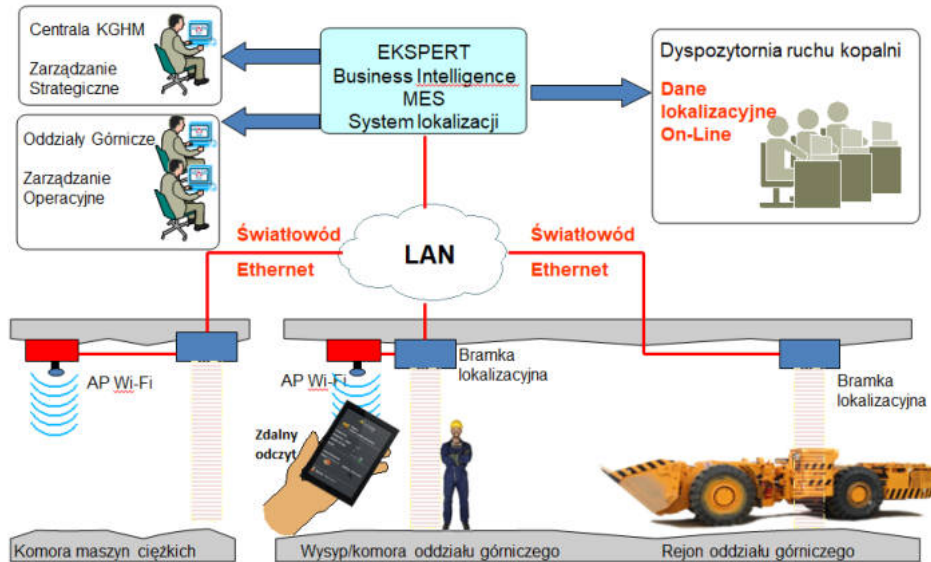


Rysunek 2-16: Ładowarka przegubowa Epiroc ST14B z napędem elektrycznym zasilanym bateryjnie oraz infrastruktura dla obsługi procesu ładowania baterii na KMC (źródło: opracowanie własne)

Systemy lokalizacji maszyny w wyrobiskach podziemnych

Na etapie projektu SYNAPSA, w ograniczonym zakresie obszaru wyrobisk podziemnych, testowano systemy lokalizacji maszyn. Najlepsze oceny uzyskał system PORTAS, zainstalowany w rejonie szybu SG O/ZG Polkowice-Sieroszowice. Po zakończeniu testów system PORTAS wszedł do użytku w tym rejonie kopalni. Koncepcję systemu przedstawiono na Rysunku 2-17. Ze względów ekonomicznych nie podjęto decyzji o wdrożeniu tego rozwiązania w skali makro dla trzech Oddziałów Górniczych. Położenie punktów systemu lokalizacji było odwzorowane w systemie GIS. Na tej podstawie zdefiniowano trasy przejazdu maszyn pomiędzy punktami identyfikacji lokalizacji. Określono następujące atrybuty dla każdej trasy:

- długość trasy, uwzględniająca topografię przebiegu wyrobisk (wskaźnik obliczony w narzędziu GIS, na podstawie trasy wykreślonej przy konfiguracji systemu lokalizacji),
- średni lub maksymalny upad na trasie przejazdu,
- dopuszczalna prędkość - parametr opcjonalny, dla wybranych tras prowadzonych po upadach



Rysunek 2-17: System lokalizacji strefowej testowany w zakresie projektu SYNAPSA (źródło: dokument KGHM PM SA)

Katalog błędów sterownika silnika maszyny

Bardzo istotnym elementem dla procedur oceny stanu technicznego nowoczesnych maszyn jest możliwość analizy danych o błędach generowanych przez sterowniki cyfrowe silnika oraz skrzyni biegów. W trudnych warunkach eksploatacji (przede wszystkim wysokiej temperaturze otoczenia), praktycznie podczas każdej zmiany roboczej pojawiają się nowe wpisy w rejestrach błędów. Większość z nich to szum tzw. „żółtych” alarmów ostrzegawczych. Dla służb dozoru mechanicznego potrzebne jest narzędzie do szybkiej analizy tych danych, zwłaszcza identyfikacji poważnych „czerwonych alertów” wymagających zatrzymania maszyny w celu weryfikacji przyczyny wystąpienia alarmu.

Procedura kodowania błędów jest uregulowana normą SAE J1937. Każdy błąd jest definiowany jako kombinacja kodów SPN oraz FMI, w takiej postaci błąd jest zapisywany przez rejestrator. W populacji maszyn objętych projektem występują silniki różnych producentów: Mercedes, Deutz, Cummins czy Volvo.

Po analizie pierwszych próbek z zapisem błędów z rejestratorów ustalono, że w zakresie projektu zostanie opracowana dodatkowa tablica dla potrzeb rozkodowania błędów. Oprócz standardowych atrybutów (kodów SPN oraz FMI) będzie uwzględniała jako dodatkowy atrybut typ sterownika silnika. Jest to stosunkowo pracochłonne rozwiązanie, ale pozwala na opracowanie jednolitego, polskojęzycznego, wewnętrznego standardu dla raportowania tego zakresu informacji.

Oprócz błędów krytycznych, rejestratory zapisują także chwilowe usterki związane np. z odczytem sygnałów z czujników, np. czujnika poziomu płynu w układzie chłodzenia lub potencjometru przepustnicy. W przypadku stwierdzenia tego typu zapisów można przy okazji obsługi codziennej zweryfikować stan połączeń elektrycznych.

Katalog parametrów nominalnych maszyny

W celu obliczenia wskaźników nawiązujących do analizy obciążenia układów maszyny, podstawowym źródłem danych jest instrukcja producenta. Instrukcja określa:

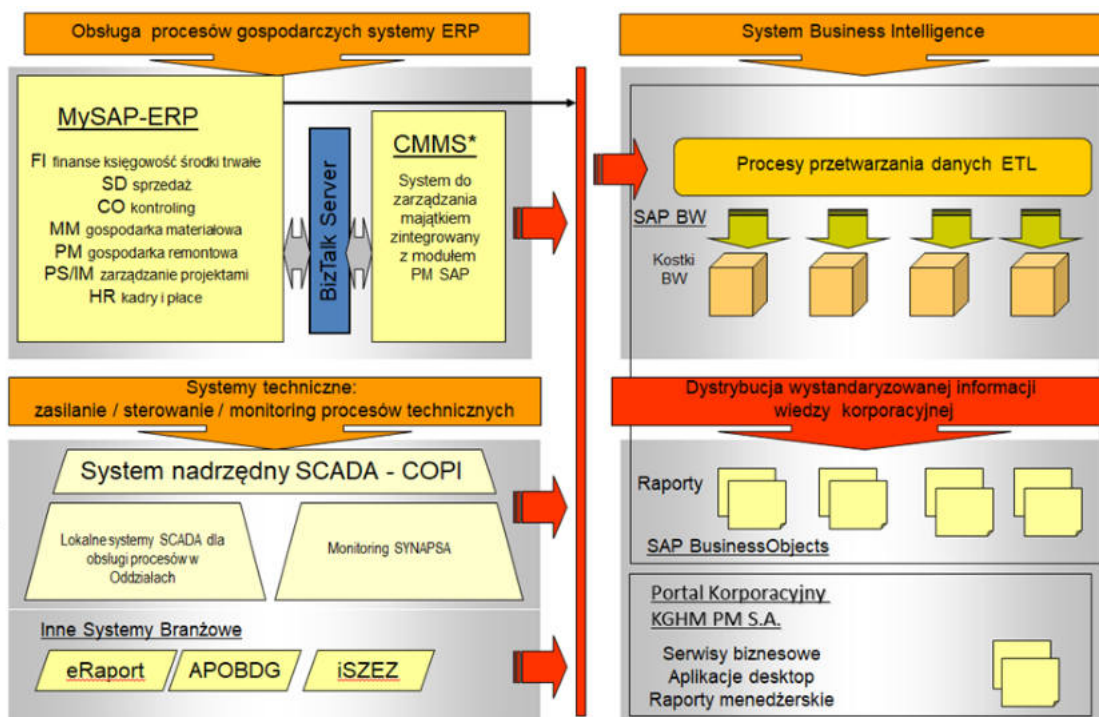
- zakres obrotów silnika spalinowego: obroty biegu jałowego, obroty dla maksymalnego momentu napędowego, obroty maksymalne;
- dopuszczalne temperatury mediów w układach maszyny, w szczególności temperaturę cieczy chłodzącej oraz oleju w silniku i instalacji hydraulicznej;
- nominalne napięcie zasilania napędu elektrycznego hydrauliki roboczej oraz minimalne ciśnienie przepłuczki (w przypadku maszyn wierząco-kotwiących).

2.1.7 Analiza możliwości wykorzystania danych w systemach informacyjnych do budowania informacji zarządczych

W zakresie aktywności zawodowej autora pracy jest animowanie rozwoju systemów informacyjnych implementowanych w środowisku hurtowni danych. Zadanie jest realizowane od 2003 roku, dla procesów w Oddziałach Górniczych - system EKSPERT. W zakresie projektu SYNAPSA został utworzony nowy obszar informacyjny w hurtowni danych EKSPERT dla raportowania informacji z monitoringu SMG – „SYNAPSA”. Algorytmy opisane w niniejszej rozprawie zostały już częściowo zaimplementowane i udostępnione dla praktycznego stosowania w postaci raportów i kokpitów informacyjnych.

System EKSPERT rozwija się wraz z postępem rozwoju KGHM. Na początku podstawowym źródłem danych był system SAP. W kolejnych latach udało się zintegrować z modelem informacyjnym hurtowni danych kolejne źródła. Na Rysunku 2-18 przedstawiono schemat logiczny powiązania danych źródłowych z procesami w hurtowni danych:

- dane z ewidencji w systemie SAP, wg modułów funkcjonalnych, od roku 2003,
- dane procesowe z systemów SCADA, od 2008,
- dane z monitoringu SYNAPSA, od roku 2014,
- dane innych systemów branżowych.



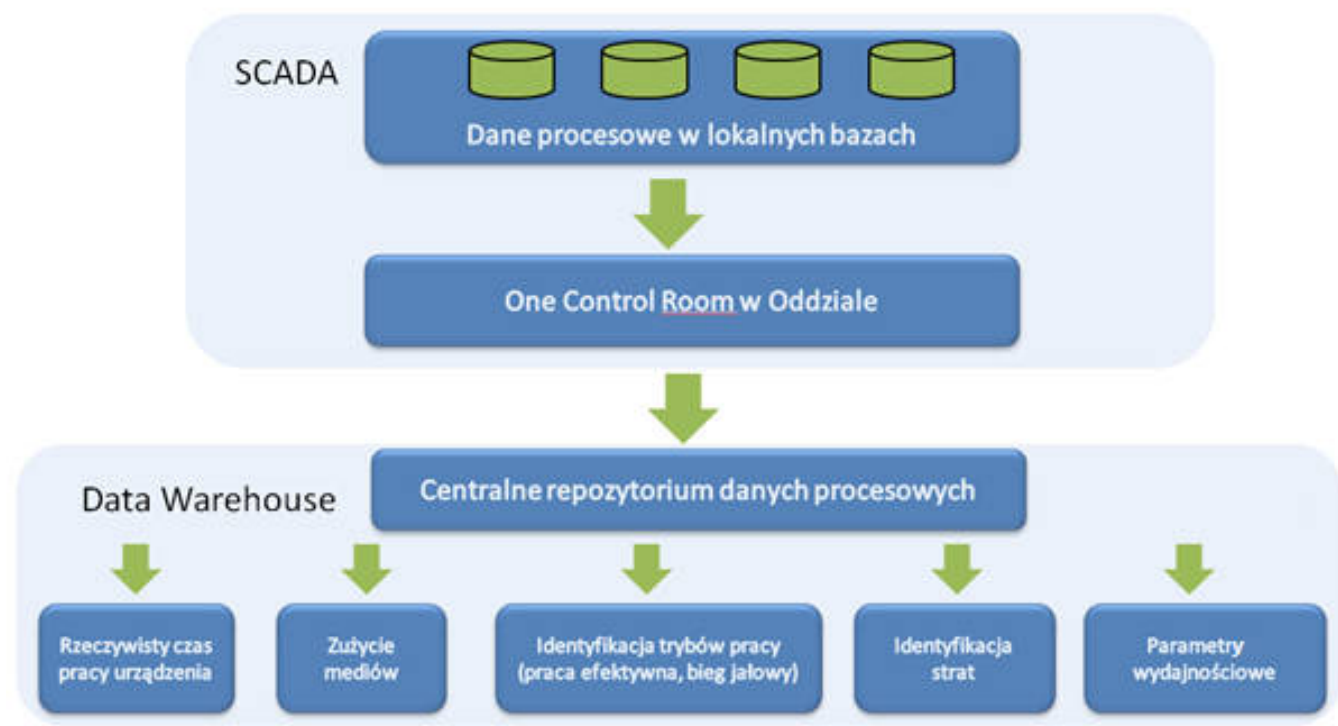
Rysunek 2-18: Topologia powiązań systemów informatycznych Oddziałach KGHM PM SA (źródło: opracowanie własne)

Technologia hurtowni danych pozwala na elastyczne modelowanie procesów transformacji danych przy zachowaniu **atrakcyjnej relacji efektów do nakładów niezbędnych dla pozyskania i udostępnienia informacji. Koszty techniczne i organizacyjne związane z funkcjonowaniem systemów źródłowych są przypisane bezpośrednio do procesu produkcji.** Kluczem do sukcesu jest zarządzanie konfiguracją powiązań obiektów dla prowadzenia wielowymiarowych analiz. Później proces szczypania złoża rud miedzi wymaga stosunkowo częstej aktualizacji konfiguracji ze względu na przesuwanie frontów eksploatacyjnych oddziałów wydobywczych.

W przypadku danych z systemu ERP - SAP jest to relatywnie proste zadanie. Ponieważ moduły funkcjonalne są ze sobą zintegrowane, konfigurację procesów ETL można powiązać ze strukturami hierarchii stosowanych do grupowania obiektów dekretacji danych w module kontrolingu.

W przypadku systemów technicznych - SCADA, które są zarządzane lokalnie w Oddziałach, konfiguracja musi być obsługiwana manualnie. Wymaga to zaangażowania dodatkowych zasobów organizacyjnych dla śledzenia zmian w konfiguracji systemów źródłowych SCADA i aktualizacji odpowiednich hierarchii po stronie hurtowni danych SAP BW. W realiach funkcjonowania Oddziałów sprawiało to odczuwalne problemy. Na dzień dzisiejszy udało się zoptymalizować ten trudny element, dzięki wdrożeniu idei One Control Room (OCR) w Oddziałach Górniczych, opisanej w artykule [121]. Konfiguracja procesu eksportu danych z lokalnych systemów SCADA do hurtowni

danych jest zintegrowana ze strukturami utrzymywanymi dla potrzeb centralnych dyspozytorni w każdym z Oddziałów. Na Rysunku 2-19 zaprezentowano schemat poglądowy tego rozwiązania.



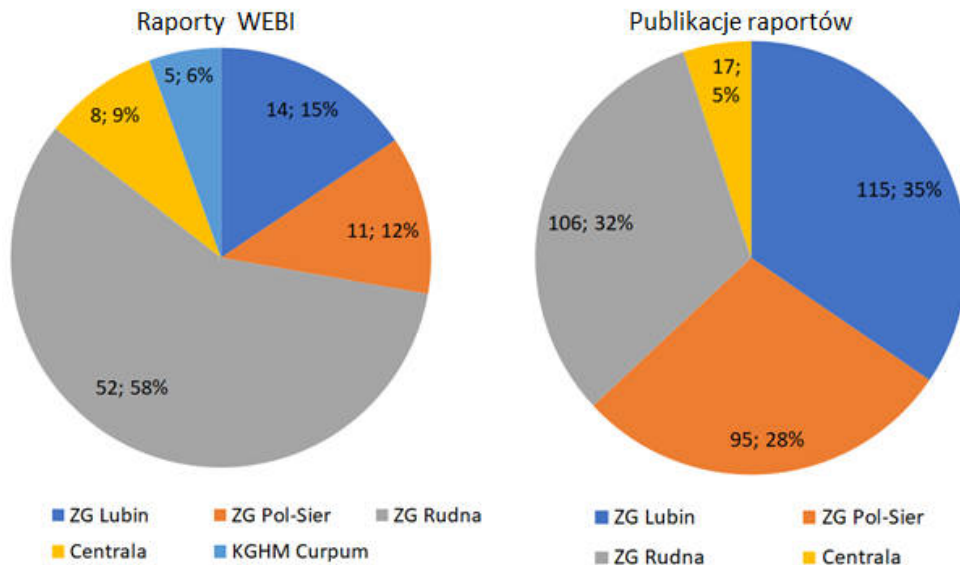
Rysunek 2-19: Kontroling techniczny dla potrzeb zarządzania operacyjnego i strategicznego procesami GCT (planowanie, kontrola, optymalizacja) (źródło: opracowanie własne)

W systemie EKSPERT podstawowym źródłem informacji są raporty Web Intelligence (WEBI), budowane na kostkach informacyjnych hurtowni danych EKSPERT. Raporty WEBI mogą mieć postać zestawień tabelarycznych i/lub wykresów. Raporty można zapisać w formacie arkusza MS Excel lub PDF. Funkcjonalność platformy BI, wg aktualnie przyjętego przez KGHM COPI modelu licencjonowania, umożliwia dostęp do informacji w trybie online dla ograniczonego grona analityków. Dostęp dla pozostałych użytkowników realizowany jest za pomocą mechanizmu dystrybucji raportów, odświeżanych wg ustalonego prelimitarza, który uwzględnia określone wcześniej potrzeby zdefiniowanych grup użytkowników (mechanizm publikacji raportów). Dostęp do systemu jest skonfigurowany z poziomu portalu KGHM, funkcjonalność portalu zapewnia autoryzację uprawnień dla zalogowanych użytkowników. Na Rysunku 2-20 przedstawiono kompilację 3 ekranów, które trzeba po kolei „przeklikać”, żeby wejść do właściwego zestawu raportów.



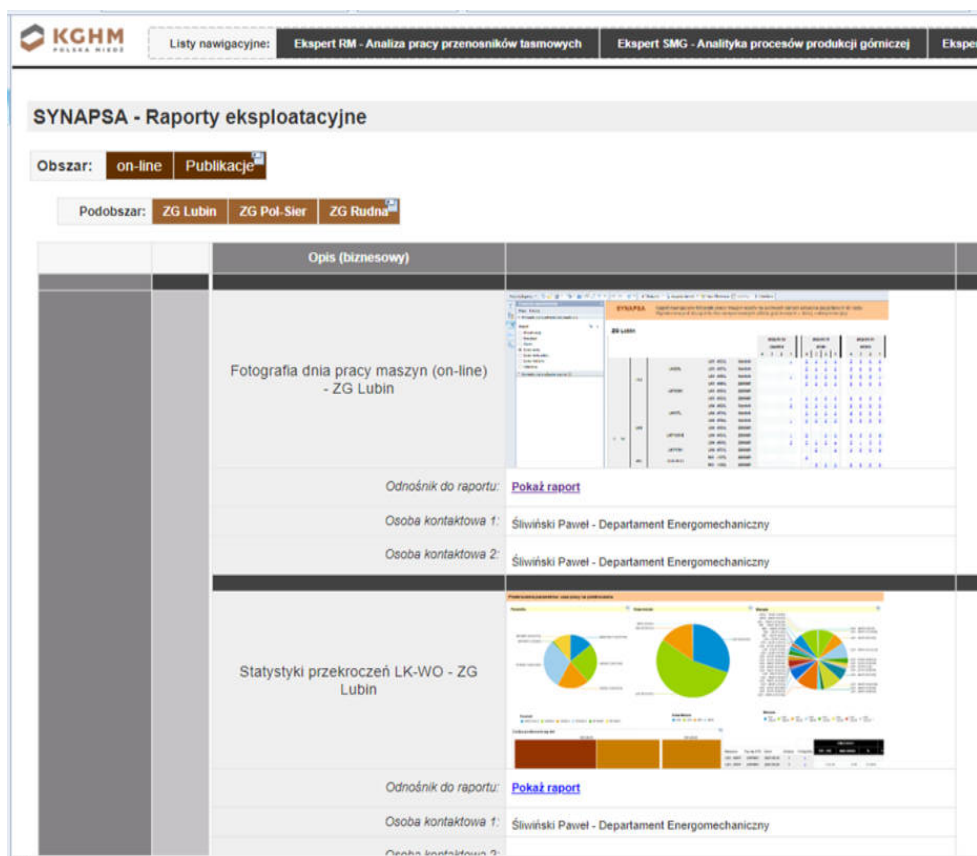
Rysunek 2-20: EKSPERT: Udostępnienie informacji na portalu KGHM (źródło: kompilacja zrzutów ekranów z portalu dla pracowników KGHM)

Raporty z monitoringu SMG są udostępnione dla ponad 330 użytkowników w wersji offline (publikacje raportów) i 90 online (raporty WEBI). Na Rysunku 2-21 przedstawiono informacje o uprawnieniach do raportów w hurtowni danych EKSPERT dla obszaru SYNAPSA.



Rysunek 2-21: Uprawnienia do raportów, obszar informacyjny SYNAPSA: liczba użytkowników, udział procentowy (opracowanie własne)

Na Rysunku 2-22 przedstawiono raport nawigacyjny dla zakładki "Raporty eksploatacyjne". Model informacyjny hurtowni danych uwzględnia wymiar przypisania organizacyjnego dla każdego użytkownika. Do autoryzacji stosowany jest mechanizm Active Directory. Informacje wyświetlane w raportach są ograniczane do macierzystej kopalni. Użytkownicy z dostępem online mogą tworzyć własne raporty, zapisywać je do indywidualnych folderów lub udostępniać je dla wszystkich, zapisując je do folderu „Raporty udostępnione”.



Rysunek 2-22: EKSPERT: lista nawigacyjna dla raportów SYNAPSA (źródło: opracowanie własne)

2.2 Wkład autora w rozwój dziedziny

Autor niniejszej rozprawy od blisko 20 lat zajmuje się opracowaniem i wykorzystywaniem informacji zawartej w systemach informatycznych przedsiębiorstwa górniczego do optymalizacji procesów produkcyjnych i zarządzania infrastrukturą górniczą. W czasie swojej zawodowej kariery wielokrotnie uczestniczył w konferencjach naukowych (w kraju i za granicą), wizytach studyjnych w krajowych i zagranicznych ośrodkach badawczo-rozwojowych, a także w przedsiębiorstwach współpracujących z branżą górniczą (producenci maszyn, systemów IT, systemów pomiarowych itd.). Był pomysłodawcą tematów, a następnie kierownikiem zadania dla wielu prac badawczo-rozwojowych realizowanych we współpracy z zespołami naukowymi takimi jak KGHM Cuprum, PWr oraz ISGMiE PAN w Krakowie. Brał udział w wielu projektach krajowych i międzynarodowych realizowanych z udziałem KGHM. Brał udział w spotkaniach branżowych, a także sam organizował spotkania o charakterze szkoleniowym dla pracowników grupy kapitałowej i firm

współpracujących z KGHM.

Szczególnie ważne w karierze naukowej autora były projekty wieloletnie EKSPERT i SYNAPSA, realizowane przez KGHM w Oddziałach Górniczych.

Autor jest zaangażowany w tematykę monitoringu SMG w KGHM od momentu zainicjowania pierwszych prac koncepcyjnych w roku 2011 do dnia dzisiejszego. Pełnił funkcję zastępcy kierownika Projektu SYNAPSA, odpowiadał za przygotowanie koncepcji wdrożenia systemu monitoringu SMG oraz realizację harmonogramu projektu. Po zakończeniu fazy pilotażowej, odpowiada za utrzymanie i rozwój funkcjonalności systemu. Koordynuje współpracę między użytkownikami systemu w Oddziałach Górniczych, służbami IT oraz zespołami naukowymi, które współpracują z KGHM w formule prac badawczo-rozwojowych. Autor jest zaangażowany w tematy wdrożeń nowych typów maszyn i dostosowania monitoringu do nowych rozwiązań i technologii zastosowanych w maszynach. Dotyczy to w szczególności współpracy z KGHM ZANAM, który jest strategicznym dostawcą maszyn dla spółki matki. Do najważniejszych prac autora należą:

- optymalizacja oprogramowania sterującego automatycznym załączaniem blokady lock-up na wozach CB4 20/24 TB dla wydłużania resursu sprzęgła;
- udział w pracach związanych z testowaniem oprogramowania sterującego załączaniem blokady lock-up na ładowarkach LKP 903;
- analiza próbek danych przy wdrażaniu ładowarek LKP 1701 oraz LKP 1001 (maszyny są wyposażone w automatyczny system monitorowania poziomu zanieczyszczeń oleju hydraulicznego i przekładniowego, zmienne z odczytami pomiarów został włączone do zakresu danych w plikach CSV);
- testowanie kotwiarki automatycznej Roof Master 1.8KE z napędem elektrycznym zasilanym bakteryjnie;
- testowanie wiertnicy Face Master 1.7LE z napędem elektrycznym zasilanym bakteryjnie.

Wymienione prace z różnych powodów nie mogły stanowić elementów rozprawy, ale pozwoliły eksperymentalnie testować hipotezy badawcze, metody pomiarowe i analityczne.

Popularyzacja technik pomiarowych i analitycznych, formalizowanie potrzeb użytkowników, definiowanie nowych rozwiązań, projektowanie i nadzór nad wykonaniem raportów analitycznych w technologii BI WEBI (technologia raportowania stosowana w KGHM) oraz szkolenia dla różnych grup użytkowników to tylko przykładowe działania, które w istotny sposób zmieniły postrzeganie roli monitoringu maszyn w KGHM i jego otoczeniu.

Autor wielokrotnie moderował pracę wielu zespołów naukowych (w tym także zespołów realizujących projekty międzynarodowe), dzieląc się swoim doświadczeniem i sugerując nowe kierunki badań związane z budowaniem informacji na podstawie danych z monitoringu. Kilukrotnie, na zlecenie Oddziałów Górniczych, wykazał słuszność roszczeń kopalni względem dostawcy maszyny (lub jej komponentów), korzystając z wyników analiz danych z monitoringu.

Na sam koniec warto odnotować dorobek naukowy, mierzony kilkudziesięcioma wystąpieniami konferencyjnymi, referatami i publikacjami w czasopismach o zasięgu międzynarodowym.

Rozdział 3

Cele ogólne i szczegółowe pracy

Obiektem badań w trakcie przewodu doktorskiego były samojezdne maszyny górnicze (SMG), głównie ładowarki produkcyjne, wozy do odstawy urobku, wozy wierzące i kotwiące pracujące w kopalniach podziemnych rud miedzi. Ze względu na cenę zakupu, koszty eksploatacji, serwisu oraz liczbę maszyn znajdujących się na stanie grupy kapitałowej KGHM, poprawa efektywności pracy tych maszyn, wydłużenie czasu pracy, ograniczenie zużycia paliwa, unikanie krytycznych awarii jest kluczowym zagadnieniem.

Rozwój systemów pomiarowych, bazodanowych i analitycznych oraz możliwości generowania informacji zarządczej i raportowania krótko i długoterminowego utworzyły potencjał do wykorzystania dostępnych funkcjonalności do optymalizacji zarządzania parkiem maszyn dołowych SMG.

W systemach informatycznych użytkowanych w KGHM można zidentyfikować wiele danych dekretowanych w referencji do konkretnych numerów kopalnianych maszyn, które mogą być wykorzystane do analiz technicznych i ekonomicznych. Zastosowanie technologii hurtowni danych pozwala na automatyzację procesu opracowania analiz i raportów oraz ich standaryzację. Wdrożenie funkcjonalności monitoringu oraz lokalizacji SMG rozszerza w sposób istotny możliwości analiz, dzięki udostępnieniu wiarygodnych danych opisujących pracę maszyny.

Głównym problemem badawczym jest określenie wskaźników wspierających procedury eksploatacji (obejmujących wydajność, dyspozycyjność i diagnostykę), opracowanie metodyki, w szczególności kryteriów selekcji zmiennych (z uwzględnieniem ich jakości, zmienności, informacyjności), które mają być monitorowane oraz opracowanie algorytmów do wyznaczania odpowiednich wskaźników. Do istotnych elementów pracy należą weryfikacja uzyskanych wyników dla dużych próbek danych oraz eksperymenty dołowe walidujące obliczenia teoretyczne.

Specyfika kopalni podziemnej, wpływ czynnika ludzkiego, duża zmienność procesów realizowanych przez maszyny poszczególnych typów itp. powodują konieczność opracowania nowych

metod automatycznej walidacji danych, przetwarzania wstępnego (głównie segmentacji, czyli wyodrębnienia np. cykli w procesie technologicznym, takich jak wiercenie), analizy (automatycznego „rozumienia” procesu na podstawie zarejestrowanych sygnałów), modelowania procesów i analiz długoterminowych agregujących „lokalną” informację na potrzeby identyfikacji „globalnych” zachowań. Dotychczasowe badania potwierdziły skuteczność autorskich procedur przetwarzania sygnałów, opracowanych w ramach prowadzonej działalności badawczej, co uzasadnia kontynuację prac.

Celem strategicznym pracy, zgodnie z jej tytułem, jest **opracowanie metody kompleksowej oceny efektywności eksploatacyjnej maszyn i predykcyjnego utrzymania ruchu** na podstawie danych z monitoringu SMG. Już sam tytuł wskazuje na dwa kierunki działań - efektywność i diagnostyka.

Poprzez **ocenę efektywności** rozumie się w rozprawie zbiór metod walidacji, przetwarzania i analizy danych mających na celu wykazanie poprawy wydajności, jakości pracy, bezpieczeństwa itd. W rozprawie ten obszar związany jest z opracowaniem:

- procedury oceny pracy maszyn z włączonym i wyłączonym układem lock-up, 5.1
- procedury identyfikacji cykli roboczych w wozie odstawczym (WO), 5.2.2
- procedury identyfikacji cykli roboczych w samojezdnym wozie wierząco-kotwiącym (SWK), 5.2.3.

Należy wspomnieć, że procedury detekcji cykli roboczych dla ładowarki oraz samojezdnego wozu wierzącego (w skrócie: wiertnica) zostały już wcześniej opracowane i nie są omawiane w rozprawie.

Poprzez **predykcyjne utrzymanie ruchu** maszyn dołowych rozumieć należy szereg zagadnień, zgodnie z rozważaniami przedstawionymi w rozdziale 2.1.5. Na potrzeby rozprawy autor przedstawia trzy rozwiązania:

- procedurę diagnostyczną dotyczącą silnika spalinowego na podstawie ciśnienia oleju silnika, 5.3.1,
- procedurę diagnostyczną na podstawie statystycznej analizy danych temperaturowych, 5.3.2,
- procedurę wykrywania uszkodzeń tarczy flex-plate w układzie napędowym ładowarki przegubowej LKP 1601B na połączeniu koła zamachowego z przekładnią hydrokinetyczną, 5.3.3.

W rozdziale 5.3.4, przedstawiono koncepcję tworzenia tabeli - rejestru zdarzeń eksploatacyjnych dla SMG, która będzie miała zastosowanie przy prowadzeniu analiz dla potrzeb predykcyjnego utrzymania ruchu. Brak rejestru jest istotnym ograniczeniem dla rozwoju analityki w systemie SYNAPSA.

Podobnie jak w przypadku analiz efektywności, autor brał udział w opracowaniu procedur dotyczących predykcyjnego utrzymania ruchu, m. in.:

- identyfikacji rozpoczęcia „przegrzewania się” silnika w związku ze zmianą jego stanu technicznego w obecności trudnych, zmiennych w czasie i w przestrzeni warunków dołowych (różne temperatury w różnych lokalizacjach kopalni),
- złożonych procedur wnioskowania prowadzącego do wykrycia anomalii (zmiany stanu technicznego) układu roboczego (silnik, hydraulika układu roboczego, itd.).

Prace te nie zostały włączone do rozprawy.

Rozdział 4

Prace eksperymentalne

4.1 Eksperymenty i symulacje numeryczne

Jak już wspomniano wcześniej, na potrzeby badań wykorzystywano trzy rodzaje prac eksperymentalnych. Eksperymenty symulacyjne - mające na celu testowanie pewnych koncepcji analitycznych - oparte na wykonywaniu analiz statystycznych, symulacjach Monte Carlo itd. z punktu widzenia wdrożenia metody wydają się być pozbawione aspektu praktycznego. Niemniej jednak należy zauważyć, że modele użyte w symulacjach były inspirowane danymi eksploatacyjnymi, ale pozbawionymi zakłóceń spotykanych w rzeczywistości. Nie uwzględniają również innych czynników, trudnych do przewidzenia na etapie symulacji. Badania symulacyjne wykorzystano m. in. do testowania metody punktu zmiany reżimu, badania skuteczności metod statystycznych związanych z analizą grupowania danych opisujących proces degradacji koronki wiertniczej itd. Ze względu na bardzo wstępny charakter badań opartych na symulacjach, ograniczoną przydatność na kolejnych etapach rozważań i obszerność pracy, opis badań symulacyjnych nie został zamieszczony w rozprawie.

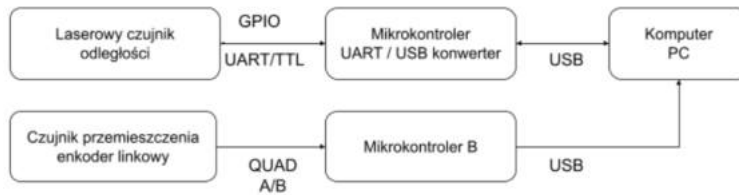
4.2 Eksperymenty w warunkach laboratoryjnych

Badania dołowe zawsze wiążą się z pewnym ryzykiem wypadku przy pracy, zwłaszcza jeśli w eksperymencie biorą udział osoby "okazjonalnie" bywające w kopalni podziemnej, bez odpowiedniego doświadczenia "dołowego". W przypadkach kiedy było to możliwe, prowadzono badania symulacyjne lub na stanowiskach badawczych na Politechnice Wrocławskiej. Dobrym przykładem badań laboratoryjnych była symulacja procesu wiercenia otworów pod zabudowę obudowy

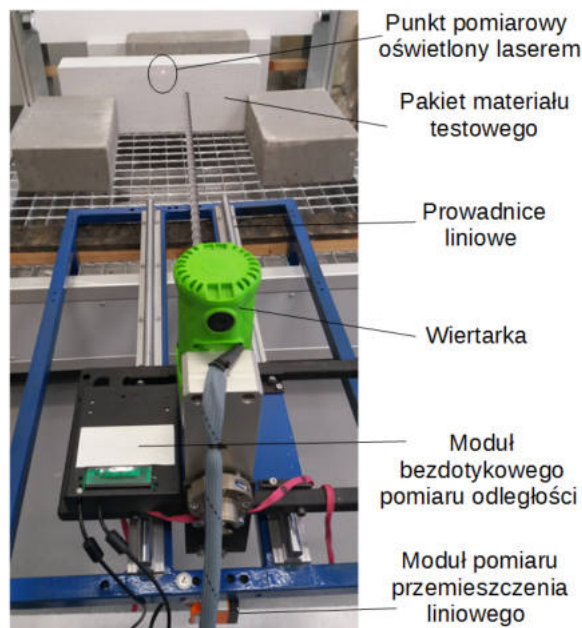
kotwowej; praca operatora kotwiarki należy do szczególnie niebezpiecznych. W systemie monitoringu istotnym parametrem dla monitorowania procesu wiercenia jest pomiar postępu wiercenia (zmienna DRPROGR wg Standardu monitoringu). Producenci maszyn wykorzystują do tego pośrednią metodę pomiaru, bazującą na zastosowaniu przepływomierza precyzyjnego w obwodzie siłownika hydraulicznego posuwu wózka wiertarki. Rozwiązanie to jest stosowane w wiertniach (SWW) oraz wozach automatycznych do zabudowy obudowy kotwowej (SWKA) produkcji KGHM ZANAM, Mine Master, Epiroc. Niestety rozwiązanie to nie jest idealne do zastosowań dołowych (koszty przetwornika pomiarowego, konieczność kalibracji po serwisie układu roboczego, stosunkowo wysoki błąd pomiaru oraz bezwładność). W przypadku maszyn Roof Master 1.7, wyposażonych w hydrauliczną wiertarkę obrotową „Fletcher” (SWKF), które zdecydowanie dominują w populacji kotwiarek, metoda ta nie może być stosowana ze względu na warunki techniczne. Analiza publikacji na temat alternatywnych rozwiązań pomiaru postępu wiercenia z zastosowaniem wiązki promieni lasera była inspiracją do przetestowania podjęcia próby opracowania układu pomiarowego dla maszyny SWKF. Wykonanie urządzenia zostało zlecone w zakresie pracy badawczej sfinansowanej z budżetu doktoratu. Badania w warunkach laboratoryjnych zostały przeprowadzone w ramach testów: samego urządzenia, walidacji jakości i dokładności danych pomiarowych oraz możliwości przesyłania danych z urządzenia do komputera. Aby sprawdzić poprawność działania modułu bezdotykowego pomiaru odległości, opracowano i zbudowano laboratoryjne stanowisko pomiarowe pokazane na Rysunkach 4-1 i 4-2. Stanowisko składa się z następujących modułów funkcjonalnych:

- moduł bezdotykowego pomiaru odległości,
- moduł bezwzględnego pomiaru odległości zintegrowany z przewodnikami liniowymi,
- moduł wiertarki udarowej,
- laboratoryjny moduł rejestracji danych.

Wszystkie moduły zostały wykonane i zintegrowane zgodnie ze schematem blokowym, widocznym na Rys. 4-1. Do komputera PC zostały przesłane dane z dwóch torów pomiarowych: z laserowego modułu pomiarowego oraz z modułu pomiaru aktualnego przemieszczenia wózka z zamontowaną wiertarką. Wartość przemieszczenia wózka stanowi wartość rzeczywistą, stanowiącą podstawę do weryfikacji poprawności działania badanego modułu.



Rysunek 4-1: Schemat blokowy układu pomiarowego zastosowanego w stanowisku testowym (opracowanie własne)



Rysunek 4-2: Elementy składowe stanowiska testowego (opracowanie własne)

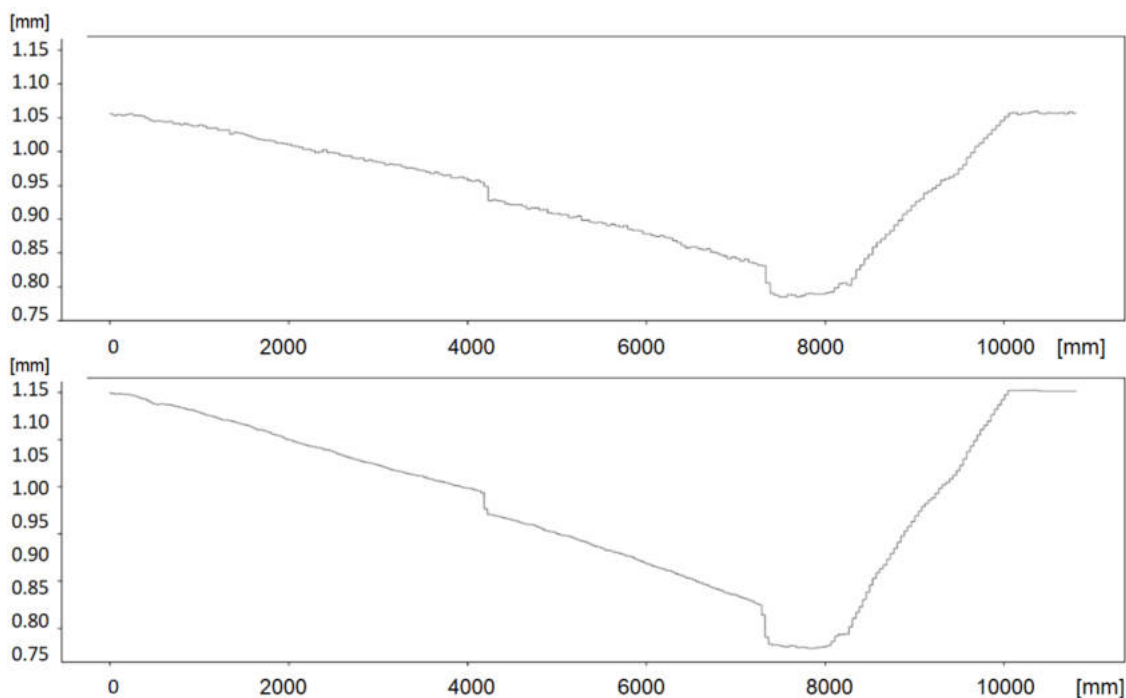
W celu weryfikacji metody pomiarowej przeprowadzono szereg pomiarów dla różnej konfiguracji materiału, w którym wykonywano otwory. Jednym z pierwotnych celów urządzenia było także sprawdzenie możliwości wykrywania nieciągłości w stropie wyrobiska. Nieciągłość materiału w warunkach laboratoryjnych podczas wiercenia symulowano poprzez umieszczenie pomiędzy zasadniczym materiałem płyt styropianowych o różnej grubości. Otwory były wykonywane z wykorzystaniem wiertła o średnicy 22 mm, zamontowanego do wiertarki udarowej o mocy 1800W, pracującej z prędkością 900 obr/min. Przy testowaniu skuteczności pomiaru przemieszczania się wiertła w wierconym materiale użyto dwóch pakietów przekładek (patrz Rysunek 4-3):

- 10 oraz 18 mm,
- 18 oraz 38 mm.



Rysunek 4-3: Pakiet materiału testowego - przykładowa konfiguracja, widok z góry (opracowanie własne)

Na Rysunku 4-4 zaprezentowano wyniki dla dwóch serii pomiarowych. W obu przypadkach pomiar oparty na różnicy w zarejestrowanej odległości, był na tyle precyzyjny, że można zlokalizować miejsce i szacunkową wartość nieciągłości materiału.



Rysunek 4-4: Proces wiercenia dla nieciągłości 19 oraz 38 mm (opracowanie własne)

Po udanych testach laboratoryjnych opracowano głowicę pomiarową do zabudowy na układzie roboczym wozu SWKF, dostosowaną do warunków środowiskowych w wyrobiskach kopalni ZG Lubin. Ostatecznie, pomiary rozwarstwień w stropie wyrobiska zostały zaniechane z powodu ograniczeń organizacyjno-technicznych w warunkach dołowych. Drugi z celów opracowanego urządzenia - detekcja cykli - został zweryfikowany tylko w warunkach dołowych. Ze względu na przyjęte w laboratorium uproszczenia, symulacja cyklicznej pracy kotwiarki byłaby daleka od rzeczywistości.

4.3 Eksperymenty w warunkach dołowych

4.3.1 Eksperymenty w kontrolowanych warunkach dołowych

Eksperymenty "kontrolowane" dotyczyły:

- badań związanych z analizą efektywności układu lock-up,
- monitorowania procesu odstawy przez ładowarki i wozy odstawcze,
- monitorowania procesów wiercenia otworów strzałowych,
- monitorowania procesu degradacji "koronki" wiertniczej,
- monitorowania procesu kotwienia.

Ze względu na realia wynikające z planu produkcji, przy projektowaniu scenariuszy eksperymentów dołowych należało zapewnić możliwość wykonania normy akordowej dla operatora. Innymi słowy, eksperymenty nie mogły być realizowane kosztem zadań produkcyjnych. Bezpośredni udział autora w eksperymentach był ograniczany wspomnianymi względami produkcyjnymi, ale także organizacyjnymi (czas dojazdu na miejsce eksperymentu) i bezpieczeństwa (między innymi osoby postronne nie mogą przebywać w pobliżu maszyny, w strefie niezabudowanego stropu). W celu zapewnienia dostatecznie licznej próbki danych, zaplanowane scenariusze były przekazywane do realizacji wielu operatorom, na przestrzeni od kilku do kilkunastu zmian roboczych.

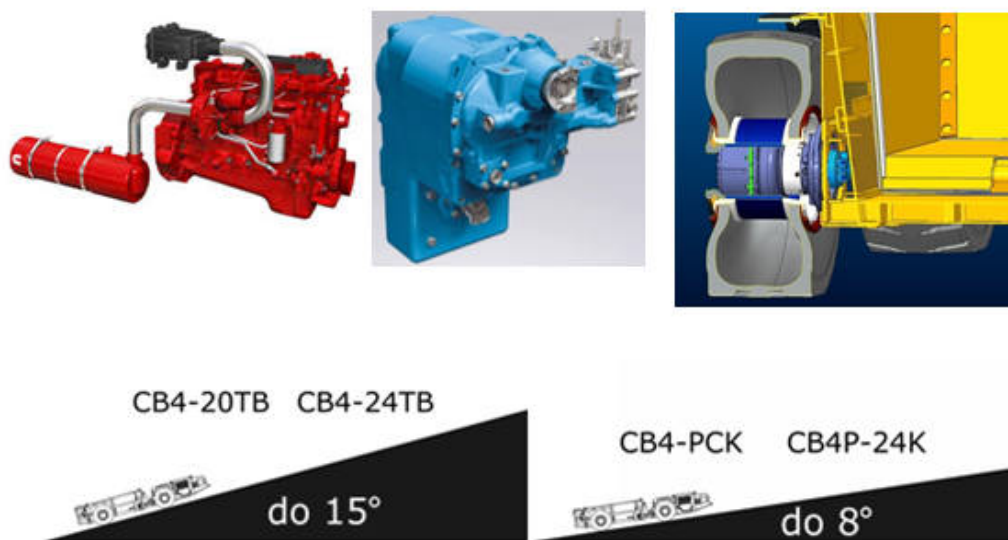
Ze względu na procedury bezpieczeństwa, możliwości bezpośredniego nadzoru nad realizacją scenariuszy badań były ograniczone. W praktyce istotna część pozyskanych próbek musiała być odrzucona ze względu na to, że operator maszyny nie zrealizował ustalonego scenariusza próby.

Eksperymenty dołowe są skarbnicą wiedzy eksploatacyjnej, która pozwala "rozumieć" zarejestrowane sygnały. Eksperymenty te były wielokrotnie powtarzane w różnych rejonach, dla różnych

operatorów, po modernizacjach oprogramowania tudzież układów pomiarowych. Pozyskanie odpowiednich danych do opracowania algorytmów to olbrzymie wyzwanie w warunkach normalnej eksploatacji w kopalni podziemnej.

Badania efektywności blokady sprzęgła lock-up dla wozów do odstawy urobku CB4 20/24 TB produkcji KGHM ZANAM

W kopalniach KGHM Polska Miedź, odstawa oponowa urobku na średnich i długich dystansach (400 - 2000m) realizowana jest przy użyciu wozów odstawczych. Populacja wozów odstawczych bazuje na wozach o pojemności do 25 Mg, produkowanych od ponad 40 lat przez KGHM ZANAM. Najnowszą generacją wozów tej firmy są wozy z serii TB: CB4 20TB i CB4 24TB. Pierwsza maszyna została oddana do użytku w 2014 roku. Układ napędowy wozu CB4-20/24TB jest pod wieloma względami innowacyjny (Rysunek 4-5) i zawiera między innymi: silnik Cummins 149 kW, 950 Nm przy 1500 obr./min - STAGE 3B, przekładnię hydrokinetyczną zintegrowaną ze skrzynią biegów – Dana Spicer HR32000 (pełnonawrotna, przełączalna pod obciążeniem, sterowana elektrycznie), addytywny układ napędowy, wyposażony w silniki hydrauliczne zabudowane w piastach skrzyni ładunkowej (rozdział siły napędowej 70/30 (przód/tył), napęd kół tylnych do 5 km/h, napęd włączany „ręcznie” przez operatora – wyłączany automatycznie po załączeniu drugiego biegu).



Rysunek 4-5: Innowacyjne rozwiązania zastosowane w konstrukcji wozów CB420/24TB (opracowano na podstawie materiałów udostępnionych przez KGHM ZANAM)

W 2017 r. na jednym z wozów przetestowano modyfikację układu przeniesienia napędu, mającą na celu zwiększenie efektywności hamowania silnikiem podczas jazdy po upadach (Rysunek 4-6).

Zastosowano dodatkowe sprzęgło mechaniczne (tzw. lock-up) w konwerterze hydraulicznym, załączane podczas hamowania silnikiem. Testy ruchowe potwierdziły lepszą efektywność hamowania silnikiem. Maszyna testowa nie była wyposażona w monitoring elektroniczny. Analiza artykułów w prasie branżowej, opisujących efekty oszczędności zużycia paliwa przy zastosowaniu blokady lock-up dla nowych modeli ładowarek przegubowych wiodących producentów (Volvo, Caterpillar), zainspirowała autora do przeprowadzenia badań dla wozów CB4 20/24/TB.



Rysunek 4-6: WO CB4 20TB - transport urobku po upadowej (opracowanie własne)

W zakresie realizacji pracy przeprowadzono badania porównawcze dla oszacowania wpływu zastosowania blokady sprzęgła lock-up na parametry eksploatacyjne układu przeniesienia napędu w realnych warunkach pracy. Rozważano następujące parametry:

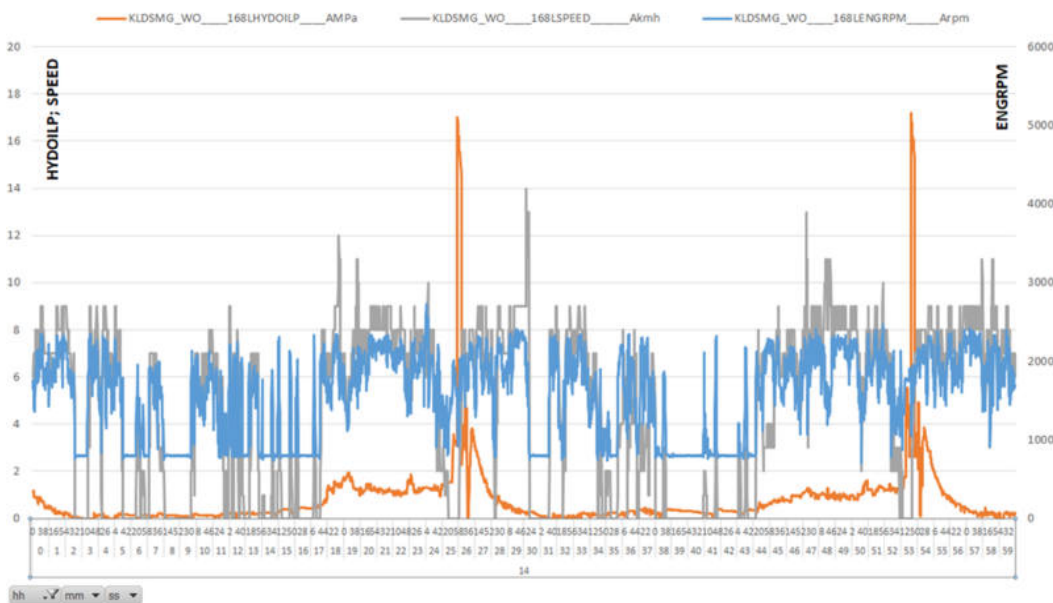
- zużycie paliwa,
- średnia prędkość jazdy transportowej,
- skuteczność hamowania silnikiem (maszyna ma dodatkowy układ wspomagający proces),
- obciążenie układu hamulcowego,
- temperatura oleju w układzie przeniesienia napędu (skrzynia biegów - zmiennik momentu).

Badania zostały przeprowadzone bez zakłócania procesu produkcji wg opracowanego zakresu badań eksperymentalnych. Do badań wybrano wóz odstawczy o numerze kopalnianym WO 168/L, wyposażony w funkcję blokady sprzęgła lock-up, załączaną automatycznie przez sterownik skrzyni biegów dla ustalonych warunków stabilnego obciążenia układu napędowego. Wóz standardowo obsługiwał oddział G7 w rejonie Szybu LW, O/ZG Lubin. Na Rysunku 4-7 zaprezentowano sekwencję operacji dla cyklu pracy maszyn WO, zarejestrowanych podczas wizji lokalnej na dole w kopalni. LK3 ładuje 3 "łyżki" urobku, następnie WO transportuje materiał na oddziałowy punkt rozładunku (tzw. „kratę”) na przenośnik taśmowy.



Rysunek 4-7: Eksperyment dołowy - załadunek na przodku oraz rozładunek wozu odstawczego na kratce (opracowanie własne)

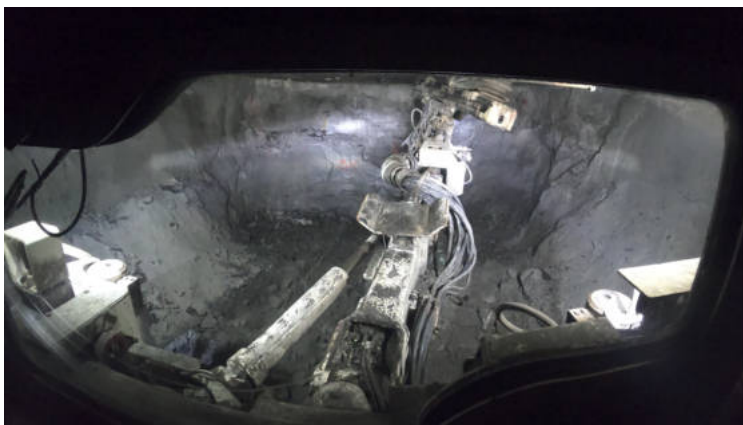
Na Rysunku 4-8 zaprezentowano wykres zbudowany na surowych zmiennych z eksperymentu dołowego. Wybrano zmienne dla sygnału prędkości jazdy (SPEED), ciśnienia w obwodzie hydraulicznym (HYDOILP) mechanizmu wysuwu przegrody skrzyni ładunkowej (tzw. „szufłady”) oraz prędkości obrotowej silnika (ENGRPM).



Rysunek 4-8: Raport dla surowych danych dla pracy wozu odstawczego (opracowanie własne)

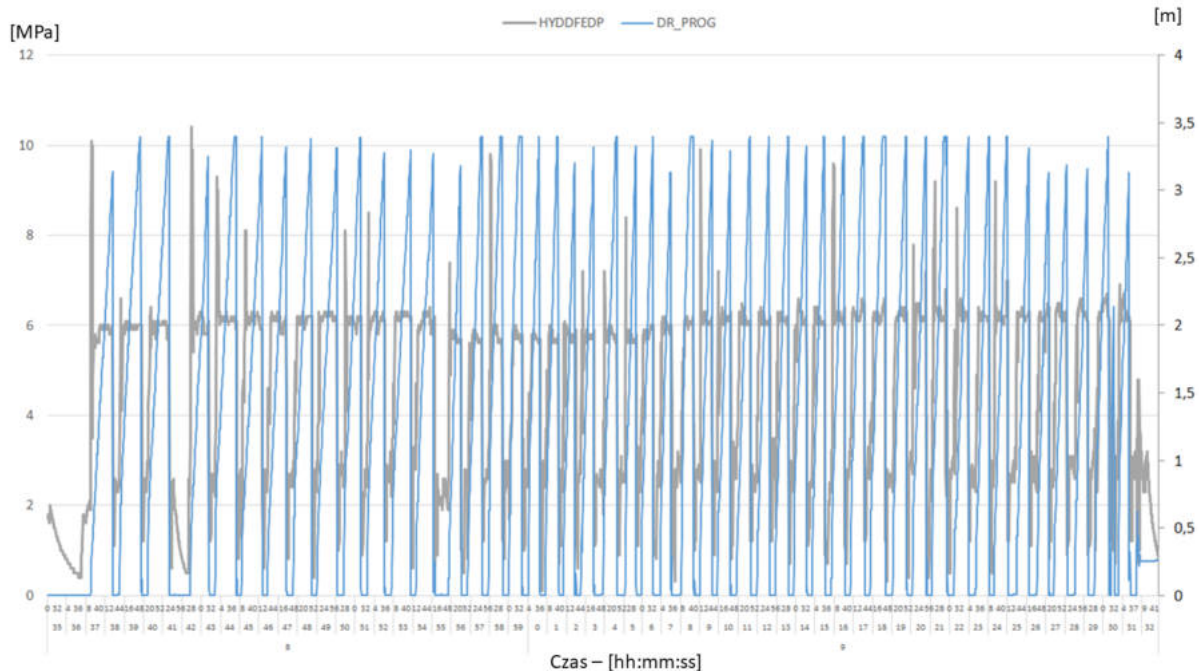
Eksperymenty dotyczące monitorowania wiercenia otworów strzałowych

W większości przypadków badania eksperymentalne miały charakter obserwacji i dokumentacji filmowej pracy maszyn. W tym samym czasie pokładowy system monitoringu rejestrował dane zgodnie ze standardem.

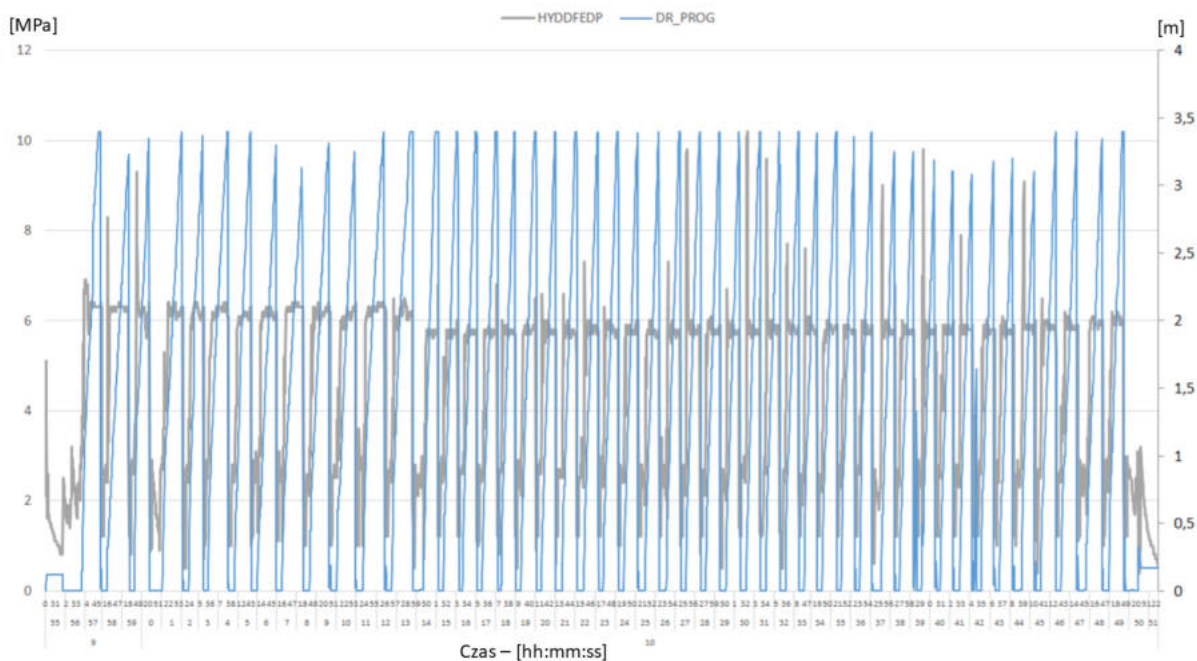


Rysunek 4-9: Eksperyment dołowy 31.05.2022, zmiana 1; SWW 175/L, oddział G6, kopalnia O/ZG Lubin (opracowanie własne)

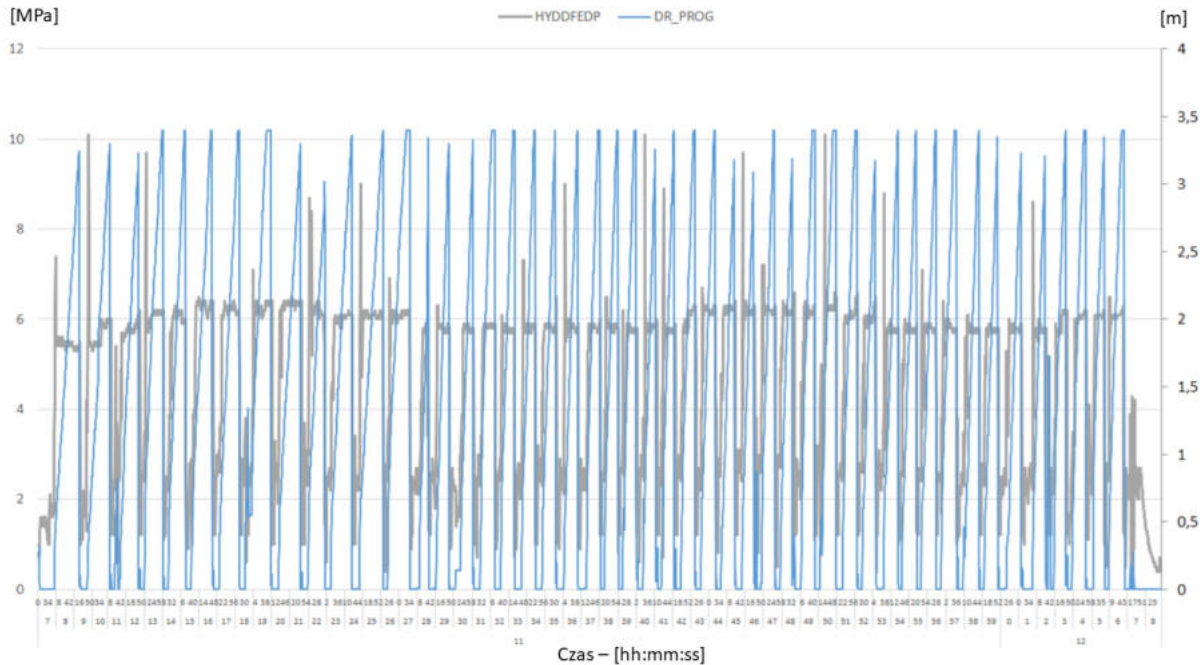
Mimo, że procedura wiercenia otworów jest ustandaryzowana i musi odpowiadać zadanej metryce strzałowej, lokalna sytuacja na przodku (między innymi czynniki geologiczne, geometria przodka - zwłaszcza kształt czoła przodka, umiejętności operatora) silnie oddziałuje na wynik eksperymentu - czyli na zarejestrowane sygnały. Bez umiejętnego powiązania tych czynników, jakiegokolwiek wnioskowanie na początkowym etapie jest bardzo trudne. Spośród mierzonych trzech parametrów ciśnienia w układzie roboczym maszyny SWW, podczas wiercenia operator manualnie reguluje jedynie ciśnienie posuwu narzędzia (zmienna HYDFEEDP). Nominalne poziomy ciśnienie na udarach (zmienna HYDDIMPP) i obrotach (zmienna HYDDRPMP) wiertarki regulowane są podczas okresowej obsługi. Na Rysunku 4-9 pokazano widok maszyny na przodku. Na Rysunkach 4-10, 4-11, 4-12 przedstawiono charakterystyki poziomu ciśnienia dla obserwowanych trzech przykładowych przodków wydobywczych z nałożoną zmienną postępu wiercenia.



Rysunek 4-10: Operacja wiercenia otworów strzałowych, przodek wydobywczy nr 1: ciśnienie posuwu wiertarki z nałożoną zmienną postępu wiercenia. (opracowanie własne)



Rysunek 4-11: Operacja wiercenia otworów strzałowych, przodek wydobywczy nr 2: ciśnienie posuwu wiertarki z nałożoną zmienną postępu wiercenia (opracowanie własne)



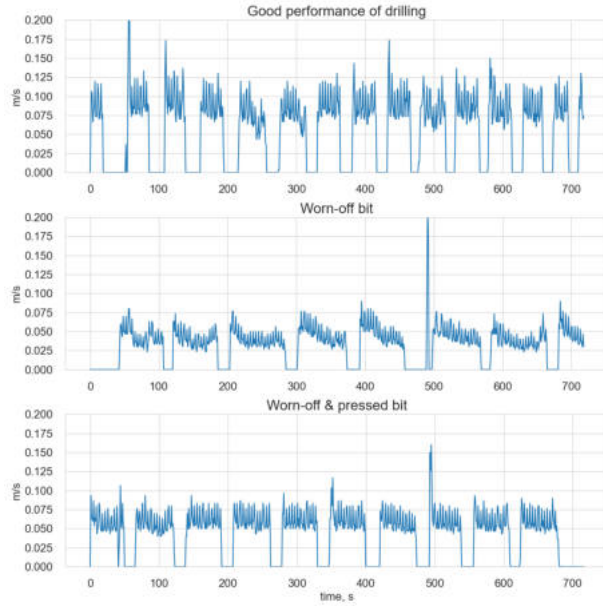
Rysunek 4-12: Operacja wiercenia otworów strzałowych, przodek wydobywczy nr 3: ciśnienie posuwu wiertarki z nałożoną zmienną postępu wiercenia. (opracowanie własne)

Badanie tempa zużycia koronek wiertniczych

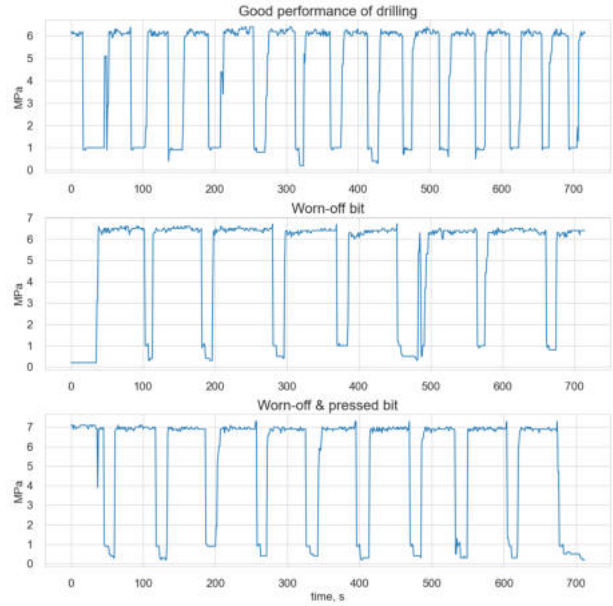
Druga seria eksperymentów związanych z wierceniem dotyczyła próby monitorowania procesu degradacji koronki wiertniczej. KGHM stosuje koronki wiertnicze różnych producentów. Część zużytych narzędzi poddawana jest procesowi regeneracji (ostrzenia), po czym wraca do obiegu. Celem badań było poszukiwanie metody pozwalającej na optymalizację kosztów zużycia narzędzi oraz ustalenie metody oceny stopnia granicznego zużycia koronki wiertniczej, który może pozwolić na jej skuteczną regenerację. Ponadto istotna jest ocena jakości dla narzędzi nowych oraz weryfikacja zasadności regeneracji narzędzi częściowo zużytych. Badania były prowadzone na podstawie danych z rejestratora monitoringu dla wiertnic Face Master z komory C-1C w O/ZG Lubin. O ile zliczanie wywierconych otworów strzałowych może być skomplikowane, rozróżnienie koronki nowej od zużytej lub po regeneracji na podstawie nieprzetworzonych danych z monitoringu jest znacznie większym wyzwaniem. Na Rysunku 4-13 przedstawiono wyniki pomiaru czterech kluczowych w procesie wiercenia sygnałów, dla koronki nowej, zużytej i po regeneracji. Wizualna ocena jest bardzo trudna, zatem istnieje potrzeba opracowania odpowiedniej metody oceny stanu koronki na podstawie zarejestrowanych sygnałów. Dla potrzeb prowadzenia badań zmodyfikowano oprogramowanie kokpitu operatora. Podczas wiercenia operator manualnie sprawdza status koronki:

1. „nowa” - wymiana narzędzia na nowe,
2. „nowa kontynuacja” – kontynuacja pracy nową koronką,
3. „regenerowana” - wymiana narzędzia na zregenerowane,
4. „regenerowana kontynuacja” – kontynuacja pracy zregenerowaną koronką.

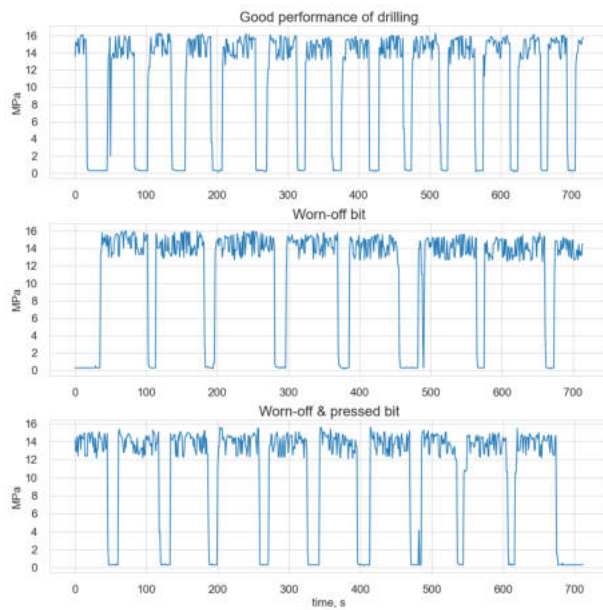
Informacje te stanowią dodatkowy zasób danych w procesie diagnostyki stanu koronki. Na Rysunku 4-14 przedstawiono przykładowe zdjęcia koronki nowej i zużytej.



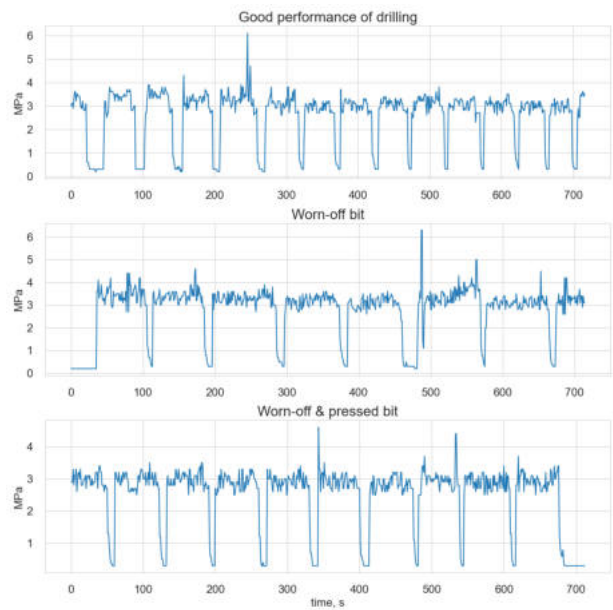
(a) Drilling pace.



(b) Feed pressure.



(c) Percussion pressure.



(d) Rotational pressure.

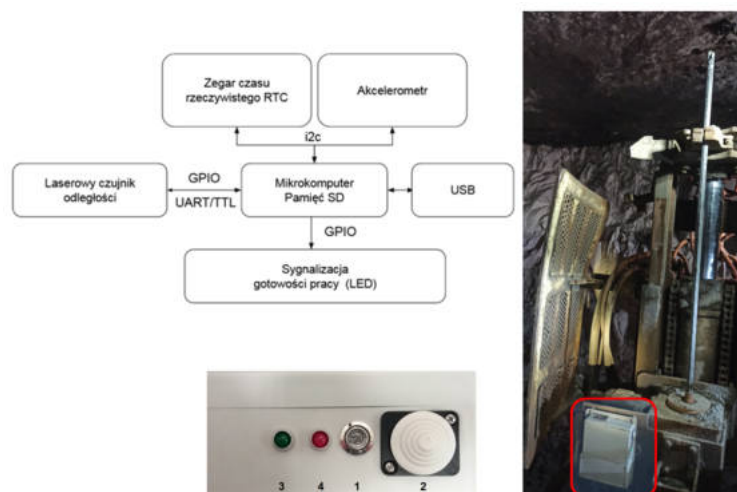
Rysunek 4-13: Prędkości wiercenia oraz sygnały ciśnień dla różnych stanów koronki wiertniczej (opracowanie własne)



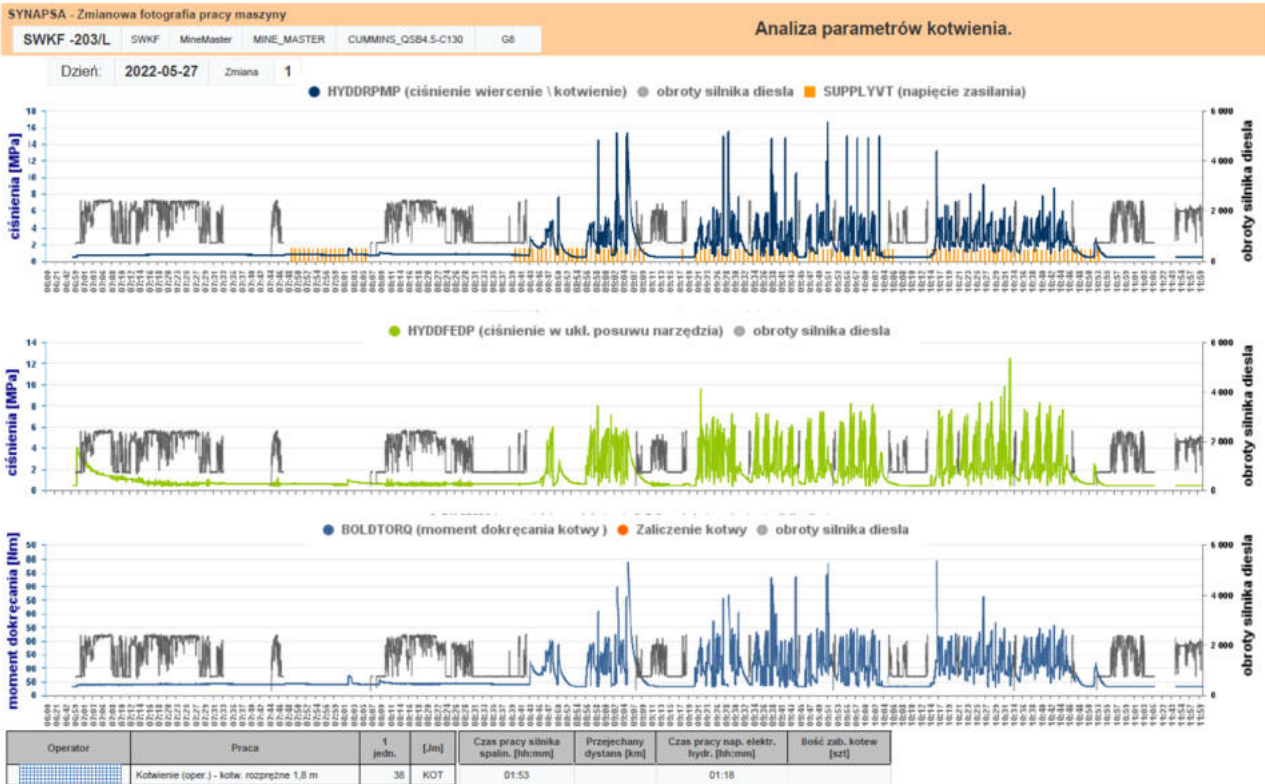
Rysunek 4-14: Koronki wiertnicze: nowa oraz zużyta w stopniu pozwalającym na regenerację (opracowanie własne)

Badanie procesu kotwienia z wykorzystaniem bezdotykowych metod pomiarowych w warunkach dołowych

Na Rysunku 4-15 przedstawiono schemat urządzenia i widok zamontowanego na kotwiarce układu pomiarowego. Pomiar nie ingeruje w pracę operatora. Urządzenie testowano w różnych lokalizacjach kopalni (jednym z pierwotnych celów była analiza możliwości detekcji rozwarstwienia stropu). Na Rysunku 4-16 przedstawiono przykładowy raport uzyskany z systemu monitoringu dla jednej zmiany roboczej.



Rysunek 4-15: Głowica pomiarowa montowana na korpusie wózka posuwu wiertarki hydraulicznej SWKF (opracowanie własne)

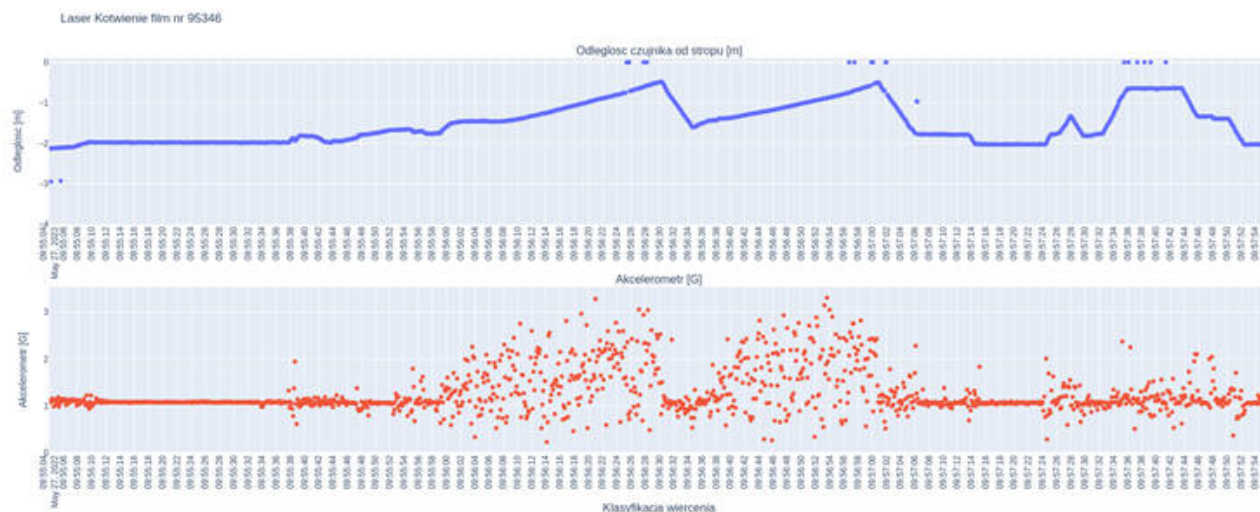


Rysunek 4-16: Pakiet materiału testowego - przykładowa konfiguracja (opracowanie własne)

Rysunek 4-17 przedstawia sygnał zarejestrowany przez urządzenie, obejmujący kilka cykli kotwienia. Rysunek 4-18 przedstawia odczyty z czujnika odległości (tzw. lidara) oraz akcelerometru dla pojedynczego cyklu. Zastosowano dodatkowo akcelerometr, aby łatwiej wyodrębnić ruchy robocze organu kotwiarki.



Rysunek 4-17: Sygnał obejmujący kilka cykli kotwienia (opracowanie własne)

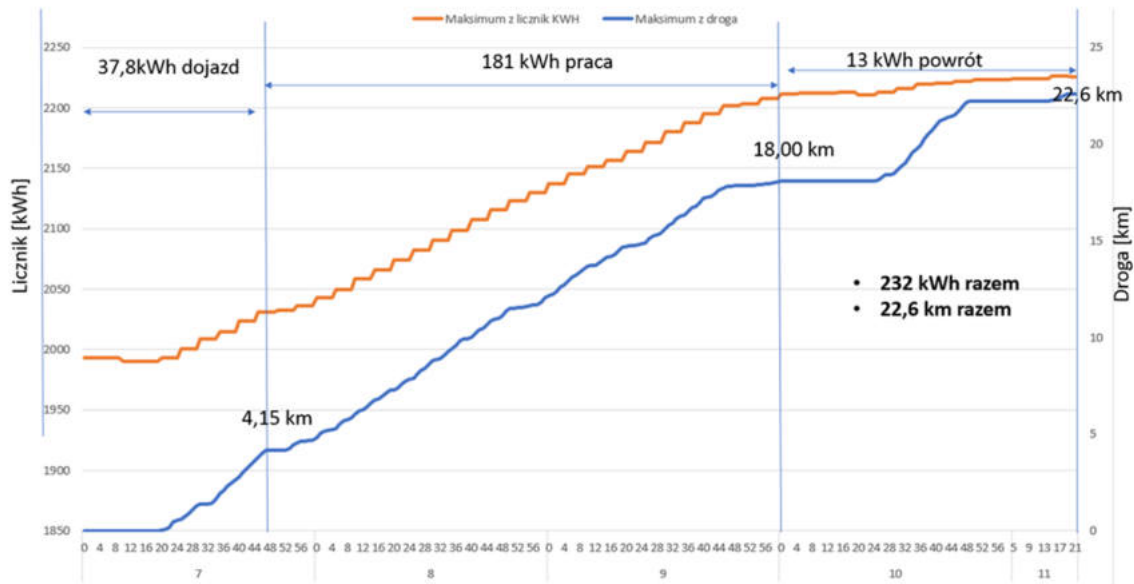


Rysunek 4-18: Pomiary w warunkach dołowych: zabudowa kotwy ekspansywnej 1,6m. Panel górny - pomiar odległości laserem, panel dolny - drgania zarejestrowane w czasie zabudowy kotwy (opracowanie własne)

Eksperyment dołowy - obserwacja pracy ładowarki ST14B w oddziale G7

Od października 2022 r. w O/ZG Rudna prowadzone są testy ładowarki przegubowej Epiroc ST14B z napędem elektrycznym zasilanym bateryjnie. Testy są prowadzone w formule pracy B+R, która z kolei jest elementem międzynarodowego projektu NEXGEN SIMS. W celu przygotowania założeń dla opracowania nowych algorytmów analitycznych dostosowanych do maszyn z napędem elektrycznym zasilanych bateryjnie, autor przeprowadził kilka wizji lokalnych na dole na komorze oddziału C8, gdzie jest obsługiwana maszyna. Zapoznał się z infrastrukturą elektryczną przygotowaną do zasilania stacji ładowania baterii, a następnie zweryfikował możliwość analizowania procesu ładowania na podstawie odczytów parametrów pola zasilającego rozdzielnicę elektrycznej przypisanego do stacji ładowania. Odległość komory obsługowej od przodków eksploatacyjnych wynosi ponad 4 km, maszyna jedzie cały czas pod górę po upadowej o nachyleniu do 15%. W celu weryfikacji zużycia energii na dojazd, pracę w oddziale oraz pokonanie drogi powrotnej, zaplanowano eksperyment dołowy. W dniu 4.12.2022 r. przeprowadzono eksperyment, ładowarka ładowała urobek na wóz WOW TH 550 w oddziale G7. Dla dokumentacji wykorzystano kamerę GoPro przymocowaną do szyby w kabinie operatora. Obiektyw był skierowany w kierunku łyżki. Wykorzystano również możliwość rejestracji dźwięku. Poproszono operatora, żeby na bieżąco komentował wykonywaną pracę. Ułatwiło to przeprowadzenie segmentacji danych po zakończeniu eksperymentu. Dane z eksperymentu zostały wykorzystane przy opracowaniu oraz testowaniu algorytmów analitycznych – procesy ETL hurtowni danych.

Na Rysunku 4-19 przedstawiono wykres na podstawie surowych danych z eksperymentu.



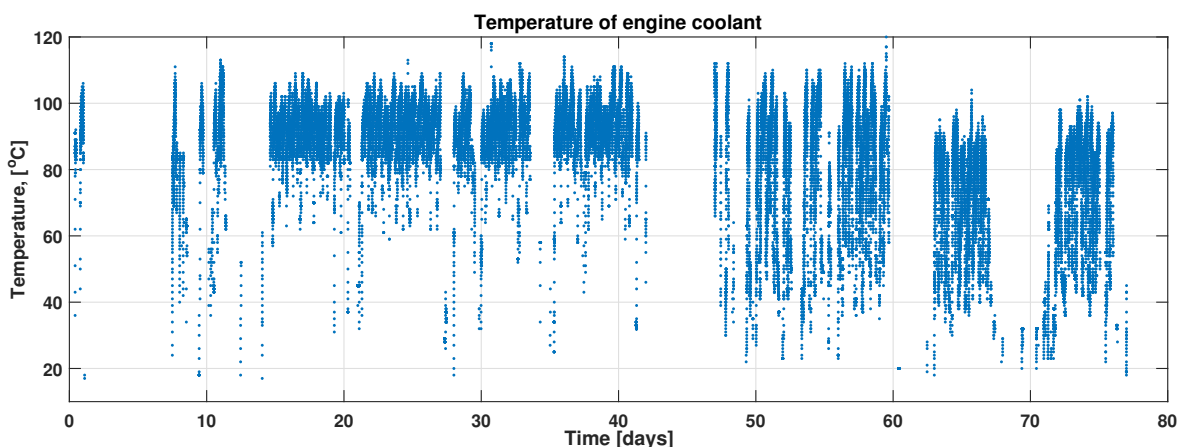
Rysunek 4-19: Dokumentowanie eksperymentu dołowego w dniu 4.12.2022 r. (opracowanie własne)

4.3.2 Eksperymenty długoterminowe

Dane z maszyn dołowych, na których zainstalowano system monitorowania w ramach projektu SYNAPSA, rejestrowane są w trybie ciągłym, jeśli tylko maszyna realizuje proces technologiczny zgodnie z dyspozycjami służb dozoru (tzn. nie jest wyłączona ani w naprawie). Ze względu na wieloletnią już historię użytkowania monitoringu dla maszyn SMG w KGHM, właściwie możliwe jest pozyskanie danych historycznych dla całego życia maszyny. Ze względu na różne czynniki losowe oraz wysoki koszt przechowywania danych historycznych dla maszyn, które już wycofano z eksploatacji, w praktyce skompletowanie danych do wnioskowania na podstawie pozyskanej informacji jest utrudnione. W odróżnieniu od dedykowanych testów realizowanych w czasie zmiany roboczej, testy długoterminowe mogą potwierdzić skuteczność metody lub wskazać jej słabe punkty. Ze względu na badawczo-wdrożeniowy charakter pracy, wyniki badań dla zestawów danych z testów długoterminowych (minimum kilka zmian roboczych) są najbardziej wartościowe.

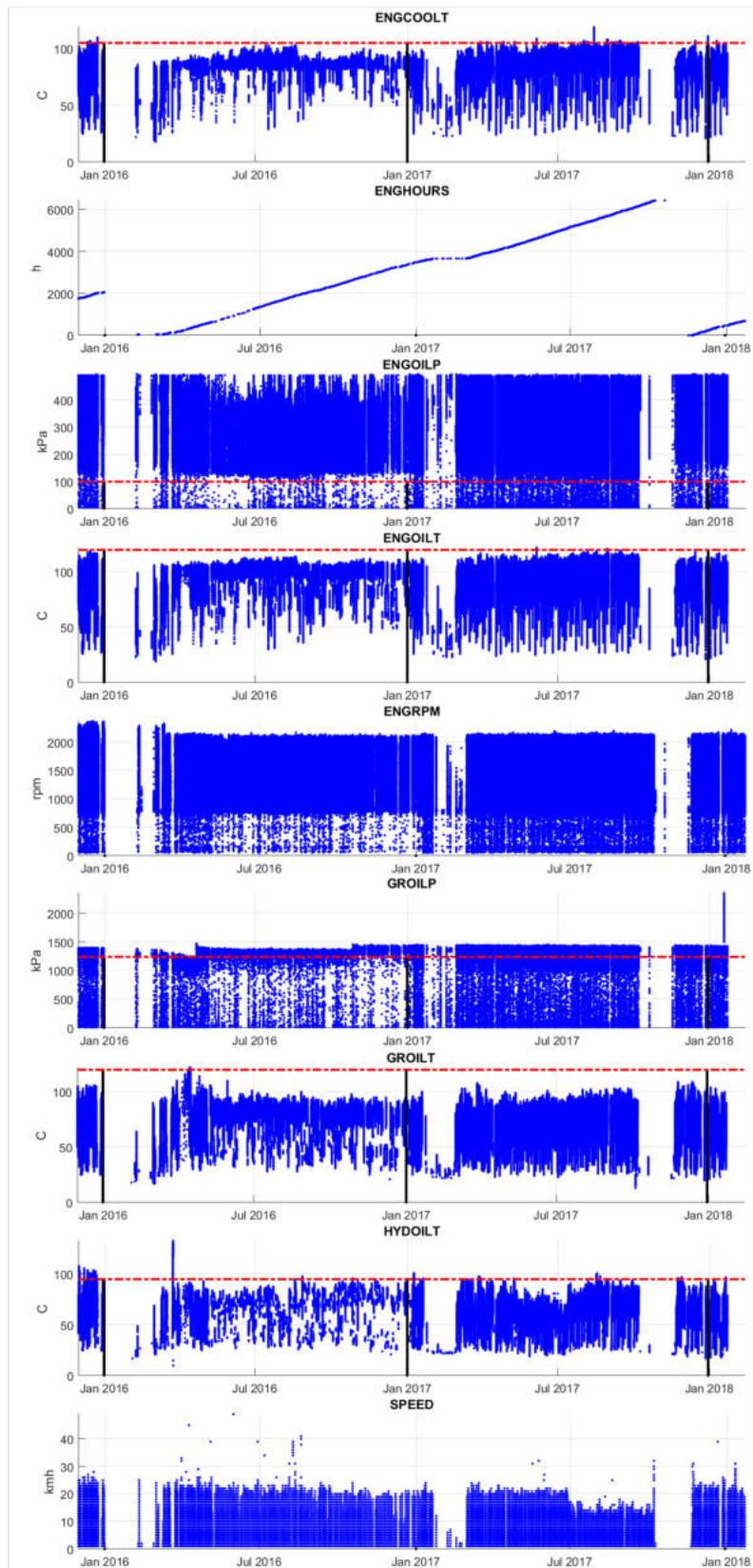
W ramach realizacji badań związanych z rozprawą doktorską przeprowadzono wiele testów długoterminowych w kontekście różnych maszyn (ładowarki, wozy odstawcze, wiertnice, kotwiarki) i w kontekście różnych wyzwań analitycznych (miedzy innymi detekcja cykli, efektywność systemu lock-up, zużycie koronki wiertniczej).

Na Rysunku 4-20 pokazano przykładowy zapis z monitoringu dla zmiennej ENGCOOLT (temperatura płynu chłodzącego silnik).



Rysunek 4-20: Przykłady danych długoterminowych zarejestrowanych przez system - okres obserwacji 80 dni (opracowanie własne)

Na Rysunku 4-21 pokazano przykładowy zapis z monitoringu dla kilku zmiennych, zebrany na przestrzeni dwóch lat. Wykres przedstawia zmienne: ENGCOOLT (temperatura płynu chłodzącego silnik), ENGHOURS (liczba godzin roboczych), ENGOILP (ciśnienie oleju silnika), ENGRPM (obroty silnika), GROILP (ciśnienie oleju przekładni), GROILT (temperatura oleju przekładni), HYDOILT (temperatura oleju w układzie roboczym), SPEED (prędkość jazdy). Jak łatwo zauważyć, charakter zmienności tych danych jest bardzo różny. Warto odnotować, że wczytanie do pamięci komputera biurowego danych obejmujących 2 lata dla choćby jednej zmiennej jest wyzwaniem technicznym, ze względu na zajmowaną pamięć RAM komputera.



Rysunek 4-21: Przykłady danych długoterminowych zarejestrowanych przez system - okres obserwacji 2 lata (opracowanie własne)

4.4 Pozyskanie i przygotowanie zestawów danych z systemu monitoringu pod kątem długoterminowej analizy wybranych parametrów

"Surowe" dane pozyskane z pokładowego systemu monitorowania wymagają bardzo często walidacji i odpowiedniego przetwarzania wstępnego [61]. Instalacja monitoringu (głównie czujników) narażona jest podczas pracy na uszkodzenia mechaniczne. Po każdej zmianie maszyny są myte z błota wodą z rurociągów technologicznych, która często ma wysoki stopień zasolenia, co przyspiesza tempo degradacji. W praktyce brak akwizycji zmiennych lub nieprawidłowe odczyty mogą być spowodowane:

- awarią czujnika,
- problemem z okablowaniem instalacji (utlenione złącza czujników, zerwane lub zwarte przewody),
- problemem z mocowaniem mechanicznym czujnika, dotyczy to w szczególności czujników indukcyjnych oraz czujników montowanych wewnątrz opon,
- zanieczyszczeniem czujnika – pył, błoto,
- problemami z oprogramowaniem rejestratora; zdarzają się przypadki, kiedy rejestrator gubi pojedyncze odczyty dla ramek zmiennych odczytywanych z magistrali CAN; czasami ujawnia się również problem z synchronizacją czasu.

Monitorowane procesy są dość złożone. Jak już wspomniano, interpretacja danych i zbudowanie wiedzy do opisu procesów wymaga często nakreślenia pewnego kontekstu. W praktyce sprowadza się to do wyodrębnienia odpowiednich danych z różnych źródeł (z różnych systemów IT wykorzystywanych w przedsiębiorstwie). Dla potrzeb realizacji zakresu badań zastosowano dwie procedury:

- przygotowanie raportów analitycznych w hurtowni danych SAP BusinessObjects dla obszaru informacyjnego SYNAPSA. Metoda ta jest zdecydowanie łatwiejsza w implementacji, pod warunkiem, że w modelu informacyjnych hurtowni danych są już udostępnione wskaźniki i wymiary dla potrzeb konkretnej analizy;
- procedura bazująca na przetwarzaniu surowych danych z bazy Wonderware Historian oraz danych komplementarnych z innych źródeł dla uzyskania wymaganego kontekstu (uwarunkowania eksploatacyjne) analiz. Podejście to zwykle jest wykorzystywane do analiz ad hoc i testowania prototypowych algorytmów.

4.4.1 Przygotowanie surowych próbek danych do właściwych badań

Przed wykonaniem nawet wstępnych przeliczeń, dane muszą być zwalidowane (Rysunek 4-22). Ze względu na skalę problemu, walidacja musi być automatyczna, a jej wyniki dostępne w postaci raportów, jak pokazano na Rysunku 4-23.

Etykiety wierszy	Maksimum z val	Średnia z val	Minimum z val	Liczba z val
KRDSMG_LK3_518RBREAKP_AkPa	15500	14 186,01	0	10069
KRDSMG_LK3_518RENGCOOLT_A_C	89	84,80	38	672
KRDSMG_LK3_518RENGHOURS_A_h	19	17,91	17	11
KRDSMG_LK3_518RENGOILP_AkPa	667	507,70	360	2014
KRDSMG_LK3_518RENGOILT_A_C	83	75,67	30	672
KRDSMG_LK3_518RENGRPM_Arpm	2418	1 677,06	808	10069
KRDSMG_LK3_518RENGTPS_A_%	100	49,53	0	10069
KRDSMG_LK3_518RFUELUS_Al_h	55	23,87	0	10069
KRDSMG_LK3_518RGROILP_AkPa	2280	2 104,60	0	10069
KRDSMG_LK3_518RGROILT_A_C	56	43,90	21	672
KRDSMG_LK3_518RHYDOILP_AMPa	21,39	7,62	0	10069
KRDSMG_LK3_518RHYDOILT_A_C	41	29,55	17	672
KRDSMG_LK3_518RINTAKEP_AkPa	318	218,55	104	2014
KRDSMG_LK3_518RINTAKET_A_C	40	27,91	20	672
KRDSMG_LK3_518RSELGEAR_A/_	4	0,74	-4	10068
KRDSMG_LK3_518RSPEED_Akmh	16	6,26	0	10069
KRDSMG_LK3_518RTEMPIN_A_C	21	19,38	13	672

Rysunek 4-22: Układ tabeli przestawnej do wstępnej weryfikacji poprawności i kompletności dla próbki danych z monitoringu (opracowanie własne)

SYNAPSA - raport kontrolny - maksymalne ciśnienie układu roboczego - parametr HYDOILP (MPa)

■ - brak danych dot. parametru ■ - Maszyna nie pracowała

ZG Lubin

Komora	Producent	Maszyna	Dost. nrj.	23-05-09	23-05-08	23-05-07	23-05-06	23-05-05	23-05-04	23-05-03	23-05-02	23-05-01	23-04-30	23-04-29	23-04-28	23-04-27	23-04-26	23-04-25	
				(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
C - 1B	ZANAM	LK2 -001L	ZANAM																
	ZANAM	LK3 -048L	ZANAM	17															
	ZANAM	LK3 -050L	ZANAM																
	ZANAM	LK3 -062L	ZANAM	25	24		22	24	24	23	24	24		23	24	24	22	24	
	ZANAM	LK3 -063L	ZANAM	25	25		25	25	25	25	25	25			25	23	24	25	
	MineMaster	SWKF -201L	MINE_MASTER																
	AtlasCopco	SWW -192L	SOMAR		20		20	20	20	27	20	20		20	20	20	20	20	
	AtlasCopco	SWW -194L	SOMAR		20	27		20	27		27	20			20	20	27	20	20
	AtlasCopco	SWWD -193L	SOMAR						24	27	25	26		24	34	27	26	25	
	MineMaster	SWKA -205L	MINE_MASTER				20		20	20	21	4		20	20	21	20	21	
C - 1C	MineMaster	SWKA -500L	MINE_MASTER		0			18	17		17					18	19	18	17
	MineMaster	SWKF -203L	MINE_MASTER	0	0		17	17	17	17	18	18		17	17	18	18	18	
	MineMaster	SWKP -204L	MINE_MASTER						0		0				0	0	0	0	
	MineMaster	SWW -176L	MINE_MASTER														18		
	MineMaster	SWW -177L	MINE_MASTER	20	20		20	20	20	20	20	20		20	20	20	20	20	
	MineMaster	SWW -181L	MINE_MASTER	12	21		21	22	22	21	21	22	19	22	21	22	21	22	
	MineMaster	SWW -182L	MINE_MASTER		22		23	22	22	23	23	22	19	23	22	22	23	23	
	MineMaster	SWW -186L	MINE_MASTER																
	MineMaster	SWW -187L	MINE_MASTER	20	20				20	20	20	20			20	20	20	20	
	MineMaster	SWW -501L	MINE_MASTER									0				1	1	1	1
C - 2C	ZANAM	LK3 -046L	ZANAM					0	0	0	0								
	ZANAM	LK3 -047L	ZANAM	0	0				0	0	0				0	0	0	0	
	Sandvik	LK4 -063L	ENTE	35	34		35	37		36	36	35	17	35	35	35	36	35	
	Sandvik	LK4 -064L	ENTE	25	35			35	35			36	35			37	35	35	35
	Sandvik	LK4 -066L	ENTE	35	35			35	35			37				35	35	35	35
	Sandvik	LK4 -067L	ENTE																
	Sandvik	LK4 -068L	ENTE	35	35	20		35	35	37					10				
Sandvik	LK4 -072L	ENTE	34	36	20	35	34	34	34	34					35	36	35	34	

Rysunek 4-23: Przykład raportu WEBI z walidacji danych (opracowanie własne)

Przetwarzanie wszystkich danych równoległe jest nieuzasadnione. Funkcjonalności bazy danych umożliwiają wyselekcjonowanie odpowiednich zmiennych w odpowiednich przedziałach czasowych (konkretna zmiana lub godzina, patrz Rysunek 4-24). Ma to duże znaczenie na etapie wczesnego prototypowania algorytmów, które zwykle realizowane są poza środowiskiem bazodanowym posiadanym przez KGHM. Oprogramowanie to posiada również możliwość eksportu danych w postaci tabelarycznej (Rysunek 4-25). Dane te najczęściej były przetwarzane w środowisku MATLAB lub Python.

The screenshot displays the Wonderware Historian interface. At the top, it shows the query type as 'Wartości historyczne', the server as 'OPXPSW01', and the database as 'Runtime'. The main window is divided into several sections:

- Przeglądarka zmiennych (Variable Browser):** Lists various variables under the 'Zmienne' tab, such as 'KLDMSG_LK4_70LBREAKP_AkPa', 'KLDMSG_LK4_70LENGCOOLT_A_C', etc.
- Kolumny (Columns):** Shows a table with columns for 'Czas' (Time), 'Formatowanie' (Formatting), 'Kryteria' (Criteria), 'Odczyt' (Read), 'Źródło' (Source), and 'Sortowanie' (Sorting). It includes a time range selector and a table of data points.
- Wyniki (Results):** Displays the SQL query and its results. The query is:


```

      SET QUOTED_IDENTIFIER OFF
      SELECT * FROM OPENQUERY(INSQL, "SELECT DateTime = convert(nvarchar, DateTime, 21),
      [KLDMSG_LK4_70LBREAKP_AkPa], [KLDMSG_LK4_70LENGRPM_Arpm],
      [KLDMSG_LK4_70LENGTSPS_A_%], [KLDMSG_LK4_70LFUELUS_Al_h],
      [KLDMSG_LK4_70LSELGEAR_A_/], [KLDMSG_LK4_70LSPEED_Akmh]
      FROM WideHistory
      WHERE wwRetrievalMode = 'Cyclic'
      AND wwResolution = 1000
      AND wwVersion = 'Latest'
      AND DateTime >= '20230314 07:00:00.000'
      AND DateTime <= '20230314 12:00:00.000'")
      
```

Rysunek 4-24: Przykład zapytania SQL przygotowanego przy użyciu interfejsu graficznego bazy Wonderware Historian (opracowanie własne)

Wyniki							
SQL	Dane						
DateTime	KLDSMG_LK4_70LBREAKP_AkPa	KLDSMG_LK4_70LENGRPM_Arpm	KLDSMG_LK4_70LENGTPS_A_%	KLDSMG_LK4_70LFUELUS_AI_h	KLDSMG_LK4_70LSELENGRPM_Arpm	KLDSMG_LK4_70LSELENGTPS_A_%	KLDSMG_LK4_70LSELENGTPS_A_%
2023-03-14 09:20:12.000	4970	701	0	7			1
2023-03-14 09:20:13.000	3650	706	0	7			0
2023-03-14 09:21:24.000	1580	674	0	7			-1
2023-03-14 09:21:53.000	10490	1274	37	7			-3
2023-03-14 09:23:57.000	10890	1350	43	7			-2
2023-03-14 09:24:51.000	7400	1115	30	7			2
2023-03-14 09:25:00.000	840	881	11	7			2
2023-03-14 09:25:26.000	4180	779	2	7			1
2023-03-14 09:28:52.000	10940	1582	48	7			-2
2023-03-14 09:33:52.000	10890	1221	34	7			-2
2023-03-14 09:34:04.000	10920	1290	33	7			-2
2023-03-14 09:35:07.000	8360	1224	34	7			2
2023-03-14 09:35:27.000	5200	695	0	7			2
2023-03-14 09:36:07.000	3730	687	0	7			2
2023-03-14 09:36:48.000	4690	692	0	7			-1
2023-03-14 09:37:12.000	5370	850	9	7			2
2023-03-14 09:46:55.000	10820	1294	40	7			-2
2023-03-14 09:47:05.000	10890	1728	63	7			-3
2023-03-14 09:47:21.000	8460	927	20	7			-3
2023-03-14 09:48:32.000	10940	1404	43	7			-2
2023-03-14 09:48:40.000	10940	1207	34	7			-2
2023-03-14 09:48:50.000	10940	1408	42	7			-2
2023-03-14 09:48:53.000	10940	1471	46	7			-2
2023-03-14 09:50:34.000	8460	1213	32	7			2
2023-03-14 09:51:43.000	10890	1041	17	7			-2
2023-03-14 09:54:56.000	8970	682	0	7			-3
2023-03-14 09:54:57.000	7830	695	0	7			0
2023-03-14 10:03:40.000	10940	1111	37	7			-3
2023-03-14 10:04:17.000	10770	1555	52	7			-2
2023-03-14 10:04:59.000	10890	1293	40	7			-2

Rysunek 4-25: Układ tabeli do eksportu danych w formacie CSV (opracowanie własne)

Jak już wspomniano, dane pozyskane z maszyny próbkowane są nawet co 1 s. Prowadzenie analiz bezpośrednio na „surowych” danych może mocno obciążać zasoby IT. W związku z tym, do analiz dla szerszego horyzontu czasowego operujemy statystykami obliczonymi dla każdej pojedynczej maszynozmiany. Ten poziom agregacji informacji pozwala na wykorzystanie możliwości fuzji danych z innymi systemami źródłowymi:

- dane z monitoringu: statystyki dla monitorowanych zmiennych, obliczane dla każdej maszynozmiany w produkcji,
- dane z monitoringu: odczyty błędów sterowników cyfrowych,
- dane z modułu HR TM – opisujące kontekst pracy maszyny,
- dane z tabeli warunków geologicznych: temperatura, mikroklimat, jakość dróg,
- dane o awariach maszyny: CMMS, eRaport, „Rejestr zdarzeń na maszynie”.

Rozdział 5

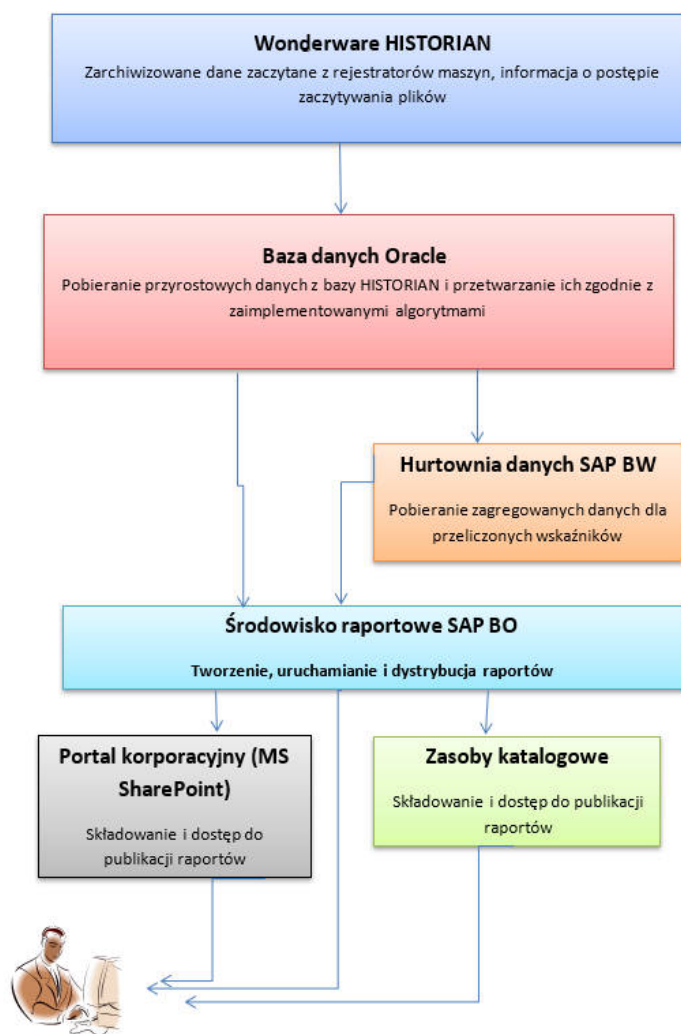
Metody analityczne i wyniki badań

Maszyny górnicze wraz z obsługą operatorską i zapleczem serwisowym to jeden z najdroższych zasobów wykorzystywanych w procesie wydobywania rud miedzi w KGHM. Koszty gospodarki maszynami górniczymi stanowią około 30% TKW (techniczny koszt wytworzenia) kopalni. W rozprawie przedstawione zostaną wybrane elementy prac badawczo-rozwojowych, jakie zrealizowane zostały ze znaczącym udziałem autora.

Pierwszym rozważanym przypadkiem będzie metoda oceny efektywności stosowania systemu lock-up w wozach odstawczych. Następnie zaprezentowane zostaną przykłady analiz dotyczących monitorowania procesów technologicznych: wiercenia, odstawy urobku na punkt wysypowy ładowarkami i wozami odstawczymi oraz zabezpieczenia stropu poprzez obudowę kotwową. Trzecią grupą analiz będą metody przetwarzania danych na potrzeby oceny stanu technicznego układów roboczych lub ich elementów na podstawie ciśnienia, temperatury oleju w danym układzie i wreszcie na podstawie fluktuacji chwilowej prędkości obrotowej wału. Ostatni element rozważań dotyczy zagadnień związanych z inżynierią informacji. Opisuje koncepcję zastosowania narzędzi tzw. "text miningu" do eksploracji danych zapisywanych w polach tekstowych formularzy elektronicznych systemów eRaport oraz CMMS w celu opracowania rejestru zdarzeń eksploatacyjnych dla każdej maszyny, zawierającego pełną historię stwierdzonych usterek, oraz zakres przeprowadzonych napraw. Wszystkie wymienione zadania analityczne, mimo że są powiązane z różnymi układami maszyny, a także są opisywane przez różne zmienne o różnej dynamice, mają jedną wspólną bazę. **Aby osiągnąć zamierzone cele, należy odpowiednio przygotowane dane analizować wielowymiarowo, z uwzględnieniem kontekstów rozumianych jako: rodzaj maszyny, rodzaj wykonywanej pracy, miejsce pracy, operator itd.**

5.0.1 Wielowymiarowe analizy danych w środowisku hurtowni danych

Znaczenie kontekstu, efekt synergii możliwy dzięki fuzji danych różnych typów z różnych systemów IT oraz potrzeba unifikacji poziomu agregacji danych poprzez proste analizy statystyczne zostały podkreślone w poprzednich rozdziałach. Na Rysunku 5-1 przedstawiono ogólny schemat procedury przetwarzania danych z maszyny. W pierwszym etapie dane transmitowane z maszyn są konsolidowane w przemysłowej bazie danych Wonderware Historian (baza dedykowana jako repozytorium danych procesowych). Następnie zakres danych dla bufora czasowego procesów przetwarzania (standardowo ostatnie 10 dni) jest przetwarzany w bazie danych Oracle. Integracja bazy danych Oracle ze środowiskiem hurtowni danych SAP BW jest podstawą do opracowania raportów i ich dalszego udostępniania.



Rysunek 5-1: Przygotowanie raportów analitycznych w hurtowni danych SAP BusinessObjects dla obszaru informacyjnego SYNAPSA (źródło: dokumentacja projektu SYNAPSA)

5.1 Analiza efektywności pracy maszyny ze sprzęgłem lock-up

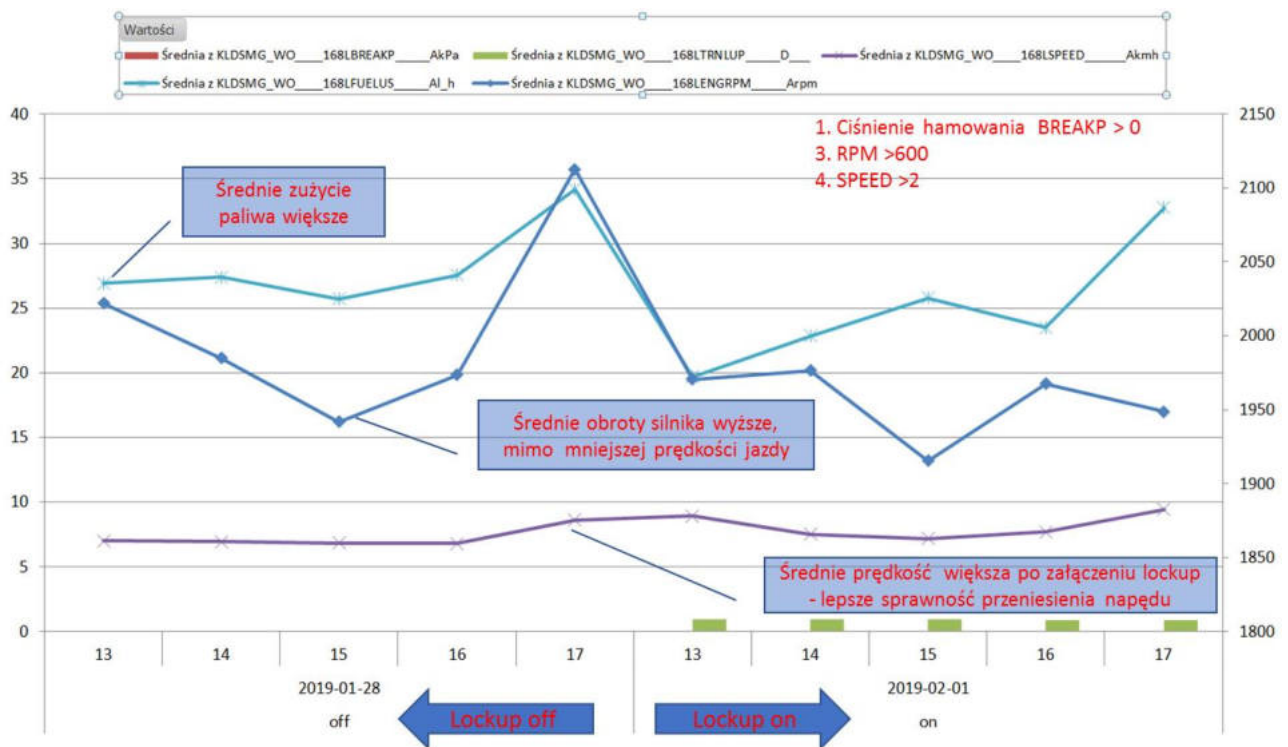
Istnieje wiele innowacyjnych rozwiązań w obszarze górnictwa podziemnego, ale często są to rozwiązania dedykowane. Jest całkowicie naturalne, że rozwiązanie z powodzeniem sprawdzające się w kopalni A, nie sprawdzi się w kopalni B, z uwagi na złożoność procesów i szereg uregulowań specyficznych dla danej kopalni. Nowatorskie rozwiązanie dotyczące systemu lock-up wzbudzało pewne kontrowersje na etapie testowania, wskutek czego narodziła się potrzeba opracowania metody analitycznej, która pozwoliłaby jednoznacznie wykazać zalety systemu lock-up w warunkach kopalni KGHM. Do zbudowania metody wykorzystano fużę danych z monitoringu SYNAPSA oraz ewidencji pracy operatora maszyny w module HR-TM SAP dla odpowiadających sobie zmian roboczych. Eksperyment był prowadzony w okresie dwóch tygodni. Najpierw zebrano próbkę danych dla maszyny z aktywną funkcją autolock-up. Następnie, w celu zebrania próbki porównawczej, funkcja autolock-up została zablokowana w oprogramowaniu sterownika skrzyni biegów. Przeprowadzono odpowiednią selekcję próbek danych dla zapewnienia porównywalności warunków pracy maszyny. Na podstawie danych z ewidencji pracy operatorów w module HR-TM systemu SAP, zostały wybrane podobne segmenty danych bazując na kryteriach:

- oddział zlecający pracę,
- miejsce pracy,
- rodzaj wykonywanej pracy,
- długość drogi odstawy urobku.

Wstępna analiza danych z eksperymentu potwierdziła założenia teoretyczne odnośnie możliwych do uzyskania efektów. Na Rysunku 5-2 przedstawiono wskaźniki prędkości jazdy maszyny, zużycia paliwa oraz obrotów silnika dla dwóch zmian roboczych w porównywalnych warunkach pracy. Wartości wymienionych wskaźników zostały uśrednione godzinowo. W dniu 28 stycznia maszyna miała wyłączony lock-up, a w dniu 2 lutego - załączony. Jeśli porównamy wartości wskaźników dla odpowiadających sobie godzin, to przy wyłączonym lock-up:

- wskaźnik zużycia paliwa jest wyższy,
- wskaźnik obrotów silnika jest wyższy,
- średnia prędkość jazdy jest niższa.

Wyniki potwierdzają, że występują uślizgi na przekładni hydrokinetycznej. Aktywacja blokady mechanicznej lock-up, załączanej dla ustabilizowanego zakresu obciążenia, eliminuje ten czynnik.

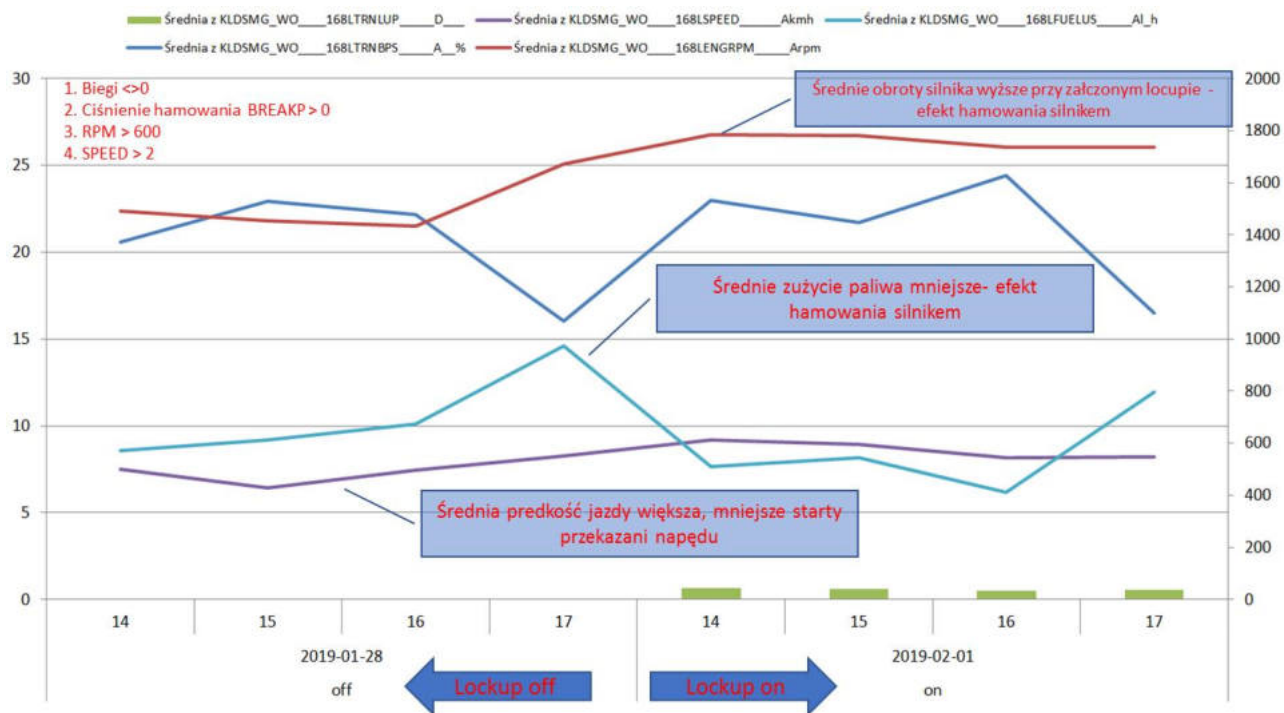


Rysunek 5-2: Wpływ lock-up na efektywność przeniesienia napędu (opracowanie własne)

Na Rysunku 5-3 przedstawiono analogiczny wykres zmiennych dla fazy hamowania, zastosowano dodatkowe warunki:

- bieg ≤ 0 ,
- ciśnienie hamowania > 0 [MPa],
- obroty silnika > 600 [RPM],
- prędkość jazdy > 2 [km/h],

Zgodnie z oczekiwaniami, przy aktywnym lock-up skuteczność hamowania silnikiem jest wyraźnie większa. Brak uślizgu na przekładni hydrokinetycznej powoduje, że przy hamowaniu silnik osiąga wyższe obroty RPM (ca.1800 vs ca.1500), przy czym zużycie paliwa jest mniejsze (przy hamowaniu sterownik cyfrowy ogranicza dawkę wtryskiwanego paliwa).



Rysunek 5-3: Wpływ lock-up na efektywność hamowania silnikiem. (opracowanie własne)

Wskaźniki do analizy efektywności pracy maszyny z sprzęgłem lock-up

Obliczanie podstawowych wskaźników eksploatacyjnych dla każdej zmiany roboczej jest realizowane na podstawie danych z monitoringu:

$$RPM_{\text{engine_op}}(t); \left[\frac{\text{obr.}}{\text{min}} \right]$$

obroty silnika - zmienna RPM, rejestracja w pliku .csv z częstotliwością 1Hz;

$$L_{\text{avg}}(t); \left[\frac{\text{dm}^3}{\text{h}} \right]$$

średnie zużycie paliwa obliczane przez sterownik silnika - zmienna FULEUS, rejestracja w pliku .csv z częstotliwością 1Hz;

$$V_{\text{avg}}(t); \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$$

średnia prędkość maszyny - zmienna SPEED, rejestracja w pliku .csv z częstotliwością 1Hz;

$$Temp_{\text{oil}}(t); \left[^\circ\text{C} \right]$$

średnia temperatura oleju przekładniowego - zmienna GROILP, rejestracja w pliku .csv z częstotliwością co 15 sekund;

$$B_{\text{avg}}(t); \quad [\text{MPa}]$$

średnie ciśnienie hamowania (hamulce negatywne, tzw. POSI STOP) - zmienna BRAKEP, rejestracja w pliku .csv z częstotliwością co 15 sekund.

Podstawowe wskaźniki eksploatacyjne:

$$T_{\text{engine_op}}(t) = \frac{\text{Count RPM}}{3600}; \quad [\text{h}]$$

czas pracy silnika – obliczany na podstawie zmiennej RPM, zliczamy liczbę odczytów dla RPM>300;

$$S_{\text{total}}(t) = \frac{\sum V_i}{3600}; \quad [\text{km}]$$

droga pokonana przez maszynę;

$$Z_{\text{total}}(t) = \frac{\sum L_i}{3600}; \quad [\text{dm}^3]$$

zużycie paliwa ogółem;

$$Z_{\text{moving}}(t) = \frac{\sum_{V_i > 0} L_i}{3600}; \quad [\text{dm}^3]$$

zużycie paliwa podczas jazdy maszyny - wskaźnik pomocniczy, opracowany w celu oszacowania efektu netto z tytułu aktywowania lock-up (eliminacja wpływu zużycia paliwa przy pracy silnika na postoju).

Obliczanie wskaźników efektywności eksploatacyjnej, dla każdej zmiany roboczej:

Obliczenia odpowiednich wskaźników zostały zaimplementowane przy zastosowaniu funkcji tabeli przestawnych w środowisku arkusza kalkulacyjnego MS Excel.

$$Z_{\text{jedn_total}}(s) = \frac{Z_{\text{total}}}{S_{\text{total}}}; \quad \left[\frac{\text{dm}^3}{\text{km}} \right]$$

zużycie jednostkowe paliwa na 1 km jazdy;

$$Z_{\text{jedn_moving}}(s) = \frac{Z_{\text{moving}}}{S_{\text{moving}}}; \quad \left[\frac{\text{dm}^3}{\text{km}} \right]$$

zużycie jednostkowe paliwa na 1 km jazdy, bez postoju maszyny - warunek $V > 0$;

$$Z_{jedn_total}(t) = \frac{Z_{total}}{T_{engine_op}}; \left[\frac{dm^3}{h} \right]$$

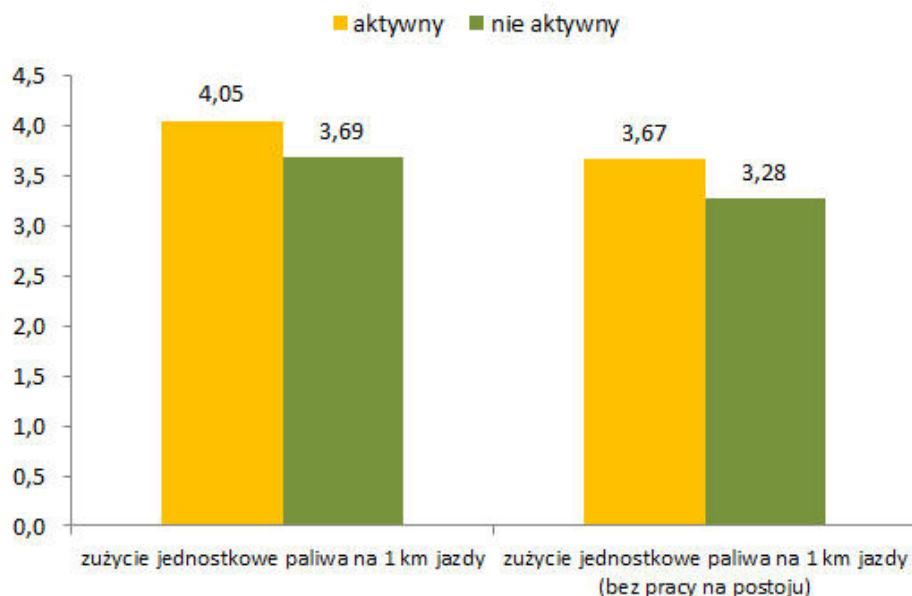
zużycie jednostkowe paliwa na 1 godzinę pracy silnika;

$$Temp_{avg} = \frac{\sum_{RPM_{engine_op_i} > 0} Temp_i}{Count_{RPM_{engine_op} > 0}}$$

średnia temperatura oleju hydraulicznego w obwodzie płukania hamulca.

Wpływ zastosowania lock-up na zużycie paliwa

Eksperyment dołowy potwierdził prognozowane efekty, w szczególności wymierne ograniczenie zużycia paliwa. W wyniku zastosowania modyfikacji dla wozu CB4 20TB produkcji KGHM ZANAM w porównywalnych warunkach osiągnięto redukcję wskaźnika jednostkowego zużycia paliwa o blisko 9%, co pokazano na Rysunku 5-4.

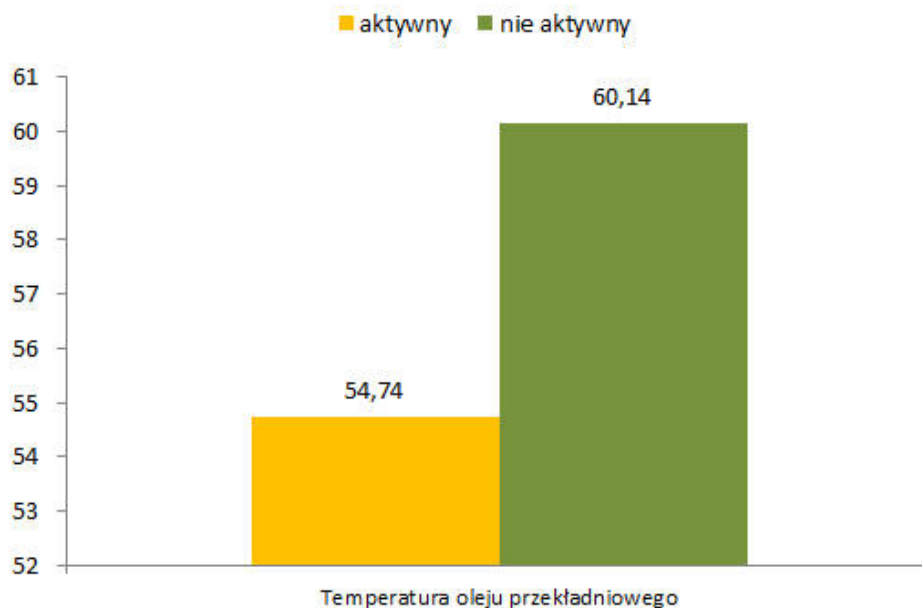


Rysunek 5-4: Ilustracja wpływu zastosowania blokady lock-up na jednostkowe zużycie paliwa (opracowanie własne)

Wpływ zastosowania lock-up na temperaturę oleju skrzyni biegów

Załączanie blokady lock-up dla ustabilizowanych warunków jazdy ogranicza straty przeniesienia

mocy na hydraulicznym zmienniku momentu obrotowego. W rezultacie spadła średnia temperatura oleju przekładniowego przy aktywnej blokadzie - patrz Rysunek 5-5. Wyniki eksperymentu potwierdziły spadek temperatury oleju przekładniowego o ponad 9%.



Rysunek 5-5: Ilustracja wpływu zastosowania blokady lock-up na temperaturę oleju przekładniowego (opracowanie własne)

Wpływ zastosowania lock-up na efektywność hamowania silnikiem

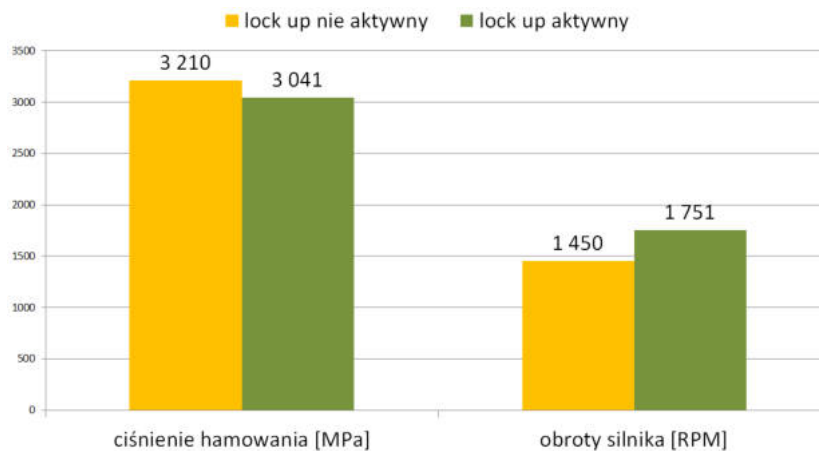
Zastosowanie blokady konwertera umożliwia efektywne hamowanie silnikiem poprzez wykorzystanie potencjału, który oferuje układ hamowania zamontowany na silniku napędowym. Usług na konwerterze przy przenoszeniu mocy od strony napędzanych kół jest znacznie większy, niż przy przenoszeniu momentu obrotowego z silnika na koła. Dla identyfikacji fazy hamowania ustalono empirycznie wartości zmiennych:

SPEED - prędkość ≥ 5 km/h;

BRAKEP - ciśnienie hamowania ≥ 100 kPa;

W efekcie średnia wartość głównego ciśnienia hamowania spadła o 5,6%, co potwierdza ograniczenia obciążenia hamulców.

Średnie obroty silnika podczas hamowania wzrosły o 17,2%, co potwierdza wzrost poziomu momentu obrotowego przenieszonego z kół na wał korbowy silnika.



Rysunek 5-6: Ilustracja wpływu zastosowania blokady lock-up na efektywność hamowania silnikiem (opracowanie własne)

Podsumowanie wyników eksperymentu

W Tabeli 5.1 zestawiono efekty obliczeniowe dla próbki danych z aktywną blokadą oraz próbki referencyjnej z wyłączoną opcją blokady. Dzięki przeprowadzonym badaniom KGHM uzyskał wiarygodne dane dotyczące potencjalnych efektów z tytułu zastosowania opcji wyposażenia wozów w lock-up. Kopalnia ZG Polkowice-Sierszowice, gdzie populacja maszyn WO jest najliczniejsza przyjęła lock-up jako standard kompletacji wyposażenia maszyn.

Najistotniejszym efektem dla przeprowadzonych badań jest potwierdzenie oszczędności w zużyciu paliwa na poziomie 9%.

Tabela 5.1: Zestawienie zbiorcze wyników obliczeń

L.p.	Wskaźnik	j.m.	auto lock-up		razem	
			nie aktywny	aktywny		
1	suma: czas pracy silnika	T _{engin_op}	[h]	24,01	31,86	127,16
2	suma: droga przejechana przez maszynę	S _{total}	[km]	101,45	129,7	231,15
3	suma: zużycie paliwa ogółem	Z _{total}	[dm ³]	411,33	478,91	890,24
4	suma: zużycie paliwa -bez pracy na postoju	Z _{moving}	[dm ³]	372,51	425,06	92,67
5	zużycie jednostkowe paliwa na 1 km jazdy	Z _{jedn_total}	[dm ³ /1km]	4,05	3,69	
6	zużycie jednostkowe paliwa na 1 km jazdy (bez pracy na postoju)	Z _{jedn_move}	[dm ³ /1km]	3,67	3,28	
7	zużycie jednostkowe paliwa na 1 godzinę pracy	Z _{jedn_total}	[dm ³ /1h]	17,13	15,03	
8	średnia temperatura oleju przekładniowego	Temp _{oil}	[°C]	60,14	54,74	

(opracowanie własne)

5.2 Monitorowanie procesów technologicznych

Eksploatacja rud miedzi w kopalniach podziemnych znajdujących się w Polsce odbywa się systemem komorowo-filarowym z wykorzystaniem techniki strzałowej. Wiercenie otworów strzałowych to jeden z kluczowych procesów technologicznych warunkujących postęp frontu eksploatacyjnego i oczekiwany wymiar produkcji górniczej. Efektywność procesu wiercenia (rozumiana jako liczba odwierconych otworów o zadanych parametrach) oraz zarządzanie procesem zużycia koronki wiertniczej to kluczowe wyzwania dla tego procesu.

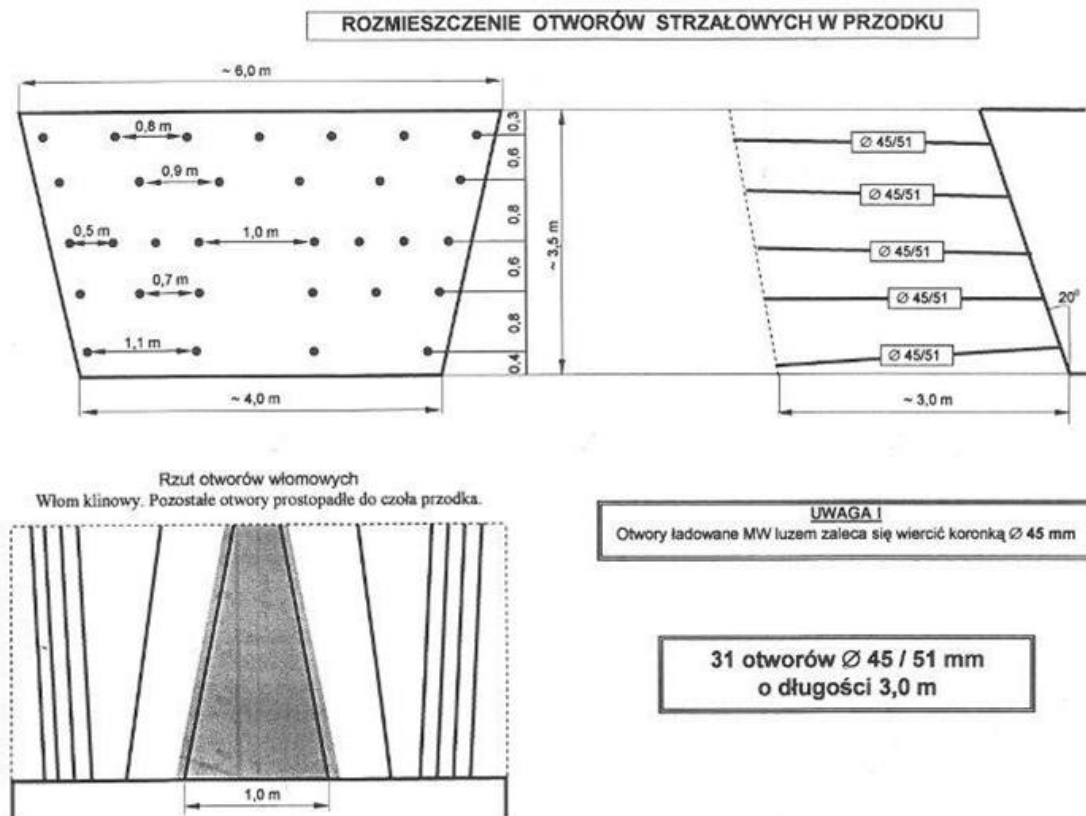
Po załadunku materiałów wybuchowych i urobieniu calizny, kolejnym kluczowym procesem jest odstawa rud miedzi do punktów wysypowych, skąd dalej materiał jest transportowany przenośnikami taśmowymi do zbiorników retencyjnych przy skipach. Efektywność odstawy poprzez ładowarki i wozy odstawcze jest od lat przedmiotem badań wielu naukowców. Dla małych odległości, materiał z przodka jest zazwyczaj transportowany na kratę ładowarkami. Na dłuższych drogach odstawy, ładowarki często wykonują dwa rodzaje pracy - załadunek wozu odstawczego (zwykle o większej pojemności) i transport rudy na kratę. Ilość przetransportowanego materiału ma kluczowe znaczenie w procesie produkcji. W celu optymalizacji procesu praca ładowarek i wozów odstawczych jest monitorowana poprzez pokładowy system monitoringu. Po zakończeniu zmiany, dane transferowane są do centrum obliczeniowego na powierzchni i tam wyznaczone są parametry

opisujące "wydajność" pracy maszyny. Kluczowym parametrem obliczanym na potrzeby rozliczenia pracy jest liczba cykli roboczych odstawy. W rozprawie przedstawione zostały dwa przykładowe algorytmy wyznaczania cykli pracy wozu odstawczego.

Ostatnim rozważanym w rozprawie ważnym procesem technologicznym jest proces kotwienia. Proces zabudowy kotwy w stropie/ociosach wyrobiska jest najbardziej skomplikowanym procesem technologicznym; do tej pory, mimo wielu starań producentów maszyn, użytkowników i ośrodków naukowych, nie został w pełni zautomatyzowany i nie jest obecnie monitorowany na szeroką skalę w kopalni. Dotychczasowe próby podejmowane przez Waloskiego [122] dotyczyły monitorowania procesu wiercenia w kontekście nieciągłości stropu. W ramach badań opracowano system pomiaru odległości elementu organu roboczego względem stropu z wykorzystaniem techniki laserowej.

5.2.1 Analiza procesu wiercenia

Proces urabiania górotworu w kopalniach KGHM jest oparty o technologię strzałową. W caliznie przodków eksploatacyjnych wiercone są otwory strzałowe. Wytrzymałość skał górotworu jest wysoka, wskaźnik R_c na poziomie 150-180 MPa. Proces wiercenia jest zmechanizowany. Parametry dla procesu wiercenia są określone w metrykach strzałowych. Metryki są dostosowane do konkretnych systemów eksploatacji złoża, przykładowa metryka została przedstawiona na Rysunku 5-7. Pomimo, że w użyciu jest bogaty zestaw metryk, podstawowe parametry wiercenia w szczególności długość otworów, są zbliżone. Typowa długość otworów strzałowych wynosi 3 metry. Typowe średnice koronek wiertniczych to: 48 mm, 51 mm; 64 mm. Proces wiercenia jest zmechanizowany, stosuje się wiertnice na podwoziu kołowym, z pojedynczym wysięgnikiem, wyposażone w wiertarkę hydrauliczną udarową, z przepłuczką wodną. W schemacie ewidencji rodzajów maszyn, stosowanym w KGHM, maszyny są oznaczone jako grupa SWW (samojezdny wóz wiertniczy, długość ramy 3,2 lub 3,6 metra) lub SWWD (maszyny z wydłużonym łóżem wiertarki do 4,5 metra). Na podstawie analizy danych dot. ewidencji pracy operatorów maszyn w module HR-TM SAP można oszacować skalę procesu: w 3 kopalniach KGHM w tzw. "dni czarne" średnio na dobę strzela się około 600 przodków, gdzie każdy ma średnio 30 otworów o długości 3 metrów. Średnio na jedną zmianę roboczą, operator odwierca 3 - 4 przodki.



Rysunek 5-7: Przykład metryki strzałowej (źródło: dokumentacja techniczna O/ZG Lubin)

Jakość odwzorowania metryk strzałowych ma fundamentalne znaczenie dla osiągnięcia oczekiwanych wskaźników zabioru urobku po strzelaniu przodków eksploatacyjnych. Dotyczy to:

- odwzorowania siatki otworów ustalonych w metryce strzałowej dla przodka - liczba, rozstaw, odpowiednia geometria, długość,
- wykonania tzw. zawiercenia otworu, istotnego dla załadunku otworów środkami strzałowymi,
- prawidłowego przedmuchania zwiercin z otworu sprężonym powietrzem.

Przy tak wysokim natężeniu procesu produkcyjnego, istotna jest dostępność instrumentów pozwalających na skuteczną ocenę jakości prowadzonych robót wiertniczych oraz weryfikację, czy operatorzy prawidłowo obsługują powierzony im sprzęt.

Poza zapewnieniem oczekiwanej wydajności i jakości prowadzenia robót wiertniczych, również istotna jest kontrola kosztów obsługi procesu. Dotyczy to:

- zużycia materiałów eksploatacyjnych: koronek wiertniczych (Rysunek 4-14), łączników (Rysunek 5-8), żerdzi wiertniczych

- kosztów serwisowania układu roboczego: wiertarek hydraulicznych, siłowników hydraulicznych (Rysunek 5-9), lin posuwu i powrotu (Rysunek 5-10)



Rysunek 5-8: Zerwany łącznik wiertarki hydraulicznej (opracowanie własne)



Rysunek 5-9: Wygięty siłownik wysuwu prowadnicy (opracowanie własne)



Rysunek 5-10: Zerwana lina powrotu wózka (opracowanie własne)

Monitoring procesu wiercenia otworów wg standardu SYNAPSA bazuje na zastosowaniu układu czujników na hydraulice układu roboczego:

- **ciśnienie posuwu wiertarki** - parametr zarządzany przez operatora maszyny za pomocąysterowania rozdzielacza hydraulicznego na pulpicie sterującym;
- **ciśnienie obrotów wiertarki** - parametr regulowany/kalibrowany przy regulacji wiertarki. Przy blokowaniu narzędzia, wskaźnik gwałtownie wzrasta, można to wykorzystać jako informację diagnostyczną odnośnie zakłóceń procesu wiercenia;
- **ciśnienie udaru wiertarki** - parametr regulowany/kalibrowany przy regulacji wiertarki. W praktyce występuje korelacja pomiędzy ciśnieniem na posuwie i na udarze;
- **przepływomierz precyzyjny** - wykorzystywany do pomiaru wysunięcia siłownika hydraulicznego wózka wiertarki (metoda pośrednia) oraz identyfikacji kierunku posuwu.

Na podstawie tego zestawu zmiennych oprogramowanie producenta oblicza wskaźniki pochodne:

- postęp wiercenia otworu,
- długość każdego odwierconego otworu,
- liczba odwierconych otworów.

Zapis parametrów i zmiennych pochodnych realizowany jest co 1 sekundę.

Metoda statystyczna analizy parametrów procesu wiercenia

W zakresie prac wstępnych nad przedmiotową pracą, przygotowano raport „Analiza parametrów wiercenia”, który odpowiadał oczekiwaniom służb dozoru mechanicznego odpowiedzialnych za udostępnianie maszyn do produkcji oraz zabezpieczanie obsługi operatorów. Ogólna konwencja

raportu wykorzystuje sprawdzony schemat tzw. „fotografii pracy maszyny”. Raport bazuje na danych z monitoringu, prezentowanych w formie wykresów dla parametrów, w tym:

- mierzone parametry procesu wiercenia: ciśnienie udarów HYDDIMPP, ciśnienie obrotów HYDDRPMP, ciśnienie posuwu narzędzia HYDDFEDP, kierunek posuwu narzędzia FE-EDDR;
- pomocnicze zmienne kontekstowe: prędkość obrotowa silnika (Diesla) ENGRPM oraz napięcie zasilania elektrycznego głównej pompy hydraulicznej SUPPLYVT;
- zmienne pochodne obliczane przez oprogramowanie rejestratora: DR_PROGR oraz DR_NUM;
- zestawień tabelarycznych dotyczących parametrów obliczanych w procesach ETL, m. in. czas pracy silnika spalinowego, czas pracy napędu elektrycznego hydrauliki roboczej, liczba odwierconych otworów, średnia długość otworów;
- zestawień tabelarycznych dotyczących opisu „dniówki” operatora wg ewidencji SAP HR.

Na Rysunku 5-11 przedstawiono modelowy przykład prowadzenia procesu wiercenia:

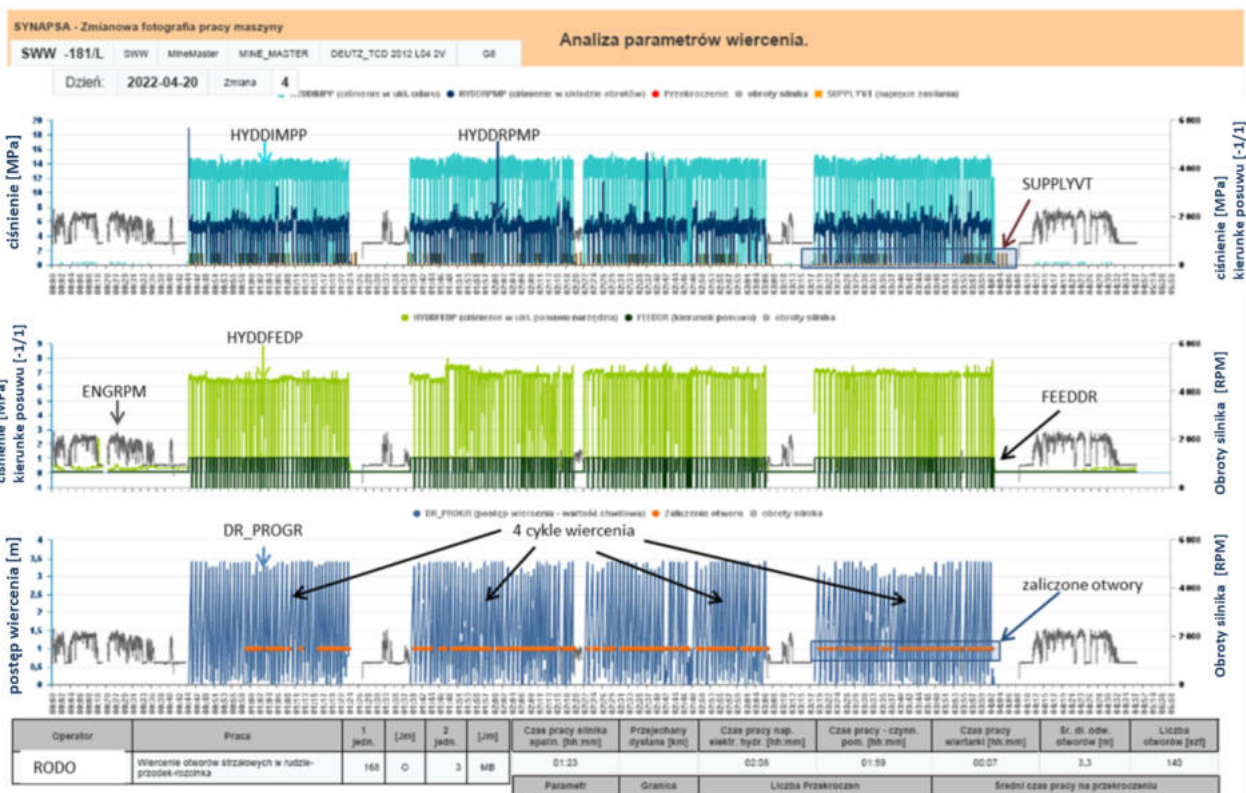
- Operator wykonał cztery cykle (odwiercił cztery przodki), w równych odstępach czasu.
- Parametry ciśnień są w prawidłowych zakresach.
- Długości odwierconych otworów są prawidłowe.
- Praktycznie wszystkie otwory są jednakowej długości.

Jak pokazuje praktyka, analiza wykresów pozwala inżynierom z ruchu kopalni na ocenę jakości pracy operatorów oraz identyfikację problemów z odpowiednim zarządzaniem parametrami wiercenia, w szczególności ciśnienia na posuwie wiertarki HYDFEEDP.

Na wykresie w sekcji „postęp wiercenia” można odczytać historię procesu wiercenia każdego otworu:

- określić długość, zidentyfikować czas wiercenia;
- potwierdzić wykonanie zawierania;
- zidentyfikować problemy, np. zakleszczenie żerdzi.

Na wykresach dodatkowo prezentowane są dane z obrotów silnika Diesla (ENGRPM) oraz poziom napięcia AC (SYPLYVT) zasilającego silnik elektryczny. Pozwala to na weryfikację, czy prace są prowadzone w sposób bezpieczny, np. czy operator nie manewruje maszyną podpiętą do sieci AC. Na wykresie z Rysunku 5-11, można stwierdzić, że przy przestawianiu maszyny, pomiędzy 2 a 3 cyklem, operator uruchomił silnik Diesla bez wyłączenia zasilania AC 500V. Jest to niezgodne z procedurami BHP.



Rysunek 5-11: Raport „Analiza parametrów wiercenia”: przykład modelowy (opracowanie własne)

Dostępność raportów pozwala sztygarom prowadzącym komory mechaniczne na prowadzenie rozmów z operatorami maszyn SWW w celu dostosowania ich standardu obsługi maszyn do poziomu określonego w instrukcjach:

- zakleszczenia narzędzia/koronki wiertniczej,
- stosowania zbyt wysokiego ciśnienia na posuwie,
- niewymuszonych, zbyt częstych zmian regulacji parametru ciśnienia posuwu.

Na Rysunku 5-12 przedstawiono przykład problemu związanego z zakleszczeniem narzędzia wiertniczego. Ilustruje to zmienna dot. ciśnienia obrotów HYDDRPMP wiertarki. Na Rysunku 5-13 przedstawiono przykład nieprawidłowego zarządzania parametrem ciśnienia posuwu HYDDFEDP.



Rysunek 5-12: Raport „Analiza parametrów wiercenia”: przykład nieprawidłowego zarządzania procesem wiercenia - zakleszczenie koronki (opracowanie własne)



Rysunek 5-13: Raport „Analiza parametrów wiercenia”: przykład nieprawidłowego zarządzania procesem wiercenia - nieprawidłowy poziom ciśnienia posuwu wiertarki (opracowanie własne)

Stosowanie opisanej praktyki, wymagającej przeglądania każdego raportu z osobna jest nieefektywne czasowo. Nie pozwala również na śledzenie trendów w szerszym horyzoncie czasowym. Aktualnie populacja maszyn SWW w monitoringiem jest ograniczana 13 maszyn w O/ZG Lubin. W Tabeli 5.2 przedstawiono oszacowanie ilości raportów, gdyby wszystkie wiertnice były wyposażone w monitoring. W skali kopalni, wolumen codziennie przyrastałby w przedziale od 40 do 85 raportów. W skali pojedynczej komory obsługowej od 4 do 19. Analiza raportów „Fotografia wiercenia” w pełnej skali byłaby problematyczna dla służb dozoru.

Tabela 5.2: Oszacowanie ilości raportów „Zmianowa fotografia wiercenia”, dla jednej doby

Oddział	Ilość zmian w produkcji	Ilość maszyn z jednej komory
ZG Lubin	46 do 48	7 do 19
ZG Pol-Sier	76 do 86	5 do 21
ZG Rudna	70 do 80	4 do 19

(opracowanie własne na podstawie danych z ewidencji HR-TM SAP)

Kolejnym ograniczeniem jest brak możliwości agregowania informacji w szerszym horyzoncie czasowym niż jedna zmiana robocza. Uniemożliwia to analizę trendów dla zarządzanych wskaźników. Wskazane ograniczenia były motywacją do kontynuowania badań, których celem było opracowanie efektywnej metody, pozwalającej na automatyczne obliczenie wskaźników charakteryzujących jakość prowadzenia procesu wiercenia, która byłaby funkcjonalnie ewolucją metody bazującej na analizie zmianowych fotografii wiercenia.

W zamierzeniach, rozwiązanie ma spełnić wymienione kryteria:

1. ograniczyć pracochłonność związaną z analizą informacji, w szczególności przeglądaniem zmianowych „fotografii”,
2. umożliwić analizę trendów dla dowolnie zdefiniowanego horyzontu czasowego,
3. pozwolić na prowadzenie analiz wielowymiarowych, uwzględniających dodatkowe kryteria, dzięki fuzji danych z systemów SAP HR-TM, eRAPORT, APO-BDG (system do prowadzenia odbioru robót górniczych),
4. zastosowane formuły obliczeniowe powinny być stosunkowo nieskomplikowane.

Dane z rejestratora na maszynie są przetwarzane i agregowane dla każdej zmiany roboczej wg kalendarza kopalni. Na podstawie klucza: nr maszyny, data/zmiana, można odwzorować kontekst dla wielowymiarowych analiz. Dzięki połączeniu danych z ewidencją pracy operatora maszyny, obsługiwanej w module HR-TM systemu SAP, możliwe jest uzyskanie informacji o operatorze, oddziale zlecającym pracę, tzw. kodzie wykonywanej pracy, opisującym rodzaj wykonywanej pracy

oraz ilości wykonanej pracy w jednostkach rozliczeniowych. Opisana konfiguracja danych pozwala na prowadzenie analiz dla dowolnie zdefiniowanego horyzontu czasowego. Statystyki istotne dla naszych badań, wyliczane dla każdej zmiany, są ponownie agregowane i poddane dalszej interpretacji w perspektywie zadanych ram czasowych.

Podczas wstępnej selekcji danych uwzględniane są następujące warunki:

1. odczyty, w których ciśnienie posuwu wiertarki (HYDDFEDP) jest poniżej poziomu szumu 1,5 MPa nie są uwzględniane,
2. kierunek posuwu narzędzia (FEDDIR) ma być równy 1 (do przodu),
3. czas pracy minimum 30 minut na zmianę roboczą.

W oparciu o doświadczenie sztygarów i operatorów oraz własną analizę danych, zaproponowano wykorzystanie funkcji statystycznej opartej na percentylach, obliczanych dla monitorowanych parametrów ciśnienia elementów układu roboczego wiertnicy.

Liczbę x_q nazywamy q -tym percentylem (dla $0 < q < 100$) dla zbioru odczytów danego parametru, jeżeli $q\%$ odczytów z tego zbioru ma wartość nie większą niż x_q .

Dla prowadzonych badań istotne są następujące statystyki:

- percentyl 95 - oddaje maksymalne ciśnienia podczas pracy, przy czym nie jest zakłócony różnego rodzaju pikami dla stanów nieustalonych w górnym zakresie pomiaru;
- percentyl 75 - po analizie kilkudziesięciu fotografii uznano, że ten wskaźnik najlepiej oddaje typowy poziom regulacji ciśnienia przez operatora;
- percentyl 25 - odwzorowuje niski poziom parametru, eliminuje zakłócenia dla stanów nieustalonych w dolnym zakresie pomiaru;
- różnica pomiędzy percentylami 75 oraz 25 odwzorowuje zmienność regulacji.

Odpowiednie wskaźniki są obliczane dla zmiennych HYDDFEDP, HYDDIMPP, HYDDRMPMP poprzez funkcję DBMS_STAT_FUNCS.SUMMARY. Obliczenia wskaźników zostały zaimplementowane w hurtowni danych systemu SYNAPSA (tzw. proces ETL). Statystyki te są wyliczane dla każdej maszynozmiany.

W celu uwzględnienia szerszego horyzontu czasowego wyniki są agregowane ze wszystkich analizowanych zmian, po czym można poddać je dalszemu przetwarzaniu i interpretacji. Przykłady dalszego postępowania to:

- analiza wskaźników prowadzona w układzie rok-miesiąc-operator,
- analiza osiąganych wartości średnich w miesiącu oraz trendów dla całego okresu obserwacji,
- porównanie indywidualnych wskaźników operatora na tle średnich wskaźników dla komory.

W procedurze testowania algorytmu wykorzystywano dane z monitoringu SWW produkcji Mine Master z wiertarkami firmy Montabert. Na podstawie wywiadu ze służbami dozoru w komorach mechanicznych, dostępnych raportów „fotografii wiercenia”, dokumentacji oraz analizy technicznej wiertarek, ustalono:

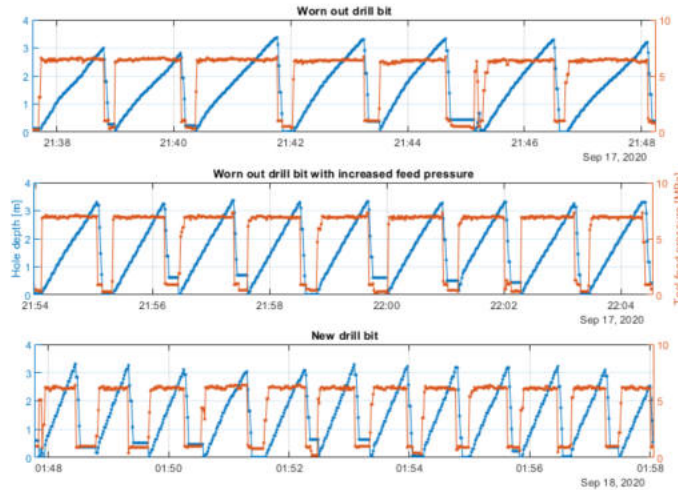
1. optymalne wartości parametru ciśnienia posuwu HYDDFEDP w przedziale od 5 do 7,5 MPa
2. optymalną zmienność parametru na poziomie HYDDFEDP - 0,75MPa. Dla każdego z typów wiertarek (np. produkcji Epiroc stosowanych na wiertnicach Boomer M1L) oszacowanie przedziałów należy weryfikować indywidualnie.

Monitorowanie zużycia koronki wiertniczej

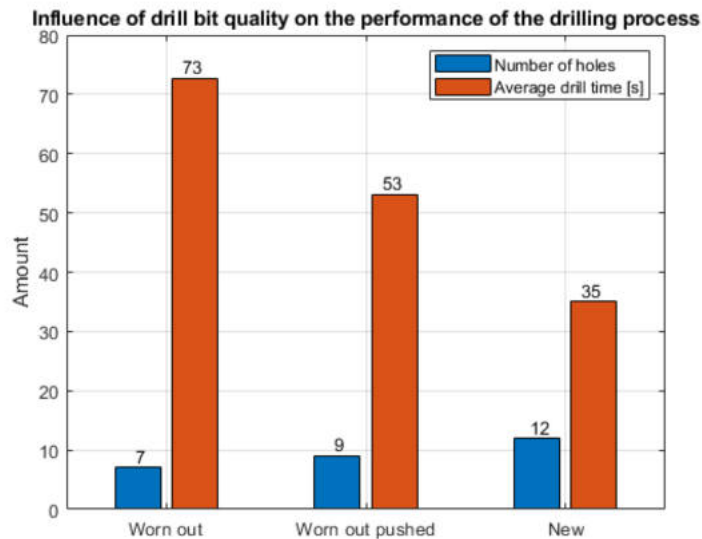
Podziemne kopalnie miedzi w Polsce prowadzą działalność wydobywczą z wykorzystaniem technologii komorowo-filarowej. Kluczowym etapem procesu jest wykonanie otworów strzałowych zgodnie z zadaną metryką strzałową. Wydajność i jakość procesu wiercenia otworów ma kluczowe znaczenie, ponieważ niewłaściwe wykonanie otworów powoduje urobienie górotworu niezgodnie z zaplanowaną geometrią wyrobiska, brakiem odpowiedniego postępu i ewentualnie koniecznością wykonania dodatkowych prac porządkowych. Co więcej, jeśli proces ten jest wykonywany w sposób nieefektywny, bezpośrednio implikuje to mniejszą ilość wydobytej rudy. Tym samym opis i parametryzacja procesu wiercenia są istotne i konieczne jest utworzenie rozwiązań w celu wdrożenia metod doskonalenia tego procesu.

Proces wiercenia składa się z kilku etapów. Wyniki pomiaru parametrów roboczych związanych z procesem wiercenia są obarczone pewnymi błędami pomiarowymi, ale przede wszystkim wpływem wielu czynników zewnętrznych (umiejętności operatora, czynniki geologiczne, stan koronki wierzącej, stan maszyny, parametry zasilania silnika elektrycznego itd.). Dlatego uzasadnionym podejściem jest wykorzystanie dużego zbioru danych i metod statystycznych oraz uczenia maszynowego. W celu oceny poprawności procesu wiercenia pojedynczego otworu należy wykonać segmentację sygnałów pozyskanych z systemu monitoringu. Pozwala to wyodrębnić cykle robocze, które następnie należy porównywać ze sobą w celu wyznaczenia grup danych. Na Rysunku 5-14 pokazano trzy przykładowe sygnały opisujące dane wejściowe: dla koronki w stanie nieprawidłowym (zużycie) przeznaczonej do utylizacji, dla koronki w stanie nieprawidłowym (zużycie) przeznaczonej do regeneracji oraz koronki nowej. Kolor niebieski reprezentuje zmienną postępu wiercenia, a pomarańczowy zmienną ciśnienia posuwu wiertarki. Na Rysunku 5-15 przedstawiono wybrane parametry 3 zbiorów danych wejściowych (liczba otworów wywierconych daną koronką, czas trwania wykonywania wiercenia danego otworu). Należy podkreślić koncepcyjny charakter pracy, ze względu na bardzo małą liczebność klas reprezentujących różne stany techniczne. Celem

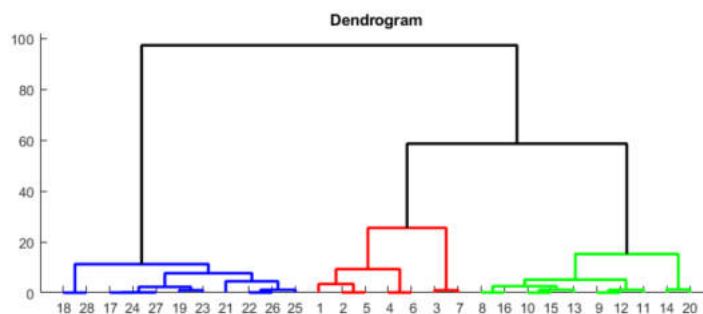
tego eksperymentu było pokazanie możliwości rozpoznawania zmiany stanu (zużycia koronki). "Dopracowanie" metody wymaga pozyskania dużego zbioru danych i trenowania sieci neuronowej. Niemniej jednak nawet dla tak mało licznego zbioru danych, możliwe jest pogrupowanie danych. Do analizy wykorzystano algorytm hierarchicznego grupowania danych (dendrogram pokazano na Rysunku 5-16). Grupy "odkryte" przez algorytm odpowiadają klasom stanu koronki, co pokazano na Rysunku 5-17.



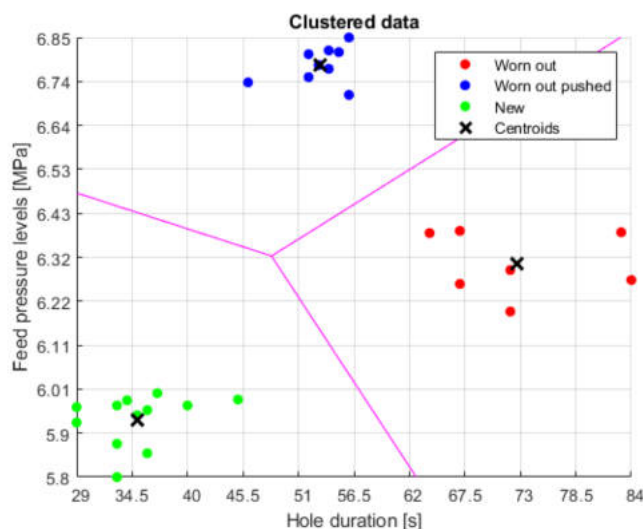
Rysunek 5-14: Dane wejściowe na potrzeby monitorowania zużycia koronki wiertniczej (opracowanie własne)



Rysunek 5-15: Zestawienie wybranych parametrów (liczba przypadków, czas trwania wiercenia) danych wejściowych dla różnych stanów zużycia koronki wiertniczej (opracowanie własne)



Rysunek 5-16: Dendrogram (opracowanie własne)



Rysunek 5-17: Wynik grupowania danych wejściowych na potrzeby monitorowania zużycia koronki wiertniczej (opracowanie własne)

Opracowanie metody oceny stopnia zużycia koronki wiertniczej na podstawie danych z monitoringu układu roboczego maszyny SWW jest istotne ze względu na możliwość wyznaczenia optymalnego momentu dla jej wymiany. Na podstawie analizy korelacji pomiędzy zmiennymi ciśnienia posuwu HYDDFEDP oraz chwilowego postępu wiercenia DRPROG możliwe jest opracowanie metody pozwalającej na identyfikację krytycznego momentu zużycia (stępienia) koronki wiertniczej. Przekroczenie tego punktu uniemożliwia regenerację narzędzia. Pierwsze wyniki są bardzo obiecujące, a kontynuacja badań wydaje się uzasadniona. Ograniczony zakres badań przedstawiony w rozprawie wynikał z konieczności współpracy z firmą zewnętrzną (zmiana oprogramowania w celu umożliwienia rejestracji rodzaju koronki (nowa, regenerowana).

5.2.2 Analiza procesu odstawy

Koszty zastosowania SMG dla operacji załadunku i odstawy urobku, ze względu na duże przebiegi maszyn, zajmują szczególną pozycję w strukturze kosztów. Na przestrzeni ostatnich 25 lat w KGHM prowadzonych było wiele prac badawczych poświęconych optymalizacji kosztów procesu odstawy urobku. W trakcie prac wstępnych, zinwentaryzowano potrzeby organizacji dotyczące wskaźników opisujących proces:

- Długość drogi odstawy
- Ilość przewiezionego urobku oraz skały płonnej
- Ilość wykonanych kursów dla LK oraz WO
- Koszty jednostkowe odstawy, w tym koszty paliwa oraz ogumienia

W aspekcie tematu zużycia paliwa, poza ograniczeniem wolumenu, coraz istotniejszym czynnikiem jest ograniczenie emisji spalin do wyrobisk. W praktyce prowadzone są działania w dwóch obszarach:

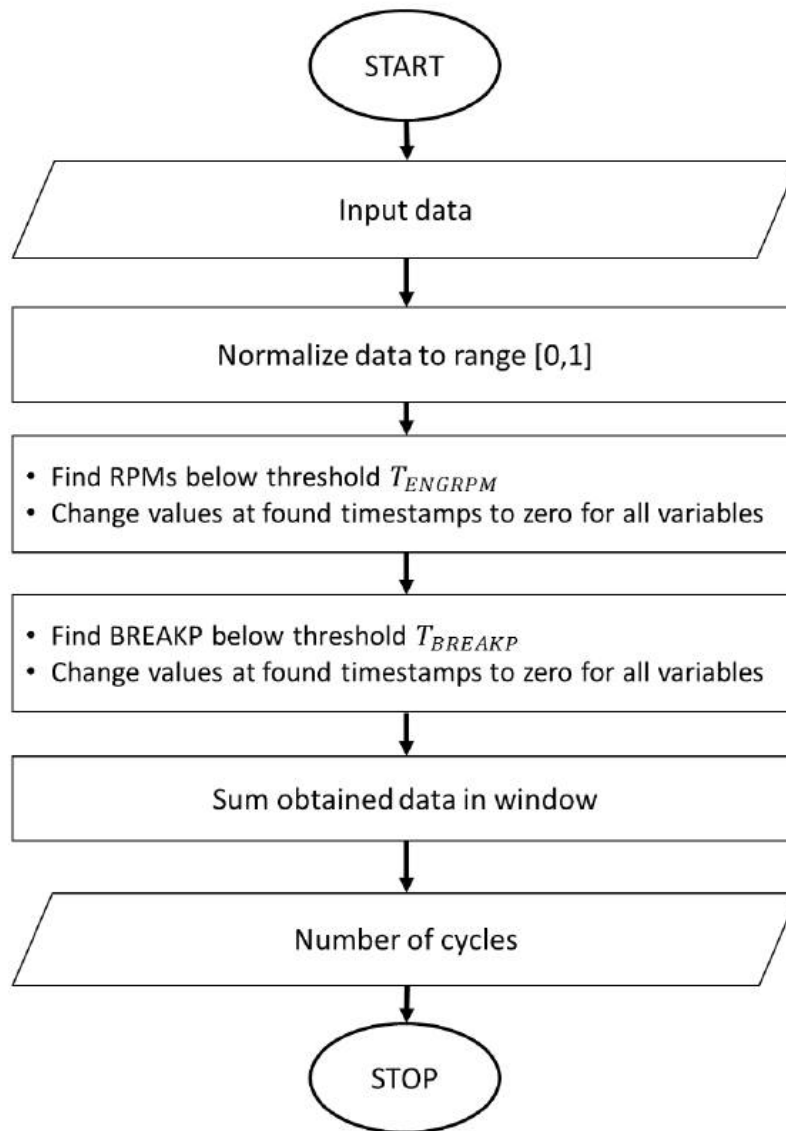
- innowacje techniczne w konstrukcji układu napędowego:
 - wdrożenie silników Diesla spełniających coraz wyższe normy emisji spalin, pierwsze próby zastosowania napędu elektrycznego (SWK, SWW – Mine Master oraz LK – ST14 Epiroc);
 - modyfikacji w układzie przeniesienia napędu, np. zastosowanie dodatkowego sprzęgła lock-up w celu ograniczania strat przeniesienia momentu obrotowego na przekładni hydrokinetycznej w ustalanych stanach obciążenia.
- optymalizacja organizacji pracy maszyn:
 - ustalenie optymalnych odległości dla dróg odstawy, budowanie modeli optymalnej współpracy ładowarek z wozami odstawczymi;
 - ograniczenie czasu pracy sinika na biegu jałowym.

Pierwsze algorytmy dotyczące identyfikacji cykli pracy podejmowane były w pracach Stefaniaka [57], Wyłomańskiej [69], Wodeckiego [123] czy Zimroza, a ostatnio w pracach Qi [124]. Intuicyjnie, najłatwiej identyfikować cykle robocze w ładowarce lub wozie odstawczym za pomocą monitorowania ciśnienia oleju w układzie roboczym maszyny. Głównym problemem w detekcji cykli w tym podejściu jest relatywnie wysoka awaryjność czujnika ciśnienia i koszt systemu pomiarowego [125]. W rozprawie przedstawione zostaną trzy alternatywne podejścia prowadzące do tego samego celu, tj. pozyskania informacji o liczbie wykonanych cykli. Kopalnia podziemna jest ogromnym "organizmem". W grupie kapitałowej KGHM każda kopalnia ma własne, wypracowane na bazie doświadczeń metody eksploatacji maszyn. Zatem proponowane metody można

potraktować wariantowo lub jako metody redundantne, które można wykorzystać do minimalizacji ryzyka pozyskania nieprawdziwej informacji lub na wypadek niesprawności elementów pomiarowych wchodzących w skład metody. Metoda pierwsza oraz metoda druga bazują na danych z systemu monitoringu SMG. Metoda trzecia powstała po wprowadzeniu systemu antykolizji i jest zupełnie nowatorskim wykorzystaniem dodatkowego źródła danych.

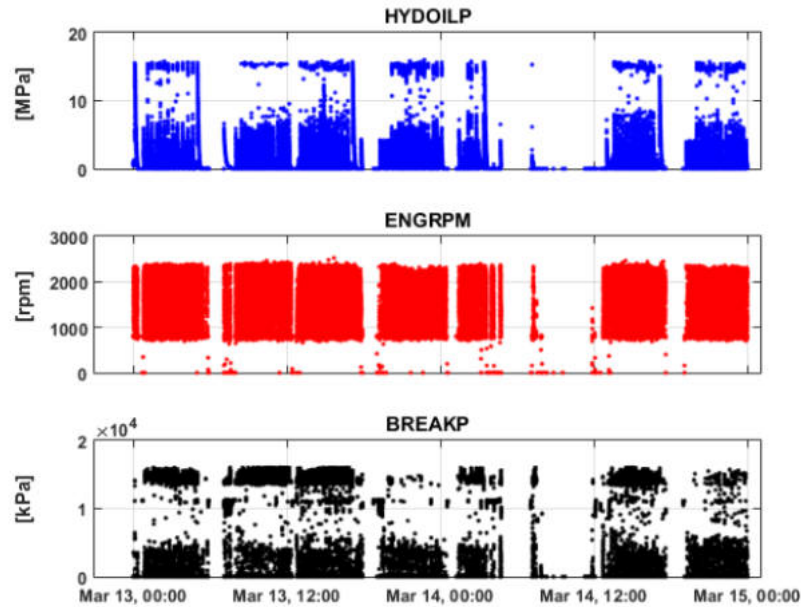
Automatyczne zliczanie cykli roboczych - algorytm 1

W tej części pracy przedstawiono opracowaną metodę detekcji cykli odstawy na przykładzie wozu odstawczego i opisano algorytm segmentacji sygnału oraz identyfikacji cykli rozładunkowych. Dane wejściowe do algorytmu zostały pozyskane z maszyny podczas pracy. Maszyna obsługiwana była przez różnych operatorów. Pomiarów dokonano w kopalni podziemnej rud miedzi. Eksperyment trwał 8 zmian roboczych, jednak maszyna faktycznie działała przez 7 pełnych zmian. Przez długość cyklu rozumie się czas pomiędzy kolejnymi fazami samorozładunku wozu odstawczego. Przeprowadzone studium przypadku wykazało wpływ wciśnięcia pedału hamulca na charakterystykę pracy silnika wozu odstawczego podczas postoju, jazdy i rozładunku. Wóz odstawczy jest wyposażony w dodatkowy układ pneumatyczny, odłączający przekładnię od skrzyni biegów podczas hamowania. Powoduje to pracę silnika na biegu jałowym. Wyjątkową sytuacją jest wzrost prędkości obrotowej silnika (ENGRPM) przy jednoczesnym, zwiększonym ciśnieniu w układzie hamulcowym (BRAKEP) [126]. Tak jest w przypadku pompy hydraulicznej napędzanej silnikiem spalinowym, a więc podczas rozładunku skrzyni wozu odstawczego. Zwiększone ciśnienie hamowania w procesie rozładunku jest niezbędne do utrzymania skrzyni bezpośrednio nad kratą podczas całego procesu rozładunku (najazd jest pod górę). Na podstawie wcześniejszych wniosków opracowano metodologię, która umożliwia wykrywanie cykli rozładunku na kolejnych zmianach roboczych. Wykrywanie byłoby możliwe bez informacji o ciśnieniu w układzie hydraulicznym. Możliwe jest zatem wykrywanie cykli i ocena działania maszyny lub operatora, nawet po awarii czujnika rejestrującego parametr HYDOILP. Na Rysunku 5-18 pokazano schemat blokowy proponowanej procedury (algorytmu segmentacji).



Rysunek 5-18: Koncepcja procedury detekcji cykli pracy dla wozu odstawczego (opracowanie własne)

Metoda polega na wyznaczeniu odpowiednich wartości progowych dla wybranych zmiennych i opracowaniu reguły decyzyjnej. Na Rysunku 5-19 pokazano dane surowe z pokładowego systemu rejestracji danych (monitoringu) zainstalowanego na maszynie. Do rozważań wybrano dane z siedmiu zmian - ciśnienie w układzie hydraulicznym (HYDOILP), obroty silnika (ENGRPM) oraz ciśnienie w układzie hamowania (BRAKEP).

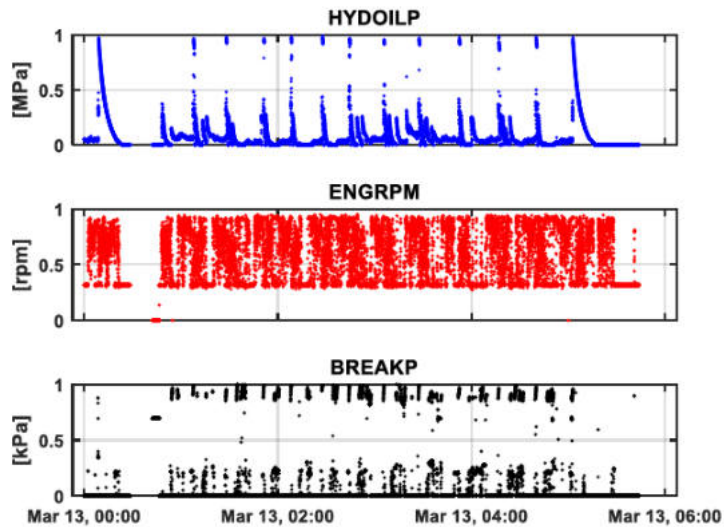


Rysunek 5-19: Dane surowe dla 7 zmian - ciśnienie w układzie hydraulicznym (HYDOILP), obroty silnika (ENGRPM) oraz ciśnienie w układzie hamowania (BRAKEP) (opracowanie własne)

W pierwszym kroku musimy podzielić dane na fragmenty odpowiadające zmianom roboczym w kopalni, ponieważ analizowane zmienne mają różne zachowanie ze względu na dwa aspekty: maszyna jest obsługiwana przez różnych operatorów, a także w różnych lokalizacjach w kopalni, co nie jest bez znaczenia. Zaproponowano, aby sygnały ciśnienia w układzie hydraulicznym (HYDOILP), obroty silnika (ENGRPM) i ciśnienie w układzie hamulcowym (BREAKP) zostały normalizowane do zakresu 0-1, co pokazano na Rysunku 5-20. Następnie wyznaczono próg dzielący obroty silnika na dwie grupy: bieg jałowy i praca pod obciążeniem. Podczas rozładunku silnik napędza układ hydrauliczny. Dlatego też powinna zostać wykryta praca silnika pod obciążeniem. Próg jest podany jako procent wartości maksymalnej zmiennej ENGRPS wg wzoru:

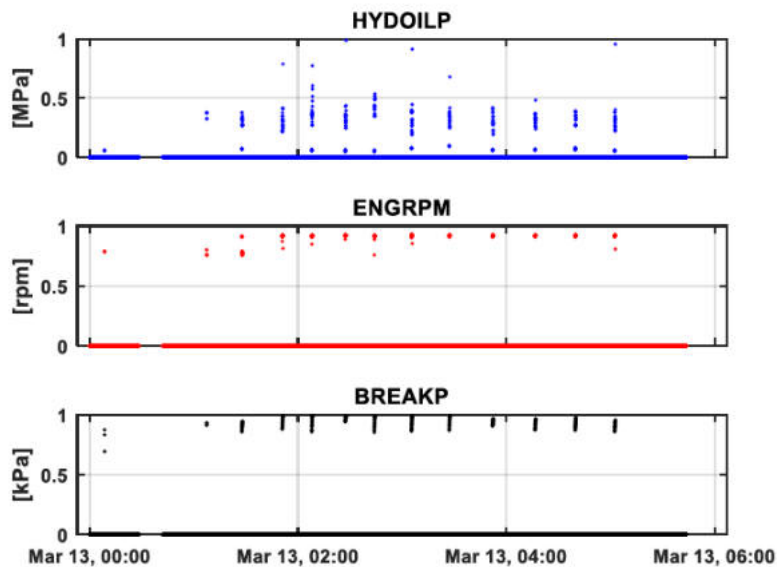
$$T_{\text{ENGRPM}} = 0.75 * \max(\text{ENGRPM})$$

Dla odczytów, gdzie wartości zmiennej ENGRPM są mniejsze od wartości progowej T_{ENGRPM} , wartości dla wszystkich zmiennych są zerowane. Na podstawie histogramu tak przygotowanych danych wyznacza się dwa tryby. Drugi próg T_{break} oblicza się jako średnią pomiędzy tymi dwoma trybami [125] i analogicznie jak dla pierwszego progu wartości zerowe przyjmowane są we wszystkich zmiennych, jeśli zmienna $\text{BREAKP} < T_{\text{break}}$.



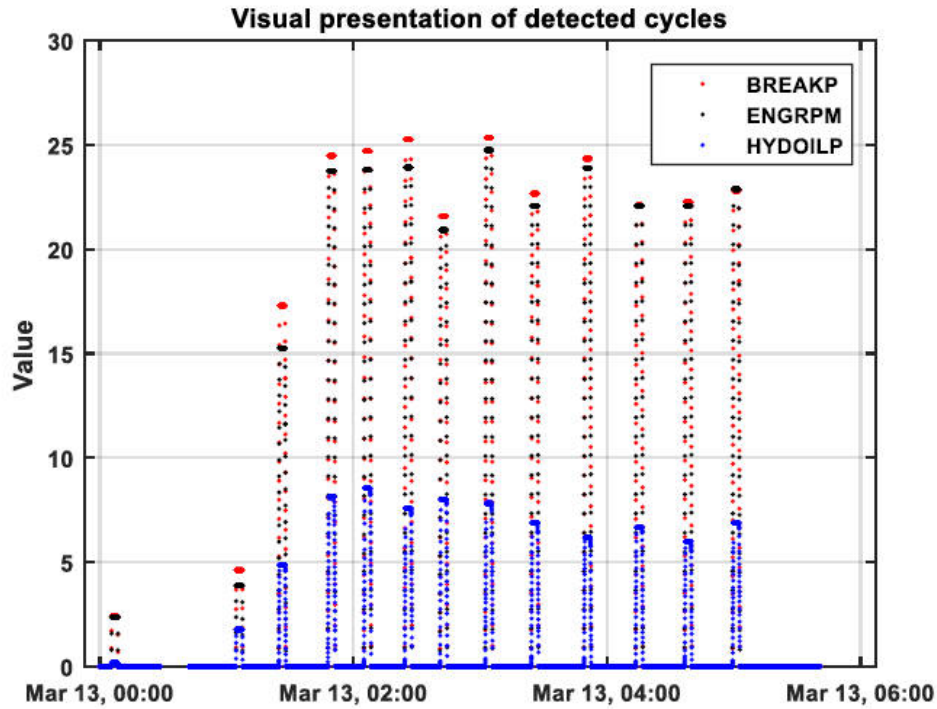
Rysunek 5-20: Dane dla jednej zmiany po zastosowaniu normalizacji (opracowanie własne)

Te dwa progi pozwalają uzyskać nowe wektory danych, w których obserwuje się tylko zachowanie odpowiadające cyklom roboczym. Jeśli wyznaczona zostanie ich suma w oknie, otrzymamy wartości związane z rozładunkiem wozu odstawczego, co pokazano na Rysunku 5-21.

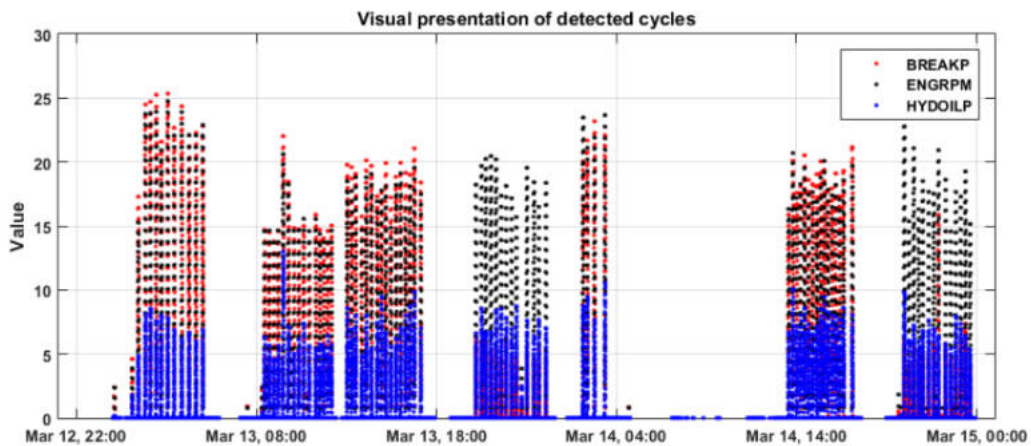


Rysunek 5-21: Dane dla jednej zmiany po zastosowaniu progowania (opracowanie własne)

Na Rysunku 5-22 pokazano wyniki wykrywania cykli dla jednej zmiany, a na Rysunku 5-23 dla trzech kolejnych zmian. Wyniki są bardzo zadowalające, tzn. pozyskana informacja jest zbieżna z informacją z czujnika ciśnienia w układzie roboczym.



Rysunek 5-22: Wizualizacja wykrytych cykli dla danych z jednej zmiany (opracowanie własne)



Rysunek 5-23: Wizualizacja wykrytych cykli dla danych z trzech dni (opracowanie własne)

Automatyczne zliczanie cykli roboczych - algorytm 2 (drzewa decyzyjne)

Przebieg cykli odstawczych na zmianie roboczej WO jest bardzo dobrze widoczny w sygnale ciśnienia w układzie hydraulicznym siłownika przesunięcia przegrody skrzyni ładunkowej (zmienna HYDOILP). Przegroda skrzyni jest wysuwana podczas każdego rozładunku skrzyni, co przejawia się gwałtownym skokiem wartości w sygnale HYDOILP. Zazwyczaj wartości te przekraczają 15 MPa. Niestety, jak wskazano w pracy [72], dostęp do zmiennej HYDOILP pośród populacji WO pozostaje ograniczony z dwóch przyczyn. Po pierwsze, sensor montowany jest na wozach odstawczych wyłącznie nowszej generacji. Po drugie, wykazuje znaczną podatność na usterki mechaniczne. W pracy postanowiono natomiast wykorzystać tę zmienną jako referencję do identyfikacji cykli roboczych w innych sygnałach na drodze wielowymiarowej analizy danych. Przykład takiego podejścia przedstawiono w pracy [127], w której zastosowano sieci neuronowe w zadaniu detekcji cykli rozładunków wozów odstawczych na kratę.

W trakcie pracy maszyny oprócz wykonywanych cykli roboczych występuje również moment dojazdu do miejsca pracy, który odbywa się zwykle na zmianach nieparzystych. W rejestrowanych sygnałach proces ten również jest obecny i nie powinien być uwzględniany przy analizie efektywności pracy maszyny w oddziale wydobywczym. Dostarczając metodę detekcji cykli opartą jedynie na predykcji rozładunków, jesteśmy w stanie wskazać moment zakończenia każdego cyklu odstawczego. W takim podejściu automatyczne rozpoznanie momentu rozpoczęcia pierwszego cyklu jest trudne do realizacji. Podobna sytuacja może mieć miejsce, jeśli nastąpi przerwanie ciągłości pracy odstawczej dłuższym postojem maszyny. Pomijając te przypadki, moment zakończenia cyklu n stanowić zatem będzie moment rozpoczęcia cyklu $n+1$ itd. W pracy postanowiono przyjąć umownie, że koniec jazdy trasą dojazdową podczas dojazdu maszyny do miejsca pracy traktowany będzie jako rozpoczęcie pierwszego cyklu pracy. Z tego względu pierwszym koniecznym etapem metody wyznaczania cykli pracy wozu odstawczego jest detekcja trasy dojazdowej.

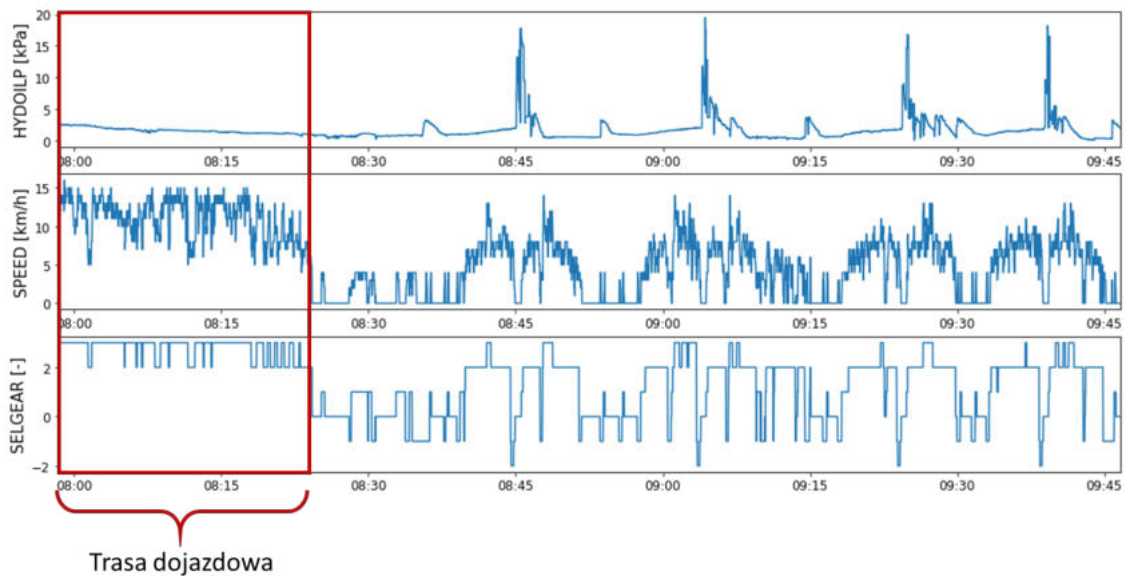
Tabela 5.3: Zmienne używane w modelu detekcji cykli roboczych wozu odstawczego i trasy dojazdowej

Nazwa zmiennej	Opis zmiennej	Jednostka pomiaru	Wartość min	Wartość maks	fs
ENGRPM	Prędkość obrotowa silnika	RPM	0	5000	1s
FUELUS	Chwilowe zużycia paliwa	l/h	0	120	1s
TRNBPS	Pozycja pedału hamulca	%	0	100	1s
SPEED	Średnia prędkość jazdy maszyny	km/h	0	40	1s
SELGEAR	Kierunek jazdy (przód/tył) i wybrany bieg	-	-4	4	1s

(opracowanie własne)

Detekcja trasy dojazdowej

Trasa dojazdowa charakteryzuje się większą prędkością jazdy w porównaniu do cykli pracy odstawczej, a co za tym idzie, również wyższymi wartościami wybranego biegu. Na Rysunku 5-24 przedstawiono sygnały tych dwóch zmiennych wraz z referencyjnym sygnałem zmiennej HYDOILP. Przez większość drogi dojazdowej (poza pokonywaniem stromych upadków) maszyna jedzie tylko na drugim i trzecim biegu, a prędkość znajduje się w przedziale od 5 do 15 km/h. Podczas wykonywania cykli zmienność biegów jest znacznie większa wraz z wartościami ujemnymi oznaczającymi cofanie maszyny. Podobna zmiana charakteru sygnału jest widoczna w przypadku zmiennej SPEED, która waha się od zera do około 14 km/h. Obserwowane wzorce zachowań tych sygnałów, wskazują na ich potencjał informacyjny w zadaniu identyfikacji przedziału czasu, w którym maszyna przemieszczała się trasą dojazdową. Tym samym możliwe jest określenie na linii czasu rozpoczęcia pierwszego cyklu odstawczego (np. w zmiennej flagowej przyjmującej wartości 0/1), jako moment zakończenia jazdy trasą dojazdową.

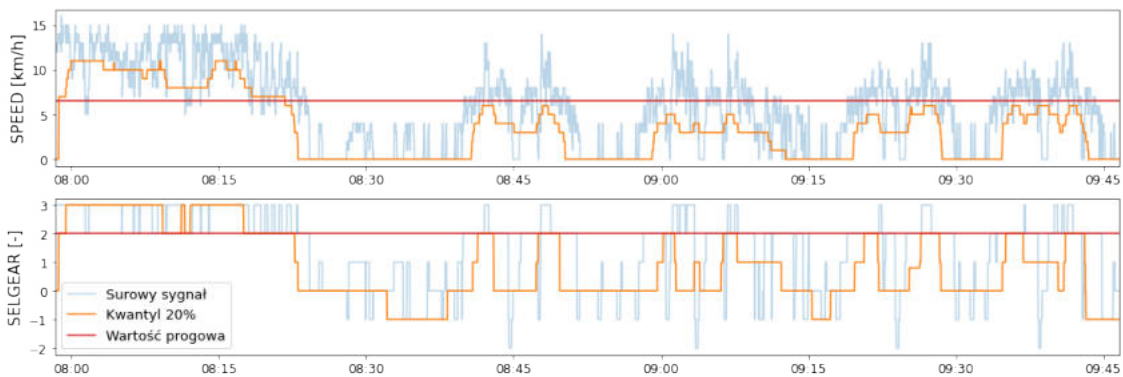


Rysunek 5-24: Sygnały: ciśnienia w układzie hydraulicznym (górny panel), prędkości (środkowy panel) i wybranego biegu (dolny panel) podczas trasy dojazdowej i pierwszych czterech cykli wozu odstawczego (opracowanie własne)

W procesie segmentacji sygnału na: (a) jazdę trasą dojazdową i (b) pracę odstawczą założono, że segment trasy dojazdowej przejawia się wyższymi wartościami średnimi prędkości jazdy oraz wyższymi wskazaniem aktualnego biegu. Jednakże krótkotrwałe przekroczenie ustalonej prędkości nie jest wystarczającym warunkiem, ponieważ takie sytuacje występują również chwilowo

w trakcie trwania cykli. Kryterium klasyfikacji powinno weryfikować więc długość okresu, w którym omawiane zmienne przyjmują zwykle wartości powyżej ustalonego progu i/lub mieszczą się w określonym przedziale. W tym celu postanowiono wyznaczyć dla obu zmiennych wartość percentyla 20 w ruchomym oknie 300 s. Wartość takiego percentyla oznacza, że w danym oknie czasowym 80% odczytów jest powyżej tej wartości. Wykresy obliczonych wartości percentyli 20 dla analizowanego fragmentu czasu przedstawiono na Rysunku 5-25. Widoczne jest, że dla wartości percentyla 20 można wyznaczyć progi graniczne, które w łatwy sposób odróżnią trasę dojazdową od cyklicznej pracy odstawczej. Warunek na trasę dojazdową przyjmuje więc następującą formułę:

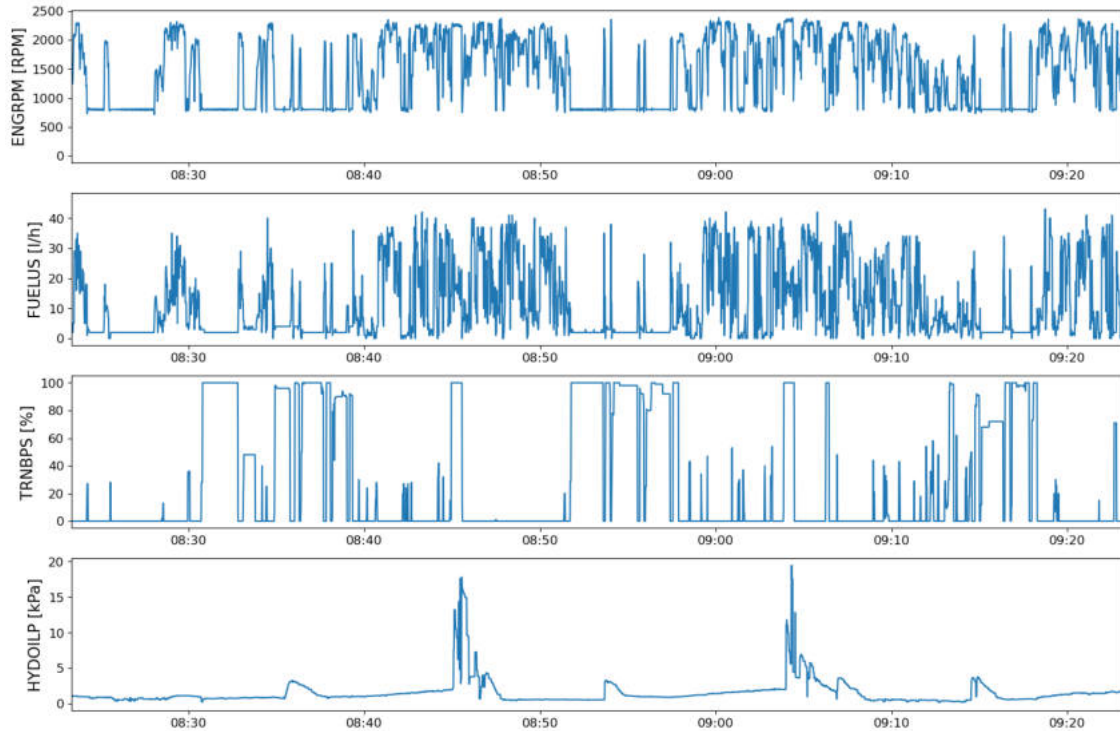
$$\text{Trasa dojazdowa, gdy } (\text{SPEED}_{20} > 6,5 \wedge \text{SELGEAR}_{20} \geq 2).$$



Rysunek 5-25: Percentyle 20 dla zmiennej SPEED i SELGEAR z uwzględnieniem wartości progowych wskazujących okresy jazdy trasą dojazdową (opracowanie własne)

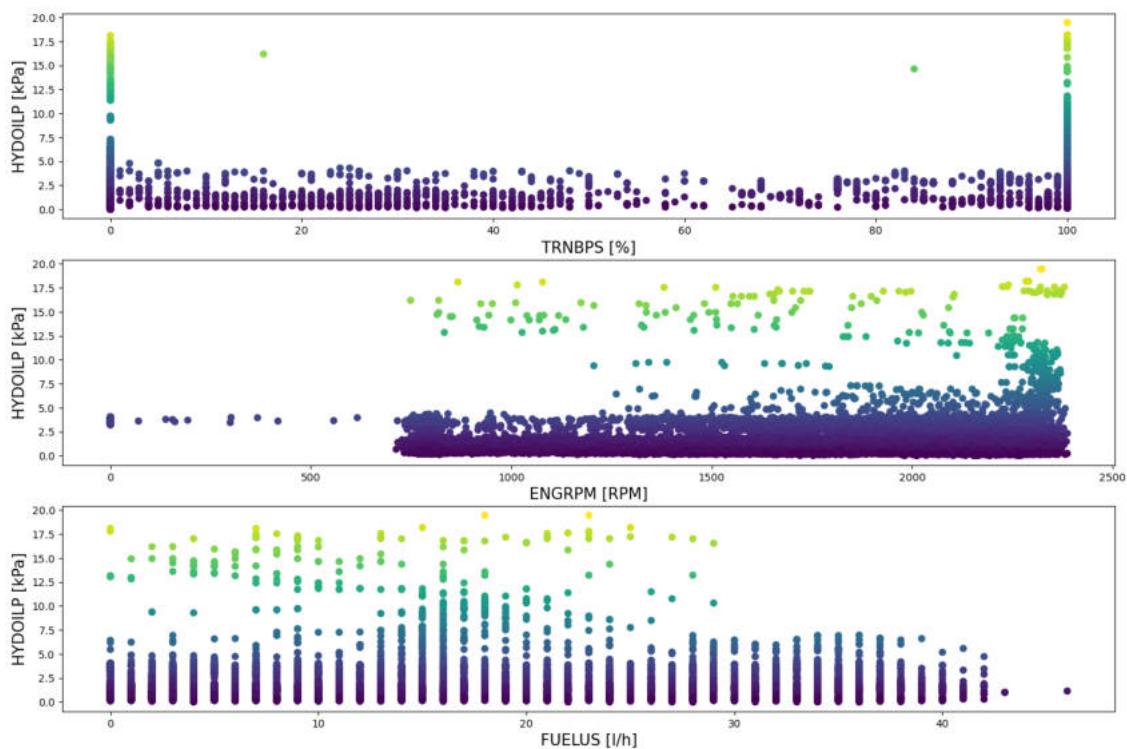
Po zastosowaniu powyższej metody i usunięciu z całego sygnału momentu drogi dojazdowej można przejść do wyznaczania cykli roboczych.

Surowe przebiegi zmiennych użytych w modelu przedstawiono na Rysunku 5-26, wraz ze zmienną referencyjną HYDOILP. W przedstawianym oknie czasowym wóz odstawczy wykonał dwa rozładunki, co charakteryzuje się znacznym wzrostem ciśnienia. Na pierwszy rzut oka nie widać żadnego powiązania, które jednoznacznie wskazywałoby, że pewne cechy sygnałów mogą korelować z momentami rozładunków. Po dokładniejszej weryfikacji zobaczyć można, że wartości ENGRPM podczas rozładunku utrzymują się na relatywnie wysokim poziomie, tak samo jak zmiennej TRNBPS. Takie stany występują jednak również poza momentami rozładunków.



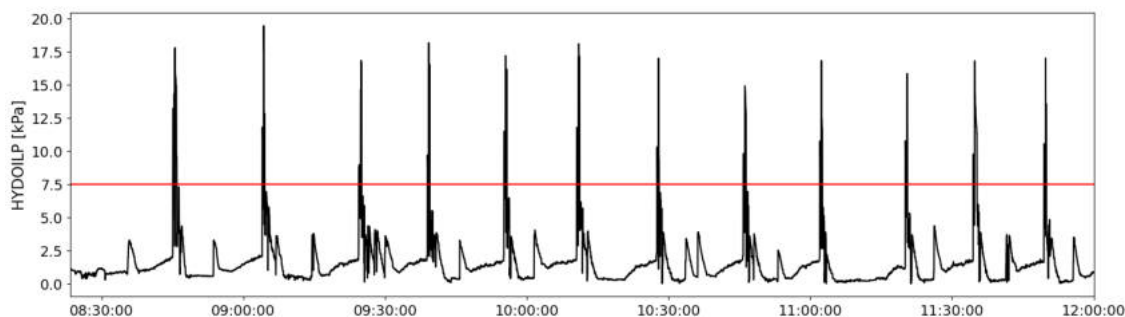
Rysunek 5-26: Surowe przebiegi zmiennych podczas dwóch cykli roboczych wozu odstawczego (opracowanie własne)

Więcej informacji uzyskać można poprzez wizualizację zmiennych przestrzennie, wykorzystując HYDOILP jako drugi wymiar, Rysunek 5-27. W przypadku zmiennej TRNBPS zauważyć można, że wysokie wartości HYDOILP są jednoznacznie skojarzone z najwyższymi lub najniższymi odczytami tej zmiennej (100% lub 0 %). W przypadku obrotów silnika wysokie wartości HYDOILP występują praktycznie w całym przedziale wartości sygnału (> 500 , < 2500), jednakże odnotowano ich zagęszczenie w górnych granicach przedziału. Inna relacja obserwowana jest w przypadku zmiennej FUELUS, gdzie powyżej spalania wynoszącego 30 l/h nie ma żadnych odczytów zmiennej HYDOILP.



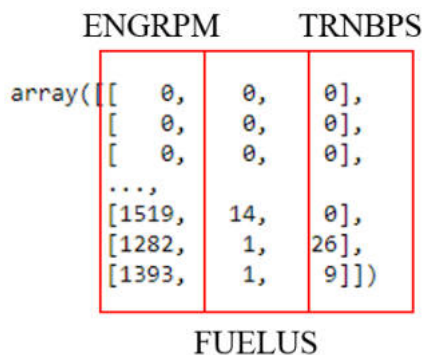
Rysunek 5-27: Wykresy przestrzenne wybranych zmiennych i zmiennej referencyjnej (opracowanie własne)

Pierwszy krok przygotowania danych pozostaje jednakowy w przypadku wszystkich zmiennych. Polega on na interpolacji wartości brakujących, która robiona jest w dwóch etapach. Na początek, wszystkie brakujące wartości wypełniane są poprzednią wartością tam, gdzie to możliwe. Po tej czynności, pozostałe brakujące wartości są wypełniane zerami. Normalną czynnością w procesach tego typu jest również usunięcie wartości odstających. W tym jednak przypadku, nie stwierdzono takiej potrzeby z uwagi, że wszystkie zarejestrowane pomiary znajdowały się w swoich nominalnych zakresach wartości. W celu przygotowania zmiennej referencyjnej postanowiono zamienić ją na zmienną logiczną z wykorzystaniem prostego progowania. Próg ten empirycznie ustawiony został na poziomie 7,5 kPa. Poziom progę w stosunku do sygnału przedstawiono na Rysunku 5-28. Wszystkie wartości poniżej progę wypełnione zostały zerami, podczas gdy wartości powyżej – jedykami.



Rysunek 5-28: Procedura progowania zmiennej HYDOILP (opracowanie własne)

Wykorzystane w modelu zmienne postanowiono połączyć w macierz stanowiącą dane wejściowe do dalszych analiz. Rysunek 5-29.



Rysunek 5-29: Struktura próbki wejściowej modelu (opracowanie własne)

Utworzenie modelu

Zadanie detekcji oparto na drzewie decyzyjnym. Algorytm drzewa zaczyna się od korzenia, który reprezentuje cały zbiór danych, oraz iteracyjnie dzieli je na mniejsze wedle konkretnego kryterium (funkcji celu). W opisywanym przypadku, tym kryterium była logiczna postać zmienna będąca pochodną HYDOILP definiująca dwie klasy (rozładunek lub jego brak). Jednym z głównych parametrów drzewa jest jego głębokość, czyli liczba iteracji, podczas których dzieli ono zbiory na dwie części. W większości przypadków zwiększenie głębokości drzewa o 1 powoduje dwukrotne zwiększenie liczby finalnych grup (liści). Wyjątkowo ważne jest żeby parametr ten był kontrolowany, ponieważ algorytm drzewa cechuje się dość znaczną wrażliwością na przeuczenie. W modelu na podstawie eksperymentów stwierdzono, że optymalna wartość tego parametru będzie wynosić 5. Drzewo tej wielkości jest trudne do przedstawienia na pojedynczym wykresie. Z tego względu na Rysunku 5-30 pokazano jego strukturę w sposób fragmentaryczny.

Lewa Strona Drzewa

```

--- ENGRPM <= 2310.50
|--- ENGRPM <= 2234.50
|   |--- ENGRPM <= 814.50
|   |   |--- ENGRPM <= 750.00
|   |   |   |--- ENGRPM <= 748.00
|   |   |   |   |--- class: False
|   |   |   |   |--- ENGRPM > 748.00
|   |   |   |   |   |--- class: False
|   |   |--- ENGRPM > 750.00
|   |   |   |--- class: False
|   |--- ENGRPM > 814.50
|   |--- TRNBPS <= 99.50
|   |   |--- FUELUS <= 20.50
|   |   |   |--- class: False
|   |   |   |--- FUELUS > 20.50
|   |   |   |   |--- class: False
|   |--- TRNBPS > 99.50
|   |   |--- ENGRPM <= 2027.50
|   |   |   |--- class: False
|   |   |   |--- ENGRPM > 2027.50
|   |   |   |   |--- class: False
|--- ENGRPM > 2234.50
|   |--- TRNBPS <= 63.00
|   |   |--- FUELUS <= 12.50
|   |   |   |--- ENGRPM <= 2254.50
|   |   |   |   |--- class: False
|   |   |   |   |--- ENGRPM > 2254.50
|   |   |   |   |   |--- class: False
|   |   |--- FUELUS > 12.50
|   |   |   |--- FUELUS <= 15.50
|   |   |   |   |--- class: False
|   |   |   |   |--- FUELUS > 15.50
|   |   |   |   |   |--- class: False
|   |--- TRNBPS > 63.00
|   |   |--- FUELUS <= 14.50
|   |   |   |--- ENGRPM <= 2276.50
|   |   |   |   |--- class: False
|   |   |   |   |--- ENGRPM > 2276.50
|   |   |   |   |   |--- class: False
|   |   |--- FUELUS > 14.50
|   |   |   |--- FUELUS <= 25.50
|   |   |   |   |--- class: True
|   |   |   |   |--- FUELUS > 25.50
|   |   |   |   |   |--- class: False

```

Prawa Strona Drzewa

```

--- ENGRPM > 2310.50
|--- TRNBPS <= 63.50
|   |--- FUELUS <= 13.50
|   |   |--- FUELUS <= 12.50
|   |   |   |--- class: False
|   |   |--- FUELUS > 12.50
|   |   |   |--- ENGRPM <= 2331.50
|   |   |   |   |--- class: False
|   |   |   |--- ENGRPM > 2331.50
|   |   |   |   |--- class: False
|   |--- FUELUS > 13.50
|   |   |--- class: False
|--- TRNBPS > 63.50
|   |--- FUELUS <= 14.50
|   |   |--- ENGRPM <= 2353.00
|   |   |   |--- ENGRPM <= 2320.00
|   |   |   |   |--- class: False
|   |   |   |   |--- ENGRPM > 2320.00
|   |   |   |   |   |--- class: False
|   |   |--- ENGRPM > 2353.00
|   |   |   |--- ENGRPM <= 2366.50
|   |   |   |   |--- class: True
|   |   |   |   |--- ENGRPM > 2366.50
|   |   |   |   |   |--- class: False
|   |--- FUELUS > 14.50
|   |   |--- FUELUS <= 19.50
|   |   |   |--- ENGRPM <= 2321.50
|   |   |   |   |--- class: False
|   |   |   |   |--- ENGRPM > 2321.50
|   |   |   |   |   |--- class: True
|   |--- FUELUS > 19.50
|   |   |--- ENGRPM <= 2316.50
|   |   |   |--- class: True
|   |   |   |--- ENGRPM > 2316.50
|   |   |   |   |--- class: False

```

Rysunek 5-30: Struktura wytrenowanego drzewa decyzyjnego (opracowanie własne)

W przedstawionym przypadku wartości „false” oznaczają brak rozładunków. W analizowanej próbie danych wejściowych algorytm wykrył więc dokładnie 4 zdarzenia, które potencjalnie mogą wskazywać momenty rozładunku skrzyni wozu. Sytuacje te poprzez warunki ich wystąpienia przedstawiono w Tabeli 5.4. W przypadku wartości nieodkrytych przez drzewo (brak lewej lub prawej strony ograniczenia) wypełniono je granicznymi wartościami możliwymi do wystąpienia w mierzonych sygnałach.

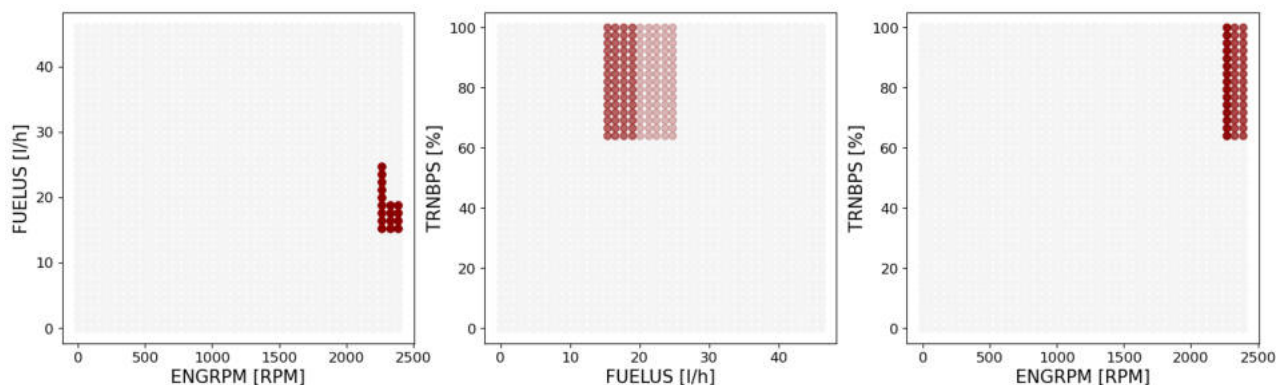
Tabela 5.4: Warunki, dla których drzewo decyzyjne stwierdziło obecność rozładunku

Lp.	ENGRPM	FUELUS	TRNBPS
1	(2276.00, 2310.50>	(14.50, 22.50>	(63.00, 100.00>
2	(2353.00, 2266.50>	(00.00, 14.50>	(63.50, 100.00>
3	(2321.50, 3000.00>	(14.50, 19.50>	(63.50, 100.00>
4	(2310.50, 2316.50>	(19.50, 120.00>	(63.50, 100.00>

(opracowanie własne)

Walidacja

Z użyciem drzewa stwierdzono dokładnie 4 różne sytuacje, dla których określono moment rozładunku skrzyni wozu odstawczego. Dodatkowo, aby w przyszłości uniknąć zjawiska przeuczenia modelu, zaproponowano przeprowadzenie manualnej generalizacji na podstawie całej próbki danych. Do tego celu przygotowano 64 000 unikatowych próbek dokładnie pokrywających całą, trójwymiarową płaszczyznę z uwzględnieniem kombinacji, jakie mogą wystąpić we wszystkich analizowanych sygnałach. Każda z tych próbek została następnie sklasyfikowana z wykorzystaniem drzewa. Działanie to przedstawiono na Rysunku 5-31. Obszar całej przestrzeni zaznaczono szarym kolorem, natomiast na sam wykres naniesiono tylko i wyłącznie próbki sklasyfikowane jako rozładunki. Ponieważ jest to przestrzeń 3D wizualizowana na 3 wykresach 2D, podczas wizualizacji próbek wprowadzono % przezroczystości dla każdej próbki, tak by obszary o największym skupisku rozładunków były oznaczone najbardziej intensywnym odcieniem czerwieni.



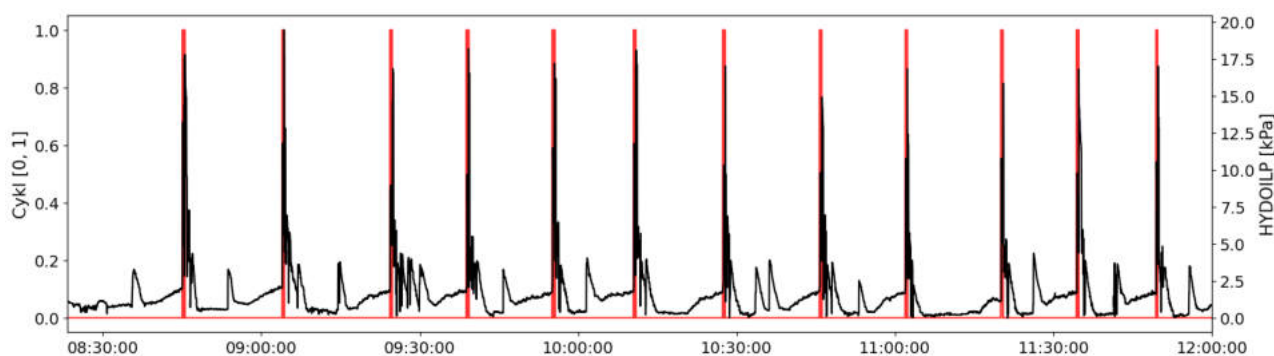
Rysunek 5-31: Wynik klasyfikacji całej możliwej przestrzeni z wykorzystaniem drzewa decyzyjnego (opracowanie własne)

Na podstawie powyższych wizualizacji przeprowadzono analizę, która pozwoliła jednoznacznie ograniczyć kryteria występowania rozładunków do jednolitej, generalnej postaci. Rozładunek

stwierdza się, gdy próbka spełnia następujące kryteria:

Rozładunek, gdy $(ENGRPM > 2200 \wedge FUELUS \in (15, 25) \wedge TRNBPS \geq 60)$.

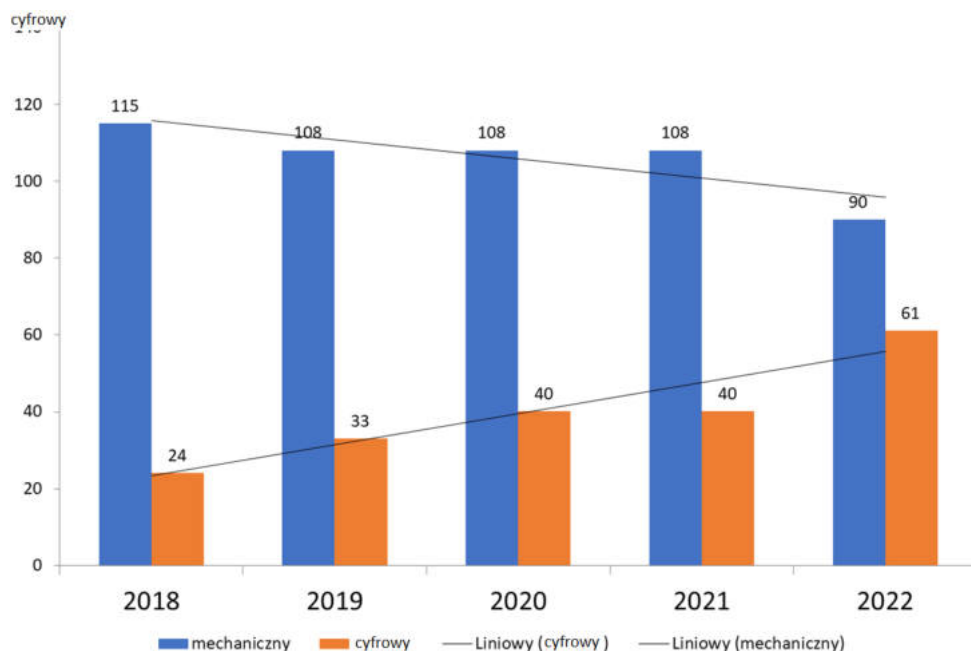
Przykładowy wynik detekcji z użyciem wspomnianego wyżej warunku przedstawione zostały na Rysunku 5-32. Algorytm osiąga wysoce zadowalające rezultaty, biorąc pod uwagę, że nie musi on koniecznie wykrywać wszystkich próbek powyżej progu HYDOILP, a jedynie ogólne momenty występowania takich sytuacji.



Rysunek 5-32: Przykładowy wynik klasyfikacji przy zastosowanych warunkach (opracowanie własne)

Automatyczne zliczanie cykli roboczych - algorytm 3 (antykolizja)

W poprzednich rozdziałach opisano badania nad identyfikacją cykli odstawy dla maszyn WO na podstawie danych z monitoringu SMG. Wyniki badań potwierdziły możliwość identyfikacji cykli. Jednak istotną przeszkodą dla ich wdrożenia w praktyce jest ograniczona populacja maszyn z odpowiednim wyposażeniem. Proces wdrożenia instalacji monitoringu dla wozów do odstawy urobku jest opóźniony w stosunku do innych grup maszyn, patrz Rysunek 5-33. Wymiana wozów starszej generacji z rozwiązaniami mechanicznymi (CB4 24K) na nowe modele (CB4 20/24TB), zaprojektowane z zastosowaniem rozwiązań cyfrowych, jest rozłożona w czasie. Ze względu na niższą cenę oraz łatwiejszą obsługę, oddziały spółki preferowały zakupy maszyn technicznie nieprzystosowanych do współpracy z cyfrowym monitoringiem wg standardu SYNAPSA. Pod koniec 2022 roku, populacja maszyn z cyfrowym monitoringiem osiągnęła poziom 40%. Proces pełnej wymiany zajmie jeszcze minimum 3 lata.



Rysunek 5-33: Populacja maszyn WO oraz WOS w kopalniach KGHM PM SA (opracowanie własne)

W przypadku ładowarek przegubowych klasy LK3 oraz LK4, nominalnie wszystkie maszyny są wyposażane w monitoring. W praktyce jednak dostępność danych z monitoringu, szczególnie sygnału HYDOILP, do obliczenia cykli wg algorytmu Kalmana [57] jest bardzo ograniczona. Spowodowane jest to częstymi uszkodzeniami mechanicznymi czujnika na układzie roboczym.

W związku z powyższym, w zakresie pracy kontynuowano poszukiwania alternatywnych źródeł danych dla monitorowania oceny organizacji procesu odstawy oponowej urobku w kopalniach. Na podstawie informacji publikowanych w mediach elektronicznych KGHM, udało się zidentyfikować nowe źródło danych dla uzupełnienia luki informacyjnej dla procesu odstawy urobku.

W KGHM Polska Miedź w sierpniu roku 2021 uruchomiono system wspomagania operatora maszyny w zakresie antykolizji w Samojezdnych Maszynach Górniczych (SMG), wykorzystujący technologię znaczników (tagów) RFID. Zakres wdrożenia obejmuje wszystkie samojezdne maszyny górnicze oraz wszystkie lampy górnicze będące na stanie kopalni oraz tzw. „firm obcych” realizujących roboty zlecone w wyrobiskach podziemnych Oddziałów Górniczych.

Zgodnie z deklaracją dostawcy „[...]system wspierania pracy operatora w zakresie antykolizji SYBET-Proxima (Rysunek 5-34) przeznaczony jest do użycia w wyrobiskach podziemnych zakładów górniczych. System wspiera pracę operatora samojezdnej maszyny górniczej w zakresie

możliwej kolizji z innymi maszynami, pracownikami lub oznaczonymi przeszkodami wyposażonymi w odpowiedni identyfikator radiowy, ostrzegając operatora pojazdu na module zabudowanym wewnątrz pojazdu odpowiednim kolorem oraz komunikatem.[...]”

Zestaw SYBET-Proxima, montowany na pojeździe, składa się z dwóch modułów połączonych przewodem:

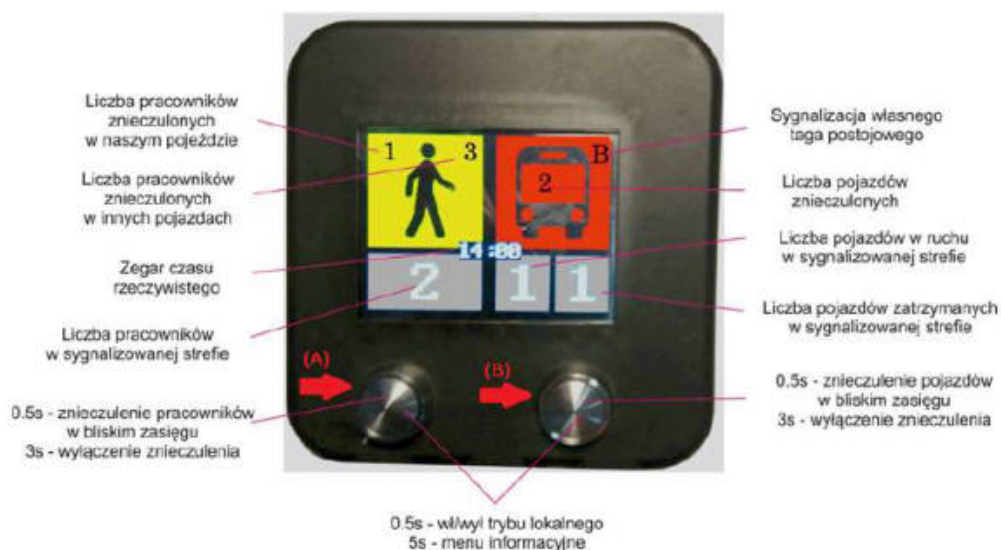
- modułu wyświetlacza - pełniącego jednocześnie rolę centralnej jednostki sterującej zestawu (Rysunek 5-35),
- oraz modułu radiowego - odpowiadającego za sygnalizację obecności i pomiar odległości do innych zestawów i/lub transponderów.

Moduł wyświetlacza – montowany w polu widzenia operatora; za pomocą tego modułu operator jest informowany o wykrytych zagrożeniach. Moduł radiowy – przeznaczony do zabudowy na zewnątrz pojazdu. Na wyposażeniu maszyn są dwa tagi: roboczy – aktywowany dla uruchomionej maszyny oraz postojowy – aktywowany dla maszyny zaparkowanej. Dodatkowo tagi są zamontowane jako wyposażenie lamp górniczych w celu identyfikacji przebywania ludzi w strefie zagrożenia kolizją z maszynami w ruchu.



Rysunek 5-34: Idea działania systemu ostrzegającego o ryzyku kolizji. (źródło: instrukcja DTR)

Funkcjonalność paneli operatorskich systemu zabudowanych w kabinach maszyn, pozwala na archiwizację rejestru zdarzeń (kontakt maszyna–maszyna, maszyna-człowiek). W dokumentacji producent deklaruje możliwość uruchomienia bezprzewodowej transmisji danych z rejestrów zdarzeń systemu, ale funkcjonalność ta nie była ujęta w zakresie wdrożenia systemu w KGHM.



Rysunek 5-35: Panel systemu SYBET-Proxima (źródło: instrukcja DTR)

W zakresie realizowanych badań przeprowadzono analizę dokumentacji technicznej systemu SYBET-Proxima, rozpoznano zasady kodowania danych w tzw. rejestrze zdarzeń (Rysunek 5-36) aplikacji (dane o kontaktach maszyny z tagami RFID zamontowanymi na maszynach oraz w lampach górniczych, oznaczone stemplem czasu). Przeprowadzono analizę pierwszych próbek danych skopiowanych w tzw. trybie serwisowym bezpośrednio z panelu systemu na nośnik USB.

Numer	Zdarzenie	Data	Godz.	Opis
4164	KONTAKT POJAZD	2021.09.10	19:07:12	48,LK3 -048/L
6676	KONTAKT OSOBA	2021.09.10	19:07:15	
6676	KONTAKT OSOBA	2021.09.10	19:07:23	
4164	KONTAKT POJAZD	2021.09.10	19:07:27	48,LK3 -048/L
6676	KONTAKT OSOBA	2021.09.10	19:07:31	
4340	KONTAKT POJAZD	2021.09.10	19:07:31	57,LK3 -057/L
21845	KONTAKT POSTOJ.	2021.09.10	19:07:35	
4164	KONTAKT POJAZD	2021.09.10	19:07:40	48,LK3 -048/L
7763	KONIEC KONTAKT	2021.09.10	19:07:41	
7763	KONTAKT OSOBA	2021.09.10	19:07:43	
6676	KONTAKT OSOBA	2021.09.10	19:07:46	
4164	KONTAKT POJAZD	2021.09.10	19:07:47	48,LK3 -048/L
6676	KONTAKT OSOBA	2021.09.10	19:07:50	
11633	KONTAKT OSOBA	2021.09.10	19:07:56	
4164	KONTAKT POJAZD	2021.09.10	19:07:58	48,LK3 -048/L

Rysunek 5-36: Przykład kodowania informacji w rejestrze zdarzeń (opracowanie własne)

Wyniki analiz potwierdzają możliwości wykorzystania danych do implementacji nowych algorytmów, najistotniejsze kwestie zostały wymienione poniżej:

- Ze względu na funkcję zapewnienia bezpieczeństwa ruchu maszyn, system ma wysoki priorytet zapewnienia funkcjonowania. Koszty utrzymania systemu „antykolizyjnego” są zabudżetowane dla Oddziałów Górniczych, krańcowy koszt udostępnienia danych do innych celów jest znikomy;
- Funkcjonalność paneli operatorskich zabudowanych w maszynach pozwala na archiwizację rejestru zdarzeń (kontakt z tagami identyfikującymi maszyny lub pracowników) oraz bezprzewodową transmisję danych w ustalonych punktach dostępowych, pasmo radiowe;
- W celu wykorzystania dostępnych AP Wi-Fi (SYNAPSA) wymagana jest konwersja sygnału z pasma o częstotliwości 868 MHz.
- Wymagana jest modyfikacja oprogramowania w panelach operatorskich maszyn dla obsłużenia procesu zarządzania transferem plików, ze względu na limitowany przedział czasu na transfer danych podczas tankowania maszyny;
- Numery tag RFID używanych w systemie można jednoznacznie powiązać z numerem maszyny w module PM SAP (tagi montowane na maszynie - 2 sztuki: aktywny oraz pasywny) lub numerem marki pracownika (tagi montowane w lampach górniczych - 1 sztuka). Potwierdzone relacje można wykorzystać do automatycznego zarządzania konfiguracją w procesach ETL hurtowni danych. Algorytmy będą odwoływały się do struktur słownikowych w systemach powiązanych logicznie z obiektami z bazy danych rejestru systemu SYBET-Proxima:
- Dla identyfikacji innych zdarzeń (obiektów) niż kontakt z maszyną lub człowiekiem konieczna jest zabudowa dodatkowych tagów RFID, tzw. tagów postojowych.

Interesujące są wyniki analizy logiki kodowania rodzajów prac wykonywanych przez pracowników na stanowiskach fizycznych w kopalniach w module HR-TM SAP. Operatorzy maszyn są przypisani do numeru maszyny (atrybut *lokalizacja funkcjonalna*) co :

- Operatorzy maszyn są przypisani do numeru maszyny oraz do oddziału wydobywczego zlecającego prace (atrybuty *lokalizacja funkcjonalna* oraz *oddział zlecający*).
- Obsługa urządzeń URB (atrybut *kod roboty* = 850) jest przypisana do numeru punktu wysypowego, który pozwala na identyfikację obiektu na mapie, a tym samym na przypisanie do konkretnego oddziału wydobywczego.

Na Rysunku 5-37 przedstawiono ilustracje typowego punktu wysypowego. System SYBET-Proxima, zamontowany na WO lub LK, w momencie rozładunku urobku rejestruje kontakt z tagiem RFID operatora manipulatora, który steruje młotem hydraulicznym do rozbijania nadgabarytowych brył z kabiny. Dzięki fuzji danych potwierdzono, że na podstawie kontaktu maszyny z tagiem operatora URB możemy jednoznacznie zidentyfikować punkt rozładunku dla każdej zmiany roboczej oraz oddział wydobywczy zlecający prace.



Rysunek 5-37: Punkt wysypu urobku tzw. URB z kabiną klimatyzowaną (opracowanie własne)

Na Rysunku 5-38 zaprezentowano wyniki analizy danych z systemu SYBET-Proxima z maszyny WO.

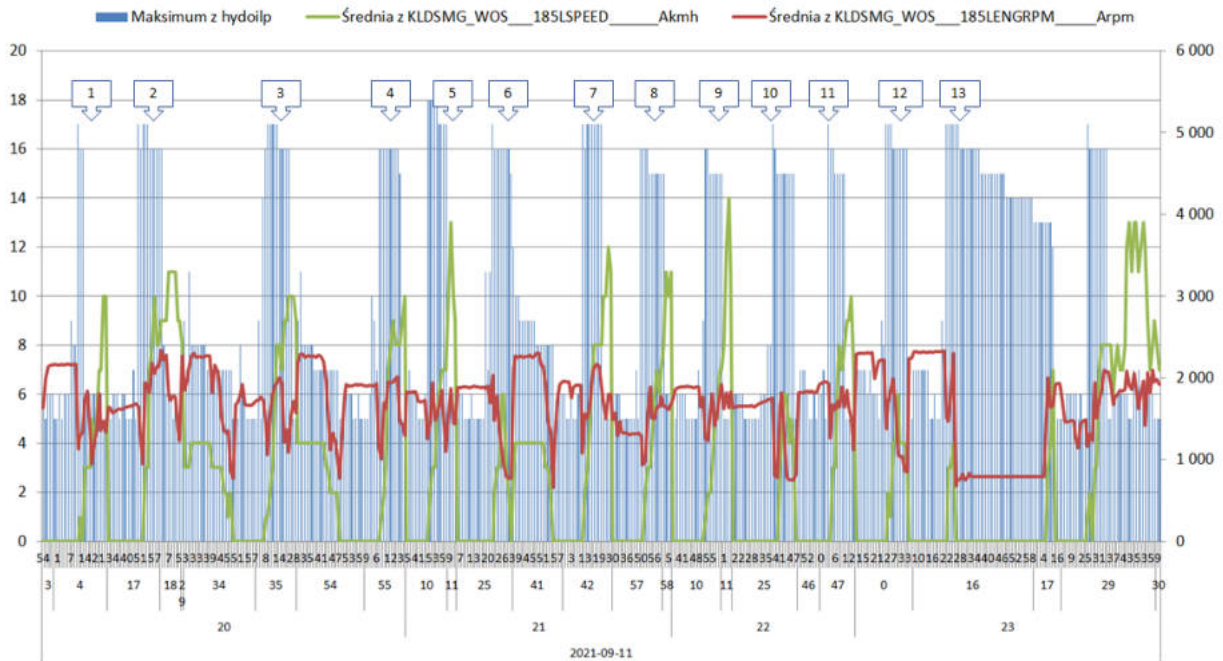
1. Filtracja danych dla znacznika identyfikującego określony punkt wysypowy.
2. Początek zdarzenia: kontakt ze znacznikiem kraty
3. Koniec zdarzenia: kontakt ze znacznikiem kraty
4. Obliczona długość zdarzenia (3-2)
5. Długość przerwy pomiędzy kolejnymi zdarzeniami określa: różnica czasu pomiędzy początkiem danego zdarzenia (n), a końcem poprzedniego zdarzenia (n-1))

Sekwencje kontaktów rejestratora maszyny WO z tagiem identyfikującym punkt wysypu zostały rozdzielone pogrubioną linią.

Opis hh 14 KLIM L-3...102 p. 24 (Wszystko)							Opis hh 14 KLIM L...-2102 p. 24 (Wszystki)						
Liczba z Zdarze		Zdarzenie		dt kontaktu	flaga	dt rozładunku	dt przewy	Liczba z Zdarze		Zdarzenie			
Data	Godz.							Data	Godz.				
2021.09.11	19:50:15	KONTAKT	INNY	00:00:06				2021.09.11	19:50:21	KONIEC	KONTAKT		
	19:50:41	KONTAKT	INNY	00:00:08			00:00:20		19:50:49	KONIEC	KONTAKT		
	20:02:39	KONTAKT	INNY	00:00:07		00:11:50	00:11:50		20:02:46	KONIEC	KONTAKT		
	20:02:52	KONTAKT	INNY	00:00:11			00:00:06		20:03:03	KONIEC	KONTAKT		
	20:03:24	KONTAKT	INNY	00:01:07	1		00:00:21		20:04:31	KONIEC	KONTAKT		
	20:16:26	KONTAKT	INNY	00:00:15		00:11:55	00:11:55		20:16:41	KONIEC	KONTAKT		
	20:17:01	KONTAKT	INNY	00:01:06	1		00:00:20		20:18:07	KONIEC	KONTAKT		
	20:33:54	KONTAKT	INNY	00:00:18		00:15:47	00:15:47		20:34:12	KONIEC	KONTAKT		
	20:34:21	KONTAKT	INNY	00:00:07			00:00:09		20:34:28	KONIEC	KONTAKT		
	20:34:31	KONTAKT	INNY	00:00:29			00:00:03		20:35:00	KONIEC	KONTAKT		
	20:35:00	KONTAKT	INNY	00:00:26	1		00:00:00		20:35:26	KONIEC	KONTAKT		
	20:53:19	KONTAKT	INNY	00:00:10		00:17:53	00:17:53		20:53:29	KONIEC	KONTAKT		
	20:53:40	KONTAKT	INNY	00:00:13			00:00:11		20:53:53	KONIEC	KONTAKT		
	20:53:54	KONTAKT	INNY	00:00:06			00:00:01		20:54:00	KONIEC	KONTAKT		
	20:54:01	KONTAKT	INNY	00:00:15			00:00:01		20:54:16	KONIEC	KONTAKT		
	20:54:28	KONTAKT	INNY	00:01:02	1		00:00:12		20:55:30	KONIEC	KONTAKT		
	21:09:43	KONTAKT	INNY	00:00:13		00:14:13	00:14:13		21:09:56	KONIEC	KONTAKT		
	21:10:11	KONTAKT	INNY	00:00:06			00:00:15		21:10:17	KONIEC	KONTAKT		
	21:10:17	KONTAKT	INNY	00:00:55	1		00:00:00		21:11:12	KONIEC	KONTAKT		
	21:24:06	KONTAKT	INNY	00:00:11		00:12:54	00:12:54		21:24:17	KONIEC	KONTAKT		
	21:24:36	KONTAKT	INNY	00:01:36	1		00:00:19		21:26:12	KONIEC	KONTAKT		
	21:41:20	KONTAKT	INNY	00:00:07		00:15:08	00:15:08		21:41:27	KONIEC	KONTAKT		
	21:41:45	KONTAKT	INNY	00:00:42	1		00:00:18		21:42:27	KONIEC	KONTAKT		
	21:55:54	KONTAKT	INNY	00:00:06		00:13:27	00:13:27		21:56:00	KONIEC	KONTAKT		
	21:56:03	KONTAKT	INNY	00:00:22			00:00:03		21:56:25	KONIEC	KONTAKT		
	21:56:31	KONTAKT	INNY	00:00:13			00:00:06		21:56:44	KONIEC	KONTAKT		
	21:56:53	KONTAKT	INNY	00:00:11			00:00:09		21:57:04	KONIEC	KONTAKT		
	21:57:05	KONTAKT	INNY	00:01:01	1		00:00:01		21:58:06	KONIEC	KONTAKT		
	22:09:24	KONTAKT	INNY	00:00:11		00:11:18	00:11:18		22:09:35	KONIEC	KONTAKT		
	22:09:45	KONTAKT	INNY	00:01:21	1		00:00:10		22:11:06	KONIEC	KONTAKT		
	22:23:27	KONTAKT	INNY	00:00:07		00:12:21	00:12:21		22:23:34	KONIEC	KONTAKT		
	22:23:58	KONTAKT	INNY	00:00:16			00:00:24		22:24:14	KONIEC	KONTAKT		
	22:24:30	KONTAKT	INNY	00:01:42	1		00:00:16		22:26:12	KONIEC	KONTAKT		
	22:40:58	KONTAKT	INNY	00:00:10		00:14:46	00:14:46		22:41:08	KONIEC	KONTAKT		
	22:41:08	KONTAKT	INNY	00:00:10			00:00:00		22:41:18	KONIEC	KONTAKT		
	22:45:00	KONTAKT	INNY	00:00:06			00:03:42		22:45:06	KONIEC	KONTAKT		
	22:45:11	KONTAKT	INNY	00:02:10	1		00:00:05		22:47:21	KONIEC	KONTAKT		
	22:58:46	KONTAKT	INNY	00:00:12		00:11:25	00:11:25		22:58:58	KONIEC	KONTAKT		
	22:59:04	KONTAKT	INNY	00:00:25			00:00:06		22:59:29	KONIEC	KONTAKT		
	22:59:37	KONTAKT	INNY	00:00:11			00:00:08		22:59:48	KONIEC	KONTAKT		
	22:59:52	KONTAKT	INNY	00:00:24			00:00:04		23:00:16	KONIEC	KONTAKT		
	23:00:24	KONTAKT	INNY	00:00:30	1		00:00:08		23:00:54	KONIEC	KONTAKT		
	23:14:39	KONTAKT	INNY	00:00:06		00:13:45	00:13:45		23:14:45	KONIEC	KONTAKT		
	23:14:45	KONTAKT	INNY	00:00:07			00:00:00		23:14:52	KONIEC	KONTAKT		
	23:14:52	KONTAKT	INNY	00:00:07			00:00:00		23:14:59	KONIEC	KONTAKT		
	23:14:59	KONTAKT	INNY	00:00:12			00:00:00		23:15:11	KONIEC	KONTAKT		
	23:15:17	KONTAKT	INNY	00:00:10			00:00:06		23:15:27	KONIEC	KONTAKT		
	23:15:38	KONTAKT	INNY	00:01:33	1		00:00:11		23:17:11	KONIEC	KONTAKT		

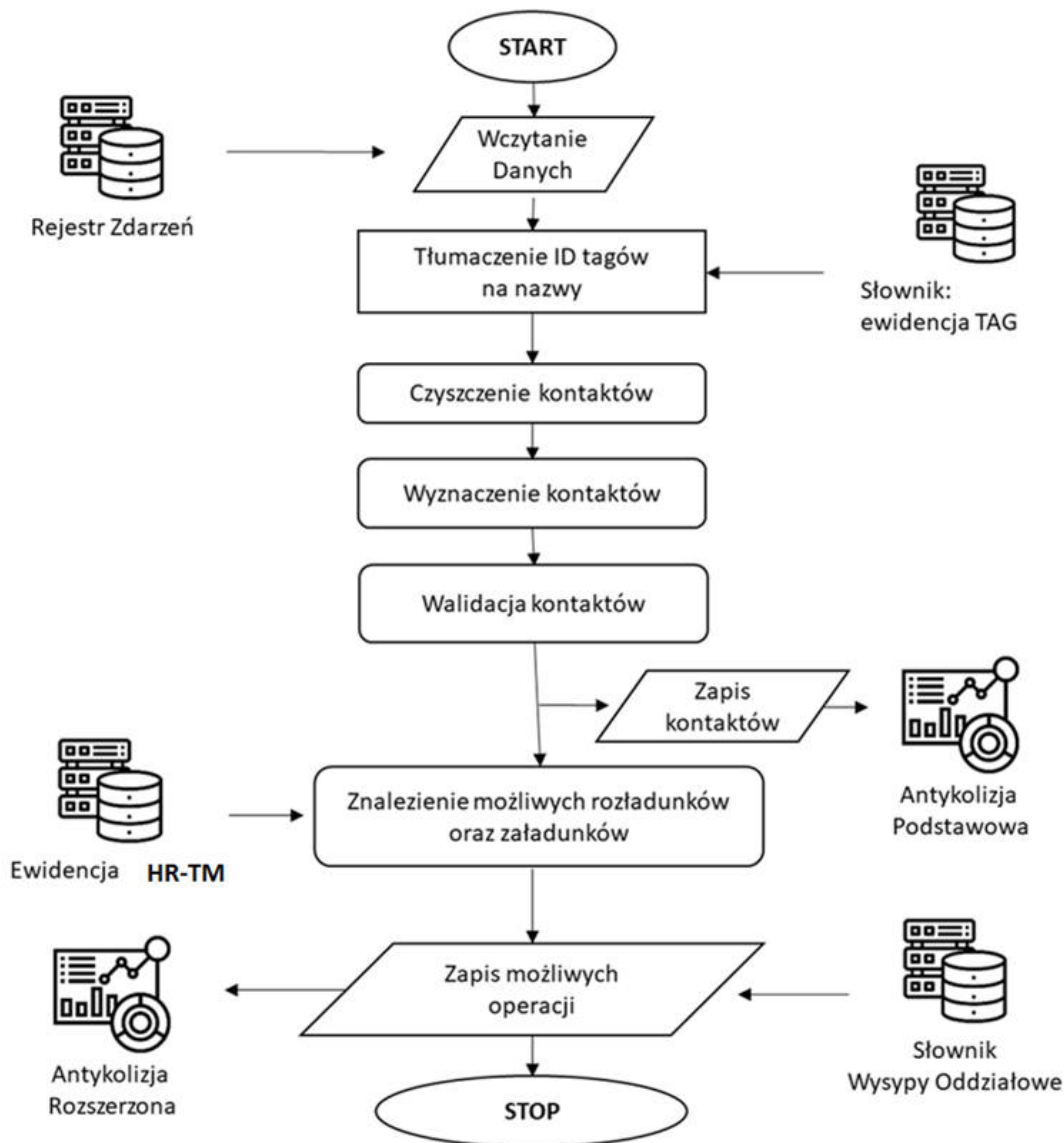
Rysunek 5-38: Segmentacja danych w celu identyfikacji cykli rozładunku (opracowanie własne)

Stempel czasowy dla zidentyfikowanych cykli z Rysunku 5-38 pokrywa się z cyklami zidentyfikowanymi na podstawie danych z monitoringu SYNAPSA, prezentowanymi na Rysunku 5-39.



Rysunek 5-39: Identyfikacja cykli rozładunku WO na podstawie danych z monitoringu SYNAPSA - weryfikacja metody bazującej na danych z rejestru zdarzeń (opracowanie własne)

Na Rysunku 5-40 zaprezentowano schemat algorytmu przetwarzania danych dla potrzeb identyfikacji cykli pracy maszyn dla operacji załadunku i odstawy urobku na punkt wysypu na przenośnik taśmowy.



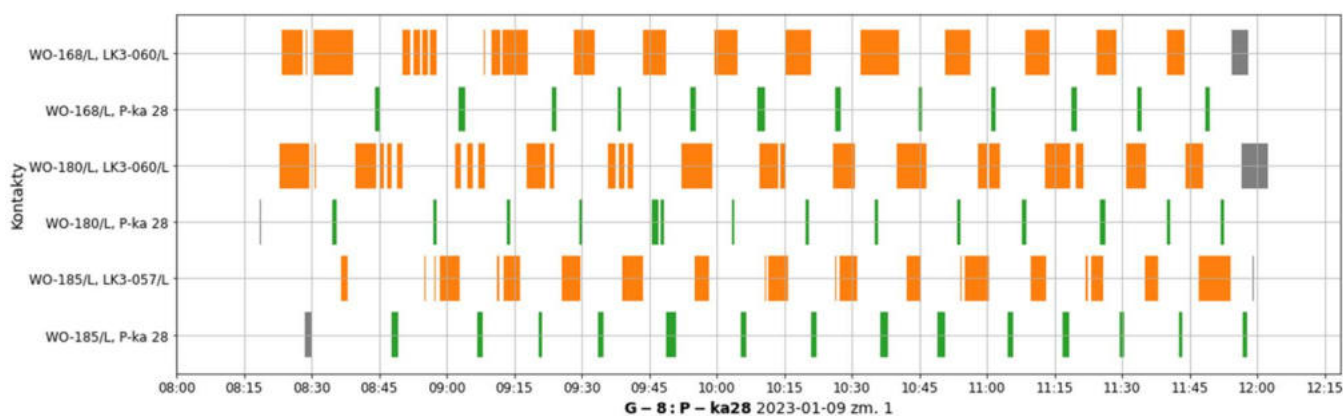
Rysunek 5-40: Algorytm przetwarzania danych z „Rejestru Zdarzeń systemu wspomaganie operatora w zakresie antykolizji” (źródło: opracowanie własne)

Na Rysunku 5-41 przedstawiono chronologicznie sekwencje pracy dla operacji załadunku i odstawy urobku przy zastosowaniu zestawu ładowarek LK3-3 oraz wozów WOS, wyznaczone na podstawie opisanego schematu. Algorytm obliczeniowy uwzględnia szereg zależności logicznych:

- zaliczanie kursu dla WO jest możliwe tylko wtedy, gdy wcześniej identyfikowano sekwencję kontaktów z ładowarką charakterystyczną dla operacji załadunku,
- zaliczanie załadowanego wozu dla LK jest możliwe tylko wtedy, gdy wcześniej identyfikowano sekwencję kontaktów z WO charakterystyczną dla operacji załadunku, a następnie WO był zarejestrowany na punkcie wyspy urobku,

- zaliczanie kursu dla LK przy odstawie urobku bezpośrednio na punkt wysypowy jest możliwe tylko wtedy, gdy LK była zarejestrowana na punkcie wysypu urobku. (Informacja obliczana w ten sposób może zostać wykorzystana do weryfikacji obliczeń ilości cykli wg metody wykorzystującej filtr Kalmana.)

Przy weryfikacji cykli rozładunku WO oraz LK na punktach wysypowych, możemy dodatkowo wykorzystać sygnał o załączaniu tzw. „podawacza” z systemów SCADA dla obszaru infrastruktury przenośników taśmowych. Dzięki temu, że system SYBET-Proxima identyfikuje operatora w kabinie, możliwe jest precyzyjne przypisanie każdego cyklu do konkretnego operatora. Jest to istotna zaleta, ponieważ pomiędzy zmianami 1 i 2 oraz 3 i 4 wymiana operatorów jest realizowana bezpośrednio w punktach wymiany maszyn, umieszczonych blisko przypadków eksploatacyjnych. W praktyce operatorzy nie trzymają się sztywno określonych ram czasowych podziału zmian, co widać na danych z monitoringu SYNAPSA. Przejmują maszyny w tolerancji czasowej +/- 20 minut.



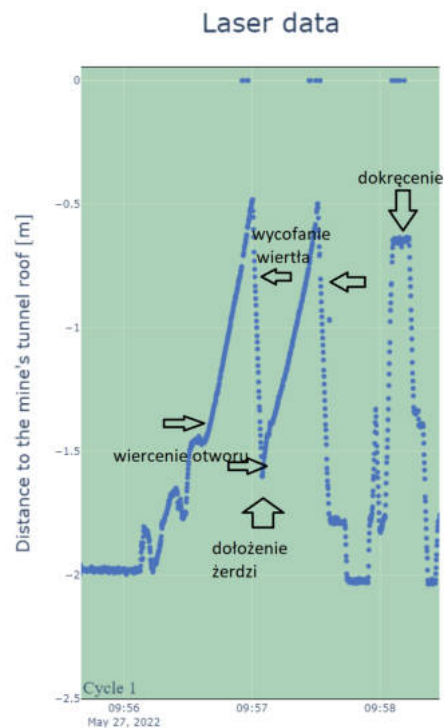
Rysunek 5-41: Ilustracja efektów obliczeń statystyk dla operacji odstawy w oddziale wydobywczym G8 kopalni ZG Lubin, URB (krata) o oznaczeniu „P-ka28” (źródło: opracowanie własne)

5.2.3 Monitorowanie procesu zabudowy obudowy kotwowej z wykorzystaniem techniki laserowej

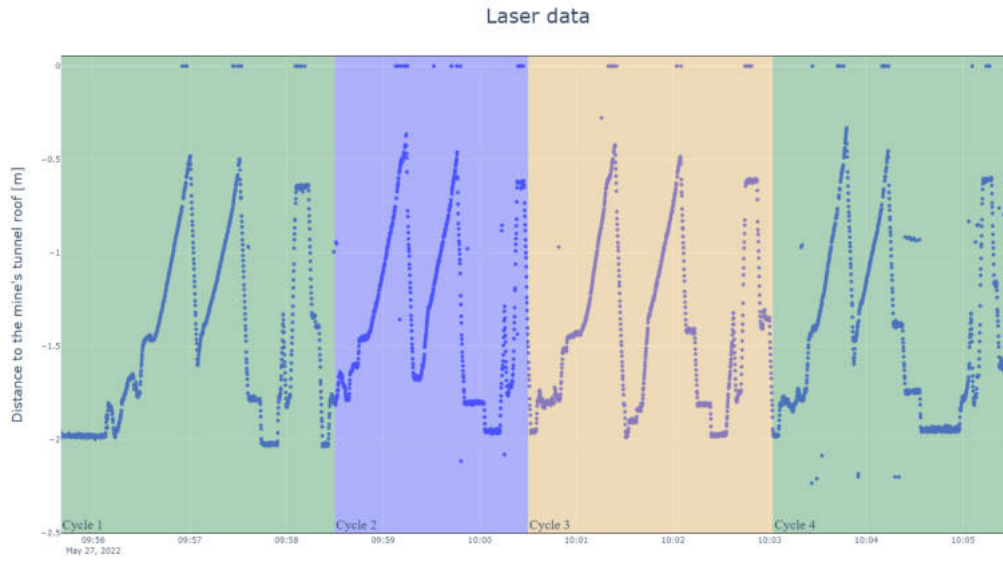
Proces zabudowy obudowy kotwowej jest bardzo skomplikowanym procesem technologicznym, składającym się z wielu czynności cząstkowych, które różnią się w zależności od rodzaju obudowy. Przy zabezpieczaniu stropów w postępie, tam gdzie pozwalają na to warunki, wykorzystuje się kotwy rozprężne (tzw. ekspansywne). Zaletą tej technologii jest szybszy proces zabudowy kotwy. W trudniejszych warunkach stosowane są kotwy wklejane, dla których czas zabudowy jest wydłużony w związku z koniecznością wprowadzania (wstrzeliwania) kleju do otworu, mieszania kleju oraz oczekiwania na związanie przed dokręceniem nakrętki. Zachowanie reżimu technologicznego jest bezwzględnie wymagane dla zapewnienia prawidłowej współpracy kotwy z górotworem i uzyskania nominalnej nośności. Przykładowa instrukcja zabudowy kotew rozprężnych jest następująca:

1. Ustawić maszynę w miejscu pracy.
2. Rozłożyć podpory.
3. Wyregulować daszek oraz podest roboczy (do wzrostu), bezwzględnie zabrania się rozpięcia daszka o strop.
4. Przygotować narzędzia oraz zaplecze niezbędne do założenia kotwi ekspansywnych.
5. Ustawić organ roboczy (wieżyczkę) w miejscu kotwienia pierwszego otworu.
6. Odwiercić otwór odpowiedni do długości i średnicy zakładanej kotwi ekspansywnej.
7. Zdemontować żerdź wiertniczą, a w przypadku wiercenia segmentowego demontować ją w kolejności odwrotnej do tej podczas wiercenia.
8. W czasie wycofywania żerdzi należy używać jednocześnie posuwu i obrotów wiertarki w celu uniknięcia blokowania się koronki w wywierconym otworze.
9. Opuścić wysięgnik w celu swobodnego założenia kotwy do klucza dokrętaka (przy kotwie 1.8 m wymagane jest opuszczenie wysięgnika do skrajnego dolnego położenia).
10. Umieścić kotew dolną częścią w kluczu, a częścią górną na początku otworu.
11. Włączyć posuw i powoli prowadzić kotew, aż do chwili przylgnięcia blachy do stropu.
12. Wyłączyć obroty dokrętaka do momentu jego samoczynnego zatrzymania się. Następnie ponownie włączyć obroty w celu dokładnego dokręcenia kotwi. Kotew należy dokręcić zgodnie z instrukcją wykonywania obudowy kotwowej (zaleca się 250-350 Nm, a dla kotew 10 m – wg zaleceń producenta kotew).
13. Wycofać wiertarkę, zdemontować klucz dokrętaka, zamontować żerdź wiertniczą.
14. Ustawić organ roboczy (wieżyczkę) w miejsce zabudowy kolejnej kotwy i proces kontynuować.

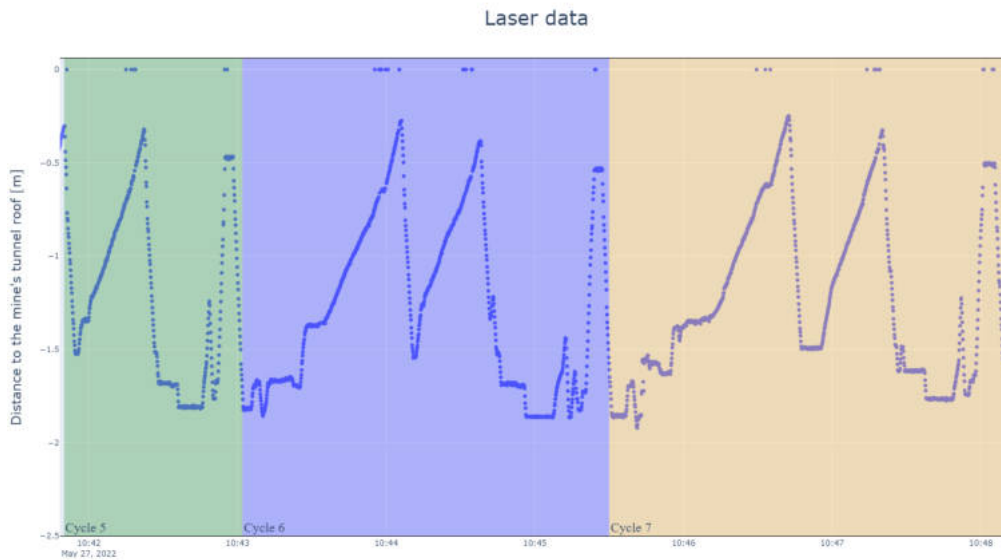
Przebieg danych zgodny z cyklem z wyróżnieniem kluczowych elementów pokazano na Rysunku 5-42. Niestety, warunki dołowe (umiejętności operatora, stan maszyny, geometria wyrobiska, stan stropu, czynniki geologiczne itd.) powodują dużą zmienność tego procesu i każdy z tych elementów może się różnić w kolejnym cyklu. Na tym etapie rozwoju metody można powiedzieć, że dzięki autorskiemu pomysłowi i testom urządzenia w warunkach dołowych, możliwe jest zarejestrowanie sygnału o bardzo dobrej jakości, w którym można wyróżnić cykle robocze kotwiarki. Na Rysunkach 5-43 i 5-44 przedstawiono wyniki detekcji cykli w dwóch eksperymentach pomiarowych. Ponieważ proces kotwienia jest złożony, wydajność tego procesu jest nieporównywalnie mniejsza niż w przypadku wiercenia. Dlatego na Rysunkach wyróżnić można tylko 7 cykli. Automatyzacja rozpoznawania realizacji cyklu roboczego będzie tematem dalszych prac badawczych.



Rysunek 5-42: Zabudowa kotew rozprężnych - zidentyfikowane kluczowe elementy cyklu w oparciu o dokumentację filmową (opracowanie własne)



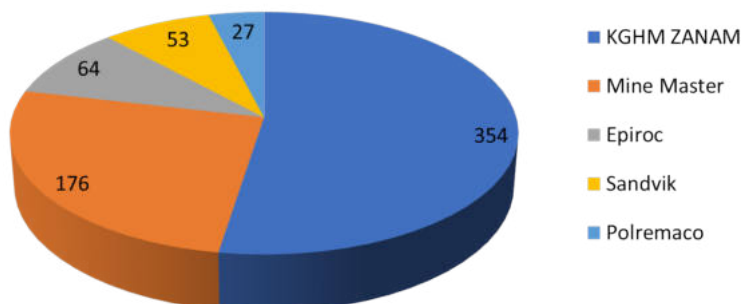
Rysunek 5-43: Zidentyfikowane cykle w oparciu o dokumentację filmową - eksperyment nr 1 (opracowanie własne)



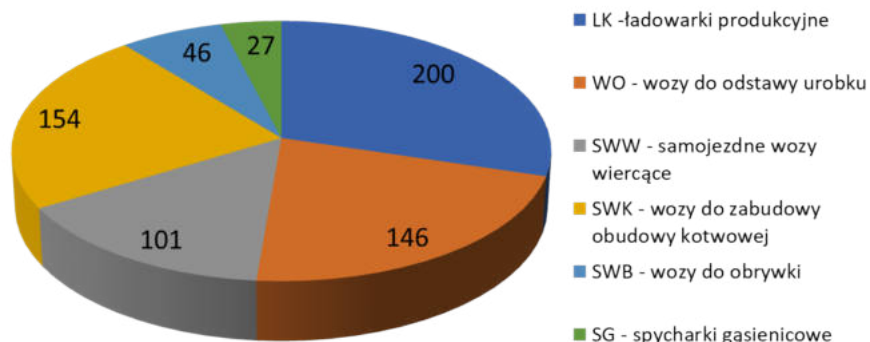
Rysunek 5-44: Zidentyfikowane cykle w oparciu o dokumentację filmową - eksperyment nr 2 (opracowanie własne)

5.3 Elementy diagnostyki maszyn

Samojezdne maszyny górnicze stosowane w kopalniach rud miedzi dostarczane są przez różnych producentów (Rysunek 5-45), realizują również różne procesy technologiczne (Rysunek 5-46), co powoduje, że nie jest możliwe opracowanie jednej procedury diagnostycznej do wszystkich podzespołów.



Rysunek 5-45: Struktura populacji maszyn ze względu na producentów (opracowanie własne)



Rysunek 5-46: Struktura populacji maszyn ze względu na rodzaj procesu technologicznego (opracowanie własne)

Maszyny różnią się znacząco budową w zależności od przeznaczenia, niemniej jednak można wyróżnić na dużym poziomie ogólności pewne wspólne dla większości maszyn układy. Na Rysunku 5-47 przedstawiono najważniejsze z punktu widzenia eksploatacji w kopalni układy i elementy maszyny samojezdnej. W przedsiębiorstwie prowadzone są kompleksowe analizy niezawodności, ale mimo to trudno oszacować jednoznacznie, który z układów/elementów maszyny jest najważniejszy i powinien być obiektem badań. Na potrzeby rozprawy doktorskiej skupiono

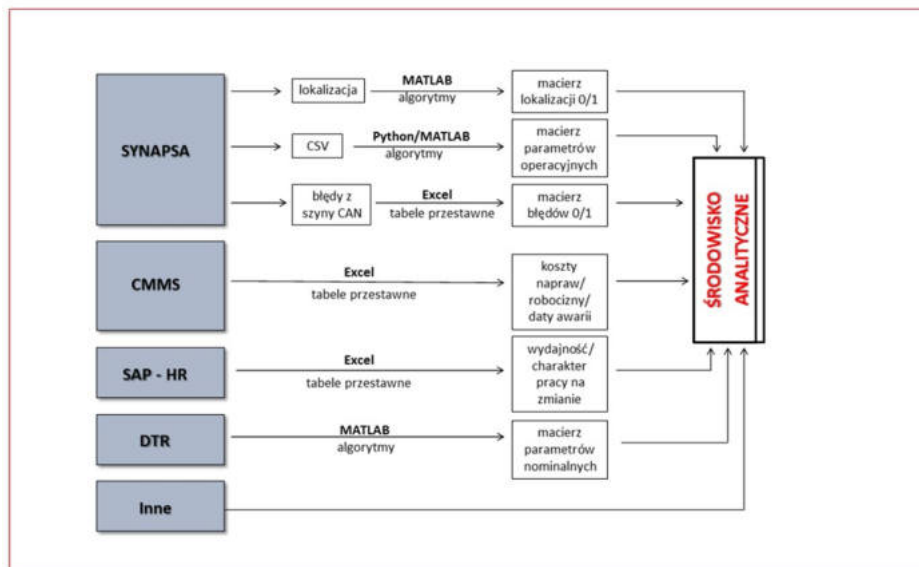
się na silniku spalinowym (analiza ciśnienia oleju, analiza temperatury płynu chłodzącego) oraz na układzie przeniesienia napędu, w którym dochodziło do uszkodzeń mechanicznych.



Rysunek 5-47: Dekompozycja maszyny SMG na najważniejsze podukłady (opracowanie własne)

Wymienione czynniki wpływają na złożoność procedur diagnostycznych. Dodatkowo, jak już wspomniano wielokrotnie w tej pracy, kluczowe czynniki wpływające na pracę maszyny samojazdnej nie mogą się ograniczać tylko do monitorowanych na bieżąco parametrów. Doświadczenie eksploatacyjne poparte analizami niezawodności prowadzonymi przez odpowiednie służby na Oddziałach Górniczych oraz w centrali spółki pokazują, że historia napraw (system CMMS), rodzaj wykonywanej pracy, umiejętności, doświadczenie operatora (SAP HR), rozwiązania konstrukcyjne i wartości graniczne parametrów pracy maszyny (DTR), a także - zupełnie nieoczywista dla ludzi spoza kopalni - lokalizacja miejsca pracy maszyny, znacząco wpływają na wartości parametrów rejestrowanych przez pokładowy system monitorowania, zatem bezwzględnie muszą być ujęte w procesie wnioskowania. Na Rysunku 5-48 przedstawiono koncepcję fuzji danych na potrzeby diagnostyki z wyszczególnieniem źródeł danych.

**Opracowanie metodologii predykcyjnego utrzymania ruchu dla samojezdnych maszyn górniczych.
ŹRÓDŁA DANYCH**



Rysunek 5-48: Możliwa fuzja danych na potrzeby diagnostyki układów (opracowanie własne)

5.3.1 Diagnostyka silnika SMG na podstawie ciśnienia oleju

W tej sekcji omówione zostanie jedno z opracowanych rozwiązań diagnostycznych w zakresie monitorowania i podejmowania decyzji o stanie silnika na podstawie ciśnienia oleju. Jeśli ciśnienie oleju silnikowego jest zbyt wysokie, działa automatyczny zawór bezpieczeństwa, który uwalnia nadmiar oleju z układu. Znacznie gorszym przypadkiem jest zbyt małe ciśnienie oleju - taka sytuacja może doprowadzić do uszkodzenia silnika. Jednak, jak wspomniano, prosta diagnoza poprzez porównanie z poziomem progowym jest niemożliwa. Dlatego w rozprawie zaproponowano procedurę statystyczną do wykrywania tzw. punktu zmiany reżimu dla wysoce zmiennych danych losowych. Zaproponowana strategia opiera się na podejściu statystycznym, które minimalizuje wpływ lokalnych zmian w badanych danych. Maszyna jest rozpatrywana jako system zmienny w czasie, dlatego postanowiono nie analizować danych próbka po próbce, ale oszacować jej charakterystykę w perspektywie zmian (sześciogodzinnych okresów) pracy. Praca maszyny w rozpatrywanej kopalni jest podzielona na 4 zmiany, każda po 6h. Wynika to z przepisów prawa górniczego, specyficznych procesów wymaganych w produkcji górniczej oraz wyjątkowo trudnych warunków podziemnych. Nawet jeśli niektórzy eksperci są w stanie zauważyć zmiany w surowym sygnale, bardzo trudno jest podać obiektywne reguły wykrywania anomalii w praktyce. Ze względu na wspomnianą specyfikę pracy maszyny w kopalni, w pierwszej kolejności dokonywana jest segmentacja danych według zmian roboczych. Z wywiadu z operatorami maszyn wynika, że

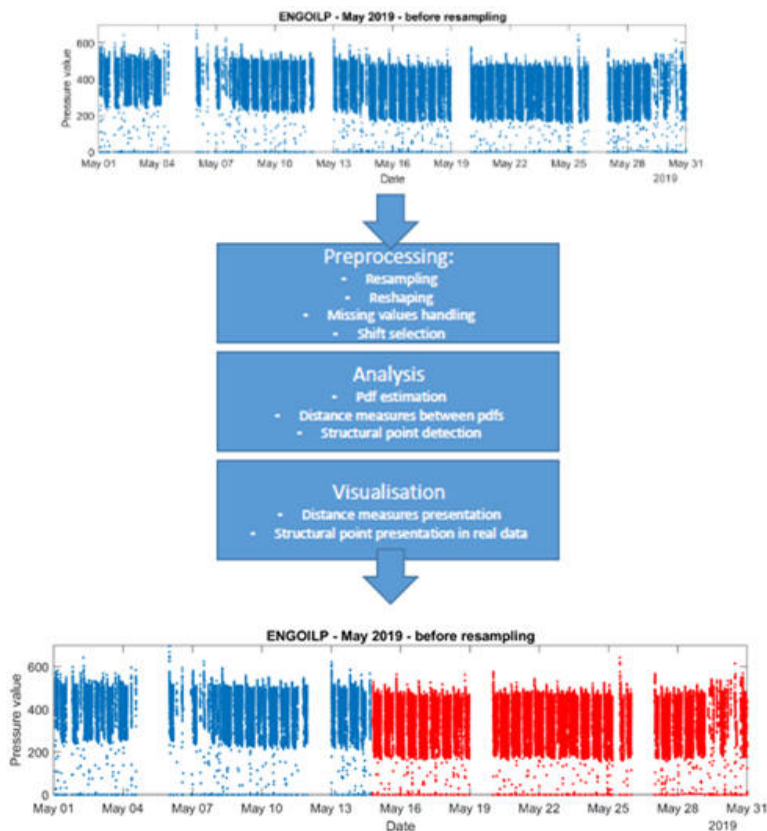
praca SMG na 1 i 2 zmianie jest zupełnie inna niż na 3 i 4 zmianie (w nocy). Pierwsza zmiana w ciągu dnia to między 6:00 a 12:00; II zmiana robocza - 12.00-18.00; 3 zmiana robocza - 18:00-00:00 i 4 zmiana robocza - 0:00-06:00. Zmiany są różne (dane rejestrowane w czasie tych zmian są różne), jednak z perspektywy proponowanej metody nie jest to krytyczne. Ze statystycznego punktu widzenia, różnice w danych związane ze zmianą warunków pracy są znacznie silniejsze niż różnice związane z różnymi zmianami pracy. Proponowane podejście pozwala przetwarzać dane do postaci, która zawiera informacje o stanie układu, a nie o dziennych zmianach parametrów jego pracy jak prędkość, obciążenie itp. Z bardzo zmiennego w czasie procesu związanego ze zmianami ciśnienia oleju możliwe jest uzyskanie prawie monotonicznej funkcji opisującej zmianę stanu w układzie. Taka transformacja danych jest czytelna dla obsługi technicznej i może być podstawą do podejmowania decyzji utrzymaniowych. Ma to ogromne znaczenie praktyczne, gdyż populacja floty SMG przekracza 1000 maszyn.

Nowością podejścia jest odpowiednia obróbka surowych danych. W analizie danych wykorzystano fakt, że empiryczny rozkład szeregów czasowych ciśnienia oleju silnikowego może zmieniać się w kolejnych zmianach roboczych, co jest silnie związane z procesem degradacji maszyny. W związku z tym badane są miary odległości między rozkładami danych odpowiadających zmianom roboczym. Tutaj wykorzystano funkcje dywergencji, które mierzą odległość między dwoma rozkładami prawdopodobieństwa wyrażoną za pomocą średnich ich funkcji gęstości prawdopodobieństwa. W oparciu o tę charakterystykę zastosowano klasyczne statystyki testowe (tj. t-Studenta i Wilcozona), stosowane w problemie testowania, czy dwie próbki mają równe średnie. Efektem końcowym jest wykrycie punktu zmiany reżimu odpowiadającego momentowi naprawy zarejestrowanej przez obsługę techniczną w kopalni. Z punktu widzenia przetwarzania sygnałów, nowość podejścia polega na statystycznym przetwarzaniu długookresowych, historycznych danych przemysłowych w celu uzyskania jednoznacznej informacji o zmianie stanu. Zaproponowano analizę danych w segmentach w celu wyeliminowania lokalnych zakłóceń i wyodrębnienia wzorców postrzeganych jako funkcja gęstości prawdopodobieństwa. Następnie różnica między segmentami jest szacowana na podstawie odległości między rozkładami i taka nowa cecha jest wykorzystywana do ustalenia strukturalnego punktu przerwania w procesie. Zaproponowano procedurę przetwarzania danych obejmującą etap wstępnego przetwarzania (walidacja danych, obsługa braków danych, ponowne próbkowanie, przekształcanie danych w celu powiązania ich ze specyfiką procesu), analizę danych (funkcja gęstości prawdopodobieństwa danych zamiast próbki poprzez analizę próbki, pomiary odległości w przestrzeni wielowymiarowej i wreszcie detekcję punktu zmiany reżimu - czyli identyfikację momentu, w którym proces zmienia swój charakter) i prezentację wyników

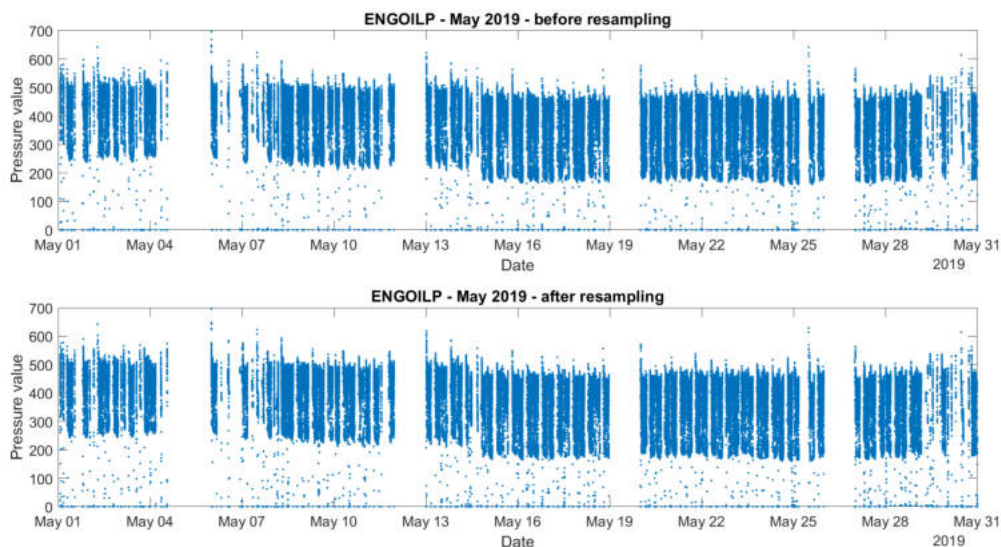
(przekształcenie uzyskanych informacji z powrotem do dziedziny rzeczywistych próbek w celu wizualizacji momentu zmiany).

Założenia i dane wejściowe

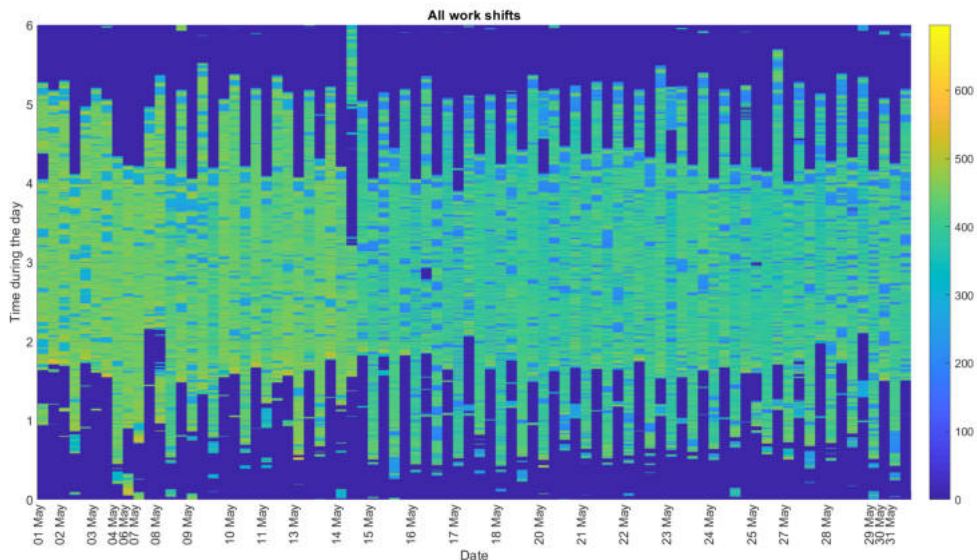
Ogólną koncepcję procedury przedstawiono na Rysunku 5-49. Surowe dane poddawane są trzyetapowej procedurze (kolejne bloki diagramu), w wyniku której wykrywany jest punkt zmiany reżimu. Kroki wyszczególnione w każdym z trzech etapów są szczegółowo opisane w kolejnych sekcjach rozdziału. Na Rysunku 5-50 przedstawiono surowe dane zmiennej ENGOILP (ciśnienie oleju silnika) oraz te same dane po procedurze resamplingu (przepróbkowania). Operacja przepróbkowania wiąże się z ustaleniem tej samej liczby próbek w tych samych momentach czasu dla różnych zmian. Z punktu widzenia przebiegu sygnału nie wprowadza ona istotnych zmian. Jak już wspomniano, analiza wizualna oryginalnego sygnału jest bardzo trudna. Nowatorska koncepcja segmentacji danych względem doby pozwala zaobserwować już pewne prawidłowości. Na Rysunku 5-51 przedstawiono mapę zawierającą dane pomiarowe w układzie: kolejne dni (oś pozioma) oraz wartości w danej dobie (oś pionowa). Zróżnicowany charakter zachowań jest typowy dla określonych przedziałów czasowych w ciągu dnia - co potwierdza obserwację operatorów maszyn. W związku z tym, na Rysunku 5-52 pokazano mapy przepróbkowanych danych odpowiadające czterem zmianom roboczym. Warto odnotować, że w danych wykryto (na etapie przepróbkowania) sporo błędów pomiarowych, (w terminologii analizy danych nie są to wartości liczbowe - ang. "Not a Number", w skrócie NaN) wskutek czego na Rysunkach 5-51 oraz 5-52 prezentowane są dane po usunięciu dni z ponad 40% udziałem wartości NaN.



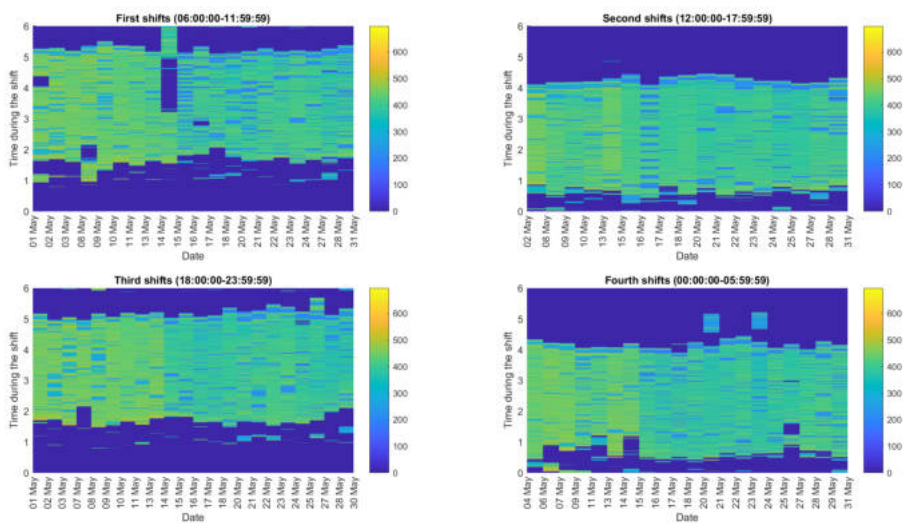
Rysunek 5-49: Ogólna koncepcja proponowanego postępowania diagnostycznego. Kolejne kroki wyróżnione w blokach schematu opisano szczegółowo w kolejnych częściach rozprawy (opracowanie własne)



Rysunek 5-50: Dane dotyczące ciśnienia oleju silnikowego z bazy danych (panel górny) i ponownie próbkowane dane (panel dolny) (opracowanie własne)



Rysunek 5-51: Mapa przepróbkowanych danych (przedstawiona doba po dobie) po usunięciu dni z ponad 40% liczbą wartości NaN (opracowanie własne)



Rysunek 5-52: Mapy przepróbkowanych danych odpowiadające czterem zmianom roboczym po usunięciu dni z ponad 40% udziałem wartości NaN (opracowanie własne)

Metoda i wyniki

W tej sekcji przedstawiona zostanie metodologia zastosowana dla rzeczywistych danych omawianych powyżej. W pierwszej kolejności należy ustalić notację stosowaną w dalszej części pracy.

Niech m_{ij} oznacza i -ty pomiar podczas j -tej zmiany roboczej, gdzie $i = 1, \dots, N$ i $j = 1, \dots, M$, i w konsekwencji niech $\mathbf{m}_j = (m_{1j}, m_{2j}, \dots, m_{Nj})$ oznacza pomiar odpowiadający j -tej zmianie

roboczej. Ponadto niech $p_j(x)$ oznacza teoretyczną funkcję gęstości prawdopodobieństwa m_j . Aby wykryć moment zmiany charakteru danych, rozpatrywane będą rozkłady prawdopodobieństwa odpowiadające kolejnym zmianom pracy, czyli $p_1(x), p_2(x), \dots, p_M(x)$.

W teorii prawdopodobieństwa i statystyce do ilościowego określenia podobieństwa dwóch rozkładów można użyć tak zwanych funkcji dywergencji (lub kontrastu), które mierzą rozbieżność dwóch rozkładów prawdopodobieństwa. Ogólnie rzecz biorąc, dywergencja nie jest pojęciem tak silnym jak odległość, ponieważ nie musi być symetryczna w argumentach ani spełniać nierówności trójkąta. Wśród różnych funkcji kontrastowych wyróżniamy jedną bardzo ważną klasę współczynników dywergencji, a mianowicie klasę tzw. f -rozbieżności o postaci [128],[129],[130]

$$I_{f,g}(p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x)) = g \left(\int p_{j^{**}}(x) f \left(\frac{p_{k^*}(x)}{p_{k^{**}}(x)} \right) dx \right), \quad (5.1)$$

gdzie $p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x)$ są funkcjami gęstości prawdopodobieństwa odpowiadającymi dwóm zmiennym, $f(t)$ jest ciągłą wypukłą funkcją rzeczywistą na \mathbb{R}_+ , a $g(t)$ jest rosnącą funkcją na \mathbb{R} . Warto wspomnieć, że dywergencje f są zawsze nieujemne, a wartość zero przyjmują wtedy i tylko wtedy, gdy gęstości $p_{k^*}(x)$ i $p_{k^{**}}(x)$ pokrywają się. W zależności od wyboru $f(t)$ i $g(t)$ można otrzymać różne postaci funkcji dywergencji. W pracy rozpatrywano trzy specyficzne miary należące do klasy zdefiniowanej powyżej.

Pierwsza miara, zwana odległością Hellingera, odpowiada przypadkowi $g(t) = \sqrt{0.5t}$ i $f(t) = (\sqrt{t} - 1)^2$ w równaniu (5.1) i wyraża się wzorem

$$H(p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x)) = \sqrt{0.5 \int \left(\sqrt{p_{k^*}(x)} - \sqrt{p_{k^{**}}(x)} \right)^2 dx}. \quad (5.2)$$

Jako drugą miarę rozbieżności rozważymy modyfikację zdefiniowanej powyżej odległości Hellingera. Mianowicie, dla $g(t)$ będącego funkcją tożsamości i $f(t)$ zdefiniowanego jak w przypadku Hellingera, otrzymujemy tzw. odległość Jeffreysa postaci [131]

$$J(p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x)) = 2H^2(p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x)) = \int \left(\sqrt{p_{k^*}(x)} - \sqrt{p_{k^{**}}(x)} \right)^2 dx. \quad (5.3)$$

Odległość Chernoffa, trzeci przykład rozważanych w tym artykule rozbieżności, odpowiada przypadkowi, gdy $g(t) = -\log(-t)$ i $f(t) = -t^{1-\alpha}$ gdzie $0 < \alpha < 1$ w równaniu (5.1) i przyjmuje następującą postać [131, 132]

$$CH(p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x)) = -\log(ch(p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x))), \quad (5.4)$$

gdzie

$$ch(p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x)) = \int p_{k^*}(x)^\alpha p_{k^{**}}(x)^{1-\alpha} dx, \quad (5.5)$$

nazywa się współczynnikiem Chernoffa. Szczególny przypadek współczynnika Chernoffa podany w równaniu (5.5), czyli przypadek $\alpha = 0,5$, nazywany jest współczynnikiem Bhattacharyya, związanym bezpośrednio z odległością Hellingera podaną w równaniu (5.2), mianowicie

$$H(p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x)) = \sqrt{1 - ch(p_{k^*}(x), p_{k^{**}}(x))}.$$

Ponieważ rozkład kolejnych zestawów próbek (sygnałów dla danej zmiany) $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \dots, \mathbf{m}_M$ zmienia się dla pewnych $j^* \in \{1, 2, \dots, M\}$, możliwe jest określenie momentu zmiany, poprzez badanie empirycznej funkcji kontrastu (dywergencji) pomiędzy rozkładem PDF stanowiącym odniesienie i bieżącym rozkładem PDF dla konkretnej doby czy zmiany. Zatem analizujemy następujący wektor

$$\hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_1(x)), \hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_2(x)), \dots, \hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_M(x)),$$

gdzie f -dywergencja jest określona w równaniach (5.2)-(5.4). Oczekujemy, że wartości przyjęte przez miary podobieństwa w danych

$$\hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_1(x)), \dots, \hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_{j^*}(x))$$

oraz

$$\hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_{j^*+1}(x)), \dots, \hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_M(x))$$

różnią się znacznie. Wstępna analiza pomiarów odpowiadających zmianom pracy wskazuje, że odpowiadające im rozkłady są różne; a dokładniej, obserwujemy, że niektóre cechy odpowiedzialne za zmianę średniej procesu zmieniają się w czasie. Aby określić punkt zmiany reżimu w danych, należałoby zastosować statystykę testową stosowaną powszechnie w problemie testowania, czy dwie próbki mają równe średnie. Jednak stosujemy tę metodologię nie do surowego wektora obserwacji, ale do opisanej powyżej empirycznej dywergencji. Poniżej opisano procedurę stosowaną do wykrywania punktu zmiany reżimu j^* w przebiegu zmian dywergencji odpowiadających zmianom roboczym.

Rozważmy M niezależnych zmiennych losowych $I_{f,g}(p_1(x), p_1(x))$, $I_{f,g}(p_1(x), p_2(x))$, ..., $I_{f,g}(p_1(x), p_M(x))$ z dystrybuantami rozkładów oznaczonymi jako $F_{I,1}$, $F_{I,2}$, ..., $F_{I,M}$, oraz wartościami średnimi $\mu_{I,1}$, $\mu_{I,2}$, ..., $\mu_{I,M}$. Przyjrzyjmy się teraz problemowi testowania średniej w oparciu o wartość oczekiwaną z hipotezą zerową i alternatywną zdefiniowaną w następujący sposób

$$H_0 : \mu_{I,1} = \mu_{I,2} = \dots = \mu_{I,M}$$

$$H_1 : \exists M^* \in \{2, \dots, M-1\} \text{ tak, że } \mu_{I,1} = \dots = \mu_{I,M^*} \neq \mu_{I,M^*+1} = \dots = \mu_{I,M}.$$

Zauważmy, że hipotezę alternatywną można również przedstawić jako

$$H_1 = \bigcup_{M^{**}=2}^{M-1} H_{1,M^{**}},$$

gdzie M^{**} jest zmienną z zakresu $\{2, \dots, M-1\}$, a $H_{1,M^{**}}$ jest hipotezą alternatywną odpowiadającą testowi dwóch prób porównującym średnie w dwóch populacjach, tj.

$$H_{1,M^{**}} : \mu_1 = \mu_{I,1} = \dots = \mu_{I,M^{**}} \text{ and } \mu_2 = \mu_{I,M^{**}+1} = \dots = \mu_{I,M}.$$

Aby zweryfikować H_0 z H_1 , możemy użyć statystyki opartej na maksimum w następującej postaci

$$S_M(\epsilon) = \max_{\lfloor \epsilon M \rfloor \leq M^{**} \leq \lfloor (1-\epsilon)M \rfloor} |T(M^{**})|, \quad (5.6)$$

gdzie $T(M^{**})$ może być dowolną statystyką do testowania H_1 względem H_{1,M^*} , a $\epsilon \in (0, 0.5)$ służy do zagwarantowania, że w obu podpróbki znajdzie się przynajmniej $\lfloor n\epsilon \rfloor$ elementów. Zauważmy, że wybór ϵ jest kluczowy, gdyż niewielka wartość pozwala wykryć bardzo wczesną lub bardzo późną zmianę rozkładu, ale jednocześnie wiąże się z uwzględnieniem małej liczebności próby, co utrudnia właściwe statystyczne wnioskowanie. Ponadto należy wspomnieć, że rozkład statystyki podany w równaniu (5.6) dla hipotezy H_0 nie zależy od analizowanego rozkładu próby losowej. W proponowanej metodzie chcemy zlokalizować moment najbardziej znaczącej zmiany danych, tzn. chcemy zidentyfikować wartość M^{**} odpowiadającą statystyce typu max, podanej w równaniu (5.6).

W pracy wykorzystano dwie przykładowe statystyki dla testów dwupróbowych dla równych średnich w grupach niezależnych, a mianowicie odpowiadającą parametrycznemu testowi t-Studenta i odpowiadającą nieparametrycznemu testowi Wilcoxon. Dla danych rozpatrywanych w pracy, statystyka t-Studenta $T_S(M^{**})$ przyjmuje postać

$$T_S(M^{**}) = \frac{(\bar{I}_1 - \bar{I}_2)}{I_{std} \sqrt{1/M^{**} + 1/(M - M^{**})}}, \quad (5.7)$$

gdzie

$$I_{std}^2 = \frac{(M^{**} - 1)I_{1,std}^2 + (M - M^{**} - 1)I_{2,std}^2}{M - 2},$$

\bar{I}_1 , \bar{I}_2 i $I_{1,std}^2$, $I_{2,std}^2$ są odpowiednio empirycznymi średnimi oraz empirycznymi wariancjami odpowiadającymi podpróbkom

$$I_1 = (\hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_1(x)), \dots, \hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_{M^{**}}(x)))$$

oraz

$$I_1 = (\hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_{M^{**}+1}(x)), \dots, \hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_M(x)))$$

Konsekwentnie, statystyka Wilcoxonowa oznaczana jako $T_W(M^{**})$ zadana jest poniższym wzorem:

$$T_W(M^{**}) = \frac{W(M^{**}) - EW(M^{**})}{\sqrt{\text{Var}(W(M^{**}))}}, \quad (5.8)$$

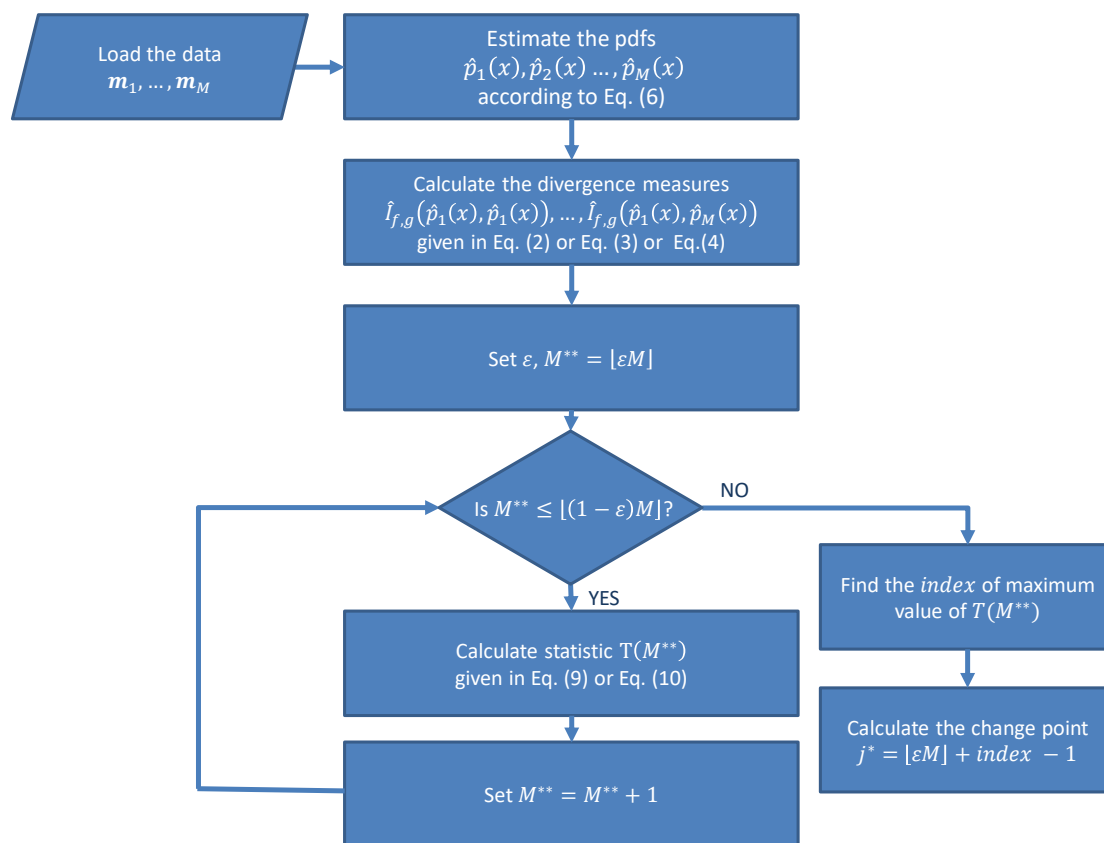
gdzie

$$W(M^{**}) = \sum_{i=1}^{M^{**}} R_i, \quad E[W(M^{**})] = \frac{M^{**}(M+1)}{2}, \quad \text{Var}[W(M^{**})] = \frac{M^{**}(M-M^{**})(M+1)}{12},$$

gdzie R_i oznacza liczbę elementów w wektorze

$$I = (\hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_1(x)), \dots, \hat{I}_{f,g}(p_1(x), p_M(x))),$$

które są nie większe niż i -ty element z I_1 . Więcej informacji na temat testu t-Studenta i testu Wilcoxonowa można znaleźć w pracach [133–138]. Kolejne etapy zastosowane w analizie danych przedstawiono na schemacie na Rysunku 5-53. Podobną metodologię, również opartą na wspomnianych testach, stosowano w [112].



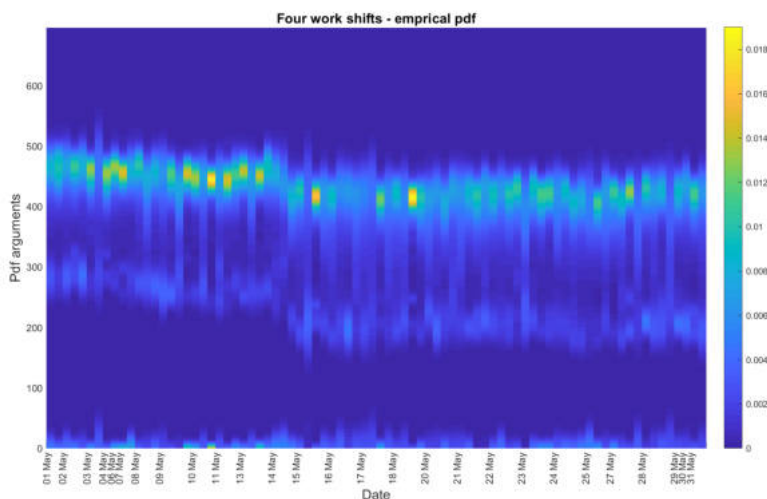
Rysunek 5-53: Diagram przedstawiający kolejne etapy opisanej metodologii (opracowanie własne)

W tym podrozdziale przedstawiono wyniki badań dot. wykrywania zmiany reżimu w sygnale opisującym ciśnienie oleju silnika. Równocześnie rozpatrywane są dane przedstawione "doba po dobie" na Rysunku 5-51 oraz dane podzielone na osobne klasy odpowiadające czterem zmianom pracy przedstawionym na Rysunku 5-52. Aby wskazać różnicę w danych, obliczamy empiryczne funkcje gęstości prawdopodobieństwa dla kolejnych kolumn macierzy danych podanych na Rysunkach 5-51-5-52. Odpowiednie ilustracje przedstawiono na Rysunkach 5-54 oraz 5-55 jako dwuwymiarowe wykresy, na których zobrazowano funkcje gęstości prawdopodobieństwa. Jak można zauważyć, kształt empirycznych rozkładów PDF zmienia się w pewnym momencie. W konsekwencji empiryczne rozkłady PDF przyjmują mniejsze wartości z większym prawdopodobieństwem.

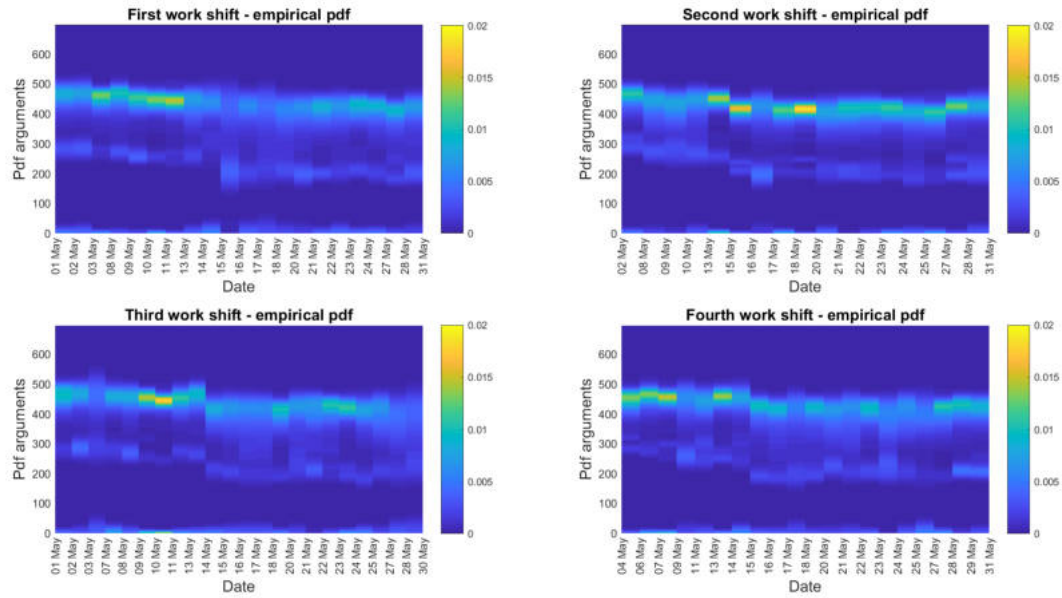
Ponieważ na Rysunkach 5-54 oraz 5-55 widać zmiany w kształcie funkcji gęstości prawdopodobieństwa, do identyfikacji punktu zmiany reżimu wykorzystano charakterystyki oparte na odległości między empirycznymi funkcjami PDF, mianowicie odległość Hellingera, odległość Jeffreysa i odległość Chernoffa z $\alpha = 0,5$, wprowadzone w poprzedniej sekcji.

Na początku rysujemy mapy przedstawiające macierze wartości przyjmowanych przez powyższe charakterystyki, na których porównujemy ze sobą dwie empiryczne funkcje PDF. Dla odległości Hellingera macierze podano na Rysunku 5-56 i 5-57. Jak widać, są one symetryczne względem przekątnej. Poza tym, obliczona odległość Hellignera dzieli zmiany robocze na dwie grupy, pomiędzy którymi wartości przyjmowane przez miarę odległości znacznie się różnią. W rozprawie zamieszczono wyniki tylko dla odległości Hellingera.

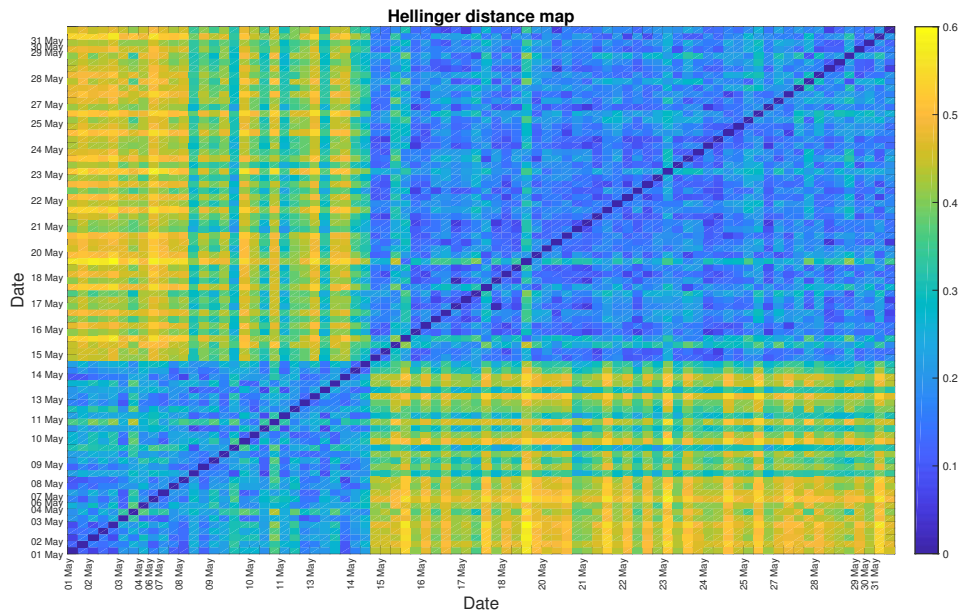
Następnie zostały wykorzystane procedury oparte na teście t-Studenta i Wilcoxona, które skutkują identyfikacją punktu zmiany reżimu w danych do wartości reprezentujących jeden wiersz macierzy odległości Hellingera przedstawionych na Rysunkach 5-56 oraz 5-57. Wybrany wiersz odpowiada odległości Hellingera między kolejnymi funkcjami PDF a bazową funkcją PDF, tutaj funkcją dla pierwszej zmiany. Innymi słowy, identyfikujemy punkt zmiany reżimu na podstawie porównania każdego empirycznego rozkładu PDF z empirycznym rozkładem PDF pierwszej zmiany. Wartości przyjęte przez miarę odległości oraz zidentyfikowany punkt zmiany reżimu przedstawiono na Rysunkach 5-58 oraz 5-57, które odpowiadają przypadkowi prezentowanych danych doba po dobie i dla każdej zmiany traktowanej oddzielnie. Jak widać, w większości przypadków (z wyjątkiem czwartej zmiany roboczej na Rysunku 5-57) procedury oparte na teście t-Studenta i teście Wilcoxona są spójne i wskazują ten sam punkt zmiany reżimu. Warto odnotować tutaj, że zaznaczone na wykresach przesunięcie jest ostatnim przesunięciem przed zmianą rozkładu. Oznacza to, że charakter danych zmienia się wraz z następowaniem kolejnych zmian roboczych po tej zaznaczonej na wykresie.



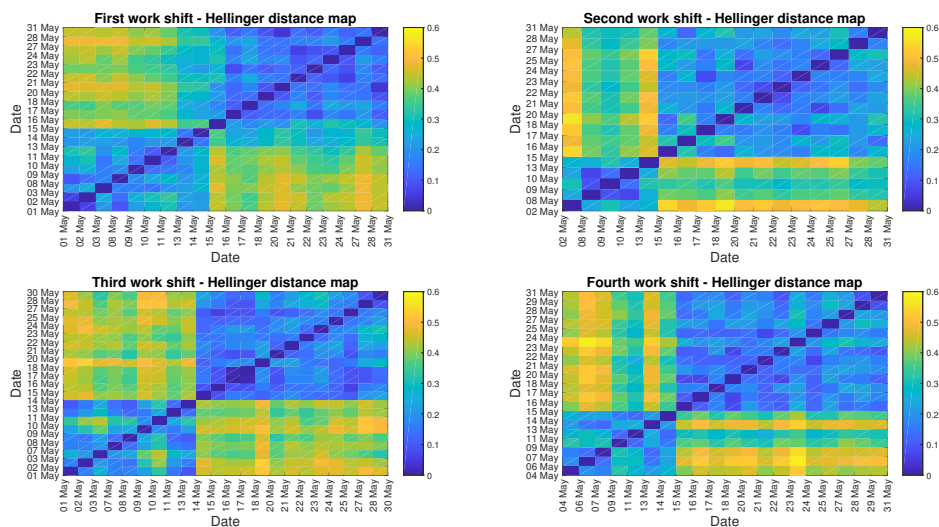
Rysunek 5-54: Empiryczne funkcje gęstości prawdopodobieństwa (wykres dwuwymiarowy) dla wstępnie przetworzonych danych przedstawione doba po dobie (opracowanie własne)



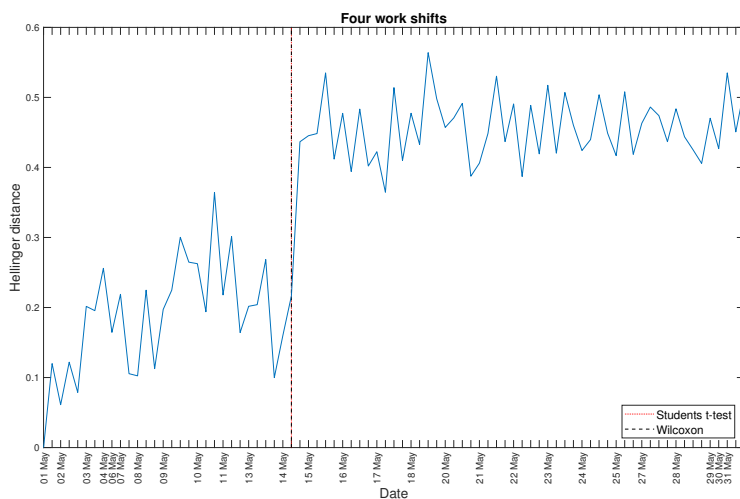
Rysunek 5-55: Empiryczne funkcje gęstości prawdopodobieństwa (wykres dwuwymiarowy) dla wstępnie przetworzonych danych odpowiadających czterem zmianom roboczym (opracowanie własne)



Rysunek 5-56: Macierz przedstawiająca wartości odległości Hellingera, obliczone na podstawie empirycznych funkcji gęstości prawdopodobieństwa odpowiadających danym prezentowanym w układzie doba po dobie (opracowanie własne)



Rysunek 5-57: Macierze przedstawiające wartości odległości Hellingera, obliczone na podstawie empirycznych funkcji gęstości prawdopodobieństwa odpowiadających danym reprezentującym cztery zmiany robocze (opracowanie własne)



Rysunek 5-58: Odległość Hellingera między kolejnymi funkcjami PDF a bazowym PDF oraz punkt zmiany reżimu, zidentyfikowany metodami opartymi na teście t-Studenta i teście Wilcoxona dla danych prezentowanych doba po dobie (opracowanie własne)

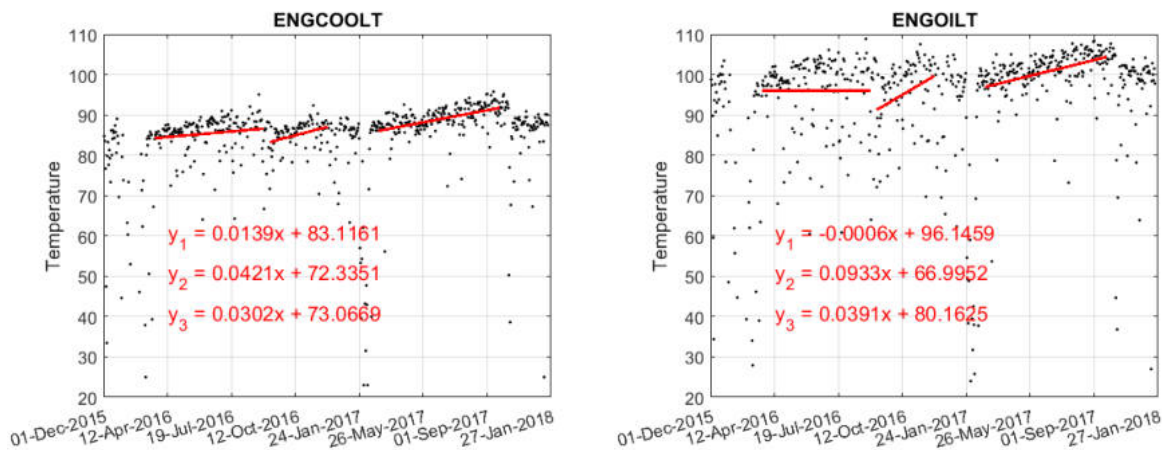
Podsumowanie

Na potrzeby diagnostyki silnika zaproponowano nowatorską, wieloetapową procedurę, która obejmuje przetwarzanie wstępne, analizę statystyczną, wizualizację danych i tworzenie nowej zmiennej opisującej stan techniczny, która może być wykorzystywana do podejmowania decyzji. Innowacyjność procedury polega na połączeniu kluczowych etapów proponowanej metodologii, a mianowicie wstępnej segmentacji i reprezentacji w postaci macierzy w perspektywie zmianowej oraz analizie charakterystyki danych (funkcje gęstości prawdopodobieństwa) i miary odległości wyznaczonych na ich podstawie. Wreszcie ostatni krok (segmentacja) jest wykonywany nie dla rzeczywistych danych, ale dla miar odległości wyznaczonych dla sygnałów dla poszczególnych zmian. Według wiedzy autora podejście to jest rzadko stosowane w rzeczywistych zastosowaniach. Wykorzystanie miar odległości pomiędzy charakterystykami sygnałów powoduje, że nie rozważamy tutaj problemu, gdy zmienia się jeden parametr danych (jak średnia czy wariancja). Proponowane podejście jest znacznie bardziej ogólne. Analiza zmian funkcji PDF powoduje, że algorytm jest wrażliwy na dynamikę różnych charakterystyk danych, a nie tylko jednego parametru (jest odporny na zaburzenia). Można go stosować dla dowolnego cyklu odpowiadającego rozważanym zjawiskom (w tym przypadku jest to zmiana robocza), dowolnej charakterystyce danych (w tym przypadku jest to funkcja gęstości prawdopodobieństwa) oraz dowolnej mierze odległości zastosowanej do charakterystyki (w tym przypadku są to miary odległości oparte na funkcjach gęstości prawdopodobieństwa). Co więcej, w analogiczny sposób można przetwarzać inne zmienne (np. temperaturę). Cała procedura jest automatyczna, dlatego może być zaimplementowana w systemach monitoringu stosowanych w praktyce. Gdy pojawią się nowe dane odpowiadające kolejnej dobie (cztery zmiany robocze), to stosując wprowadzoną procedurę można sprawdzić, czy mieszczą się one w aktualnym reżimie. W analizowanym przypadku nowa próbka oznacza dane odpowiadające następnej dobie. Zatem w pewnym sensie, metodologia może być stosowana w sposób ciągły w obserwacjach długoterminowych. Opracowaną procedurę można potraktować jako procedurę uczącą (wyznaczającą moment zmiany reżimu) na podstawie danych historycznych. Implementacja proponowanej metody jako procedury automatycznego przetwarzania danych nie powinna stanowić problemu dla nowej maszyny (bez historii). Relatywnie mały zestaw danych z kilku zmian z nowej maszyny (nowy zestaw danych) wystarczy do ustalenia uśrednionego obrazu sygnatury dobrego stanu. Jeśli uszkodzenie się pojawi (wystąpi zmiana reżimu), metoda będzie w stanie je wykryć po kilku zmianach roboczych (min. 2), czyli znacznie szybciej niż obecna praktyka. Warto odnotować, że często maszyna z takim uszkodzeniem mogła pracować nawet przez dwa tygodnie od szacowanego momentu uszkodzenia, ponieważ nie było narzędzia do wykrywania problemu, a jak już wspomniano, wnioskowanie na podstawie surowych danych jest bardzo trudne.

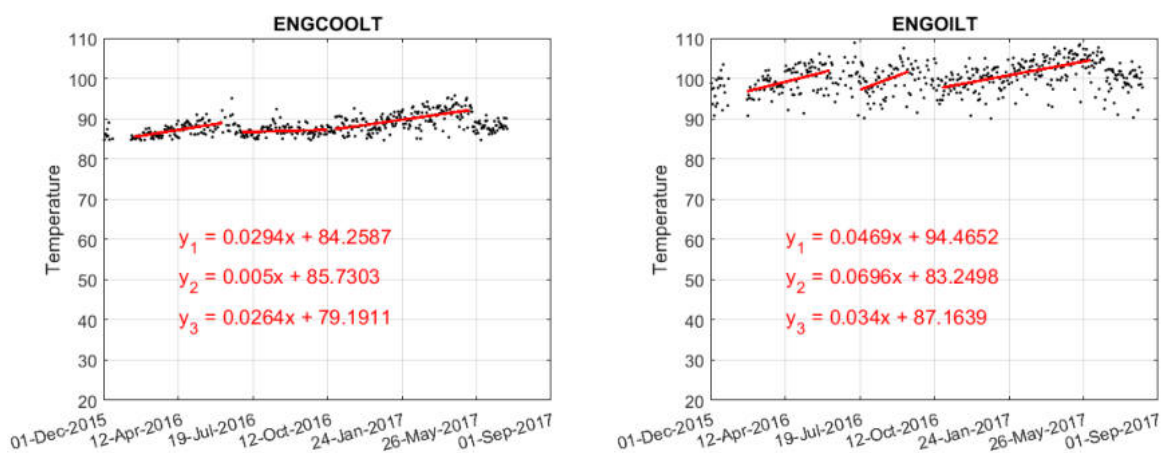
5.3.2 Diagnostyka elementów układu przeniesienia napędu maszyny na podstawie pomiaru temperatur

Maszyny dołowe eksploatowane są w skrajnie trudnych warunkach środowiskowych. Temperatura górotworu rośnie z głębokością, a maszyna dołowa jako źródło ciepła dokłada do bilansu sporo energii. Wymiana powietrza w procesie wentylacji i klimatyzacji wychładza wyrobiska, ale w obszarach, gdzie wentylacja jest utrudniona, np. na froncie eksploatacyjnym, lokalnie występują wysokie temperatury. Maszyny dołowe są wyposażone w rozbudowane systemy chłodzenia, (chłodnice cieczy, oleju silnikowego, oleju przekładniowego, oleju hydraulicznego, intercooler oraz wymiennik ciepła z układu klimatyzacji). W trudnych warunkach pracy (zapylenie, wilgotność, błoto), chłodnice ulegają zanieczyszczeniu specyficzną mazią, która szybko wysycha i tworzy skuteczną izolację pomiędzy układami chłodzenia a otoczeniem. W rezultacie wymagana jest szczególna opieka w zakresie przeglądu i oczyszczania maszyn.

Te specyficzne warunki eksploatacyjne powodują przyspieszone procesy degradacyjne, które łatwo można zaobserwować w analizach danych długoterminowych. Na Rysunkach 5-59 i 5-60 pokazano długoterminowe dane z pomiaru temperatury płynu chłodzącego silnika w maszynie dołowej. Dane te zawierają odpowiednio surowe dane z systemu monitorowania i dane po usunięciu wartości odstających. Wizualna inspekcja danych sugeruje wzrostowe tendencje temperatury dla pewnych fragmentów sygnału. Prostymi metodami analitycznymi, takimi jak regresja liniowa, dla dopasowanych segmentów wyznaczono linie trendu i równania regresji. W przedziale kilku miesięcy temperatura płynu chłodzącego wzrasta o ok 10°C. Po wykonaniu odpowiednich akcji serwisowych, sytuacja się poprawia. Warto odnotowania jest również duże rozproszenie danych wokół tendencji trendowej. Duże odchylenie, a także obecność wartości odstających, powodują duże trudności z wyznaczaniem trendu, toteż należy stosować odporne metody estymacji, co nie jest zagadnieniem trywialnym.



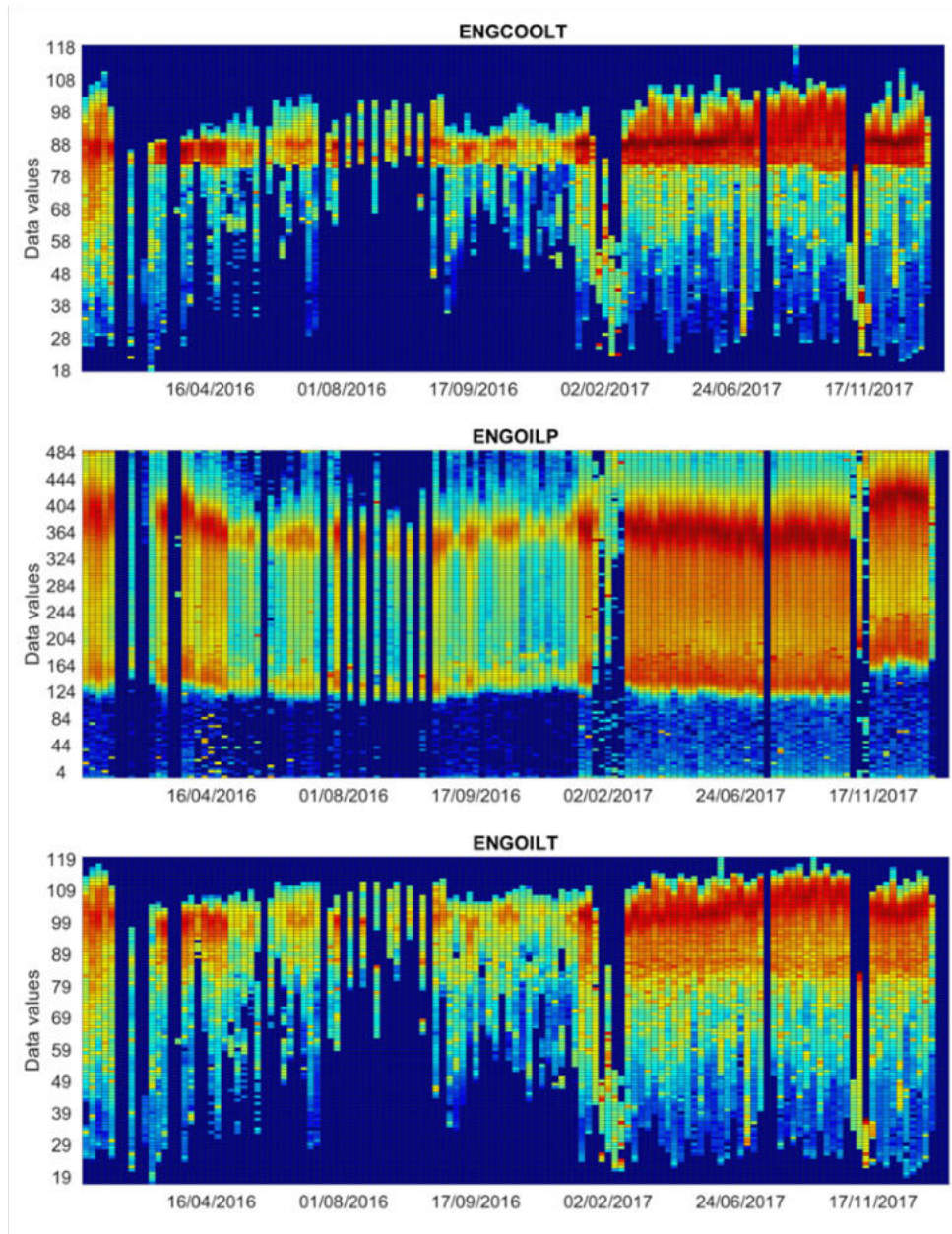
Rysunek 5-59: Uśrednione dobowo dane z dopasowaniem linii trendu dla wybranych zakresów czasu (opracowanie własne)



Rysunek 5-60: Uśrednione dobowo dane temperaturowe bez wartości odstających. Dodatkowo przedstawione są wyniki analizy regresji, jak dla Rysunku powyżej (opracowanie własne)

Rozważane analizy wymagają rozwiązania dwóch zagadnień - najpierw odpowiedniej segmentacji, a następnie modelowania danych w celu wyznaczenia trendu. Z racji na wspomniane duże rozproszenie danych wokół trendu i niesymetryczny, ciężkoogonowy rozkład próbek wokół średniej dla lokalnie dobranego okna czasowego, poszukiwano innych metod wizualizacji i analizy danych. W analogii do badania ciśnienia, na Rysunku 5-61 przedstawiono dobowy rozkład prawdopodobieństwa jako sposób reprezentacji danych długoterminowych, zastosowany dla wybranych zmiennych. Jak wynika z Rysunku, nie tylko wartość średnia ulega zmianie, ale i kształt rozkładu temperatur jest inny dla kolejnych dni. W pewnych momentach zmiana jest jednak radykalna,

co może świadczyć o zmianie sposobu (skuteczności) wymiany ciepła maszyna-otoczenie, co jest oznaką nieprawidłowości w pracy maszyny. Dla takiej reprezentacji danych możliwe jest zastosowanie podejścia opracowanego dla analizy danych dla przypadku ciśnienia oleju silnika.



Rysunek 5-61: Dobowy rozkład prawdopodobieństwa jako sposób reprezentacji danych długoterminowych - zastosowanie dla wybranych zmiennych (opracowanie własne)

5.3.3 Diagnostyka uszkodzeń tarczy flex-plate w układzie napędowym ładowarki przegubowej LKP 1601B na połączeniu koła zamachowego z przekładnią hydrokinetyczną

Opisane w rozdziale prace miały charakter interwencyjny, dotyczyły nietypowej awarii, prowadzącej do zniszczenia silnika Diesla w ładowarkach LKP 1601B produkcji KGHM ZANAM. Objawem awarii było zerwanie mocowania koła zamachowego do wału korbowego silnika MTU Mercedes OM 460LA [STAGE 3B]. W efekcie występowały uszkodzenia podpór głównych wału oraz samego wału - Rysunek 5-62. Dla tego rodzaju uszkodzeń, producent nie przewiduje technologii naprawy. Konieczna była całkowita wymiana silnika. Przy rewizjach uszkodzonych silników nie stwierdzano widocznych śladów typowego zużycia eksploatacyjnego dla układu tłokowo-korbowego. Za bezpośrednią przyczynę uszkodzeń stwierdzono luzy na pierścieniu flex, montowanym na połączeniu koła zamachowego z przekładnią hydrokinetyczną. Użytkownicy maszyn nie mieli możliwości weryfikowania na bieżąco, czy na tarczy flex pojawiły się niebezpieczne luzy. Weryfikacja wymagała demontażu silnika. Oczekiwania użytkowników maszyn sprowadzały się do zastosowania monitoringu w celu wypracowania metody detekcji uszkodzenia z wykorzystaniem bardziej zaawansowanego aparatu matematycznego. Spodziewano się wówczas, że symptomy wskazujące na wystąpienie luzów mogą pojawiać się w sygnałach na krótką chwilę przed samym uszkodzeniem.



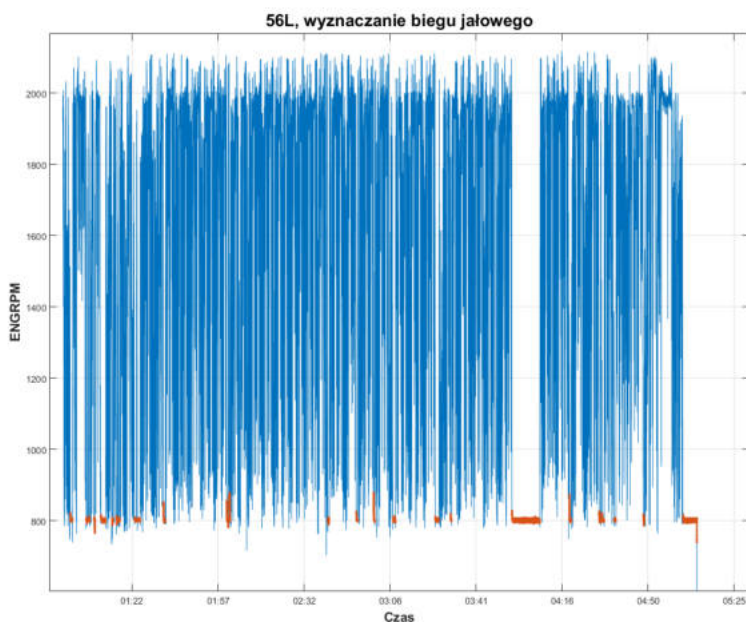
Rysunek 5-62: Uszkodzenie połączenia koła zamachowego z przekładnią hydrokinetyczną (opracowanie własne)

Selekcja danych i ekstrakcja cech

Wstępna analiza eksploracyjna zakładała estymację i śledzenie przebiegów percentyli dla danych temperaturowych i ciśnieniowych pozyskanych z maszyn, dla których odnotowano przypadek awarii połączenia flex. Nie wykazano żadnych zależności w danych powiązanych z wystąpieniem awarii, które dawałyby przesłanki do wypracowania dedykowanej metody diagnostycznej. W kolejnym etapie badań postanowiono sprawdzić zachowanie sygnału prędkości obrotowej silnika (ENGRPM). Wykonano analizę szeregu czasowego z pracy maszyny na wolnych obrotach silnika. Według dokumentacji techniczno-ruchowej regulacja poziomu obrotów biegu jałowego dla silnika była ustawiona na 800 RPM. Sterownik wtrysku utrzymuje histerezę poziomu RPM w przedziale +/-5%. Identyfikację pracy na wolnych obrotach dokonano z wykorzystaniem zmiennej SELGEAR (aktualny bieg i kierunek jazdy). Bieg jałowy określają wskazania zmiennej równe 0. Jako przykładowe awarie silnika związane z poluzowaniem połączenia flex postanowiono wybrać awarie odnotowane na maszynach O/ZG Lubin:

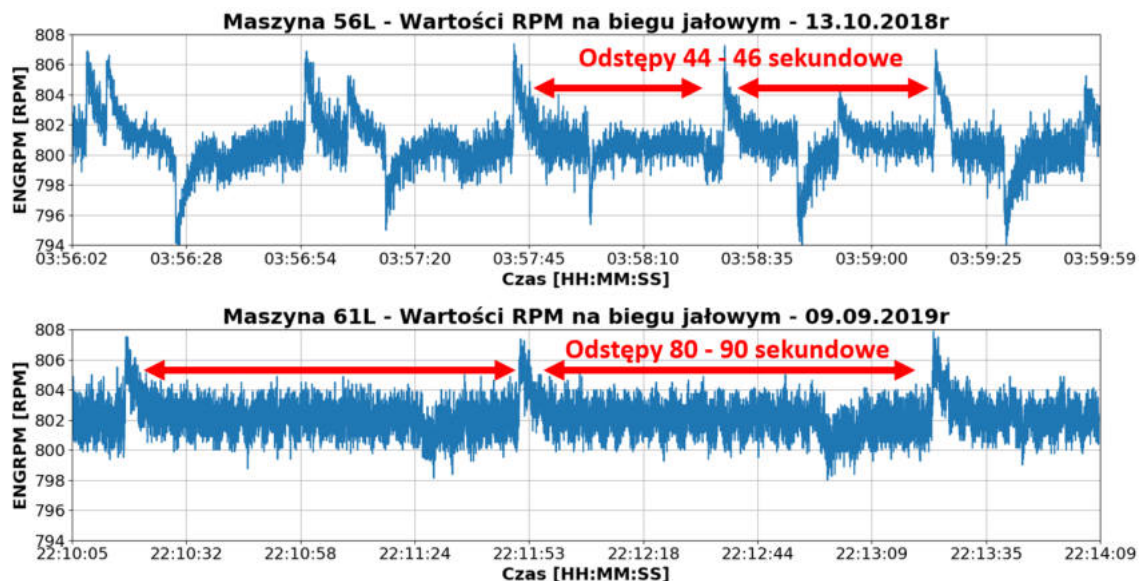
- LK4 -56/L, 13.10.2018 r. w okolicach godziny 11:00,
- LK4 -61/L, 09.09.2019 r. w okolicach godziny 23:00.

Dodatkowo, dla celów porównawczych wykorzystano dane z maszyny nowej produkcji – LK4 61/L po oddaniu jej do eksploatacji w warunkach ruchowych O/ZG Lubin. Analizę sygnału ENGRPM postanowiono przeprowadzić na danych gęsto próbkowanych (100Hz), możliwych do uzyskania poprzez bezpośrednie skopiowanie surowych danych bufora pamięci z rejestratora.

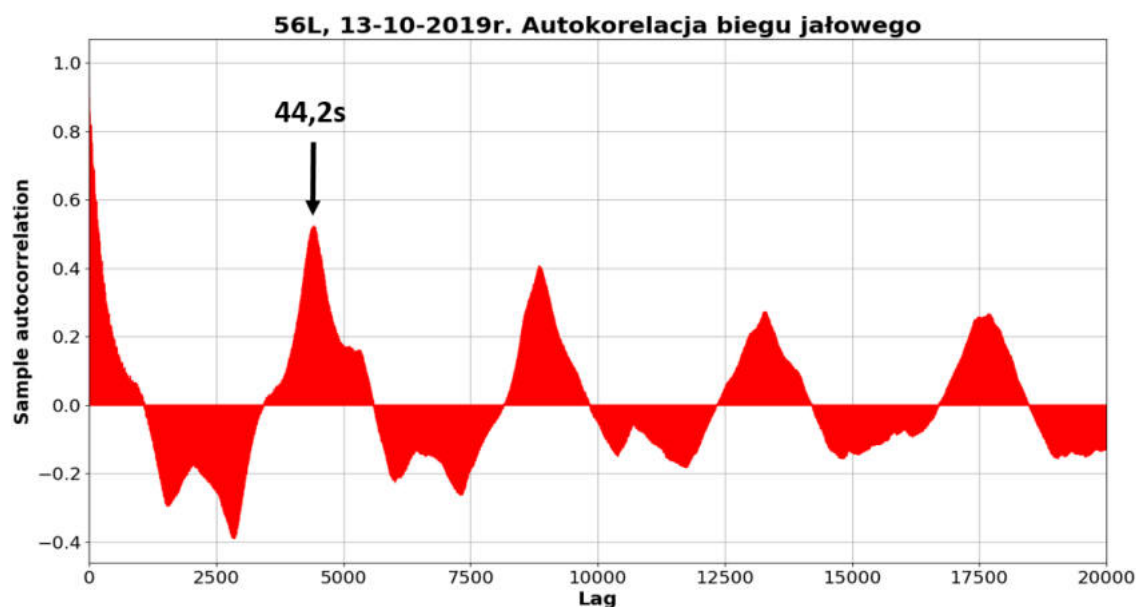


Rysunek 5-63: Fragment przebiegu surowego sygnału prędkości obrotowej silnika (ENGRPM). Dane zarejestrowane dla maszyny LK4-56/L, w dniu awarii. Kolorem pomarańczowym oznaczono segmenty sygnału dla pracy w zakresie biegu jałowego (opracowanie własne)

Na Rysunku 5-64 przedstawiono 3,5 minutowe fragmenty sygnału ENGRPM na biegu jałowym, pozyskane odpowiednio z maszyny LK4-56/L i LK4-61/L, z okresów, w których maszyny te znajdowały się w stanie krytycznym w związku z problemem flex.

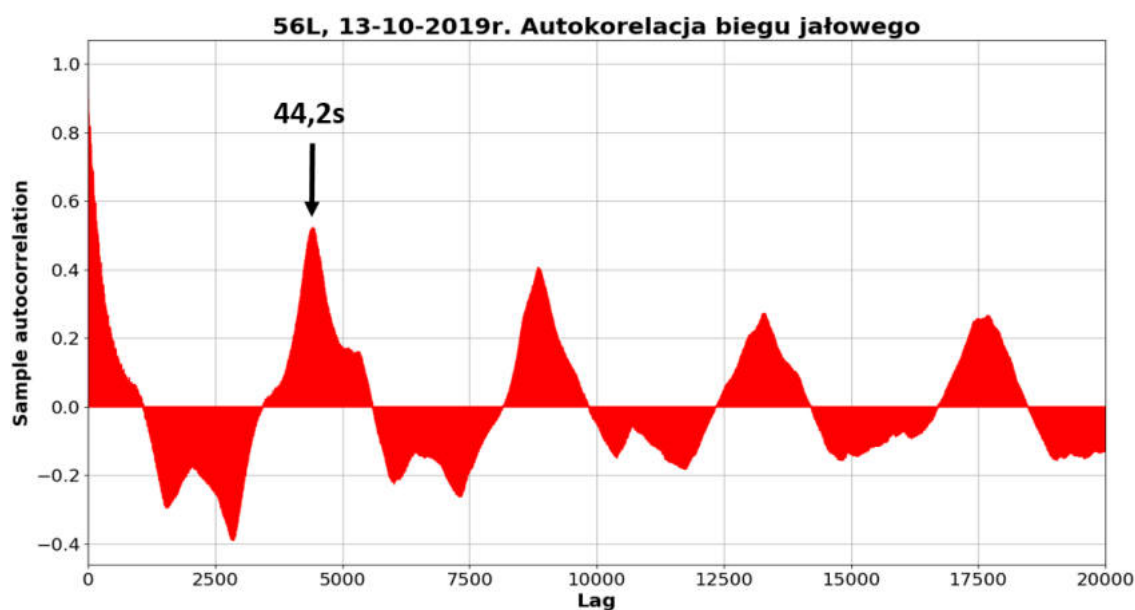


Rysunek 5-64: Fragmenty szeregów czasowych ENGRPM z pracy maszyn (a) LK4-56/L oraz (b) LK4-61L na biegu jałowym z okresów bliskich awarii (opracowanie własne)



Rysunek 5-65: Wyniki analizy autokorelacji sygnału ENGRPM z biegu jałowego - maszyna LK4-56/L z dnia 13.10.2018 (opracowanie własne)

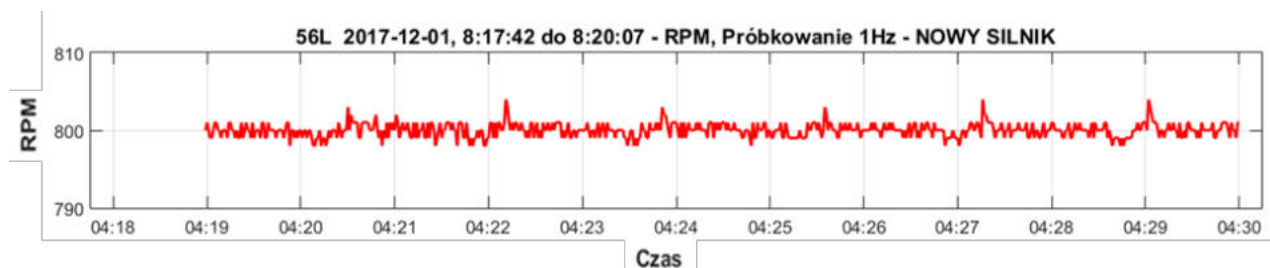
Jak widzimy, w przypadku maszyny LK4-56/L rejestr wartości ENGRPM na biegu jałowym oscyluje w obrębie 790-812 obr./min. Zdecydowana większość obserwacji skupiona jest jednak wokół wartości 800 obr./min. Sygnał ten pochodzi z okresu ok. 8 h przed zdarzeniem awarii. Ponadto, występują charakterystyczne wybudzenia związane ze wspomnianym wcześniej zjawiskiem „falowania obrotów”. Przyjmują one znacznie większe odczyty niż średnia (tutaj około 808 obr./min). Wybudzenia te mają charakter cykliczny i w przypadku rozważanej maszyny pojawiają się co ok. 45 s. Podobne wybudzenia występują na dolnym panelu Rysunku 5-64, przedstawiającego sygnał ENGRPM z wolnych obrotów silnika, zarejestrowany na maszynie LK4 61/L, również na kilka godzin przed awarią. W tym przypadku omawiane „piki” przyjmują wartość ok. 807,5 obr./min oraz pojawiają się co ok. 90 s. W kolejnym kroku przystąpiono do zbadania autokorelacji szeregu czasowego ENGRPM z biegu jałowego dla przypadku maszyny LK4-56/L. Idea autokorelacji sprowadza się do analizy zależności w danych. Jeśli obecna jest korelacja o określonym okresie, wówczas funkcja zwracać będzie co jakiś czas przyjmować większe wartości. Tak jak się spodziewano, w sygnale poddanym analizie odnotowano duże korelacje pomiędzy odczytami występującymi względem siebie co ok. 45 sekund (Rysunek 5-66). Potwierdza to również cykliczny charakter tych wybudzeń.



Rysunek 5-66: Szum dla sygnału pracy na biegu jałowym dla maszyny LK4-56/L w dniu 13.10.2018r. (opracowanie własne)

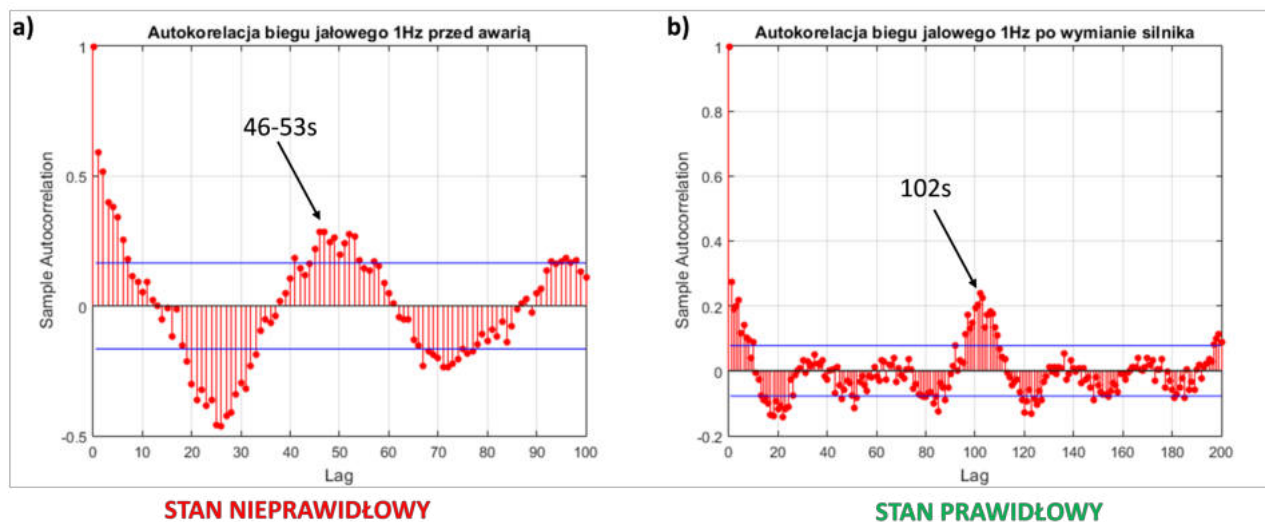
Następnie przystąpiono do porównania otrzymanego wyniku z analizą autokorelacji uzyskaną dla przypadku „zdrowej” maszyny. W tym celu wytypowano dane historyczne z okresu po wymianie silnika. Dostęp do danych możliwy był jedynie z bazy Historian, gdzie próbkowanie sygnału

ENGRPM w wyniku tzw. downsamplingu zmniejsza się do 1 Hz. Wybrano dane z dn. 01.12.2017 z maszyny LK4-56/L. Reprezentatywny przebieg sygnału (ok. 10 min.) z pracy silnika na wolnych obrotach przedstawiono na Rysunku 5-67. Łatwo zauważyć, że sygnał wykazuje nieco inną charakterystykę. Okres wystąpień wybudzeń to ok. 100 s. Z uwagi na niskie próbkowanie przeprowadzenie analizy częstotliwościowej było utrudnione.



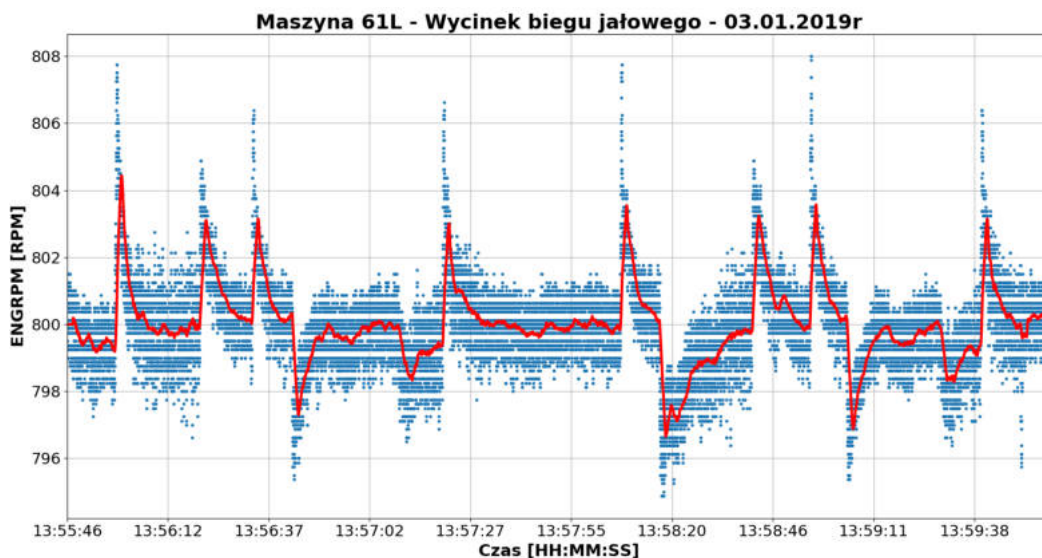
Rysunek 5-67: Sygnał ENGRPM dla maszyny LK4-56/L na wolnych obrotach silnika po jego wymianie – 01.12.2017r. (opracowanie własne)

Dalszy etap badań wiązał się z porównaniem wyników analizy autokorelacji sygnału ENGRPM dla próbkowania 1 Hz przeprowadzonej dla stanu prawidłowego i nieprawidłowego. Wyniki analizy przedstawiono na Rysunku 5-68. Przykład „zdrowy”, zarejestrowany po wymianie silnika, przedstawiono na panelu prawym. Odnotowano znaczną różnicę pomiędzy analizowanymi stanami. W przypadku stanu prawidłowej pracy, najwyższa korelacja obserwowana jest dla odczytów sygnału odległych względem siebie o ok. 100 s. Dla stanu nieprawidłowego cykl wybudzeń powtarza się co 46-53 s.



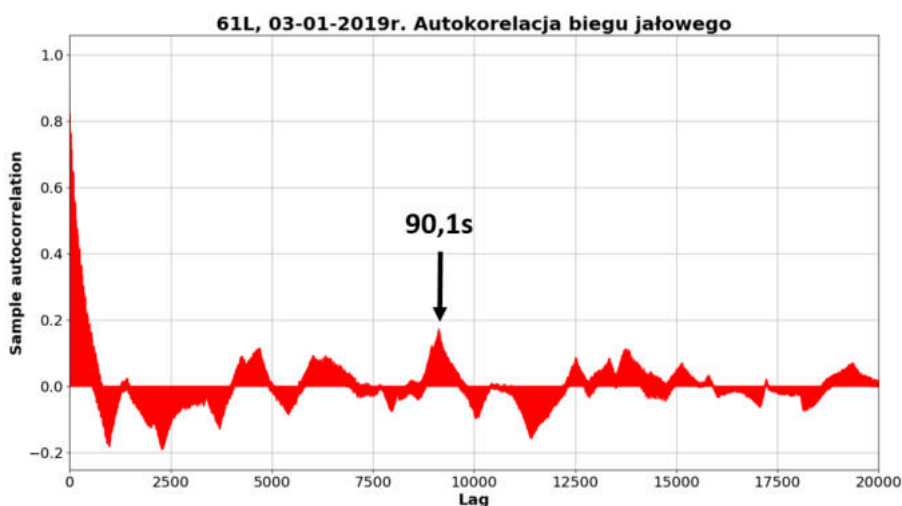
Rysunek 5-68: Sygnał ENGRPM na wolnych obrotach silnika po jego wymianie – 01.12.2017 r. (opracowanie własne)

Analizę powtórzono dla danych z maszyny nowej produkcyjnie (LK4-61/L). Próbkę potraktowano jako wzorcową w dalszych badaniach. Krótki wycinek sygnału z pracy na wolnych obrotach przedstawiono na Rysunku 5-69.



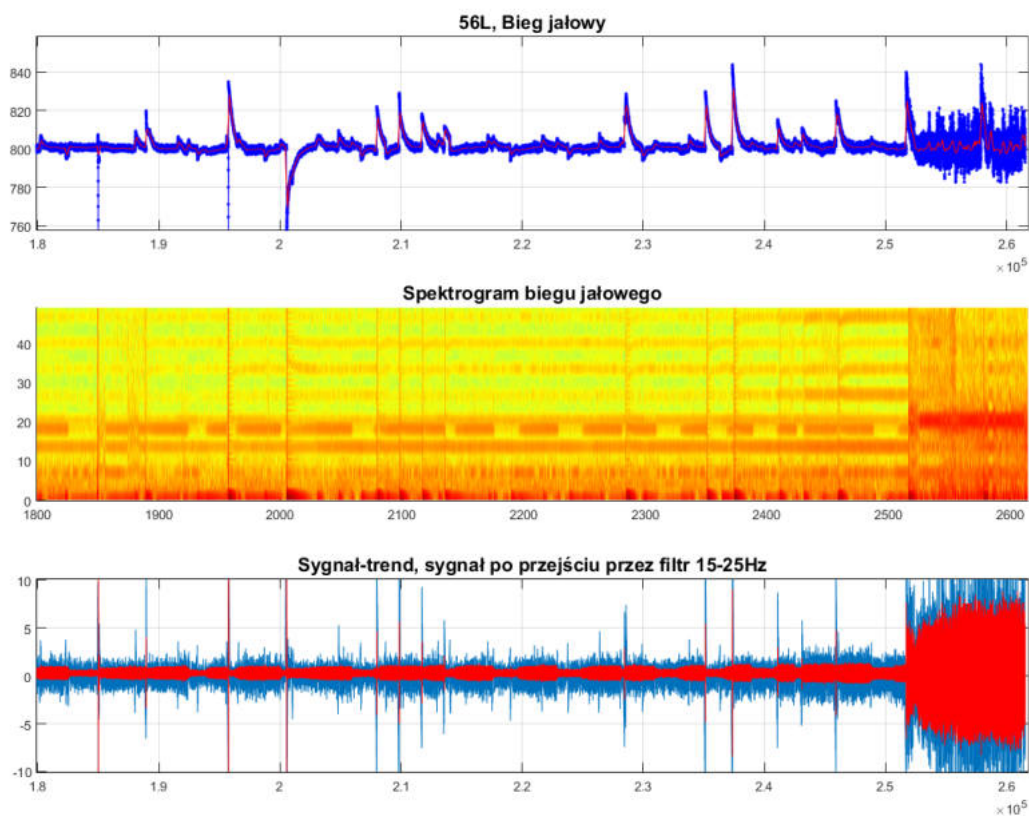
Rysunek 5-69: Przebieg wolnych obrotów silnika w sygnale ENGRPM z nowej produkcyjnie maszyny LK4-61/L – kolor niebieski oraz dopasowana średnia ruchoma – kolor czerwony (opracowanie własne)

Również i dla tego przypadku widoczne są cykliczne wybudzenia. Na Rysunku 5-70 zaprezentowano wynik analizy autokorelacji. Obliczono okres wynoszący ok. 90,1 s, a więc dłuższy od okresu wybudzeń obserwowanego dla maszyny LK4-56/L z okresu przed awarią.



Rysunek 5-70: Wynik analizy autokorelacji z sygnału ENGRPM (bieg jałowy) zarejestrowanego na nowej produkcyjnie (wzorcowej) maszynie LK4-61/L (opracowanie własne)

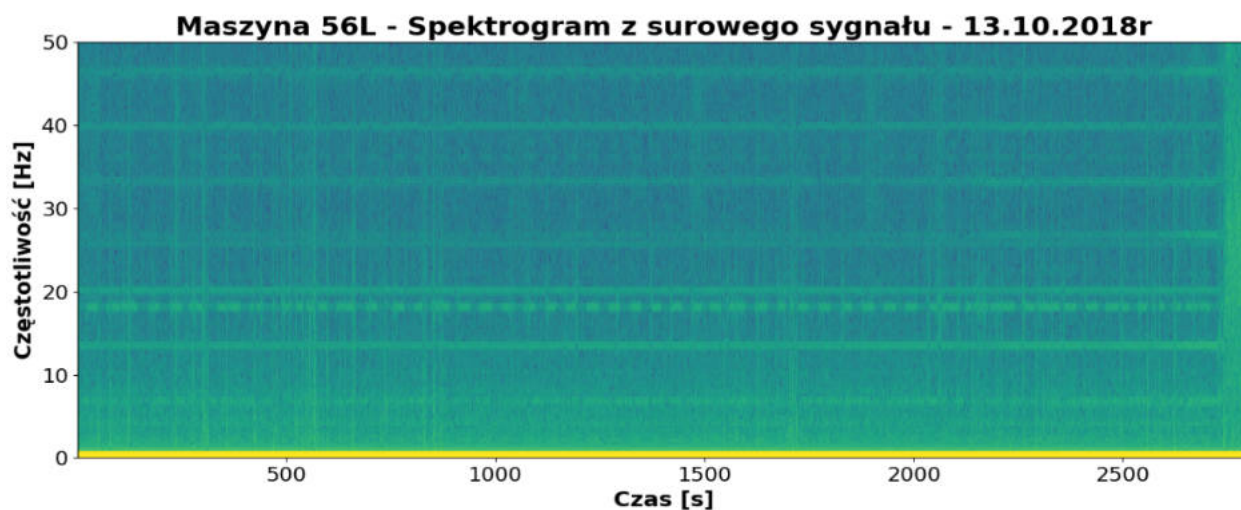
Dalszy proces ekstrakcji cech o znaczeniu diagnostycznym, obecnych w sygnale ENGRPM, związany był z analizą szumu w danych. Z uwagi na fakt, że zazwyczaj fragmenty sygnału z pracy maszyny na biegu jałowym są relatywnie krótkie, zdecydowano się na analizę wszystkich momentów pracy na biegu jałowym jednocześnie. W związku z tym, w pierwszym kroku wyselekcjonowano wszystkie próbki w sygnale, które mieściły się w przedziale pracy na wolnych obrotach silnika. Następnie wszystkie te fragmenty złączono kolejno po sobie, tworząc w ten sposób jeden długi szereg czasowy zmiennej ENGRPM z pracy maszyny na biegu jałowym. Przykładowy wynik dla maszyny LK4-56/L uzyskany dla dn. 13.10.2018 r. przedstawiono na Rysunku 5-71. Długość otrzymanego wektora wynosi ok. 43 min.



Rysunek 5-71: Wynik analizy autokorelacji z sygnału ENGRPM (bieg jałowy) zarejestrowanego na nowej produkcyjnie (wzorcowej) maszynie LK4-61/L (opracowanie własne)

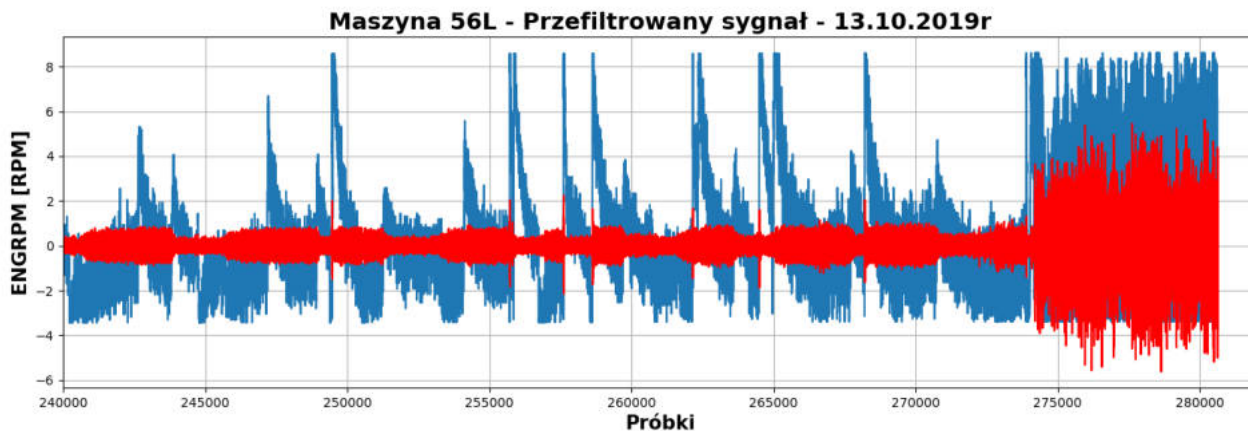
Sygnał cechuje obecność dużego szumu. Szczególny wzrost szumu widoczny jest ok. 1h przed zdarzeniem awarii. Dla lepszej prezentacji, do sygnału wynikowego dopasowano średnią ruchomą z nienakładającym się oknem o długości 1 s (kolor czerwony). Średnia ruchoma ma tą zaletę, że dobrze opisuje ogólną zmienność sygnału oraz cechuje się mniejszą wrażliwością na szum.

Następnie sygnał poddano transformacji do reprezentacji czasowo-częstotliwościowej. Obliczony spektrogram biegu jałowego przedstawiono na Rysunku 5-72.



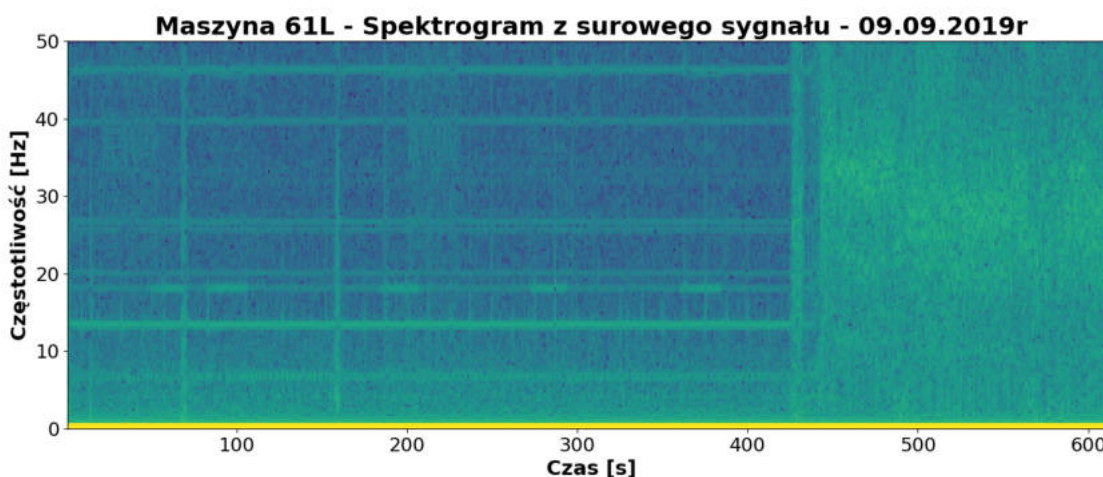
Rysunek 5-72: Spektrogram dla sygnału pracy na biegu jałowym dla maszyny LK4-56L w dniu 13.10.2018 r. (opracowanie własne)

Widoczne są cykliczne wybudzenia w przedziale częstotliwości 15-20 Hz. Warte uwagi są przede wszystkim ostatnie odczyty sygnału występujące po 45 minucie (próbki >2700), gdzie odnotowano gwałtowny wzrost energii. Na Rysunku 5-73 jeszcze raz kolorem niebieskim przedstawiono sygnał ENGRPM, ze zbliżeniem na okres przed awarią silnika. Wielkość szumu rośnie, osiągając w sposób gwałtowny maksymalne wartości przed awarią. Wskazuje to, że nieprawidłowość pracy połączenia flex może mieć wpływ na szum i zwiększać jego wartość. Dodatkowo przefiltrowano sygnał w paśmie 15-25 Hz i wykreślono wynik kolorem czerwonym, dzięki czemu uzyskano jeszcze lepszą postać cechy diagnostycznej. Jej zmienność jest zbliżona do szumu, a więc można stwierdzić, że większość informacji o szumie mieści się w tym paśmie częstotliwości.



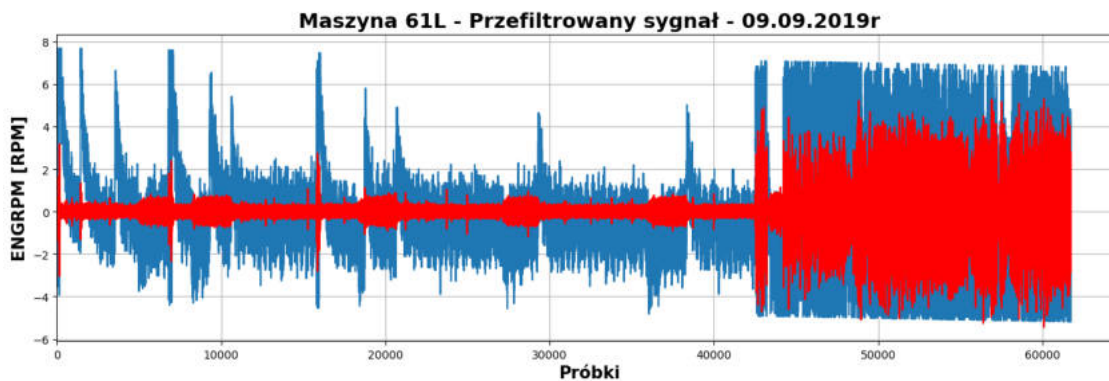
Rysunek 5-73: Analiza szumu dla sygnału ENGRPM z pracy silnika na wolnych obrotach – okolice awarii silnika na maszynie LK4-56/L z dnia 13.10.2018 r. (opracowanie własne)

Analogicznie przeprowadzono analizę dla sygnału ENGRPM z maszyny LK4-61/L z okresu awarii. Uzyskany spektrogram przedstawiono na Rysunku 5-74. Podobnie jak we wcześniejszym przypadku, widzimy cykliczne wybudzenia dla pasma 15-20 Hz oraz gwałtowny wzrost energii na chwilę przed awarią obserwowaną w całym paśmie częstotliwości.



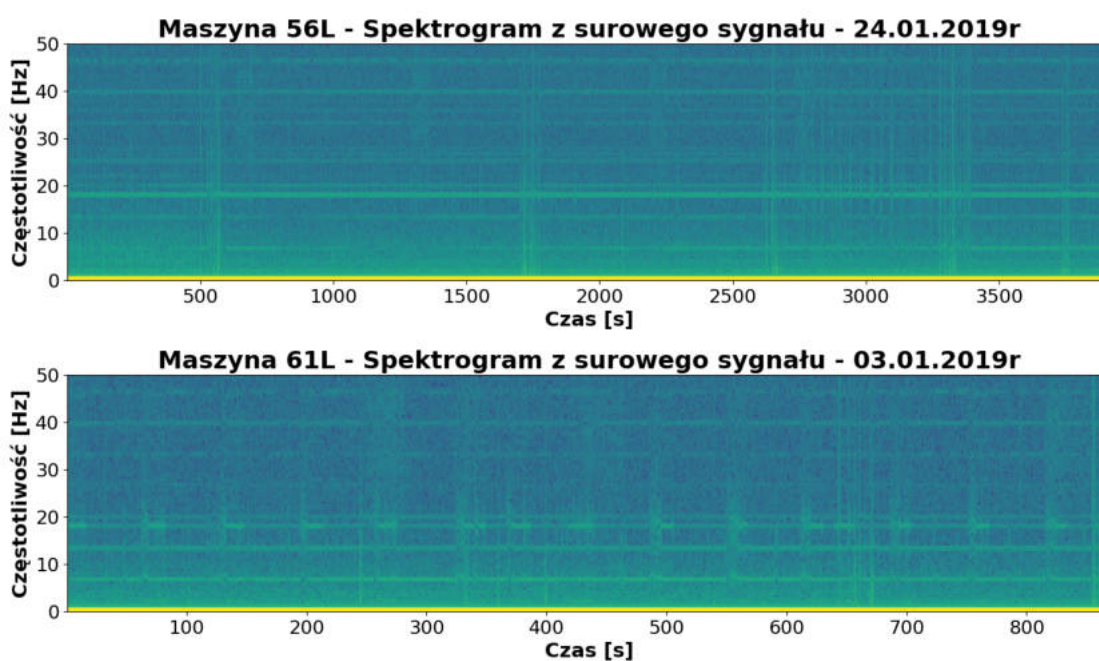
Rysunek 5-74: Spektrogram biegu jałowego (ENGRPM) z okresu awarii silnika ładowarki LK4 61/L w dniu 09.09.2019r. (opracowanie własne)

Wynik analizy szumu w formie surowego sygnału i odfiltrowanego przedstawiono na Rysunku 5-75, w analogii do poprzedniego przypadku. Dla obu przypadków awarii odnotowano tą samą prawidłowość.



Rysunek 5-75: Spektrogram biegu jałowego (ENGRPM) z okresu awarii silnika ładowarki LK4 61/L w dniu 09.09.2019r. (opracowanie własne)

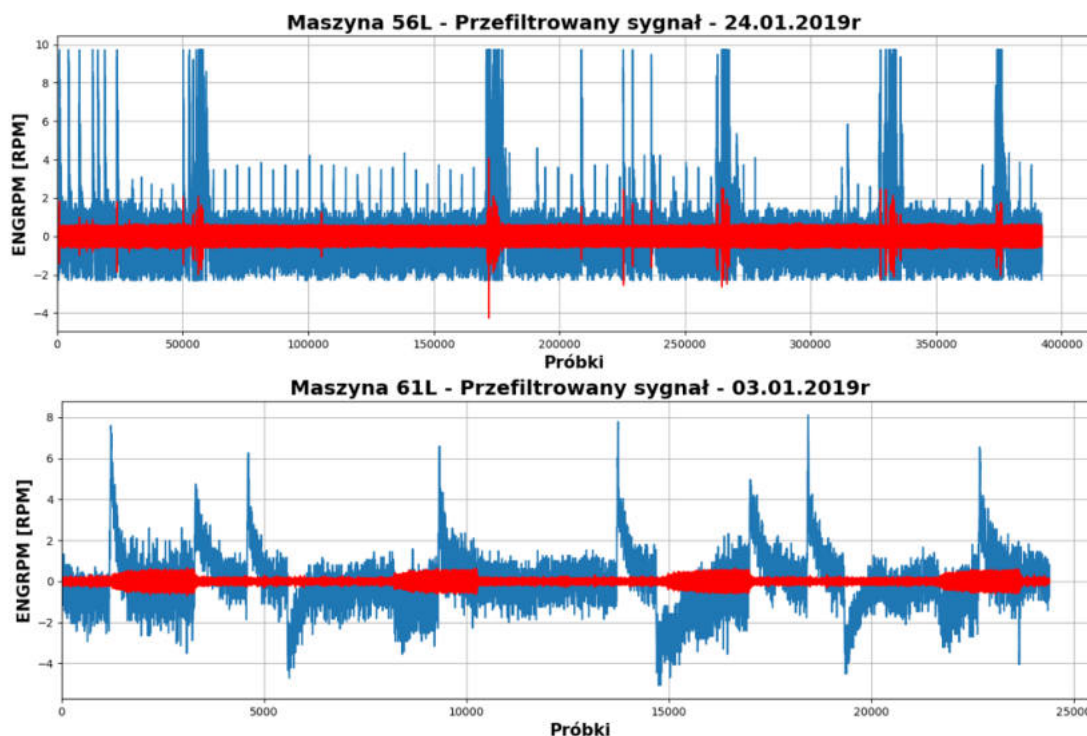
Na potrzeby dalszej weryfikacji wyników, powtórzono analizę szumu w sygnale ENGRPM na wolnych obrotach silnika dla maszyn sprawnych technicznie. W tym celu wybrano próbki z maszyn: LK4-56/L – 24.01.2019r., LK4-61/L – 03.01.2019r. Wynikowe spektrogramy zostały przedstawione na Rysunku 5-76. Dla obu przypadków nie odnotowano obecności dużej energii sygnału widocznej w pełnym paśmie częstotliwości, która utrzymywała się w sposób ciągły.



Rysunek 5-76: Spektrogramy dla ENGRPM uzyskane z sygnału wolnych obrotów silnika. Porównanie stanu dwóch maszyn LK4-56/L oraz LK4-61/L po wymianie silnika (opracowanie własne)

Z kolei na Rysunku 5-77 przedstawiono wynik przeprowadzonej analizy szumu, tj. porównanie surowego sygnału ENGRPM wraz z sygnałem odfiltrowanym w zakresie 15-25 Hz. Oba przypadki

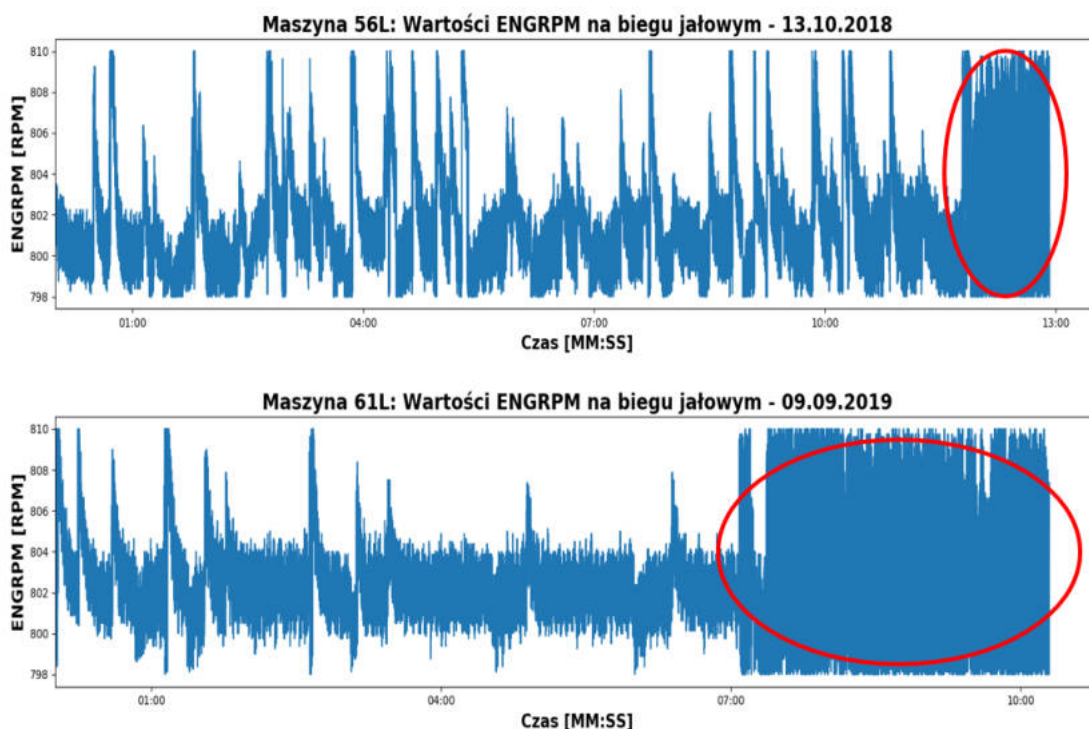
wykazują zdecydowanie niższy poziom szumu. Co prawda zauważalne są cykliczne wybudzenia, ale nie przekraczają one 4 obr./min. Ma to również związek z obserwowanymi wartościami maksymalnymi biegu jałowego. Dla tych przypadków praca na biegu jałowym jest bardziej stabilna w czasie.



Rysunek 5-77: Spektrogramy dla ENGRPM uzyskane z sygnału wolnych obrotów silnika. Porównanie stanu dwóch maszyn po wymianie silnika (opracowanie własne)

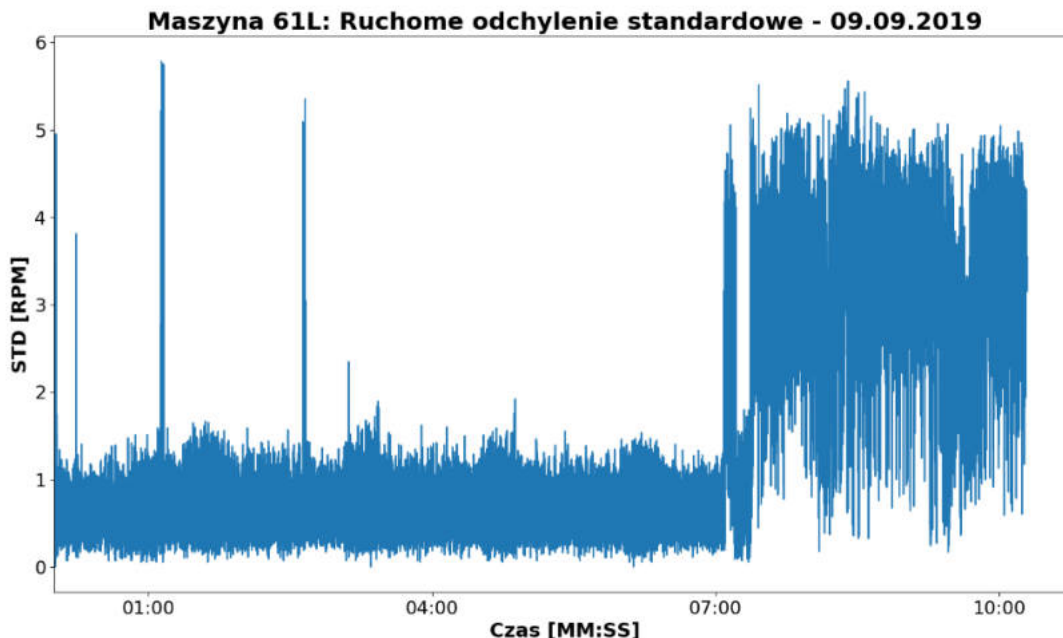
Następnie skupiono się na analizie momentu przejścia maszyny w stan krytyczny. Celem dalszego badania było wypracowanie dalszych założeń algorytmu automatycznej detekcji momentu, w którym maszyna powinna zostać awaryjnie zatrzymana w celu zapobieżenia zerwania śrub na kole zamachowym. Do tego zadania użyto próbek sygnału z dni awarii LK4-56L (13.10.2018 r.) i LK4-61L (09.09.2019 r.). Na Rysunku 5-78 zostały zaprezentowane złączone segmenty biegu jałowego ENGRPM dla dwóch maszyn. Górny panel wykresu przedstawia sygnał z maszyny LK4 56/L o długości ok. 12 min, natomiast dolny panel - dla ładowarki LK4 61/L o długości ok. 11 min. W obu przypadkach oś czasu prezentuje długość wektora biegu jałowego. W obu przypadkach wyraźnie widoczny jest moment przejścia maszyn w stan krytyczny. Momenty te oznaczono na Rysunku 5-78 za pomocą czerwonych elips. W przypadku maszyny LK4-56/L moment przejścia uszkodzenia w stan alarmowy odnotowano ponad godzinę przed awarią. Bardziej drastyczna sytuacja miała miejsce w sytuacji maszyny LK4-61/L, gdzie przejście w stan krytyczny nastąpiło

dopiero na 3 minuty przed awarią. Wskazywać to może na fakt, że maszyna po wejściu w stan krytyczny może ulec rozległej awarii w każdym momencie. Z tego względu konieczne jest niezwłoczne wyłączenie silnika po przekroczeniu wartości granicznej dla rozważanego szumu w sygnale.



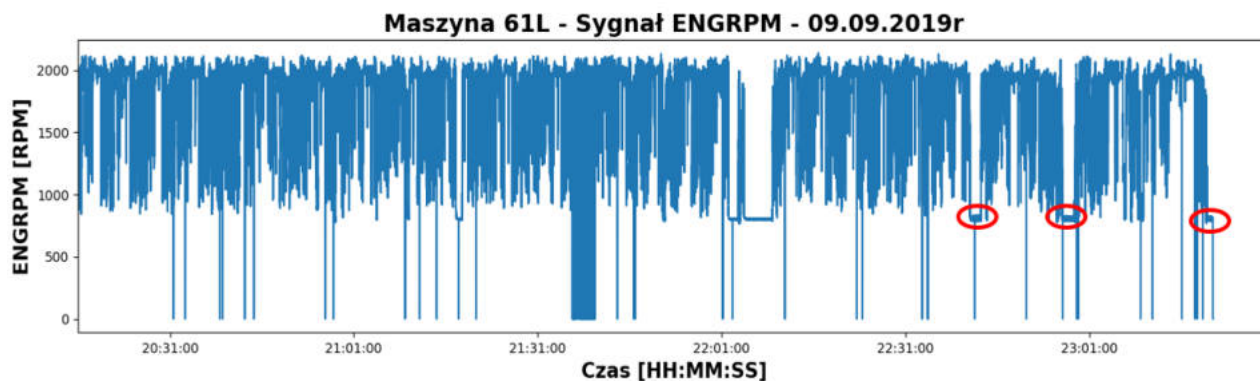
Rysunek 5-78: Wektory ENGRPM uzyskane po wyselekcjonowaniu i połączeniu fragmentów biegu jałowego w sygnale ENGRPM z maszyn LK4-56/L (górny panel) oraz LK4-61/L (dolny panel) w dniach ich awarii (opracowanie własne)

Aby wykryć punkt zmiany reżimu, postanowiono wykorzystać odchylenie standardowe, będące miarą zmienności sygnału. Innymi słowy, statystyka ta mówi nam, jak bardzo odczyty sygnału rozrzucone są względem średniej. Odchylenie estymowano w poruszającym się oknie typu prostokątnego o szerokości 5 próbek. Na Rysunku 5-79 prezentuje wyniki obliczeń dla maszyny LK4-61/L, a na Rysunku 5-80 dla ładowarki LK4-56/L.



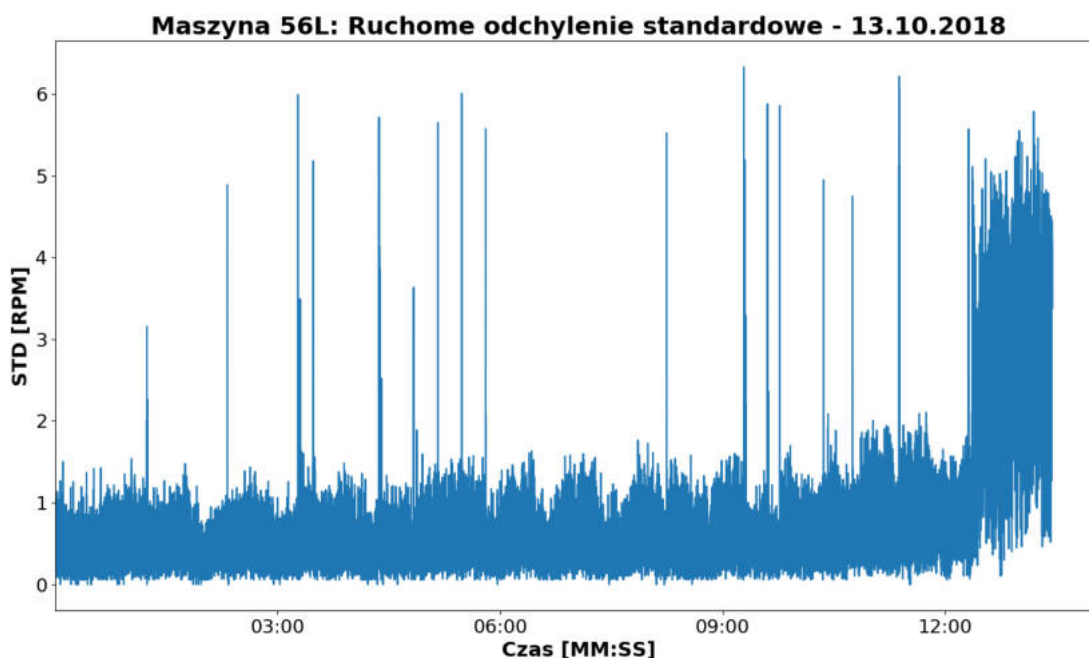
Rysunek 5-79: Ruchome odchylenie standardowe z sygnału biegu jałowego maszyny LK4-6/1L dnia 09.09.2019r. (opracowanie własne)

Sygnał z maszyny LK4-6/1L - Rysunek 5-79 - wykazuje pojedyncze wybudzenia odchylenia standardowego z okresu przed wejściem maszyny w stan krytyczny. Widzimy również, że zwiększony poziom statystyki utrzymuje się w sposób ciągły przez ok. 3 min. przed awarią, co wstępnie potwierdza skuteczność statystyki w zadaniu detekcji. Ten nagły wzrost przedstawiono w 3 następujących po sobie fragmentach biegu jałowego, które miały miejsce przed awarią silnika - Rysunek 5-80.



Rysunek 5-80: Sygnał ENGRPM z maszyny LK4-6/1L, zaznaczone wzrosty odchylenia (opracowanie własne)

Rysunek 5-81 przedstawia odchylenie standardowe obliczone dla maszyny LK4 56/L. Wartość statystyki rośnie tu 5-krotnie na około godzinę przed awarią i utrzymuje się na tym poziomie aż do momentu awarii. Można to interpretować tak, że zmienna ENGRPM na biegu jałowym cechuje się w tym przypadku dużo szybszą zmiennością oraz ogólnie większymi wartościami.



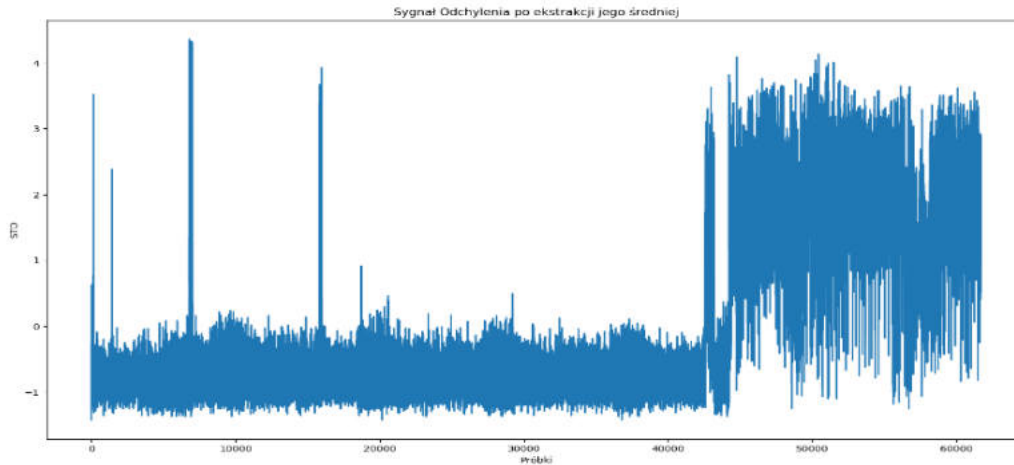
Rysunek 5-81: Ruchome odchylenie standardowe z sygnału biegu jałowego maszyny LK4 -56/L dnia 13.10.2018r. (opracowanie własne)

Gwałtowny skok wartości odchylenia standardowego, przedstawiony na wykresach powyżej, można przybliżyć kształtem do skoku jednostkowego. Oznacza to, że pomimo wcześniej obserwowanych symptomów w sygnale o zbliżającej się awarii, możliwe jest wskazanie w czasie dokładnego momentu, w którym maszyna przechodzi w stan krytyczny, za pomocą procedury detekcji skoku.

Procedura detekcji stanu alarmowego i jej zastosowanie do danych przemysłowych

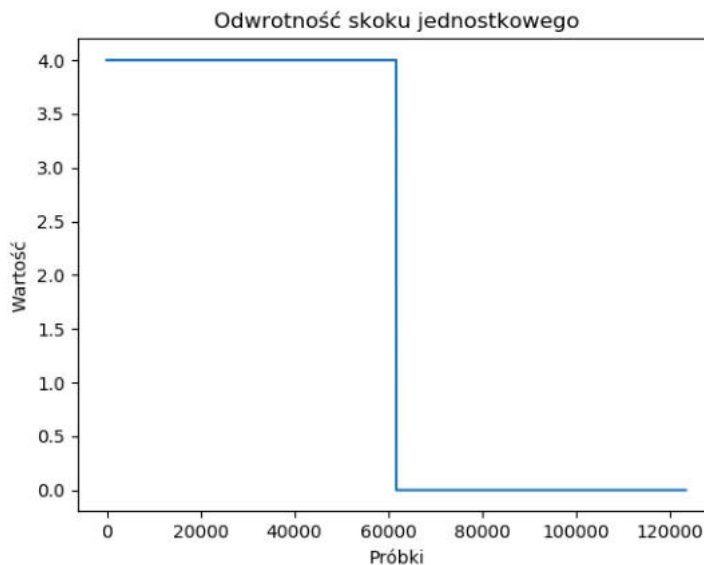
Na podstawie wcześniej odkrytych zależności występujących w danych, wypracowano metodę analizy danych zapewniającą detekcję przejścia maszyny w stan krytyczny dla omawianego problemu z połączeniem flex. Wypracowana procedura składa się z kilku podstawowych kroków:

- KROK 1: Wczytanie surowego sygnału ENGRPM.
- KROK 2: Wykrycie i złączenie segmentów biegu jałowego w jeden wektor danych.
- KROK 3: Obliczenie odchylenia standardowego w oknie ruchomym z otrzymanego wektora biegu jałowego.
- KROK 4: Odjęcie od wektora otrzymanego w kroku 3 jego wartości średniej.



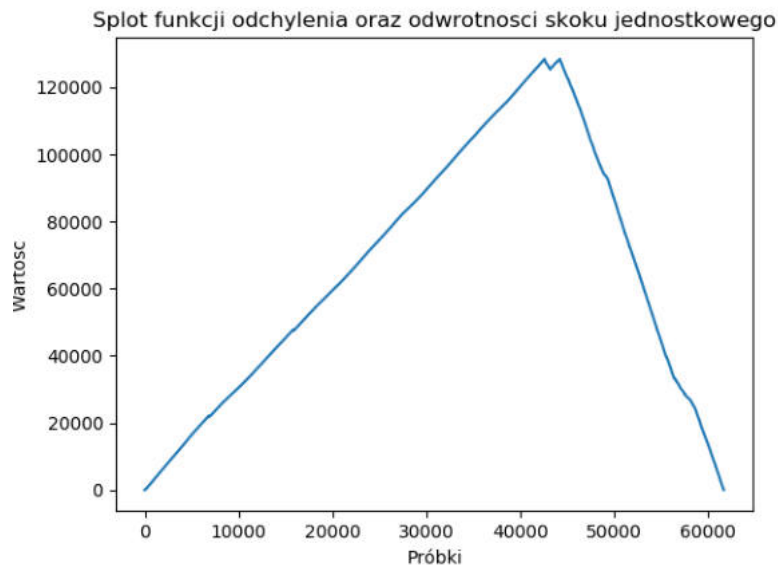
Rysunek 5-82: Wektor odchylenia standardowego po odjęciu jego wartości średniej (opracowanie własne)

- KROK 5: Obliczenie funkcji odwrotności skoku jednostkowego o długości równej długości badanego sygnału, Rysunek 5-83 . Zwiększenie wartości funkcji z przedziału (0,1) do przedziału (0,4) w celu lepszego jej dopasowania do sygnału odchylenia standardowego.



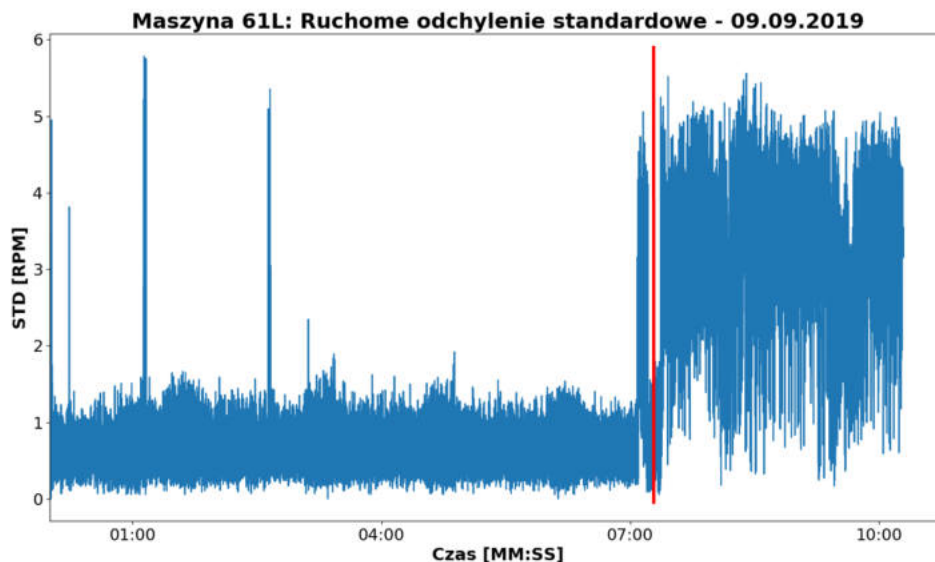
Rysunek 5-83: Odwrotność skoku jednostkowego.

- KROK 6: Splot funkcji skoku jednostkowego oraz sygnału odchylenia, Rysunek 5-84. W wyniku operacji splotu generowana jest funkcja odzwierciedlająca, w jaki sposób kształt jednej jest modyfikowany przez drugą.



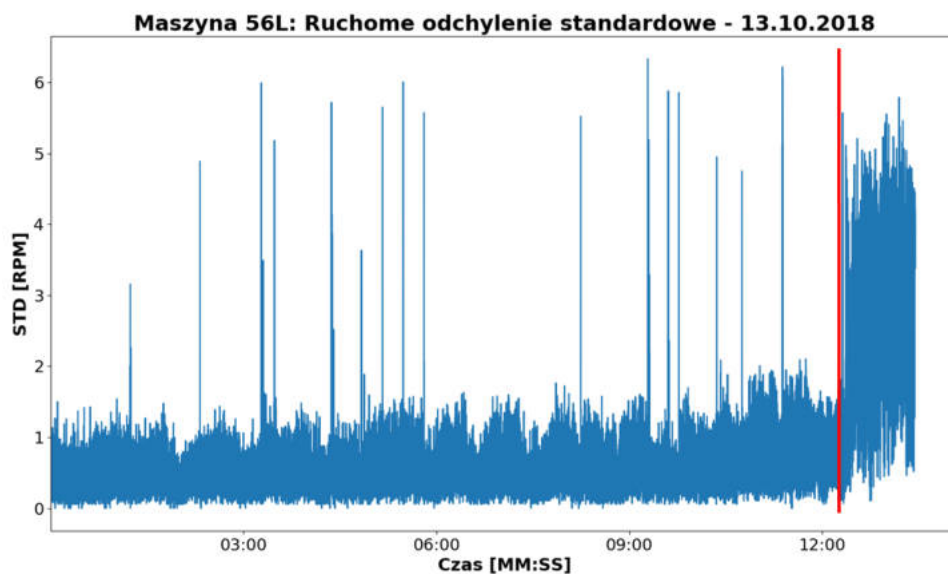
Rysunek 5-84: Splot funkcji odchylenia z odwrotnością funkcji skoku jednostkowego (opracowanie własne)

- KROK 7: Selekcja minimalnego i maksymalnego odczytu w sygnale. Funkcja splotu przyjmuje wartość maksymalną w momencie, gdy funkcja odchylenia standardowego kształtem najbardziej zbliżona jest do funkcji skoku jednostkowego. Wskazanie wartości maksymalnej w funkcji splotu określa z kolei, w którym miejscu w sygnale odnotowano skok. Detekcja najmniejszej wartości umożliwia sprawdzenie, czy skok w ogóle miał miejsce w sygnale. Jeśli minimum będzie znacznie mniejsze od 0, otrzymujemy informację, że w sygnale odchylenia nie ma skoku wartości. Przykładowy wynik procedury przedstawiono na Rysunku 5-85.



Rysunek 5-85: Wykres wektora odchylenia standardowego wraz z momentem przejścia w stan krytyczny maszyny (opracowanie własne)

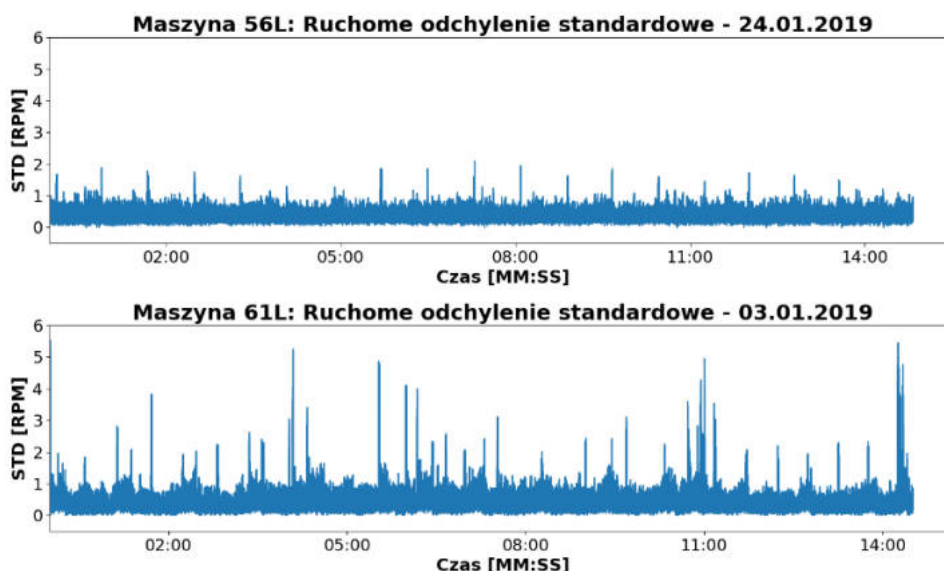
Dla porównania na Rysunku 5-86 przedstawiono efekt działania algorytmu detekcji skoku na maszynie LK4 56L.



Rysunek 5-86: Wykres wektora odchylenia standardowego wraz z momentem przejścia maszyny w stan krytyczny (opracowanie własne)

W celu potwierdzenia otrzymanych rezultatów opisane wyżej czynności zostały wykonane dla sygnałów odpowiednio ze stanu krytycznego oraz stanu prawidłowego. Dla maszyny LK4-56/L użyto tym razem sygnału z dnia 24.01.2019 r., który został uzyskany po wymianie silnika. Dla

maszyny LK4-61/L użyto sygnału z dnia 03.01.2019 r. Na Rysunku 5-87 przedstawiono wyniki obliczeń ruchomego odchylenia standardowego. Oba sygnały nie przejawiają zależności pokazanych w przypadku sygnałów z dnia awarii. Również algorytm detekcji skoku nie wykrył w nich nagłego przeskoku wartości.



Rysunek 5-87: Ruchome odchylenie standardowe z sygnałów zdrowych maszyn (opracowanie własne)

Podsumowanie badań detekcji stanu połączenia flex przed awarią

Badania potwierdziły skuteczność zastosowanej metody. Wyniki zostały zaprezentowane dla zespołu ekspertów: konstruktorów KGHM ZANAM oraz użytkowników z Oddziałów ZG Lubin oraz ZG Rudna. ZANAM nie podjął decyzji o implementacji technicznej procedury. Maszyny typu LKP 1601B zostały wycofane z oferty producenta w roku 2020.

Proponuje się rozwijanie metod analitycznych opartych na danych gęsto próbkowanych. Tego typu analizy mogą stanowić element rozwiązania IoT (ang. Internet of Things), w ramach którego algorytmy będą przetwarzały np. szybkozmiennie dane gęsto próbkowane na poziomie rejestratora i zapisywały jedynie zmienne pochodne o mniejszym okresie próbkowania.

5.3.4 Procedura tworzenia Rejestru Zdarzeń Eksploatacyjnych

Analiza struktur kodowania danych w systemie CMMS w kontekście wykorzystania dla wielowymiarowych analiz, a także obliczania wskaźników oceny efektywności i niezawodności dla SMG, potwierdziła wysoki potencjał źródła. Informacja o awariach maszyn, ze wskazaniem uszkodzonego układu, podzespołu oraz momentu wystąpienia (data, zmiana robocza), ma fundamentalne znaczenie dla prowadzenia badań nad modelami predykcyjnymi wykorzystującymi dane z monitoringu SYNAPSA.

Hierarchia układów i podzespołów została opracowana dla potrzeb ewidencji prowadzonych prac serwisowych przy maszynach - Tabela 5.5. Zdefiniowano 13 układów i 94 podzespoły, w tym 20 rodzajów podzespołów prowadzonych w formie aktywnej z przypisanymi numerami seryjnymi. Dotyczy to wartościowych podzespołów (np. silniki, skrzynie biegów, wiertarki hydrauliczne, mosty napędowe), które są cyklicznie remontowane lub regenerowane. Po naprawie lub regeneracji, podzespół jest najczęściej montowany na innej maszynie.

Tabela 5.5: Dekompozycja układów SMG w systemie CMMS

L.p.	Nazwa układu	Ilość podzespołów przypisanych do układu		razem
		aktywne	pasywne	
1	Elementy konstrukcji	1	4	5
2	Elementy wyposażenia		1	1
3	Instalacja elektryczna niskiego napięcia (12V, 24V)		8	8
4	Instalacja elektryczna wysokiego napięcia (500V, 1000V)	1	5	6
5	Instalacja gaśnicza		6	6
6	System wspomaganie pracy operatora		4	4
7	Układ centralnego smarowania		5	5
8	Układ hydrauliczny	1	6	7
9	Układ klimatyzacji		5	5
10	Układ monitoringu i komunikacji	1	2	3
11	Układ napędowy	10	9	19
12	Układ roboczy	6	18	24
13	Elementy zastosowania ogólnego		1	1
razem		20	74	94

(opracowanie własne)

Na podstawie informacji odnośnie przypisania podzespołów (numerów seryjnych) do maszyny, możliwe jest skonfigurowanie automatycznego procesu dziedziczenia danych z monitoringu maszyn do historii eksploatacyjnej podzespołu. Proces byłby inicjowany po zakończeniu każdej zmiany roboczej. Pozwoliłoby to na prowadzenie analiz dla pełnego cyklu życia kluczowych podzespołów. W Tabeli 5.6 przedstawiono zestawienie dla ilości komponentów wg hierarchii w systemie CMMS.

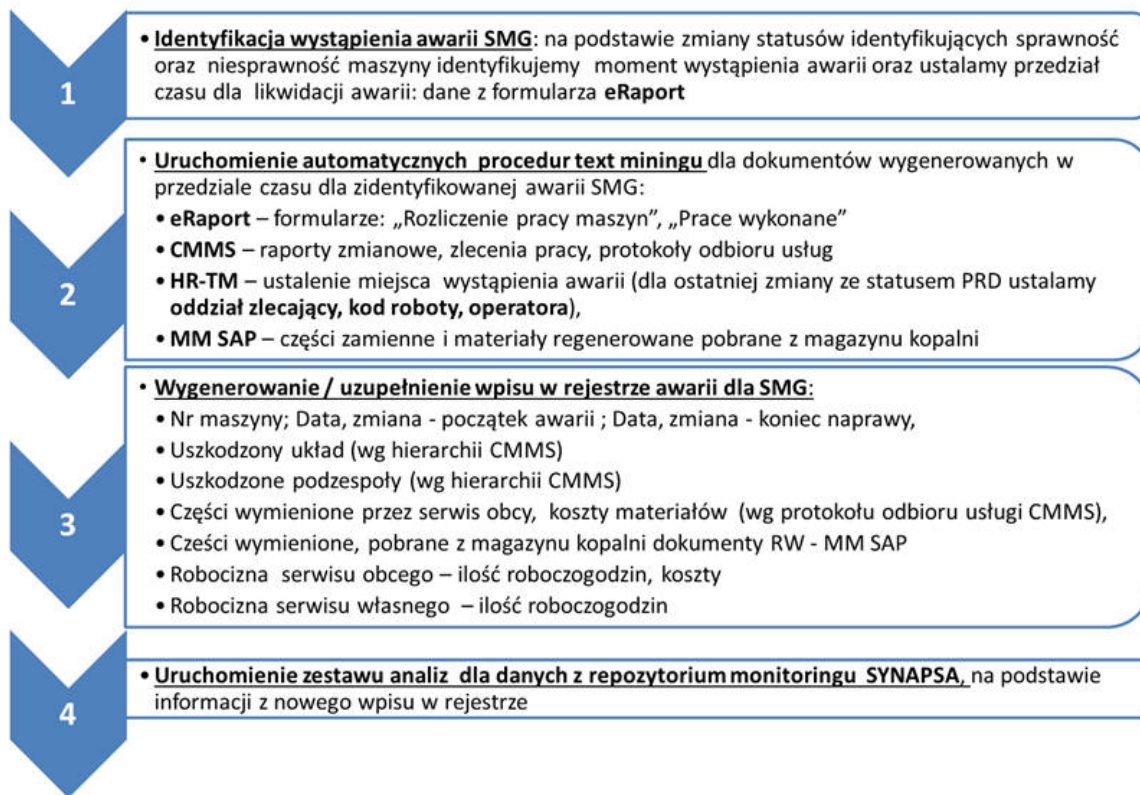
Tabela 5.6: Zestawienie dla podzespołów „aktywnych” w systemie CMMS

Układ oraz podzespół	Zamontowany	Zdemontowany	Drugi obieg	Likwidacja SMG	Nowy	Zwrócony	Razem
UKL-NAPEDEWY	6 095	165	200	148	25	7 087	13 720
HYDROSTAT-POMPA	103	3	4	4		106	220
HYDROSTAT-SILNIK	146	1	1	3	1	81	233
MECHANIZM-JAZDY-KOMBS	2						2
MOST-NAPEDEWY	2 163	22	91	48	8	1 512	3 844
PRZEKLADNIA-HR	200	16	10	6	1	530	763
SILNIK-ELEKTR-TRAKCYJNY	1						1
SILNIK-SPALINOWY	1 642	65	32	37	12	2 017	3 805
SKRZYNIA-BIEGOW	1 137	44	35	28	3	1 780	3 027
ZMIENNIK-MOMENTU	701	14	27	22		1 061	1 825
UKL-ROBOCZY	95	35	10	7	3	160	310
PRZEKLADNIA-STOLU	1						1
WIERTARKA	94	35	10	7	3	160	309
UKL-HYDRAULICZNY	6	1					7
POMPA-HYDR-KOMBS	6	1					7
ELEM-KONSTRUKCJI	43					2	45
KABINA-OPERATORA	43					2	45
INST-ELEKTRYCZNA-500V	93	15	9	8		68	193
SILNIK-ELEKTRYCZNY	93	15	9	8		68	193
UKL-KLIMATYZACJI	69	3			2	77	151
SPREZARKA	69	3			2	77	151
UKL-MONITORINGU						1	1
REJESTRATOR						1	1
ZAST-OGOLNE						2	2
WIERTARKA						2	2
razem	6 401	219	219	163	30	7 397	14 429

(opracowanie własne)

Teoretycznie, powinno to zapewniać bardzo szerokie możliwości dla prowadzenia badań. W trakcie analiz danych napotkaliśmy jednak poważne ograniczenia. Ujawnił się powszechny problem związany z tym, że na etapie ewidencji zleceń pracy w systemie CMMS użytkownicy nie dekretyją zadań w odniesieniu do układów maszyny i komponentów maszyny. Operatorzy systemu - sztugarzy dozoru mechanicznego - tłumaczą taki stan brakiem czasu na prowadzenie szczegółowej ewidencji w czasie zmiany roboczej. Dodatkowo w kopalniach został wdrożony system eRaport, który przejął część ewidencji, która pierwotnie była prowadzona w systemie CMMS. Informacje o awariach SMG można odczytać w formularzach eRaport, na podstawie zapisów w raportach

zmianowych. Zapisy te nie mają formy ustrukturalizowanej, co nie pozwala na opracowanie automatycznych procesów ETL dla zasilania hurtowni danych. Konieczne jest zastosowanie preprocessingu danych w celu klasyfikacji opisów awarii wg struktury układów w systemie CMMS. Umożliwiłoby to opracowanie tabeli w hurtowni danych – Rejestru Zdarzeń Eksploatacyjnych. Rejestr obejmowałby praktycznie całą historię obsługi maszyn; planowaną: przeglądy okresowe, obsługa profilaktyczna (demontaż chłodziw w celu dokładnego umycia), naprawy prewencyjne i nieplanowaną - usuwanie awarii. Do preprocessingu danych będzie zastosowany text mining. Narzędzia tego typu zostały wcześniej pozytywnie zweryfikowane. W zakresie prac badawczo-rozwojowych powiązanych z monitoringiem SMG zlecono dla KGHM Cuprum przetestowanie algorytmów dla identyfikacji awarii układów i podzespołów maszyn (silnik i skrzynia biegów) z ewidencji dokumentów w systemie CMMS (badania prowadzono w roku 2020). Proces testowania algorytmów prowadzony był pod nadzorem ekspertów ze strony KGHM. W pierwszych iteracjach wyniki były dalekie od oczekiwań. Ostatecznie, na bazie wypracowanych doświadczeń, udało się znacząco poprawić skuteczność identyfikacji. Opisane doświadczenia zostaną wykorzystane w do klasyfikacji wpisów z formularzy eRaportu. Docelowo zakres klasyfikacji będzie rozszerzony do wszystkich układów dla SMG. Ogólne założenia procedury tworzenia rejestru przedstawiono na Rysunku 5-88. Mechanizm wykorzystuje możliwość fuzji danych dostępnych w wielu systemach, które zasilają obszar informacyjny hurtowni danych EKSPERT SMG/SYNAPSA. Wdrożenie, udostępnienie Rejestru Zdarzeń Eksploatacyjnych dla SMG ułatwiłoby realizację analiz dla potrzeb predykcji awarii sprzętu na poziomie operacyjnym oraz dla szerszego horyzontu obserwacji cyklu życia maszyn.



Rysunek 5-88: Schemat poglądowy procedury tworzenia rejestru awarii SMG przy zastosowaniu procedur text miningu (źródło: dokumentacja wdrożeniowa systemu w KGHM, opracowanie własne)

Rozdział 6

Implementacje i wdrożenia

Praca ma charakter wdrożeniowy. Do fazy wdrożenia włączono zagadnienia, dla których potwierdzono uzasadnienie wykorzystania przez KGHM. Drugim istotnym warunkiem była możliwość wykorzystania zasobów niezbędnych dla implementacji technicznej i uzyskania realnego wsparcia przez Zespół Koordynacyjny ds. Monitoringu SMG w KGHM.

Zakres badań ustalony na początku podlegał ewolucji, która była uzasadniona zmianami w otoczeniu firmy oraz potrzebami organizacji. Przykładem może być wdrożenie w KGHM maszyn z napędem elektrycznym zasilanym bateryjnie, które wymagało dostosowania funkcjonalności monitoringu SYNAPSA. Firma jako jedna z pierwszych w branży zdecydowała się na ryzyko testów tej technologii w realnych warunkach eksploatacji. Było to związane z restrykcyjnymi normami w zakresie emisji spalin, w szczególności NOx. Tematyka badań związanych z testami maszyn elektrycznych, ze względu na innowacyjny charakter, została włączona do pracy.

Na początku realizacji programu badań, Zespół Koordynacyjny ds. Monitoringu cofnął rekomendację w zakresie wykorzystywania monitoringu dla maszyn wierząco-kotwiących. W rezultacie kopalnie zrezygnowały z tej opcji wyposażenia dla SWW oraz SWK. Program badań z konieczności został ograniczony.

W ramach wdrożenia opracowano od podstaw lub zmodyfikowano wiele raportów dla obszaru informacyjnego hurtowni danych SYNAPSA. W rozdziale opisane zostały tylko najważniejsze, ze względu na element innowacyjności, odniesienia do celów pracy.

Warto zaznaczyć także inne efekty wdrożeniowe z tytułu prowadzonych badań. Autor ma na myśli współpracę z konstruktorami maszyn, szczególnie z KGHM ZANAM. Efekty tej współpracy mają bezpośrednie przełożenie na lepszą jakość produktu. Przy okazji badań efektywności lock-up na wozach serii 20/24TB przeprowadzono analizę statystyczną czasu trwania sekwencji

załączeń blokady dla badanego WO. W rezultacie poprawiono oprogramowanie sterownika. Wyeliminowano krótkie sekwencje (do 3 sekund), które nie poprawiały trakcji, powodowały natomiast przyspieszone zużycie skrzyni biegów.

6.1 Wdrożenie analityki dla procesu odstawy oponowej urobku na podstawie danych z systemu antykolizji

W zakresie pracy testowano dwa algorytmy dla identyfikacji cykli pracy maszyn WO. Okazało się, że największy potencjał rozwojowy mają algorytmy bazujące na danych z systemu antykolizji. Na podstawie badań opisanych w rozdziale 5.2.2, które potwierdzały możliwość identyfikacji cykli pracy dla maszyn typu WO, uruchomiono pracę badawczo-rozwojową, zleconą dla KGHM Cuprum. Autor pełnił funkcję kierownika zadania, zaplanował zakres i harmonogram realizacji pracy oraz uzyskał przydział środków finansowych na realizację. Praca B+R ma akronim „GWAR”, będzie realizowana w Oddziale ZG Lubin dla rejonu szybu L-VI „Rynarcice”. Pierwszy etap - do października 2023. Drugi etap - do końca stycznia 2024 roku. Po zakończeniu testów możliwe będzie wdrożenie rozwiązania na pełną skalę w 3 kopalniach dla wszystkich maszyn z grupy LK oraz WO, bez względu na to, czy będą wyposażone w monitoring SYNAPSA. W ramach prac przygotowawczych przeprowadzono wizję lokalną wyrobisk w rejonie szybu L-VI. Przeprowadzono inwentaryzację obiektów zdefiniowanych w schemacie algorytmu przetwarzania danych:

- zidentyfikowano punkty wysypu urobku,
- zidentyfikowano numery maszyn oraz nr tagów RFID do nich przypisanych (nr taga aktywnego oraz postojowego),
- zidentyfikowano numery marek stałych, przypisanych dla pracowników.

W Tabeli 6.1 przedstawiono wyniki inwentaryzacji funkcjonujących punktów wysypu urobku na przenośniki taśmowe w rejonie szybu L-VI. Dla każdego punktu przypisano nr oznaczenia przenośnika oraz oznaczenie oddziału wydobywczego.

Tabela 6.1: Inwentaryzacja punktów wysypu urobku w rejonie szybu L-VI O/ZG Lubin

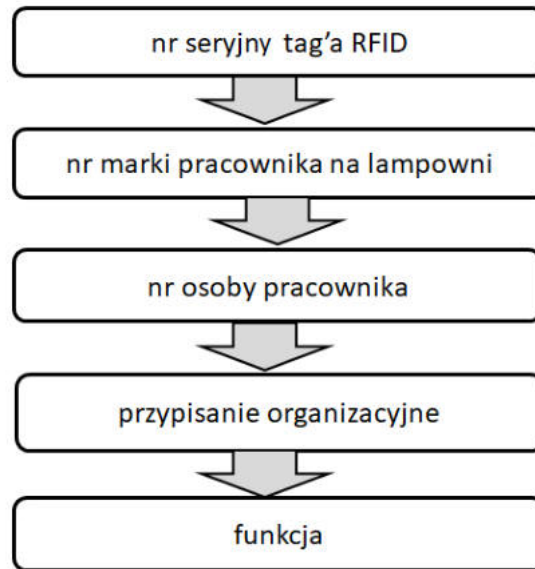
L.p.	Nr URB	Lokalizacja	Oddz. górniczy	nr zlecenia
1	6	N-331/p.14	G-6	11T00T30URB6
2	8	W-1b/p-6	G-6	11T00T30URB8
3	2	poch. C-106 p.8	G-7	11T00T30URB2
4	1	C-242 p-17	G-8	11T00T30URB1
5	5	W-91/p-23	G-6	11T00T30URB5
6	9	N-465 / p-10	G-8	11T00T30URB9
7	3	N-331 / p-18	G-6	11T00T30URB3
8	4 KLIM	N-465 / p-20	G-8	11T00T30UR04
9	7	remont komora		
10	11	W-91/p-19	G-6	11T0T30URB11
11	10 KLIM	C-2202 / p-9	G-7	11T0T30URB10
12	12 KLIM	C-2202 / p-12	G-7/ZANAM	11T0T30URB12
13	13 ZS 1 KLIM	C-2202 / p- 30a	G-7	11T0T30URB13
14	14 KLIM L-3	remont komora		
15	15 ZS 1 KLIM	C-2102 p. 31	G-7	11T0T30URB15
16	16 ZS 1 KLIM	N-465 p. 28	G-8	11T0T30URB16
17	17 ZS 1 KLIM	C-1701 p. 19	G-7/ZANAM	11T0T30URB17
18	18 KLIM	C-242 p-21	G-8	11T0T30URB18
19	19 KLIM	C-232A p-14A	G-6	11T0T30URB19
20	20 KLIM	C-232A p-24	G-6	11T0T30URB20

(opracowanie własne)

Na Rysunku 6-1 przedstawiono schemat przekodowania nr tagu RFID na atrybuty pracownika dostępne w module HR-TM SAP. Atrybuty pracowników będą wykorzystane przy opracowaniu algorytmów identyfikujących przemieszczanie się maszyny pomiędzy strefami:

- komora obsługowa w oddziale mechanicznym,
- trasa dojazdowa do frontów eksploatacyjnych,
- pole eksploatacyjne w oddziale wydobywczym.

Na przykład, kontakt z tagiem identyfikującym sztygara zmianowego oddziału wydobywczego można zaklasyfikować jako początek pracy w oddziale zlecającym.



Rysunek 6-1: Schemat przekodowania nr tagu RFID na atrybuty pracownika w ewidencji HR-TM SAP (opracowanie własne)

W Tabeli 6.2 przedstawiono wyniki inwentaryzacji maszyn z O/ZG Lubin operujących w rejonie szybu L-VI. Pomimo, że zasadniczym celem dla wdrożenia jest analityka pracy maszyn LK oraz WO, przeprowadzono pełną inwentaryzację maszyn w rejonie szybu L-VI. Zaplanowano rozmieszczenie dodatkowych tagów w węzłowych punktach wyrobisk komunikacyjnych. Pozwoli to na monitorowanie ruchu maszyn w trakcie zmiany roboczej, w szczególności na weryfikację czasu wyjazdu każdej maszyny z KMC do pracy w oddziale wydobywczym.

Tabela 6.2: Inwentaryzacja populacji maszyn w rejonie szybu L-VI O/ZG Lubin

Etykiety wierszy	C-1A	C-1B	C-1C	C-1D	SMG razem
LK2		4			4
LK3	8	4			12
LK4	8				8
WO	2	11			13
WOS	9				9
SWW		4	9		13
SWWD		1	1		2
SWK		6	7		13
SWKA			4		4
SWKF		2	4		6
SWB		1		5	6
SG		1		4	5
SMG podstawowe	27	34	25	9	95
LK1	11	3	1	6	21
POM	1	1	1	4	7
SK				1	1
SWKP			1		1
SWO				1	1
SWOI		1	1		2
SWPS	2	1			3
SWS		5		2	7
SWSR					0
SWTD		4		4	8
SWTS				33	33
WCKLS		2	1		3
SMG pomocnicze	14	17	5	51	87
SMG razem	55	68	35	111	269

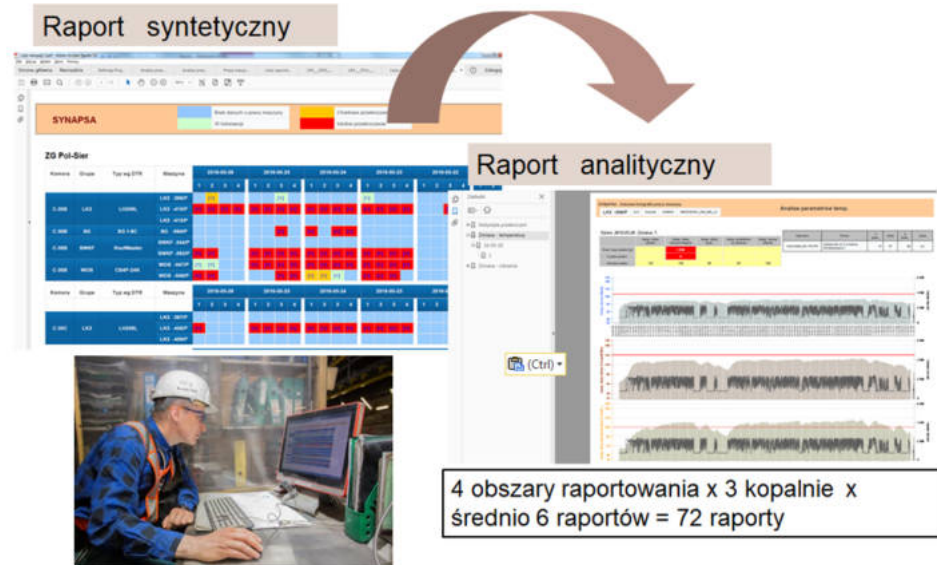
(opracowanie własne)

6.2 Operacyjna ocena parametrów pracy maszyn na podstawie podstawowych statystyk dla monitorowanych parametrów

Na Rysunku 6-2 przedstawiono klasyczną formułę wykorzystywaną do operacyjnej kontroli parametrów pracy maszyn, która bazowała na przeglądaniu raportów typu „fotografia pracy maszyny”. Ta powszechnie stosowana metoda jest dobrze znana wszystkim użytkownikom systemu SYNAPSA. Rozwiązanie to ma wiele ograniczeń:

- przeglądanie indywidualnych fotografii dla każdej maszyny nieefektywne pod względem czasowym;
- porównanie wyników dla kilku maszyn jest utrudnione;

- proces generowania zestawu fotografii dla każdej maszyny mocno obciąża zasoby IT, przez co jest uruchamiany raz na dobę, podczas gdy użytkownicy raportów oczekują aktualizacji informacji po zakończeniu każdej zmiany, czyli cztery razy na dobę.



Rysunek 6-2: System raportowania od ogółu do szczegółu (opracowanie własne)

Dla zapewnienia możliwości kontroli parametrów po zakończeniu każdej zmiany, autor zaproponował zastosowanie uproszczonej metody, która jest możliwa do implementacji bez zaangażowania dużych zasobów po stronie IT. Zastosowano następujący schemat przetwarzania danych:

1. selekcja parametrów,
2. dobór istotnych statystyk,
3. harmonogramowanie procesu ETL,
4. czyszczenie danych,
5. właściwe obliczenia,
6. zasilenie kostek informacyjnych hurtowni danych,
7. przygotowanie raportów WEBI,
8. odświeżenie raportów.

Zrezygnowano z formuły dostępu offline – generowania i publikacji raportów PDF. Przy zmiennej aktualizacji danych nie uruchamia się też algorytmów identyfikacji przekroczeń wartości nominalnych (są uruchamiane tylko przy pełnej aktualizacji danych – proces uruchamiany o godzinie 2 w nocy).

W rezultacie proces aktualizacji danych został skrócony do około 40 minut, dzięki czemu sztygarzy zmianowi mają zapewniony dostęp do aktualnych informacji. Mogą je wykorzystać przy ustalaniu zakresu bieżącej obsługi maszyn na prowadzonej zmianie w KMC.

Opisana metoda jest zastosowana dla wskazanych poniżej parametrów:

- temperatury:
 - silnik: ciecz chłodząca - ENGCOOLT, olej - ENGOILT, powietrze na dolocie silnika - INTAKET,
 - skrzynia biegów: olej - GROILT,
 - układ hydrauliczny: olej - HYDOILT,
 - wnętrze kabiny: powietrze - TEMPIN
- ciśnienia:
 - silnik: olej - ENGOILP, doładowanie - INTAKEP,
 - skrzynie biegów: olej - GROILP,
 - układ hydrauliczny: olej - HYDOILP
- prędkość obrotowa silnika - ENGRPM,
- prędkość jazdy - SPEED,
- nastawy sterowania:
 - pozycja pedału gazu – ENGTPS,
 - pozycja pedału hamulca - TRNBPS.

Dla każdej z wymienionych grup parametrów dobrano statystyki, które mają wartość informacyjną:

- wskaźniki dot. temperatury: percentyl 95 oraz percentyl 75,
- wskaźniki dot. ciśnienia: percentyl 25,
- prędkość maszyny: percentyl 95, percentyl 75, suma odczytów (sygnał próbkowany co 1 sekundę) do obliczenia przejechanego dystansu ,
- chwilowe zużycie paliwa: percentyl 75, suma odczytów (sygnał próbkowany co 1 sekundę) do obliczenia sumarycznego zużycia wg kalkulatora wtrysku.

Zastosowano proste reguły czyszczenia danych:

Eliminacja wartości „0” oraz „null” w surowych próbkach danych.

Zaplanowano harmonogramowanie procesu przetwarzania danych - ETL:

Standardowo planuje się inicjację procesu pod koniec każdej zmiany roboczej dla pełnej populacji maszyn.

Przygotowano pakiet raportów WEBI, udostępniany tylko w formie online:

Przyjęto standardową formę definicji raportu. Jest to macierz prezentująca wybraną statystykę dla

określonego parametru. Układ macierzy odwzorowuje wymiar organizacyjny: kopalnia, rejon, komora oraz wymiar techniczny: grupa maszyn, typ wg DTR. Raporty są odświeżane automatycznie przy otwarciu. Dla ilustracji rozwiązania zaprezentowano kilka przykładowych raportów. Przedstawiono rekomendacje odnośnie praktycznej interpretacji danych, bazujące na doświadczeniach wypracowanych wspólnie przez autora oraz liderów odpowiedzialnych za wykorzystanie monitoringu w Oddziałach Górniczych. Na Rysunku 6-3 przedstawiono wskaźnik percentyla 95 dla parametru temperatury w układach maszyny, odpowiednio dla cieczy chłodzącej, oleju w silniku oraz w skrzyni biegów i wreszcie oleju hydraulicznego. Zastosowano formatowanie warunkowe. Kolorem pomarańczowym oznaczono przekroczenia temperatury o średnim poziomie. Kolorem czerwonym oznaczono poważne przekroczenia w stosunku do wartości określonych w instrukcjach obsługi maszyn (tzw. DTR).

ZG Lubin komora: C - 1A			18-04-23		17-04-23		16-04		15-04-23		14-04-23			13-04-23					
			2	1	4	3	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
LKP0903	ENGCoolt	LK3 -056/L	94	92	94	91	97							94	95	95	91		
	ENGOILT	LK3 -056/L	100	97	99	94	94							99	101	101	98		
	GROILT	LK3 -056/L	100	95	99	96	83							103	103	94			
	INTAKET	LK3 -056/L	73	67	75	65	61							72	77	75	67		
	HYDOILT	LK3 -056/L	10		10		10	10									10		
LH209L		LK3 -053/L							105	104	93	88	93				95		
	ENGCoolt	LK3 -057/L					94		88		89	94	93	95	95	97	95	98	
		LK3 -059/L					89	87								86	86	90	88
		LK3 -053/L							107	112	101	99	102					89	
	ENGOILT	LK3 -057/L					106		101		102	106	105	108	108	109	107	110	
		LK3 -059/L					107	106								105	106	107	106
	GROILT	LK3 -059/L					83	82								79	80	91	81
		LK3 -053/L								72	71	63	60	61					64
	INTAKET	LK3 -057/L					66		59		63	68	66	68	67	71	68	70	
		LK3 -059/L					76	82							79	81	86	73	
HYDOILT	LK3 -059/L					85	76							50	80	81	87	82	

Rysunek 6-3: Przykład raportu dla analiz maksymalnych temperatur dla monitorowanych układów (opracowanie własne)

SYNAPSA: analiza zmianowych statystyk dla monitoringach parametrów SMG: kwantyl 75% dla temperatury

Maksimum> Kwantyl 95>> Kwantyl 75> Mediana > Kwantyl 25> Kwantyl 5> Minimum

ZG Lubin komora: C - 1A

			18-04-23		17-04-23				16-04		15-04-23		14-04-23				13-04-23				
			2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	
LKP0903	ENGCOOLT	LK3 -056/L	92	90	90	89			89							92	91		93	89	
	ENGOILT	LK3 -056/L	96	95	94	93			93							98	97		99	95	
	GROILT	LK3 -056/L	95	91	91	88			81							97			100	85	
	INTAKET	LK3 -056/L	70	62	67	59			57							69	69		72	62	
	HYDOILT	LK3 -056/L	10		10				10	10										10	
LKP1001	ENGCOOLT	LK3 -060/L	100	90	87	90	90												97		
		LK3 -061/L					96	92			70	85	85	98	94				85	99	89
	GROILT	LK3 -060/L	105	94	62	90	90												93		
		LK3 -061/L					103	98			48	85	85	103	98				81	104	92
	INTAKET	LK3 -060/L	84	75	57	85	85												81		
		LK3 -061/L					78	75			59	62	63	80	78				70	82	73
	HYDOILT	LK3 -060/L	100	74	40	48	75												78		
		LK3 -061/L					115	90			38	68	70	118	102				57	120	90

Rysunek 6-4: Przykład raportu dla analiz średnich temperatur dla monitorowanych układów (opracowanie własne)

SYNAPSA: analiza zmianowych statystyk dla monitoringach parametrów SMG: kwantyl 25% dla ciśnienia silnik oraz SB

Maksimum> Kwantyl 95>> Kwantyl 75> Mediana > Kwantyl 25> Kwantyl 5> Minimum

ZG Lubin komora: C - 1A			18-04-23		17-04-23				16-04-2		15-04-23		14-04-23				13-04-23			
			2	1	4	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	
LKP0903	ENGOILP	LK3 -056/L	260	241	239			246								263	265	356	378	
	GROILP	LK3 -056/L	1692	1684	1680			1680								1676	1692	1700	1716	
LKP1001	ENGOILP	LK3 -060/L	316	302												292				
		LK3 -061/L				284	280				300		286	276				250	280	
	GROILP	LK3 -060/L	1978	1888													1910			
		LK3 -061/L				1888	1888				1910		1888	1888				1811	1888	
LH209L	ENGOILP	LK3 -053/L							394	333	328	272	300					56	56	
		LK3 -057/L						413		292		306	280	343	384	272	300	361	361	
	GROILP	LK3 -059/L						378	306							273	266	366	264	
							2046	2022							2014	2012	2030	2012		

Rysunek 6-5: Przykład raportu dla identyfikacji potencjalnych problemów związanych ze spadkiem ciśnienia w monitorowanych układach (opracowanie własne)

Macierz raportu prezentuje wskaźnik percentyla 25 dla parametru ciśnienia w układach maszyny, odpowiednio oleju silnikowego oraz oleju w skrzyni biegów. Z punktu widzenia diagnostyki maszyn, statystyka ta odwzorowuje symptomy zużycia mechanicznego podzespołów. Wydajność

pomp hydraulicznych jest projektowana z odpowiednim naddatkiem. W zakresie średnich i wysokich obrotów silnika, ciśnienie ograniczają zawory przelewowe. Na podstawie obserwacji podczas wizji lokalnych na dole, wskaźnik percentyl 25 dotyczy pracy silnika na biegu jałowym. W tym zakresie RPM zawory są zamknięte i można obserwować występujące spadki ciśnienia.

SYNAPSA: analiza zmianowych statystyk dla monitoringach parametrów SMG: kwantyl 25% obroty silnika

Maksimum> Kwantyl 95>> Kwantyl 75> Mediana > Kwantyl 25> Kwantyl 5> Minimum

Statystyka potencjalnie użyteczna do szybkiej oceny organizacji pracy w oddziale zlecającym.
Wartość kwantyla 25% zbliżona do regulacji RPM biegu jałowego potwierdza, że przynajmniej 25% czasu silnik maszyny pracował na biegu jałowym.

C - 1A			16-04-23				17-04-23				16-04-23				15-04-23				14-04-23				13-04-23			
			2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3
LKD9903	ENGRPM	LK3_056L	841	840	837	0	0	0	838										0	0	843	841	1137	1231		
LKD1001	ENGRPM	LK3_060L	1226	1100	0	0	0														1101					
		LK3_061L						1101	1100					0	1101	0	1102	1100				0	1099	1099		
		LK3_053L											1491	893	874	639	640						0	0		
LH299L	ENGRPM	LK3_057L								1588			640								643	640	1023	1257		
		LK3_059L								1241		753										699	700	1116		
																						701				

Rysunek 6-6: Przykład raportu dla oceny organizacji pracy maszyn w oddziałach wydobywczych (opracowanie własne)

Macierz raportu prezentuje wskaźnik percentyla 25 dla parametru obrotów silnika – RPM. Wartość percentyla 25 zbliżona do regulacji RPM biegu jałowego maszyny potwierdza, że przynajmniej przez 25% czasu silnik maszyny pracował na biegu jałowym. Jeśli opisana prawidłowość wystąpi, warto zweryfikować wskaźnik percentyla 50 (mediana). Jeśli mediana jest na porównywalnym poziomie, to jest to zjawisko niepokojące.

6.3 Analityka stanu maszyn na podstawie komunikatów o błędach zapisanych przez sterowniki cyfrowe

Istotnym uzupełnieniem dla informacji o zarejestrowanych statystykach dla monitorowanych parametrów są dane o błędach sterowników cyfrowych silnika i skrzyni biegów. Na podstawie doświadczeń praktycznych można stwierdzić, że systemy autodiagnostyki maszyn generują bardzo dużo wpisów w rejestrach. W konsekwencji, praktycznie podczas każdej zmiany roboczej maszyna może generować błędy. W związku z tym operatorzy często ignorują komunikaty o błędach wyświetlane na panelach kontrolnych.

Raport WEBI, online, przedstawiony na Rysunku 6-7, który prezentuje wskaźnik sumarycznego czasu wystąpienia błędów zgłaszanych na szynie CAN przez sterownik silnika (prefiks ERR) oraz sterownik skrzyni biegów (prefiks GRR). Dane są agregowane dla wszystkich zarejestrowanych kombinacji kodów SPN oraz FMI. Autor przygotował tabelę z opisami dla kodów błędów: SPN (na dzień 25 maja br. tabela liczyła 201 pozycji, jest ona ciągle uzupełniana) oraz FMI, na podstawie dostępnej dokumentacji. W raporcie zastosowano elementy formatowania warunkowego odnoszącego się do długości czasu, przez który błąd był sygnalizowany w trakcie zmiany roboczej. Dodatkowo wyróżniono numery maszyn w okresie gwarancji producenta.

Zestawienie wg łącznego czasu błędów wg numerów SPN [min] od 23-04-27 do 23-04-30

ERR - silnik; GRR skrzynia biegów

<https://spnfmi.com/code-list/>

ZG Pol-Sier

C - 60D

C - 60D LK2

SPN nr	SPN - opis	FMI	FMI opis	26-04-23			28-04-23			27-04-23					
				3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	
LK2 -525/P	ERR	110	temperatura cieczy chłodzącej	0	wskazanie powyżej normalnego zakresu, "czerwony status"									105,5	
		111	niski poziom cieczy chłodzącej	1	wskazanie poniżej normalnego zakresu, "czerwony status"					5,3					
	GRR	520291	Temperatura zewnętrzna konwertera skrzyni biegów	16	wskazanie powyżej normalnego zakresu, "pomarańcz status"									3,1	
		520418	Próba zmiany kierunku jazdy przy za dużej prędkości obrotowej silnika	31	sygnal niedostępny								2,0	3,8	
		520419	Próba redukcji biegu przy przekroczeniu limitu prędkości redukcji biegów	31	sygnal niedostępny									9,5	
LK2 -527/P	ERR	105	temperatura powietrza dołot	0	wskazanie powyżej normalnego zakresu, "czerwony status"			5,8							
		110	temperatura cieczy chłodzącej	0	wskazanie powyżej normalnego zakresu, "czerwony status"			19,4							
LKP0900E	GRR	520418	Próba zmiany kierunku jazdy przy za dużej prędkości obrotowej silnika	31	sygnal niedostępny			4,6						4,1	
		520418	Próba zmiany kierunku jazdy przy za dużej prędkości obrotowej silnika	31	sygnal niedostępny					3,9		2,4			
	GRR	520419	Próba redukcji biegu przy przekroczeniu limitu prędkości redukcji biegów	31	sygnal niedostępny		4,0		2,5	3,4	4,2		4,8	2,7	
		520421	Przekroczenie maksymalnego limitu obrotów skrzyni biegów	31	sygnal niedostępny			4,2		5,3	6,3				
	LK2 -552/P	GRR	520418	Próba zmiany kierunku jazdy przy za dużej prędkości obrotowej silnika	31	sygnal niedostępny	2,9				3,8		2,3	2,1	4,4
			520419	Próba redukcji biegu przy przekroczeniu limitu prędkości redukcji biegów	31	sygnal niedostępny	4,2		10,1	2,4	2,6	13,8	12,0	2,8	3,8
		GRR	520421	Przekroczenie maksymalnego limitu obrotów skrzyni biegów	1	wskazanie poniżej normalnego zakresu, "czerwony status"					3,7				
			520421	Przekroczenie maksymalnego limitu obrotów skrzyni biegów	31	sygnal niedostępny			5,6		6,1				6,2

Rysunek 6-7: Przykład raportu: „Błędy SPN - wgląd pełny” (opracowanie własne)

W celu ułatwienia interpretacji danych, przygotowano dodatkowy wgląd raportu – Rysunek 6-8, ograniczony do listy błędów SPN z kodem FMI 0 oraz 1, które wskazują na krytyczne znaczenie komunikatu.

Zestawienie wg łącznego czasu błędów wg numerów SPN [min], filtr dla kodów FMI 0 oraz 1 ; od 23-04-27 do 23-04-30

ERR - silnik; GRR skrzynia biegów

<https://spnfmi.com/code-list/>

ZG Pol-Sier

C - 60D

						29-04-		28-04-		27-04-23	
		SPN nr	SPN - opis	FMI	FMI opis	1	2	4	1		
LKP0900B	LK2 -525/P	ERR	110	temperatura cieczy chłodzącej	0	wskazanie powyżej normalnego zakresu, "czerwony staus"				105,0	
			111	niski poziom cieczy chłodzącej	1	wskazanie poniżej normalnego zakresu, "czerwony staus"			6,3		
	LK2 -527/P	ERR	105	temperatura powietrza dolot	0	wskazanie powyżej normalnego zakresu, "czerwony staus"	5,8				
			110	temperatura cieczy chłodzącej	0	wskazanie powyżej normalnego zakresu, "czerwony staus"	18,5				
	LK2 -552/P	GRR	520421	Przekroczenie maksymalnego limitu obrotów silnika	1	wskazanie poniżej normalnego zakresu, "czerwony staus"		3,7			

						30-04-		28-04-23		27-04-23		
		SPN nr	SPN - opis	FMI	FMI opis	1	4	3	2	2	1	
LKP0903	LK3 -516/P	ERR	105	temperatura powietrza dolot	0	wskazanie powyżej normalnego zakresu, "czerwony staus"	4,3	31,8	4,7	24,3	11,1	13,3

						28-04-		27-04-23		
		SPN nr	SPN - opis	FMI	FMI opis	4	4	3		
CB4-24TB	WOS -134/P	GRR	1638	Hydraulic Temperature	0	wskazanie powyżej normalnego zakresu, "czerwony staus"	223,5	185,4	9,2	

Rysunek 6-8: Przykład raportu: „Błędy SPN - kody krytyczne” (opracowanie własne)

Udostępnienie informacji o błędach przyjęto z aprobatą. Dozór w komorach mechanicznych przyznaje, że materiały ułatwiają im współpracę z mechanikami serwisów producentów maszyn, których prace również nadzorują z KMC. W maju 2023 r. zorganizowano warsztaty dla liderów monitoringu. Tematyka dotyczyła wymiany doświadczeń w zakresie interpretacji błędów sterowników. W zajęciach brali udział zaproszeni goście - konstruktorzy maszyn oraz kierownicy serwisów z KGHM ZANAM oraz Sandvik.

6.4 Wdrożenie analityki dla potrzeb testów ładowarki przegubowej Epiroc ST14B z napędem elektrycznym zasilanym bateryjnie

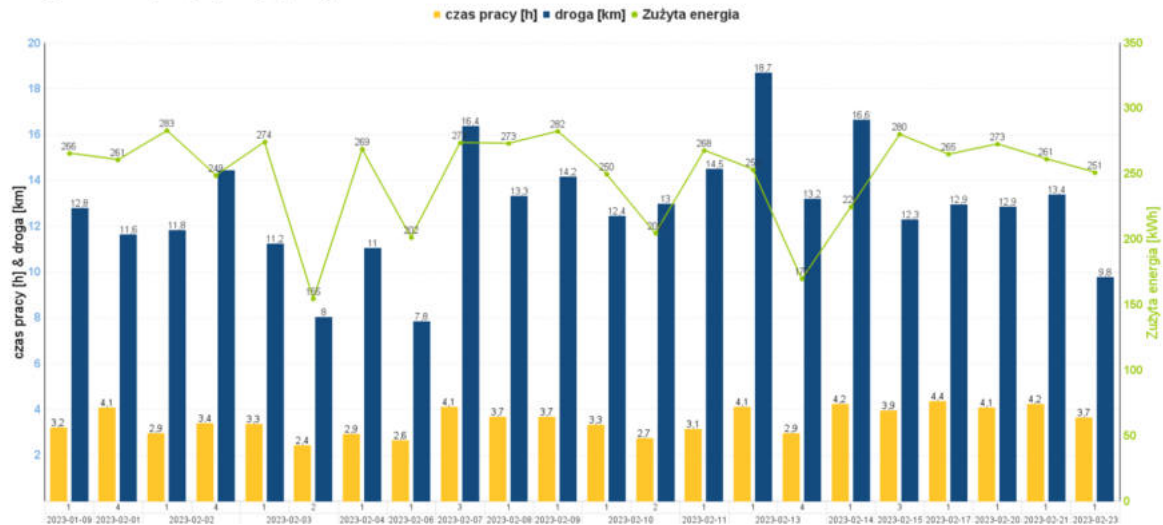
Maszyna ST14B to pierwsza w kopalniach KGHM ładowarka z napędem elektrycznym, zasilanym bateryjnie. Testy ruchowe zaplanowano na 3 lata. Maszyna jest wyposażona w monitoring wg standardu SYNAPSA. Lista rejestrowanych zmiennych została dostosowana do monitorowania istotnych parametrów pracy układu napędu elektrycznego oraz baterii trakcyjnej o mocy 400kW. Ze względu na odmienną konstrukcję maszyny, standardowe algorytmy, stosowane dla maszyn napędzanych silnikiem Diesla, nie miały zastosowania. Autor zaprojektował nowe procedury analityczne, uwzględniające możliwości wykorzystania dostępnych źródeł danych:

- monitoring SYNAPSA, rozbudowany o zmienne dot. napędu elektrycznego bateryjnego;
- system SCADA O/ZG Rudna, kontrolujący stację transformatorową zasilającą ładownicę;
- eRaport, SAP HR-TM: ewidencja pracy operatora;
- CMMS: ewidencja obsługi serwisowej maszyny;
- rejestr zdarzeń systemu wspomaganie operatora w zakresie antykolizji: system SYBET-Proxima.

Procedury zaprojektowane przez autora zostały zaimplementowane przez programistów z KGHM Cuprum. Autor brał czynny udział w testowaniu procedur na danych rzeczywistych. Po testach przygotowano zestaw nowych raportów WEBI, aktualizowanych po każdej zmianie roboczej i udostępnionych dla szerokiego kręgu użytkowników w O/ZG Rudna oraz w Centrali.

Na Rysunku 6-9 przedstawiono wykres oceny zużycia energii elektrycznej w relacji do czasu pracy oraz przejechanego sumarycznego dystansu.

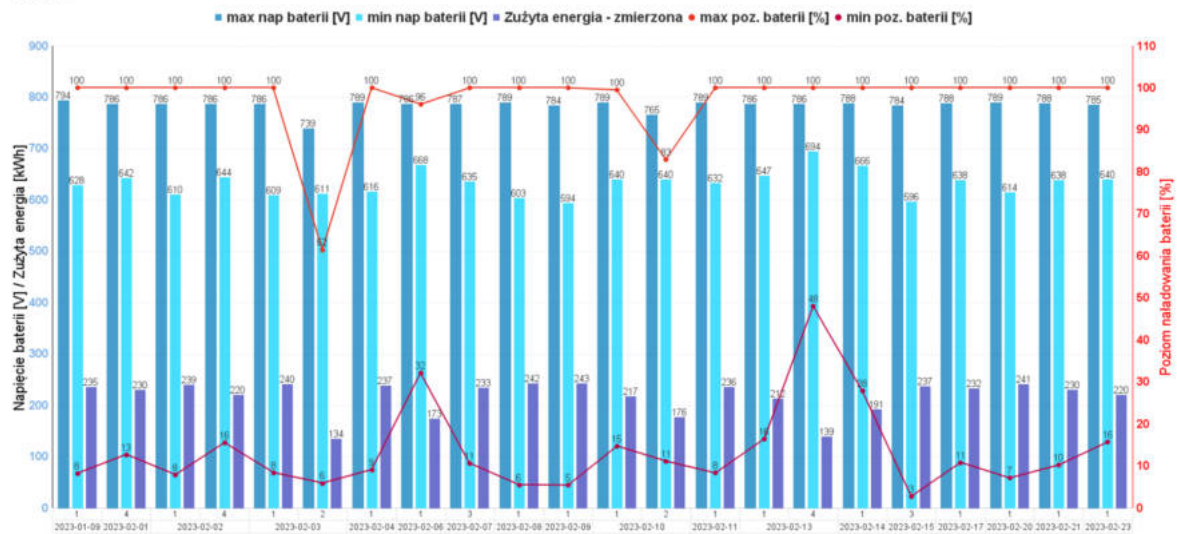
Energia do czasu pracy i przebytej drogi



Rysunek 6-9: Przykład raportu: zużycie energii (opracowanie własne)

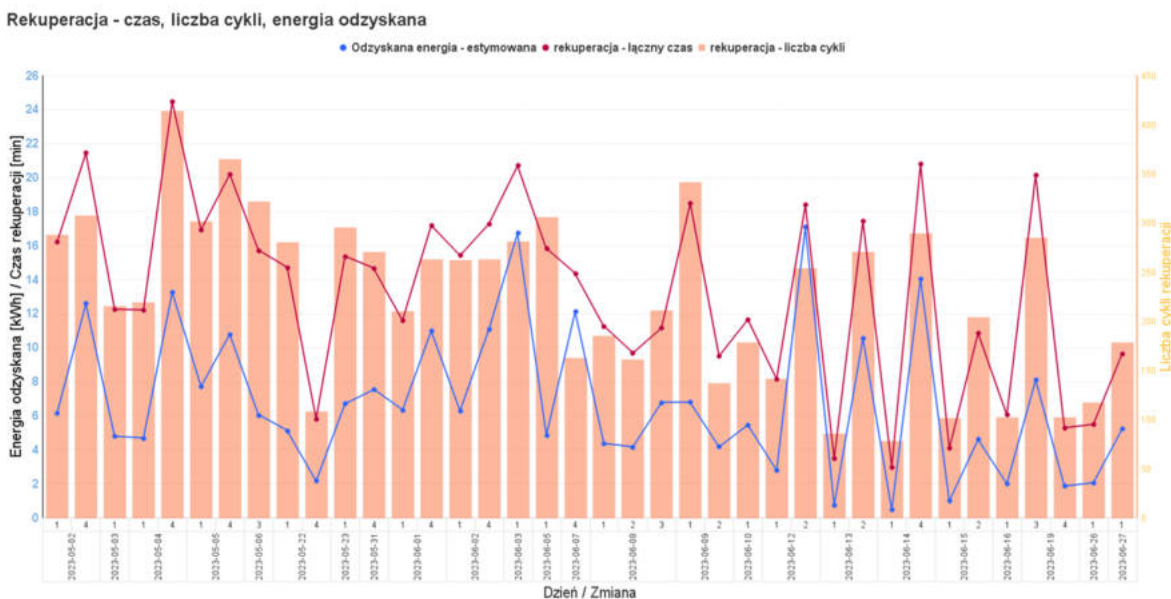
Na Rysunku 6-10 przedstawiono parametry eksploatacyjne baterii trakcyjnej. Moduł baterii posiada rozbudowany układ chłodzenia z pompą ciepła. Monitorowanie temperatury baterii wykonanej w technologii Li-Ion NMC jest bardzo istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa.

Bateria



Rysunek 6-10: Przykład raportu: parametry eksploatacyjne baterii (opracowanie własne)

Jednym z priorytetowych celów testów jest opracowanie praktycznych rekomendacji dla ekonomicznego stylu jazdy dla operatorów. Na Rysunku 6-11 przedstawiono wyniki obliczeń algorytmów wykorzystywanych do analiz procesu rekuperacji energii z układu jazdy. W przypadku napędu elektrycznego zasilanego z baterii mamy do czynienia z limitem pojemności użytecznej. W przypadku maszyn ST14B, nominalna pojemność baterii wynosi ponad 400 kWh. Pojemność dostępna dla użytkownika została ograniczona do 300 kWh, co w praktyce nie wystarcza na przeprowadzenie pełnej zmiany roboczej bez wymiany lub doładowania baterii.



Rysunek 6-11: Przykład raportu: rekuperacja energii (opracowanie własne)

W przypadku maszyn napędzanych silnikami Diesla, temat ograniczenia zużycia paliwa nie ma najwyższego priorytetu. Maszyny są tankowane 2 razy dziennie „pod korek”. W tabeli 6.3 przedstawiono porównanie wyników osiągniętych przez operatorów maszyn LK4 typu LH517i z komory C8, dla operacji załadunku wozów WOW TH550, w oddziale G7 (O/ZG Rudna). Ci sami operatorzy w tej lokalizacji pracują maszyną ST14B. Wskaźnik zużycia paliwa dla wybranych 5 operatorów, którzy przepracowali najwięcej zmian dla ustalonego okna obserwacji, zawiera się w przedziale wartości od 5,4 do 7,0 [dm³/km]. Zróżnicowanie wynosi 23%, przy bardzo zbliżonych wskaźnikach ilości wykonanej pracy na 1 zmianę. Maszyny LH 517i są wyposażone w blokadę lock-up. Operatorzy mają swobodę odnośnie jej stosowania, co na pewno jest istotnym czynnikiem tak dużego zróżnicowania wskaźnika.

Wdrożenie maszyn elektrycznych będzie wymagało współpracy dozoru z operatorami, w celu maksymalizacji wykorzystania zapasu energii. Dobre praktyki, umożliwiające efektywną eksploatację maszyn, składają się na odpowiednie zarządzanie pedałem akceleracji, które będzie uwzględniało bezwładność ciężkiej maszyny, a także na wykorzystywanie funkcji rekuperacji przy hamowaniu. Intensywność rekuperacji jest regulowana. Na początku testów operatorzy nie mieli zaufania do tej funkcji, wykorzystywali hamulce zasadnicze. W miarę upływu czasu zaczęli jej używać, stopniowo zwiększając intensywność. Monitoring SYNAPSA jest instrumentem, który może pomóc w wypracowaniu dobrych praktyk dla efektywnego wykorzystywania maszyn z napędem elektrycznym.

Tabela 6.3: Analiza wskaźników wydajności dla maszyn LH517i pracujących w tej samej lokalizacji, gdzie są prowadzone testy maszyny ST14B

data: od 01.05.2023 do 25.05.2023

Oddział : G7

Ilość 1 Jedn. Wyk. [JM] - LK (łyżka)

Opis pracy: Załadunek rudy - Operator ŁK - O/W

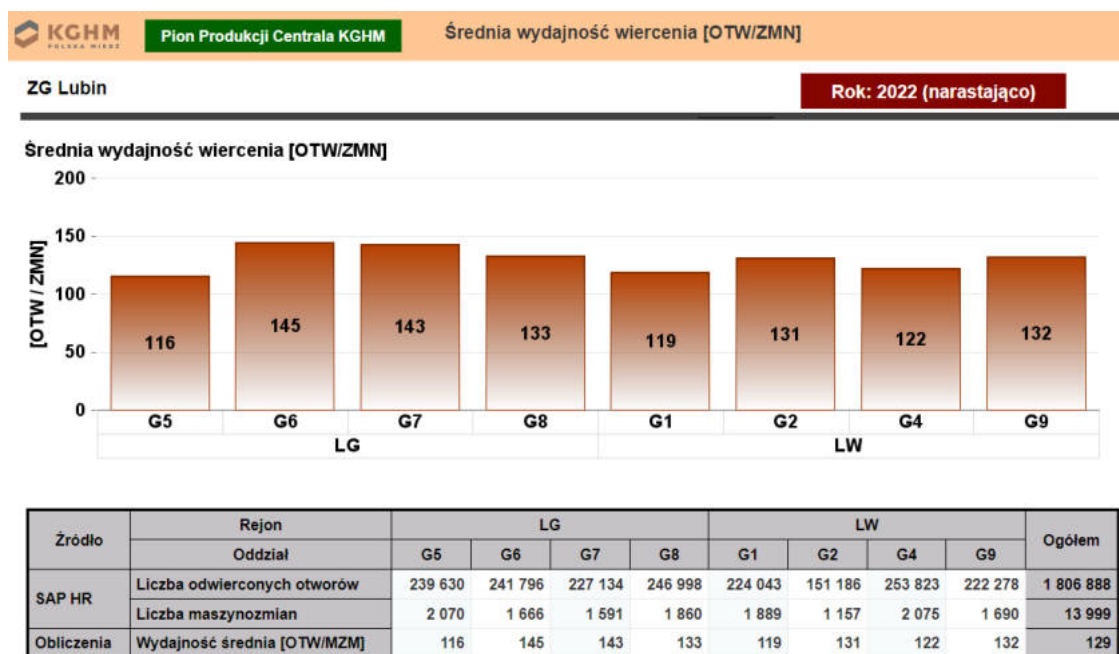
operator	zużycie paliwa	przebieg	ilość załadowanych łyżek	ilość zmian	średni przebieg	średnie zużycie ON	średnia ilość łyżek
	[dm ³]	[km]	[LK]	[zm]	[km/1zm]	[dm ³ /1km]	[LK/1zm]
<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>8</u>
operator 1	1 052	193	124	6	32,2	5,4	20,7
operator 2	1 934	339	225	10	33,9	5,7	22,5
operator 3	2 294	327	288	12	27,2	7,0	24,0
operator 4	2 710	429	342	14	30,6	6,3	24,4
operator 5	3 000	519	379	16	32,5	5,8	23,7
razem	10 990	1 807	1 358	58	31,2	6,1	23,4

(opracowanie własne na podstawie danych z systemu SYNAPSA)

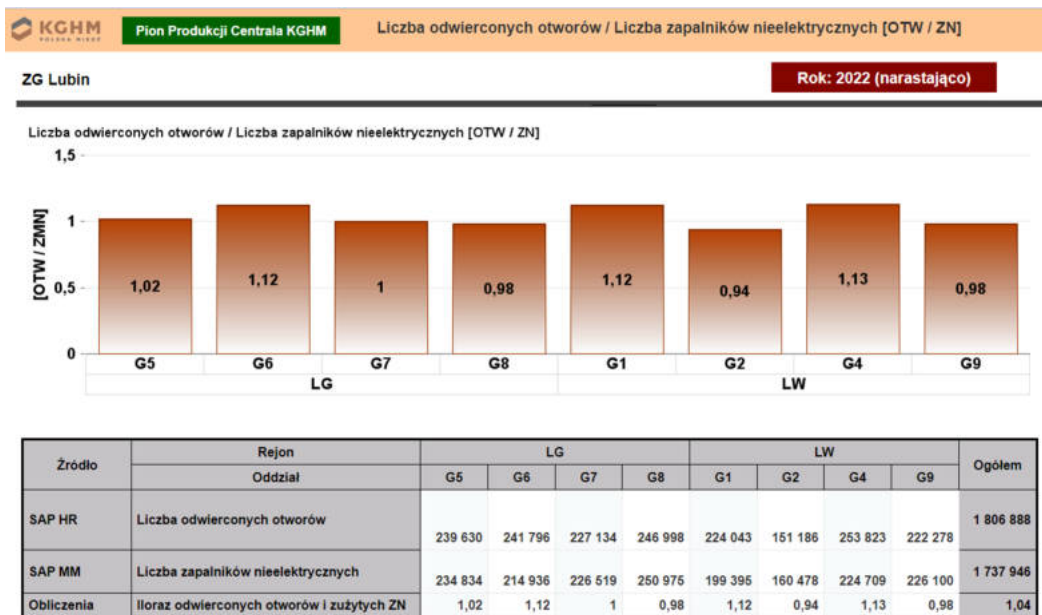
6.5 Kokpity - analityka procesów produkcji górniczej

Wszystkie przedstawione wcześniej przykłady wdrożeniowe dotyczyły tematyki inspirowanej potrzebami Oddziałów Górniczych. Ostatni przykład dotyczy tematu, który został wdrożony z inicjatywy Centrali KGHM. Autor przekonał Głównych Inżynierów z Pionu Produkcji Górniczej do pomysłu stworzenia kokpitów dla oceny efektywności prowadzenia prac realizowanych przy zastosowaniu samojezdnych maszyn górniczych. Na dzień dzisiejszy opracowano 2 kokpity dotyczące operacji zabudowy budowy kotwowej oraz wiercenia otworów strzałowych. Wiodącą rolę w kreowaniu treści merytorycznej mieli Główni Inżynierowie odpowiadający za tematykę technologii górniczej. Zadaniem autora było przedstawienie dostępnych źródeł informacji oraz koordynacja prac służb IT.

Na Rysunkach 6-12 oraz 6-13 zaprezentowano kokpit dla operacji wiercenia otworów strzałowych w postępie eksploatacji. Analiza została opracowana na podstawie danych z ewidencji pracy operatorów SMG w module HR-TM SAP oraz danych dotyczących zużycia materiałów strzałowych w oddziałach wydobywczych w module MM SAP.

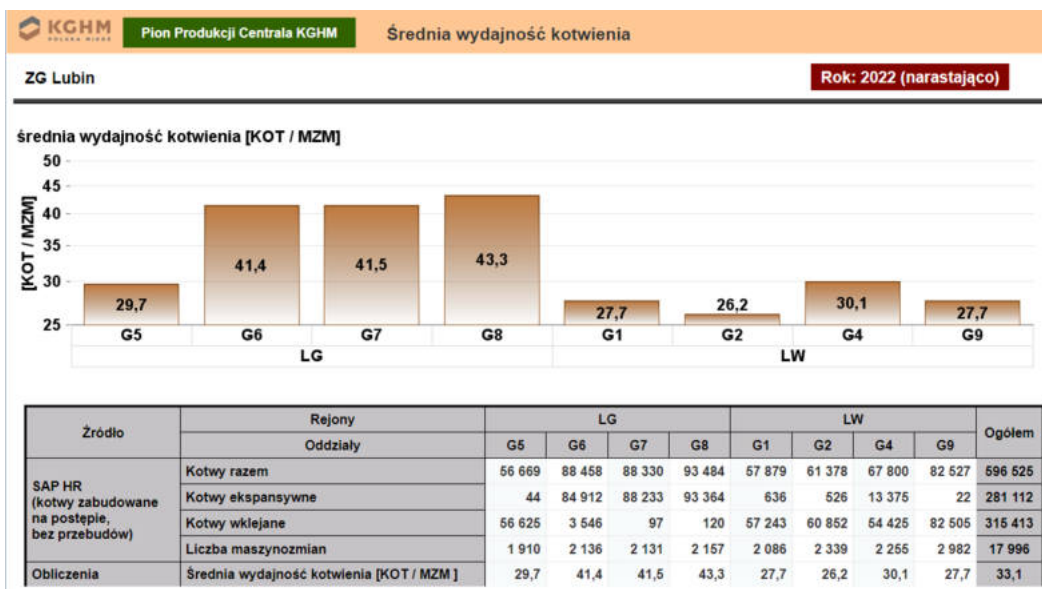


Rysunek 6-12: Przykład kokpitu dla procesu wiercenia, wskaźnik średniej wydajności wiercenia [OTW/ZMIN] (źródło: kokpit KGHM)



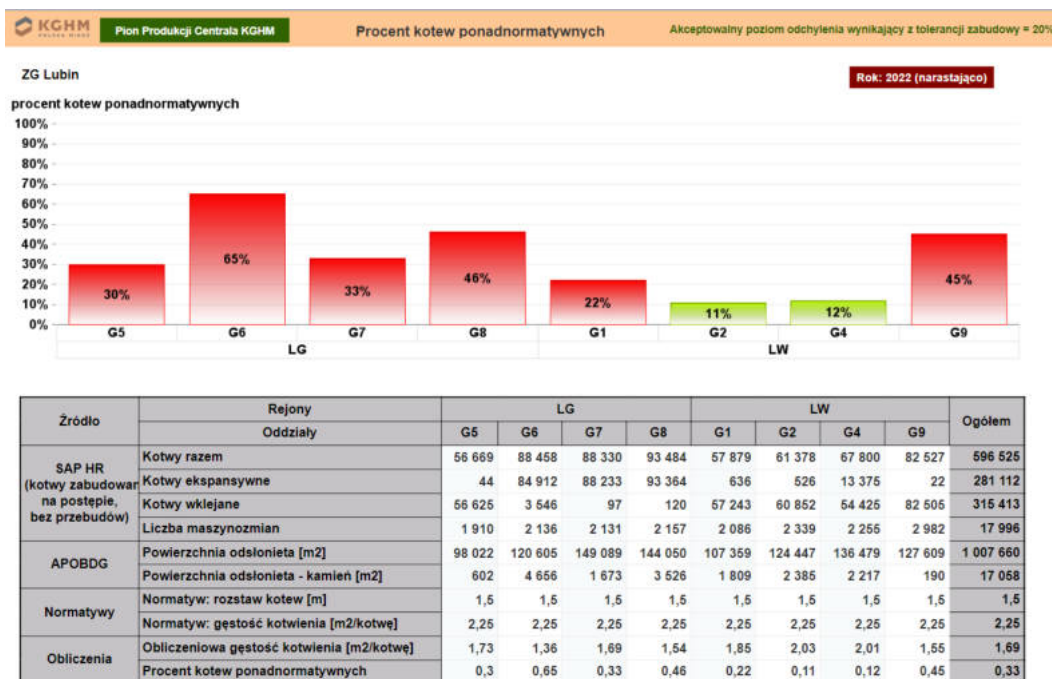
Rysunek 6-13: Przykład kokpitu dla procesu wiercenia, wskaźnik: Liczba odwierconych otworów / liczba zapalników nieelektrycznych [OTW/ZN] (źródło: kokpit KGHM)

Na Rysunkach 6-14 oraz 6-15 zaprezentowano kokpity dla operacji zabudowy obudowy kotłowej w postępie eksploatacji. Analiza została opracowana na podstawie danych z ewidencji pracy operatorów SMG w module HR-TM SAP oraz danych systemu APO-BDG. Pierwszy kokpit służy podstawowej ocenie wydajności procesu.



Rysunek 6-14: Przykład kokpitu „Średnia wydajność kotwienia” (źródło: kokpit KGHM)

Drugi kokpit służy identyfikacji potencjalnych problemów z utrzymaniem stropu w wyrobiskach.



Rysunek 6-15: Przykład kokpitu „Procent kotew ponadnormatywnych” (źródło: kokpit KGHM)

Wskaźnik „zabudowanych kotew ponadnormatywnych” pokazuje procentowo liczbę kotew zabudowanych dla danej powierzchni odsłoniętego stropu na postępie w rudzie i kamieniu ponad normatyw, rozumiany tu jako liczba wynikająca z gęstości zabudowy wynoszącej 2,25 m²/kotwę, tj. dla typowej siatki kotwienia 1,5m x 1,5m. Uwzględniono tolerancję na +20% wynikającą z dopuszczalnej 10% tolerancji niedokładności zabudowy w stosunku do standardowej siatki kotwienia. Udostępnienie kokpitów zmienia jakość współpracy inżynierów zatrudnionych w Centrali z inżynierami w Oddziałach Górniczych. Do tej pory musieli polegać wyłącznie na danych przekazywanych im przez Oddziały, zazwyczaj z odczuwalną zwłoką czasową. Dostęp do informacji obliczanych w sposób automatyczny, według ściśle kontrolowanych reguł, rozszerza kontekst merytoryczny dla dyskusji prowadzonych na forum zespołów problemowych zajmujących się zarządzaniem technologią eksploatacji złoża w KGHM.

Rozdział 7

Podsumowanie i wnioski

W ramach realizacji badań związanych z rozprawą doktorską zaplanowano i wykonano szereg eksperymentów numerycznych, laboratoryjnych i badań in situ (eksperymenty dołowe), w których pozyskano unikatowy zbiór danych opisujących wybrane procesy technologiczne w górnictwie podziemnym rud miedzi. Dane te były następnie analizowane różnymi technikami (analiza wizualna, statystyczna, analizy korelacyjne, metody uczenia maszynowego itd.). Algorytmy stosowane do analiz zostały opracowane bezpośrednio przez autora rozprawy lub przy współpracy z ośrodkami naukowymi z KGHM Cuprum oraz Wydziału Geoinżynierii Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej, na zlecenie KGHM lub na zasadach ogólnej współpracy.

Autor był odpowiedzialny za definicje nowych potrzeb informacyjnych, inicjowanie nowych działań prowadzących do opracowania rozwiązań analitycznych, ocenę rozwiązań i wdrożenia procedur raportowania. W ramach prac Zespołu Koordynacyjnego ds Monitoringu SMG w KGHM SYNAPSA, po etapie pilotażu zespołu monitorującego rozwój tych rozwiązań, opracowano wiele algorytmów obliczeniowych i procedur raportowania informacji zarządczej. Ewoluuował także system zbierania danych (niektóre zmienne zostały wyeliminowane z powodów technicznych, finansowych, braku wymaganej wiarygodności informacji i innych przyczyn; pojawiły się także nowe parametry rejestrowane przez pokładowy system monitoringu).

Na bazie tych wieloletnich doświadczeń przygotowana została rozprawa zatytułowana "Metoda kompleksowej oceny efektywności eksploatacyjnej maszyn i predykcyjnego utrzymania ruchu na podstawie danych z systemu monitoringu". Tytułowa metoda jest w zasadzie zbiorem procedur związanych z docelową optymalizacją wykorzystania maszyn i zapobieganiem krytycznym awariom wybranych podzespołów. Jak już wspomniano wielokrotnie w pracy - park maszynowy obejmujący samojezdne maszyny górnicze liczy w KGHM ponad tysiąc sztuk. Główne grupy maszyn (ładowarki, wozy odstawcze, wozy wierzące i wozy wierząco-kotwiące) znacząco różnią się

od siebie w sensie budowy, przeznaczenia oraz wykonywanych zadań (realizowanych procesów technologicznych).

Nie może być zatem mowy o jednej, uniwersalnej metodzie analizy danych. Tytułowa metoda nie odnosi się do konkretnego algorytmu, ale do **filozofii fuzji danych** z różnych źródeł, **agregacji danych**, tak aby możliwa była **fuzja informacji** na różnych poziomach ogólności z opisem dowolnych przedziałów czasu (doba, zmiana, godzina, ...) oraz dla procesów (wiercenie, odstawa, kotwienie). Mimo że procesy technologiczne są skrajnie różne, zadanie analityczne jest bardzo podobne - chodzi o **pomiar efektywności procesu** w sensie **detekcji cykli roboczych** (liczba cykli odstawy, liczba odwierconych otworów - liczba cykli wiercenia, liczba zabudowanych kotew - liczba cykli kotwienia), a także o **detekcji anomalii** w danych opisujących zmienność ciśnienia, temperatury lub prędkości obrotowej wału silnika. W analizach długoterminowych przetwarzanie danych musi bazować na segmentacji, parametryzacji, agregacji i statystykach. Zaproponowane metody analizy z wykorzystaniem prostych metod statystycznych (analiza percentyli, analiza rozkładów) umożliwiły **wykrywanie globalnych zmian** o charakterze trendu z pominięciem lokalnych zmian, wynikających z chwilowych zmienności prędkości, obciążeń, wpływu temperatur itd. Fuzja danych z różnych źródeł, często o różnej częstotliwości próbkowania (rejestrwana co 1 s zmienność parametru pracy silnika skojarzona z operatorem, który to parametr z punktu widzenia analizy danych jest jedną wartością identyfikującą operatora) jest tożsama z nadawaniem analizie pewnego kontekstu. Powiązanie danych o różnym charakterze zmienności pozwala w pewnym sensie "filtrować informację" odpowiadającą tym samym trybom pracy, warunkom środowiskowym itd. Analiza kontekstowa danych pozwala zauważyć prawidłowości niewidoczne w surowych danych, czyli, innymi słowy, pozwala rozumieć proces o dużym poziomie złożoności. Efekty naukowe i użyteczne, które uzyskano w rozprawie, będą zatem częściowymi rezultatami poszczególnych procesów. Wspólnym mianownikiem wszystkich metod jest kombinacja procedur przetwarzania danych mających na celu poprawę efektywności i niezawodności pracy maszyn górniczych pracujących w podziemnych kopalniach rud miedzi.

Uzyskane rezultaty badań **potwierdzają możliwość wykorzystania danych z systemu monitoringu do zbudowania informacji zarządczej do oceny i poprawy efektywności eksploatacyjnej maszyn i predykcyjnego utrzymania ruchu**, co jest zgodne z tematem badań i głównym tematem pracy.

W zakresie badań dotyczących efektywności związanej z wdrożeniem systemu autolock-up ustalono, że:

- Przeprowadzony eksperyment dołowy i zaproponowana metodyka analizy danych potwierdziły wpływ zastosowania lock-up na zużycie paliwa, w szczególności wymierne ograniczenie zużycia paliwa. W wyniku zastosowania modyfikacji skrzyni biegów wozu CB4 20TB produkcji KGHM ZANAM z dodatkowym mechanicznym sprzęgłem sterowanym elektronicznie w porównywalnych warunkach osiągnięto redukcję wskaźnika jednostkowego zużycia paliwa o blisko 9%,
- Załączanie blokady lock-up dla ustabilizowanych warunków jazdy ogranicza straty przeniesienia mocy na hydraulicznym zmienniku momentu obrotowego. Wyniki eksperymentu i metoda analizy danych potwierdziły wpływ zastosowania lock-up na wartości temperatury oleju przekładniowego - oszacowano spadek o ponad 9%.
- Zastosowanie blokady konwertera umożliwia efektywne hamowanie silnikiem poprzez wykorzystanie potencjału, który oferuje układ hamowania zamontowany na silniku napędowym. W rezultacie średnia wartość głównego ciśnienia hamowania spadła o 5,6%, co potwierdza ograniczenie obciążenia hamulców. Średnie obroty silnika podczas hamowania wzrosły o 17,2%, co potwierdza wzrost poziomu momentu obrotowego przenoszonego z kół na wał korbowy silnika.
- Dzięki przeprowadzonym badaniom, KGHM uzyskał wiarygodne dane dotyczące potencjalnych efektów z tytułu zastosowania opcji wyposażenia wozów w lock-up. Największy użytkownik tego typu maszyn, kopalnia ZG Polkowice-Sieroszowice, przyjęła lock-up jako standard kompletacji wyposażenia maszyn.

W zakresie badań dotyczących efektywności kluczowych procesów technologicznych (wiercenie, odstawa, kotwienie) opracowano szereg algorytmów i nowe koncepcje pomiarowe (tzw. virtual sensor dla cykli roboczych odstawy, pomiar laserowy odległości na potrzeby detekcji cykli kotwienia):

- Zaproponowano kierunki długoterminowych, statystycznych analiz bazujących na dostępnych zmiennych. Wskazano możliwość wykrywania różnych form nieprawidłowej pracy wiertnicy (brak zawiercania, zakleszczenia, nieprawidłowe wartości ciśnień).
- Wskazano trudności w interpretacji aktualnie stosowanych raportów prezentujących poszczególne zmienne i czasochłonność związaną z analizą wykresów ze względu na liczbę wykorzystywanych maszyn.
- Zaproponowano metodę oceny stanu technicznego koronki, która bazuje na wykorzystaniu funkcji statystycznej opartej na percentylach, obliczanych dla monitorowanych parametrów ciśnienia elementów układu roboczego wiertnicy. Zaproponowano różne warianty analiz,

z uwzględnieniem szeregu kontekstów (analiza wskaźników prowadzona w układzie rok-miesiąc-operator, analiza osiągniętych wartości średnich w miesiącu oraz trendów dla całego okresu obserwacji, porównanie indywidualnych wskaźników operatora na tle średnich wskaźników dla komory).

- Zaproponowano koncepcję wykorzystania metod uczenia maszynowego do rozpoznawania stanu technicznego koronki. Odnotowano, że dla tych samych parametrów ciśnień, dla koronki zużytej czas wiercenia jest znacznie dłuższy. Zaproponowano wykorzystanie metody hierarchicznego grupowania danych do rozpoznania stanu technicznego koronki.
- Zaproponowano trzy metody identyfikacji cykli roboczych procesu odstawy realizowanego przez wozy odstawcze. Metoda pierwsza (identyfikacja rozładunku na podstawie wartości progowych wybranych zmiennych) oraz druga (algorytm oparty na drzewach decyzyjnych) wykorzystują dane z systemu monitoringu, który jest dostępny dla ograniczonej populacji WO. Ostatnia metoda, zdefiniowana przy zastosowaniu alternatywnego źródła danych, „Systemu wspierania operatora w zakresie antykolizji”, który został wdrożony w drugiej połowie 2021, jest **zdecydowanie najskuteczniejsza, niezawodna i de facto najtańsza w implementacji** w środowisku hurtowni danych. Wykorzystuje dane dostępne dla wszystkich maszyn (także bez monitoringu SYNAPSA) przypisane do procesu o krytycznym priorytecie utrzymania (funkcja bezpieczeństwa). W związku z tym, koszt krańcowy wykorzystania danych dla innych celów jest relatywnie niski.
- Zaproponowano koncepcję wykorzystania metody pomiarowej opartej na laserowym pomiarze odległości wybranego punktu układu roboczego kotwiarki od stropu. Zarejestrowane dane dla szeregu eksperymentów potwierdziły możliwość identyfikacji cykli roboczych kotwiarki. Warto odnotować, że ze względu na złożoność procesu i dużą awaryjność układów pomiarowych opartych na pomiarach ciśnień w układach roboczych, kopalnie rezygnowały z tej opcji monitoringu. Zaproponowana koncepcja otwiera nowe możliwości w zakresie monitorowania procesu kotwienia. Automatyzacja procesu detekcji cykli wymaga dalszych badań.

W zakresie badań dotyczących diagnostyki elementów maszyny dołowej zaproponowano:

- metodę diagnostyki silnika maszyny samojezdnej (ładowarki) w oparciu o zmienną opisującą ciśnienie oleju;
- metodę diagnostyki silnika maszyny samojezdnej (ładowarki) w oparciu o zmienną opisującą temperaturę płynu chłodzącego;
- metodę diagnostyki uszkodzeń tarczy flex-plate w układzie napędowym ładowarki przegubowej LKP 1601B na połączeniu koła zamachowego z przekładnią hydrokinetyczną;

- koncepcję tworzenia Rejestru zdarzeń eksploatacyjnych dla SMG, osadzanego w hurtowni danych, z zastosowaniem technik text miningu do ekstrakcji danych z zapisów sztygarskich w formularzach systemu eRaport.

Niniejsza rozprawa powstała w ramach programu "doktorat wdrożeniowy". Zgodnie z założeniami programu, wyniki prowadzonych badań powinny znaleźć zastosowanie praktyczne w przedsiębiorstwie, w którym prowadzone były badania. W czasie realizacji pracy wiele częściowych rozwiązań zostało wdrożonych i poddanych długoterminowym analizom. Zaproponowano implementację procedur walidacji danych, procedur oceny przydatności zarejestrowanych zmiennych na danej zmianie, zestawień tabelarycznych lub w postaci wykresów dla danych na różnym poziomie agregacji (zmiennosc sekundowa w danej godzinie, zmianie, dobie...).

Opracowane metody analiz były implementowane na potrzeby testów długoterminowych w środowisku WEBI, które umożliwia tworzenie tzw. "dashboardów". Jeśli dana metoda sprawdziła się w sensie skuteczności i zyskała uznanie wśród grup odbiorców, wchodziła do zbioru metod analitycznych i dostarczała informacji zarządczej określonej procedurami wewnętrznymi danej kopalni. Jeśli skuteczność metody była odpowiednia, ale użytkownicy niechętnie z niej korzystali (z powodu złożoności przekazu, trudności w interpretacji itd.), metoda była wyłączana z użycia. Niestety, zdarzały się przypadki, że skuteczność danej metody przetestowanej lokalnie na dużym zbiorze danych, po implementacji nie wykazywała oczekiwanej skuteczności. Sytuacja taka może się wiązać np. ze zmianą warunków lokalnych w danej kopalni, które nie były uwzględnione na etapie budowy algorytmu. Wspomniane trzy scenariusze implementacji metod analitycznych pokazują, jak trudny jest proces implementacji rozwiązań naukowych. Mimo trudności należy podkreślić, że wiele algorytmów zostało zaimplementowanych, a niektóre z nich funkcjonują już od kilku lat. Biorąc pod uwagę specyfikę doktoratu wdrożeniowego, która łączy "etatową" pracę w przedsiębiorstwie, prowadzenie badań naukowych i obowiązek wdrożenia wyników badań w praktyce, osiągnięte wyniki autor rozprawy uznaje za sukces. Wdrażanie nowych rozwiązań jest zawsze trudne, ale niniejsza rozprawa dotyczy pionierskich w skali nie tylko KGHM, ale i polskiego górnictwa koncepcji zarządzania parkiem maszynowym i procesami technologicznymi w oparciu o analizę danych procesowych. Mimo osiągniętych rezultatów tematyka rozprawy ma potencjał rozwojowy i warto jeszcze prowadzić badania w tym obszarze. Autor w ramach działalności zawodowej prowadzi aktualnie projekty stanowiące kontynuację i rozszerzenie badań zgodnych z rozprawą.

W zakresie pracy wdrożono do praktycznego zastosowania:

- zdefiniowane reguły interpretacji danych dla potrzeb oceny parametrów pracy SMG na podstawie statystyk percentyli dla wybranych parametrów, udostępnianych w raportach WEBI:

- oceny stanu technicznego maszyny,
- oceny kultury obsługi maszyny przez operatora,
- oceny organizacji pracy maszyn w oddziałach wydobywczych,
- opracowane reguły selekcji i interpretacji błędów; sygnalizowanych przez sterowniki cyfrowe silnika i skrzyni biegów, udostępnianych w raportach WEBI,
- automatycznie aktualizowane prezentacje wskaźników wydajności dla operacji zabudowy obudowy kotwowej oraz wiercenia otworów strzałowych, które są udostępnione w formie kokpitów na portalu KGHM.

Część prac wdrożeniowych jest w trakcie implementacji. Chodzi o wdrożenie metody identyfikacji cykli dla wozów odstawczych z zastosowaniem danych z systemu wspierania operatora w zakresie antykolizji oraz mechanizm generowania wpisów do „Rejestru zdarzeń eksploatacyjnych dla SMG”. Algorytmy procesów ETL będą implementowane w hurtowni danych.

Wiodącym kierunkiem dla dalszych prac będzie dostosowanie monitoringu SYNAPSA oraz analityki danych dla nowych generacji maszyn z napędem elektrycznym zasilanych bateryjnie.

W perspektywie najbliższych lat z pewnością zostaną wprowadzone do eksploatacji nowe typy takich maszyn. Pierwsze maszyny, które są aktualnie testowane w KGHM, zostały zaprojektowane jako konwersja maszyn napędzanych silnikiem Diesla. Ładowarka Epiroc ST14B posiada klasyczną skrzynię biegów połączoną z silnikiem trakcyjnym oraz drugi silnik do napędu hydrauliki roboczej. Nowsze konstrukcje, które są na etapie certyfikacji, zostały opracowane zupełnie od podstaw, np. ładowarka Sandvik LH 518i. Ładowarka LH518i jest napędzana przez 3 silniki elektryczne połączone bezpośrednio z mostami napędowymi (przedni most - 2 silniki, koła o rozmiarze 29 cali, tylny most - jeden silnik, koła 26 cali). Zastosowano również dwa silniki do napędu hydrauliki roboczej. Wdrożenie monitoringu dla maszyn o tak zaawansowanej konstrukcji będzie wymagało wielu istotnych zmian:

- wprowadzenia poważnych zmian w zestawie monitorowanych zmiennych,
- opracowania nowych algorytmów przetwarzania danych w hurtowni danych,
- opracowania nowych wskaźników dla pomiaru efektywności i wydajności maszyn,
- opracowania metod diagnostycznych w zakresie predykcji awarii.

Autor ma nadzieję, że analityka dla operacji odstawy oponowej urobku, bazująca na danych z systemu wspierania operatora w zakresie antykolizji, zostanie wdrożona z powodzeniem w pełnej skali. Efekty wynikające z tego tytułu mogą mieć wysoki potencjał dla zastosowań praktycznych.

Autor planuje rozszerzenie zakresu tematycznego **kokpitów dla potrzeb analityki procesów produkcji górniczej**. Ma już przemyślaną koncepcję na przygotowanie kokpitu dla operacji odstawy oponowej urobku dla maszyn. Liczy na to, że pozytywne efekty prac poświęconych analityce

danych dla procesu wiercenia, prowadzonych lokalnie w Oddziale ZG Lubin, wpłyną na zmianę negatywnych rekomendacji Zespołu Koordynacyjnego ds. Monitoringu SMG w KGHM odnośnie zakupu tej dodatkowej opcji wyposażenia.

Bibliografia

- [1] J. Kicki and A. Dyczko, “The concept of automation and monitoring of the production process in an underground mine,” *New Techniques and Technologies in Mining - Proceedings of the School of Underground Mining*, pp. 245 — 253, 2010.
- [2] G. T. Nwaila, H. E. Frimmel, S. E. Zhang, J. E. Bourdeau, L. C. Tolmay, R. J. Durrheim, and Y. Ghorbani, “The minerals industry in the era of digital transition: An energy-efficient and environmentally conscious approach,” *Resources Policy*, vol. 78, 2022.
- [3] L. Abrahamsson, B. Johansson, and J. Johansson, “Future of metal mining: Sixteen predictions,” *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 1, no. 3, p. 304 – 312, 2009.
- [4] J. Lööv, L. Abrahamsson, and J. Johansson, “Mining 4.0—the impact of new technology from a work place perspective,” *Mining, Metallurgy and Exploration*, vol. 36, no. 4, p. 701 – 707, 2019.
- [5] P. Maroufkhani, K. C. Desouza, R. K. Perrons, and M. Iranmanesh, “Digital transformation in the resource and energy sectors: A systematic review,” *Resources Policy*, vol. 76, 2022.
- [6] L. Barnewold, “Digital technology trends and their implementation in the mining industry,” p. 9 – 16, 2019.
- [7] J. Duarte, M. F. Rodrigues, and J. Santos Baptista, “Data digitalisation in the open-pit mining industry: A scoping review,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, no. 4, p. 3167 – 3181, 2021.
- [8] S. Lukichev and O. Nagovitsin, “Digital transformation of mining industry: Past, present and future,” *Gornyi Zhurnal*, vol. 2020, no. 9, p. 13 – 18, 2020.
- [9] M. Clifford, R. Perrons, S. Ali, and T. Grice, “Extracting innovations: Mining, energy, and technological change in the digital age (1st ed.),” *CRC Press*, 2018.
- [10] I. M. Jiskani, W. Zhou, S. Hosseini, and Z. Wang, “Mining 4.0 and climate neutrality: A unified and reliable decision system for safe, intelligent, and green climate-smart mining,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 410, p. 137313, 2023.

- [11] A. Singh, D. Kumar, and J. Hötzel, “Iot based information and communication system for enhancing underground mines safety and productivity: Genesis, taxonomy and open issues,” *Ad Hoc Networks*, vol. 78, pp. 115–129, 2018.
- [12] F. Günther, H. Mischo, R. Lösch, S. Grehl, and F. Güth, “Increased safety in deep mining with iot and autonomous robots,” in *Mining Goes Digital*, pp. 603–611, CRC Press, 2019.
- [13] J. guo Li and K. Zhan, “Intelligent mining technology for an underground metal mine based on unmanned equipment,” *Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 381–391, 2018.
- [14] Y. Choi, H. Nguyen, X.-N. Bui, and T. Nguyen-Thoi, “Optimization of haulage-truck system performance for ore production in open-pit mines using big data and machine learning-based methods,” *Resources Policy*, vol. 75, p. 102522, 2022.
- [15] M. V. Vavenkov, “Vr/ar technologies and staff training for mining industry,” *Mining Science and Technology (Russian Federation)*, vol. 7, no. 2, p. 180 – 187, 2022.
- [16] O. Zinovieva, D. Kuznetsov, A. Merkulova, and N. Smirnova, “Digitalization of industrial safety management systems in mining,” *Mining Informational and Analytical Bulletin*, no. 2, p. 113 – 123, 2021.
- [17] S. Sadeghi, N. Soltanmohammadlou, and F. Nasirzadeh, “Applications of wireless sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines,” *Journal of Safety Research*, vol. 83, pp. 8–25, 2022.
- [18] I. Beloglazov, P. Petrov, and V. Bazhin, “The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry,” *Eurasian Mining*, vol. 2020, no. 2, p. 50 – 54, 2020.
- [19] P. Gackowiec, E. Brzychczy, and M. Kęsek, “Enhancement of machinery activity recognition in a mining environment with gps data,” *Energies*, vol. 14, no. 12, 2021.
- [20] P. Kruczek, N. Gomolla, J. Hebda-Sobkowicz, A. Michalak, P. Śliwiński, J. Wodecki, P. Stefaniak, A. Wyłomańska, and R. Zimroz, “Predictive maintenance of mining machines using advanced data analysis system based on the cloud technology,” in *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection-MPES 2018*, pp. 459–470, Springer, 2019.
- [21] E. Brzychczy, “An overview of data mining and process mining applications in underground mining,” *Inzynieria Mineralna*, vol. 2019, no. 1, pp. 301–314, 2019.
- [22] E. Brzychczy, P. Gackowiec, and M. Liebetrau, “Data analytic approaches for mining process improvement-machinery utilization use case,” *Resources*, vol. 9, no. 2, 2020.
- [23] P. Gackowiec, M. Podobinska-Staniec, E. Brzychczy, C. Kühnbach, and T. Özver, “Review of key performance indicators for process monitoring in the mining industry,” *Energies*,

vol. 13, no. 19, 2020.

- [24] J. Paraszczak, E. Svedlund, K. Fytas, and M. Laflamme, “Electrification of loaders and trucks – a step towards more sustainable underground mining,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 12, p. 81 – 86, 2014.
- [25] A. Banasiewicz, P. Śliwiński, P. Krot, J. Wodecki, and R. Zimroz, “Prediction of nox emission based on data of lhd on-board monitoring system in a deep underground mine,” *Energies*, vol. 16, no. 5, 2023.
- [26] J. Paraszczak, A. Gustafson, and H. Schunnesson, “Technical and operational aspects of autonomous lhd application in metal mines,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 29, no. 5, p. 391 – 403, 2015.
- [27] B. W. Jo and R. M. A. Khan, “An event reporting and early-warning safety system based on the internet of things for underground coal mines: A case study,” *Applied Sciences*, vol. 7, no. 9, p. 925, 2017.
- [28] A. Wyłomańska, “How to identify the proper model,” *Acta Physica Polonica B*, vol. 43, no. 5, pp. 1241–1253, 2012.
- [29] T. A. Przylibski, A. Wyłomańska, R. Zimroz, and L. Fijałkowska-Lichwa, “Application of spectral decomposition of 222rn activity concentration signal series measured in niedźwie-dzia cave to identification of mechanisms responsible for different time-period variations,” *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 104, pp. 74–86, 2015.
- [30] R. Hossa, R. Makowski, and R. Zimroz, “Automatic segmentation of seismic signal with support of innovative filtering,” *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 91, pp. 29–39, 2017.
- [31] A. R. Sayadi, A. Lashgari, and J. J. Paraszczak, “Hard-rock lhd cost estimation using single and multiple regressions based on principal component analysis,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 27, no. 1, p. 133 – 141, 2012.
- [32] J. Paraszczak, “Understanding and assessment of mining equipment effectiveness,” *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, vol. 114, no. 3, p. A147–A151, 2005.
- [33] J. Paraszczak, “Maximization of productivity of autonomous equipment in underground mines,” *Mining Engineering*, vol. 66, no. 6, p. 24 – 41, 2014.
- [34] A. Gustafson, J. Paraszczak, J. Tuleau, and H. Schunnesson, “Impact of technical and operational factors on effectiveness of automatic load-haul-dump machines,” *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology*, vol. 126, no. 4, p. 185 – 190, 2017.

- [35] A. Dyczko, J. Kicki, and J. Paraszcak, "Decision support system to improve equipment effectiveness and reduce production cost in kghm "polska miedz", poland," p. 385 – 390, 2005.
- [36] J. Kicki and A. Dyczko, "System ewidencji, kontroli, analizy efektywności maszyn i urządzeń górniczych ekspert – inteligentna platforma analityczna w kghm polska miedz s.a.," *Przegląd Górniczy*, vol. T. 69, nr 5, p. 94–103, 2013.
- [37] A. Kowalski, D. Kubiak, L. Szwancyber, J. Sobol-Wojciechowska, and P. Śliwiński, "Model symulacyjny odstawy urobku z robót przygotowawczych w kopalniach kghm "polska miedz" s.a.," *Wiadomości Górnicze*, vol. 65, pp. 542–549, 01 2014.
- [38] T. Kaniewski and M. Lewicki, "Profilaktyka utrzymania sprawności eksploatacyjnej maszyn górniczych prowadzona w oparciu o monitoring, oceniana metodą kosztów całkowitych tco," *Zeszyty Naukowe Uczelni Jana Wyżykowskiego. Studia z Nauk Technicznych*, vol. Nr 8, p. 89–98, 2019.
- [39] W. Van der Aalst, *Process mining: Data science in action*. 2016.
- [40] H. Al-Chalabi, F. Ahmadzadeh, J. Lundberg, and B. Ghodrati, "Economic lifetime prediction of a mining drilling machine using an artificial neural network," *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 28, no. 5, p. 311 – 322, 2014.
- [41] S. Chatterjee and S. Bandopadhyay, "Reliability estimation using a genetic algorithm-based artificial neural network: An application to a load-haul-dump machine," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 12, pp. 10943–10951, 2012.
- [42] J. Cheng and S. Yang, "Data mining applications in evaluating mine ventilation system," *Safety Science*, vol. 50, no. 4, p. 918 – 922, 2012.
- [43] D. Mkhwanazi, "Optimizing LHD utilization," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 111, no. 4, pp. 273–280, 2011.
- [44] P. Segopolo, "Optimization of shuttle car utilization at an underground coal mine," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 115, no. 4, p. 285 – 296, 2015.
- [45] H. Fourie, "Improvement in the overall efficiency of mining equipment: A case study," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 116, no. 3, p. 275 – 281, 2016.
- [46] S. Vashistha, A. Kumar Agrawal, M. Siddiqui, and S. Chattopadhyaya, "Reliability and maintainability analysis of LHD loader at Saoner Mines, Nagpur, India," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 691, no. 1, p. 012013, 2019.

- [47] B. Jakkula, M. Govinda Raj, and C. Murthy, "Maintenance management of load haul dumper using reliability analysis," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 290–310, 2019.
- [48] S. Dindarloo, "Reliability forecasting of a load-haul-dump machine: A comparative study of arima and neural networks," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 32, no. 4, pp. 1545–1552, 2016.
- [49] R. Bala, R. Govinda, and C. Murthy, "Reliability analysis and failure rate evaluation of load haul dump machines using weibull distribution analysis," *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 5, no. 2, pp. 116–122, 2018.
- [50] A. Paithankar and S. Chatterjee, "Forecasting time-to-failure of machine using hybrid neuro-genetic algorithm—a case study in mining machinery," *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 32, no. 3, pp. 182–195, 2018.
- [51] J. Balaraju, M. Govinda Raj, and C. S. N. Murthy, "Prediction and assessment of LHD machine breakdowns using failure mode effect analysis (FMEA)," in *Reliability, Safety and Hazard Assessment for Risk-Based Technologies* (P. V. Varde, R. V. Prakash, and G. Vinod, eds.), pp. 833–850, Springer Singapore, 2020.
- [52] B. Jakkula, G. Mandela, and S. Chivukula, "Application ANN tool for validation of LHD machine performance characteristics," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, vol. 101, pp. 27–38, 2020.
- [53] B. Jakkula, G. Mandela, and M. Chivukula, "Improvement of overall equipment performance of underground mining machines- a case study," *Advances in Modelling and Analysis A*, vol. 79, no. 1, pp. 6–11, 2018.
- [54] A. Jakobs, "The Sandvik LH621, from hardrock loader to high-performance machine in German salt and potash mining," *World of Mining - Surface and Underground*, vol. 70, no. 4, pp. 276–279, 2018.
- [55] P. Krot, P. Śliwiński, R. Zimroz, and N. Gomolla, "The identification of operational cycles in the monitoring systems of underground vehicles," *Measurement*, vol. 151, p. 107111, 2020.
- [56] R. Fukui, K. Kusaka, M. Nakao, Y. Kodama, M. Uetake, and K. Kawai, "Production analysis of functionally distributed machines for underground mining," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 26, no. 3, pp. 477–485, 2016.
- [57] P. Stefaniak, R. Zimroz, J. Obuchowski, P. Sliwinski, and M. Andrzejewski, "An effectiveness indicator for a mining loader based on the pressure signal measured at a bucket's hydraulic cylinder," *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 15, pp. 797–805, 2015.

- [58] J. Balaraju, M. Govinda Raj, and C. Murthy, “Fuzzy-FMEA risk evaluation approach for LHD machine - a case study,” *Journal of Sustainable Mining*, vol. 18, no. 4, pp. 257–268, 2019.
- [59] B. Ghodrati, S. Hoseinie, and U. Kumar, “Context-driven mean residual life estimation of mining machinery,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 32, no. 7, pp. 486–494, 2018.
- [60] A. Laukka, J. Saari, J. Ruuska, E. Juuso, and S. Lahdelma, “Condition-based monitoring for underground mobile machines,” *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 74–89, 2016.
- [61] R. Zimroz, J. Wodecki, R. Król, M. Andrzejewski, P. Sliwinski, and P. Stefaniak, “Self-propelled mining machine monitoring system – data validation, processing and analysis,” in *Mine Planning and Equipment Selection* (C. Drebenstedt and R. Singhal, eds.), (Cham), pp. 1285–1294, Springer International Publishing, 2014.
- [62] J. Wodecki, P. Stefaniak, A. Michalak, A. Wyłomańska, and R. Zimroz, “Technical condition change detection using Anderson–Darling statistic approach for LHD machines—engine overheating problem,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, pp. 1–9, 2017.
- [63] A. Michalak, P. Śliwiński, T. Kaniewski, J. Wodecki, P. Stefaniak, A. Wyłomańska, and R. Zimroz, “Condition monitoring for LHD machines operating in underground mine – analysis of long-term diagnostic data,” in *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018* (E. Widzyk-Capehart, A. Hekmat, and R. Singhal, eds.), (Cham), pp. 471–480, Springer International Publishing, 2019.
- [64] P. Stefaniak, P. Śliwiński, P. Poczynek, A. Wyłomańska, and R. Zimroz, “The automatic method of technical condition change detection for LHD machines - engine coolant temperature analysis,” in *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations* (A. Fernandez Del Rincon, F. Viadero Rueda, F. Chaari, R. Zimroz, and M. Haddar, eds.), (Cham), pp. 54–63, Springer International Publishing, 2019.
- [65] T. Kaniewski, P. Śliwiński, J. Hebda-Sobkowicz, and R. Zimroz, “Comprehensive, experimental verification of the effects of the lock-up function implementation in LHD haul trucks in the deep underground mine,” *Mining Goes Digital: Proceedings of the 39th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2019)*, pp. 506–514, 2019.
- [66] P. Śliwiński, T. Kaniewski, J. Hebda-Sobkowicz, R. Zimroz, and A. Wyłomańska, “Analysis of dynamic external loads to haul truck machine subsystems during operation in a deep

- underground mine,” *Mining Goes Digital: Proceedings of the 39th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2019)*, pp. 515–524, 2019.
- [67] Y. Wang, T. Jin, and L. Liu, “Output torque prediction of hybrid underground LHD motor based on least square support vector machine,” *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, vol. 42, pp. 619–625, 2017.
- [68] J. Saari and J. Odelius, “Detecting operation regimes using unsupervised clustering with infected group labelling to improve machine diagnostics and prognostics,” *Operations Research Perspectives*, vol. 5, pp. 232–244, 2018.
- [69] A. Wyłomańska and R. Zimroz, “Signal segmentation for operational regimes detection of heavy duty mining mobile machines - a statistical approach,” *Diagnostyka*, vol. 15, no. 2, p. 33 – 42, 2014.
- [70] J. Wodecki, A. Michalak, and P. Stefaniak, “Review of smoothing methods for enhancement of noisy data from heavy-duty LHD mining machines,” *E3S Web of Conferences*, vol. 29, p. 00011, 2018.
- [71] P. K. Stefaniak, R. Zimroz, P. Śliwiński, M. Andrzejewski, and A. Wyłomańska, “Multidimensional signal analysis for technical condition, operation and performance understanding of heavy duty mining machines,” in *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations* (F. Chaari, R. Zimroz, W. Bartelmus, and M. Haddar, eds.), (Cham), pp. 197–210, Springer International Publishing, 2016.
- [72] P. Śliwiński, M. Andrzejewski, T. Kaniewski, J. Hebda-Sobkowicz, and R. Zimroz, “Selection of variables acquired by the on-board monitoring system to determine operational cycles for haul truck vehicle,” *Mining Goes Digital: Proceedings of the 39th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2019)*, pp. 525–533, 2019.
- [73] D. Kucharczyk, A. Wyłomańska, and R. Zimroz, “Structural break detection method based on the adaptive regression splines technique,” *Physica A*, vol. 471, pp. 499–511, 2017.
- [74] J. Obuchowski, A. Wyłomańska, and R. Zimroz, “The local maxima method for enhancement of time-frequency map and its application to local damage detection in rotating machines,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 46, pp. 389–405, 2014.
- [75] R. V. Andreao, B. Dorizzi, and J. Boudy, “Ecg signal analysis through hidden Markov models,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 8, pp. 1541–1549, 2006.
- [76] K. M. H. Azami and B. Bozorgtabar, “An improved signal segmentation using moving average and Savitzky-Golay filter,” *Journal of Signal and Information Processing*, vol. 3, no. 1,

- pp. 39–44, 2012.
- [77] C. Bhagavatula, A. Jaech, M. Savvides, V. Bhagavatula, R. Friedman, R. Blue, and M. O Griofa, “Automatic segmentation of cardiosynchronous waveforms using cepstral analysis and continuous wavelet transforms,” in *19th IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 2045–2048, 2012.
- [78] S. Choi and Z. Jiang, “Comparison of envelope extraction algorithms for cardiac sound signal segmentation,” *Expert Systems with Applications*, vol. 34, no. 2, pp. 1056–1069, 2008.
- [79] P. Micó, M. Mora, D. Cuesta-Frau, and M. Aboy, “Automatic segmentation of long-term ecg signals corrupted with broadband noise based on sample entropy,” *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 98, no. 2, pp. 118–129, 2010.
- [80] V. Khanagha, K. Daoudi, O. Pont, and H. Yahia, “Phonetic segmentation of speech signal using local singularity analysis,” *Digital Signal Processing*, vol. 35, pp. 86–94, 2014.
- [81] B. Lovell and B. Boashash, “Segmentation of non-stationary signals with applications,” in *ICASSP-88., International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 5, pp. 2685–2688, 1988.
- [82] R. Makowski and R. Hossa, “Automatic speech signal segmentation based on the innovation adaptive filter,” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 24, pp. 259–270, 2014.
- [83] J. Janczura and R. Weron, “Goodness-of-fit testing for the marginal distribution of regime-switching models with an application to electricity spot prices,” *AStA Advances in Statistical Analysis*, vol. 97, pp. 239–270, 2013.
- [84] J. Janczura, “Pricing electricity derivatives within a Markov regime-switching model: A risk premium approach,” *Mathematical Methods of Operational Research*, vol. 79, pp. 1–30, 03 2014.
- [85] C. Chen, “On a segmentation algorithm for seismic signal analysis,” *Geoexploration*, vol. 23, no. 1, pp. 35–40, 1984.
- [86] J. E. Gaby and K. R. Anderson, “Hierarchical segmentation of seismic waveforms using affinity,” *Geoexploration*, vol. 23, no. 1, pp. 1–16, 1984.
- [87] D. Kucharczyk, A. Wyłomańska, J. Obuchowski, R. Zimroz, and M. Madziarz, “Stochastic modelling as a tool for seismic signals segmentation,” *Shock and Vibration*, vol. 2016, pp. 1–13, 2016.
- [88] T. D. Popescu, “Signal segmentation using changing regression models with application in seismic engineering,” *Digital Signal Processing*, vol. 24, pp. 14–26, 2014.

- [89] J. Sokołowski, J. Obuchowski, R. Zimroz, A. Wyłomańska, and E. Koziarz, “Algorithm indicating moment of P-wave arrival based on second-moment characteristic,” *Shock and Vibration*, vol. 2016, pp. 1–6, 2016.
- [90] J. Gajda, G. Sikora, and A. Wyłomańska, “Regime Variance Testing - a Quantile Approach,” *Acta Physica Polonica B, Proceedings Supplement*, vol. 44, pp. 1015–1035, 2013.
- [91] R. Makowski and R. Zimroz, “New techniques of local damage detection in machinery based on stochastic modelling using adaptive Schur filter,” *Applied Acoustics*, vol. 77, pp. 130–137, 2014.
- [92] R. Makowski and R. Zimroz, “A procedure for weighted summation of the derivatives of reflection coefficients in adaptive Schur filter with application to fault detection in rolling element bearings,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 38, no. 1, pp. 65–77, 2013.
- [93] R. S. Tsay, “Outliers, level shifts, and variance changes in time series,” *Journal of Forecasting*, vol. 7, no. 1, pp. 1–20, 1988.
- [94] J. Urbanek, T. Barszcz, R. Zimroz, and J. Antoni, “Application of averaged instantaneous power spectrum for diagnostics of machinery operating under non-stationary operational conditions,” *Measurement*, vol. 45(7), pp. 1782–1791, 2012.
- [95] Y. Lanoiselée and D. Grebenkov, “Unraveling intermittent features in single-particle trajectories by a local convex hull method,” *Physical Review E*, vol. 96, p. 022144, 2017.
- [96] T. Wagner, A. Kroll, C. R. Haramagatti, H.-G. Lipinski, and M. Wiemann, “Classification and segmentation of nanoparticle diffusion trajectories in cellular micro environments,” *PLOS ONE*, vol. 12, no. 1, pp. 1–20, 2017.
- [97] T. Akimoto and E. Yamamoto, “Detection of transition times from single-particle-tracking trajectories,” *Physical Review E*, vol. 96, p. 052138, 2017.
- [98] G. Sikora, A. Wyłomańska, and D. Krapf, “Recurrence statistics for anomalous diffusion regime change detection,” *Computational Statistics & Data Analysis*, vol. 128, pp. 380–394, 2018.
- [99] G. Sikora, A. Wyłomańska, J. Gajda, L. Solé, E. Akin, M. Tamkun, and D. Krapf, “Elucidating distinct ion channel populations on the surface of hippocampal neurons via single-particle tracking recurrence analysis,” *Physical Review E*, vol. 96, p. 062404, 2017.
- [100] W. Li, H. Li, S. Gu, and T. Chen, “Process fault diagnosis with model- and knowledge-based approaches: Advances and opportunities,” *Control Engineering Practice*, vol. 105, 2020.
- [101] S. Qin, “Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis,” *Annual Reviews in Control*, vol. 36, no. 2, pp. 220–234, 2012.

- [102] Y. Yan, J. Li, and D. Gao, "Condition parameter modeling for anomaly detection in wind turbines," *Energies*, vol. 7, no. 5, pp. 3104–3120, 2014.
- [103] S. Aghabozorgi, A. Seyed Shirkhorshidi, and T. Ying Wah, "Time-series clustering - a decade review," *Information Systems*, vol. 53, pp. 16–38, 2015.
- [104] N. Branisavljević, Z. Kapelan, and D. Prodanović, "Improved real-time data anomaly detection using context classification," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 13, no. 3, pp. 307–323, 2011.
- [105] V. Chandola, A. Banerjee, and V. Kumar, "Anomaly detection: A survey," *ACM Computing Surveys*, vol. 41, no. 3, 2009.
- [106] M. Markou and S. Singh, "Novelty detection: A review - part 1: Statistical approaches," *Signal Processing*, vol. 83, no. 12, pp. 2481–2497, 2003.
- [107] D. Myers, S. Suriadi, K. Radke, and E. Foo, "Anomaly detection for industrial control systems using process mining," *Computers and Security*, vol. 78, pp. 103–125, 2018.
- [108] H. Zhao, H. Liu, W. Hu, and X. Yan, "Anomaly detection and fault analysis of wind turbine components based on deep learning network," *Renewable Energy*, vol. 127, pp. 825–834, 2018.
- [109] A. D. Nembhard, J. K. Sinha, A. J. Pinkerton, and K. Elbhah, "Fault diagnosis of rotating machines using vibration and bearing temperature measurements," *Diagnostyka*, vol. 14, pp. 45–51, 2013.
- [110] D. Astolfi, F. Castellani, and L. Terzi, "Fault prevention and diagnosis through scada temperature data analysis of an onshore wind farm," *Diagnostyka*, vol. 15, no. 2, pp. 71–78, 2014.
- [111] P. Guo, D. Infield, and X. Yang, "Wind turbine generator condition-monitoring using temperature trend analysis," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 124–133, 2012.
- [112] A. Grzesiek, R. Zimroz, P. Śliwiński, N. Gomolla, and A. Wyłomańska, "Long term belt conveyor gearbox temperature data analysis - statistical tests for anomaly detection," *Measurement*, vol. 165, p. 108124, 2020.
- [113] M. Sawicki, R. Zimroz, A. Wyłomańska, J. Obuchowski, P. Stefaniak, and G. Żak, "An automatic procedure for multidimensional temperature signal analysis of a scada system with application to belt conveyor components," *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 15, pp. 781–790, 2015.
- [114] Y. Jiang and D. Liu, "Remote monitoring and fault diagnosis of mine hoist operation system," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 935 LNEE, p. 835 – 841, 2022.

- [115] D. R. Bongler and H. Gurgenci, *Complex System Maintenance Handbook*, ch. Fault Detection and Identification for Longwall Machinery Using SCADA Data, pp. 611–641. London: Springer, 2008.
- [116] W. Migdał, J. Wodecki, M. Wuczyński, P. Stefaniak, A. Wyłomańska, and R. Zimroz, “Long term temperature data analysis for damage detection in electric motor bearings with density modeling and bhattacharyya distance,” in *Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations* (A. Fernandez Del Rincon, F. Viadero Rueda, F. Chaari, R. Zimroz, and M. Haddar, eds.), (Cham), pp. 151–159, Springer International Publishing, 2019.
- [117] X. Zhang and T. Fan, “The research of distribute temperature monitoring system early warning fire in coal belt conveyor,” *Advanced Materials Research*, vol. 548, pp. 890–892, 2012.
- [118] L. Renaudin, F. Bonnardot, O. Musy, J. Doray, and D. Rémond, “Natural roller bearing fault detection by angular measurement of true instantaneous angular speed,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, no. 7, p. 1998 – 2011, 2010.
- [119] D. Remond, J. Antoni, and R. Randall, “Editorial for the special issue on instantaneous angular speed (ias) processing and angular applications,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 44, no. 1-2, p. 1 – 4, 2014.
- [120] J. L. Gomez, A. Bourdon, H. André, and D. Rémond, “Modelling deep groove ball bearing localized defects inducing instantaneous angular speed variations,” *Tribology International*, vol. 98, p. 270 – 281, 2016.
- [121] M. Andrzejewski and L. Borkowski, “Kierunki rozwoju monitoringu pracy maszyn i urządzeń górniczych w kghm „polska miedź” sa,” *Wiadomości Górnicze*, vol. R. 65, nr 10, p. 550–556, 2014.
- [122] J. Kicki and A. Dyczko, “The concept of automation and monitoring of the production process in an underground mine,” *New Techniques and Technologies in Mining - Proceedings of the School of Underground Mining*, pp. 270 — 281, 2016.
- [123] J. Wodecki, P. Stefaniak, P. Sliwinski, and R. Zimroz, “Multidimensional data segmentation based on blind source separation and statistical analysis,” *Applied Condition Monitoring*, vol. 9, p. 353 – 360, 2018.
- [124] Z. Qi, Q. Gu, Y. Meng, G. Bai, and D. Ding, “The load-haul-dump operation cycle recognition based on multi-sensor feature selection and bidirectional long short-term memory network,” *Measurement and Control (United Kingdom)*, 2023.

- [125] T. Kozłowski, A. Michalak, R. Zimroz, P. Sliwinski, and T. Kaniewski, “An algorithm for determining unloading cycles in dump truck,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 362, no. 1, 2019.
- [126] A. Akers, M. Gassman, and R. Smith, *Hydraulic power system analysis*. 2006.
- [127] A. Skoczylas, A. Rot, P. Stefaniak, and P. Śliwiński, “Haulage cycles identification for wheeled transport in underground mine using neural networks.,” *Sensors*, vol. 23, 2023.
- [128] I. Csiszár, “Information-type measures of difference of probability distributions and indirect observations,” *Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica*, vol. 2, pp. 299–318, 1967.
- [129] I. Csiszár, “ i -divergence geometry of probability distributions and minimization problem,” *The Annals of Probability*, vol. 3, pp. 146–158, 1975.
- [130] M. Basseville, “Distance measures for signal processing and pattern recognition,” *Signal Processing*, vol. 18, no. 4, pp. 349–369, 1989.
- [131] J. Chung, P. Kannappan, C. Ng, and P. Sahoo, “Measures of distance between probability distributions,” *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 138, no. 1, pp. 280–292, 1989.
- [132] M. Basseville, “Divergence measures for statistical data processing - an annotated bibliography,” *Signal Processing*, vol. 93, no. 4, pp. 621–633, 2013.
- [133] R. C. Blair and J. J. Higgins, “A Comparison of the Power of Wilcoxon’s Rank-Sum Statistic to that of Student’s t Statistic Under Various Nonnormal Distributions,” *Journal of Educational Statistics*, vol. 5, no. 4, pp. 309–335, 1980.
- [134] J. A. Rice, *Mathematical Statistics and Data Analysis*. Belmont, CA: Duxbury Press, third ed., 2006.
- [135] R. Hogg and A. Craig, *Introduction to Mathematical Statistics*. New York: Macmillan, fourth ed., 1978.
- [136] W. N. Venables and B. D. Ripley, *Modern Applied Statistics with S*. Springer, fourth ed., 2010.
- [137] M. P. Fay and M. A. Proschan, “Wilcoxon-Mann-Whitney or t -test? On assumptions for hypothesis tests and multiple interpretations of decision rules,” *Statistics Surveys*, vol. 4, pp. 1–39, 2010.
- [138] W. J. Conover, *Practical Nonparametric Statistics*. New York: Wiley, second ed., 1980.