



**KGHM**  
Centrum  
Analityki

**OPTYMALIZACJA  
ENERGETYCZNA  
PROCESÓW  
PRODUKCYJNYCH NA  
PRZYKŁADZIE  
POMPOWNI –  
SPOSOBEM NA DUŻE  
OSZCZĘDNOŚCI.**



Z MYŚLĄ O  
**INNOWACYJNYM  
ROZWOJU KGHM**

**NASI EKSPERCI GŁĘBOKO WIERZA W TO, ŻE NIE MA PROCESÓW, KTÓRYCH NIE DA SIĘ USPRAWNIĆ!**

Skontaktuj się z nami, a my pomożemy Tobie w optymalizacji procesów.



**Michał Guzek – Dyrektor ds. projektów innowacyjnych**

Z wykształcenia mgr inż. energetyki (obecnie doktorant w tej dziedzinie, jak również asystent w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Warszawskiej). Rozwija swoje umiejętności w kierowaniu projektami i zastosowaniem metod Data Science w przemyśle. Pracował przy wdrożeniach licznych optymalizatorów, modeli prognostycznych i systemów utrzymania predykcyjnego w elektrowniach, fabrykach chemicznych i magazynach gazu w Polsce i za granicą.

e-mail: [michal.guzek@cakghm.com](mailto:michal.guzek@cakghm.com)



**Rafał Polak, Ekspert w dziedzinie analityki danych pomiarowych, symulacji i cyfrowych bliźniaków.**

Absolwent Akademii Górniczo-Hutniczej, na wydziale Energetyka, specjalność elektroenergetyka. Współorganizator Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Pracował w IGSMiE PAN Kraków, gdzie uczestniczył w ponad 40 pracach komercyjnych dla górnictwa, obszar: przetwarzania danych z AKPiA, raportowanie, symulacja, m.in. JSW SA, LW Bogdanka, KGHM. W 2022 r. obronił doktorat - modelowanie symulacyjne odstawy urobku.

e-mail: [rafal.polak@cakghm.com](mailto:rafal.polak@cakghm.com)

**Ostatnie 4 lata na rynku energii elektrycznej to prawdziwy roller-coaster. Po zahamowanych w 2018/2019 dzięki interwencjom na rynku energii wzrostach cen i ich całkowitej redukcji w post-pandemicznym spowolnieniu gospodarki, stabilna sytuacja nie trwała długo. Obecny kryzys energetyczny na Starym Kontynencie, skatalizowany przede wszystkim przez wojnę w Ukrainie, stawia przedsiębiorstwa w trudnym położeniu. Wzrost cen o kilkaset procent sprawia, że trzeba szukać oszczędności. Jak?**

### Zacznij zbierać dane o zużyciu energii

Oczywiście dane same w sobie nie sprawiają, że koszty rachunków spadną. Jednak zbieranie precyzyjnych informacji o tym, ile energii zużywa całe przedsiębiorstwo, kiedy i na jakich urządzeniach pobór jest największy itd., pozwala na podjęcie działań prowadzących do zmniejszenia zużycia mediów.

Opomiarowanie zużycia mediów w zakładzie pozwala na identyfikację obszarów, które mogą w pierwszej kolejności zostać objęte działaniami mającymi na celu obniżenie kosztów energii. Dzięki temu możliwe będzie skupienie uwagi na obszarach o największym potencjale, a tym samym środki przeznaczone na inwestycje zostaną wydane w sposób najbardziej efektywny.

### Wprowadź do swojej firmy System Zarządzania Energią, inaczej... optymalizuj!

Systemy Zarządzania Energią dają realną szansę na obniżenie zapotrzebowania procesów produkcyjnych na energię, przy jednoczesnym utrzymaniu ich wydajności (lub nawet ze wzrostem), ponieważ pozwalają podjąć konkretne działania na bazie realnych i obiektywnych informacji.

Dopiero mając precyzyjne informacje o przebiegu procesu, zużywanej ilości energii czy o planie produkcyjnym, z zastosowaniem metod analitycznych bądź symulacji możliwe staje się precyzyjne obliczenie energochłonności. Szerokie zastosowanie znajdują tutaj również techniki uczenia maszynowego. Świadome podejście do problemu jest prawdziwe również w wielu innych obszarach, nie trudno tu o analogie - o wiele łatwiej ekonomicznie jechać samochodem, jeżeli widzimy na desce rozdzielczej wartość średniego spalania, a lekarz będzie w stanie postawić tym precyzyjniejszą diagnozę, im dokładniejsze badania zostaną wykonane.

Opomiarowanie zużycia mediów w zakładzie to podstawowy krok w kierunku efektywności. Pozyskanie szczegółowych danych pomiarowych pozwala bowiem na identyfikację obszarów, które mogą w pierwszej kolejności zostać objęte działaniami mającymi na celu obniżenie kosztów energii. Dzięki temu możliwe będzie skupienie uwagi na obszarach o największym potencjale, a tym samym środki przeznaczone na inwestycje zostaną wydane w sposób najbardziej efektywny.

### Pompy – sercem procesów przemysłowych

Pompy uznawane są za serce większości procesów przemysłowych. Z tego też powodu, pompy są często pomijane jako potencjalne źródło zwiększonej produktywności lub jako przyczyna nadmiernych kosztów, jeśli nie są prawidłowo obsługiwane. Kierownicy zakładów, inżynierowie utrzymania ruchu i kierownicy produkcji powinni stosować się do najlepszych praktyk i rozumieć, co należy, a czego nie należy robić w celu prawidłowego wykorzystania pomp w zastosowaniach produkcyjnych i przemysłowych.

W niniejszym artykule omówione zostanie zagadnienie jakim jest optymalizacja energetyczna pomp i jak wpływa ona na wzrost poziomu oszczędności zużycia energii w firmie. Zaprezentowane zostanie również case study dot. optymalizacji pracy jednej z przepompowni KGHM.

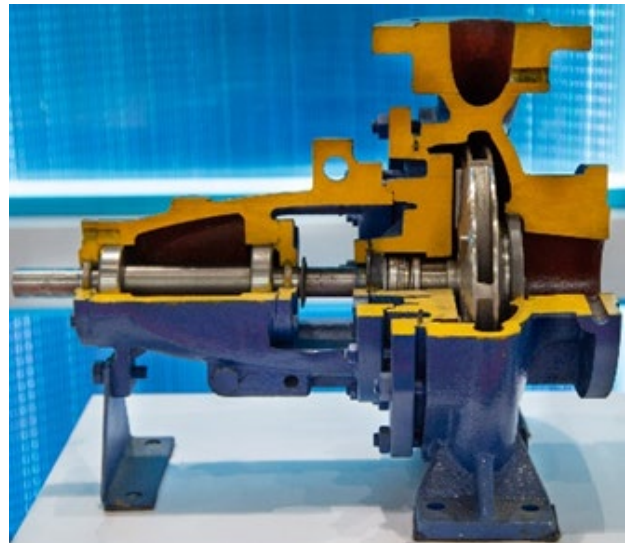
Zgodnie z oceną możliwości rynkowych przemysłowych systemów silników elektrycznych Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych z 2002 r., pompy przemysłowe odpowiadają za 25 procent całkowitej energii systemów silników w dzisiejszej produkcji. Choć wydajność pomp przemysłowych poprawiła się wraz z ulepszeniami ich konstrukcji, materiałów i pojawiającym się zastosowaniem technologii cyfrowej do monitorowania wydajności, podstawowa struktura niewiele się zmieniła od dziesięcioleci.

Pompa odśrodkowa to wirująca maszyna składająca się z sześciu głównych części, które współpracują ze sobą, aby pompa działała prawidłowo. Obejmują one wirnik, obudowę pompy, łożyska, ramę łożyska, wał i uszczelnienie mechaniczne.

Zasada działania pompy odśrodkowej polega na przekształceniu energii mechanicznej wytworzonej przez silnik napędzającej wirnik w energię sił odśrodkowych. Energia ta powoduje przepływ zebranego płynu do wyjścia pompy. Podczas pracy obracający się wirnik przyspiesza płyn, a prędkość płynu wywołuje wzrost ciśnienia - w rezultacie płyn opuszcza wylot pompy a po stronie ssącej następuje jego spadek. Każda pompa wirowa ma więc dwie strony: ssąca, czyli wlotową oraz tłocząca, czyli wylotową.

### Przyczyny strat energetycznych w pompowniach:

Przyczyn strat energetycznych w pompowniach jest wiele, w ogólnym ujęciu podzielić je można na **straty projektowe oraz straty operacyjne**.



Rysunek 1 Przekrój pompy odśrodkowej

Do strat o charakterze **projektowym** zaliczyć można wszystkie negatywne czynniki, których oddziaływanie wynika w sposób bezpośredni z niepewności oraz błędów popełnionych na etapie specyfikacji wymagań, projektowania i wykonania instalacji jak również z przebudowy obiektów połączonych z pompownią. Wyszczególnić można tutaj:

- Straty wynikające z niewłaściwego doboru pomp – jeśli pompy nie są dobrze dobrane do wymagań systemu, mogą działać w nieoptymalnych warunkach, co prowadzi do większych strat energetycznych. Dotyczy to zarówno parametrów pojedynczych obiektów jak i ich struktury w aspekcie ilości oraz wydajności poszczególnych jednostek.
- Straty w oporach przepływu – niewłaściwie zaprojektowana i wykonana instalacja charakteryzuje się wyższym oporem przepływu w rurociągach, zaworach i innych elementach hydraulicznych. Wzrost oporów może występować na skutek wąskich przekrojów, nagłych zmian kierunku przepływu, tarcia wewnętrznego, a także nieprawidłowej konfiguracji i ustawienia systemu.
- Strat w silniku napędowym - straty w silniku napędowym pompy mogą być znaczącym źródłem strat energetycznych



w pompowniach na skutek obniżonej efektywności jego pracy. Przewymiarowanie mocy silnika prowadzi do pracy w nieoptymalnej części jego charakterystyki zwiększając dodatkowo wartość pobieranej mocy biernej. Kolejnym problem może być brak systemu regulacji obrotów w sytuacji konieczności dopasowania do zmiennych warunków pracy instalacji.

- Straty na zaworach - straty na zaworach w pompowniach mogą stanowić znaczący czynnik, przyczyniający się do strat energetycznych. Przepływ płynu przez zawór wiąże się z oporami wynikającymi z turbulencji, tarcia i zmiany kierunku przepływu, co prowadzi do utraty energii w postaci strat ciśnienia. Tym samym niewłaściwy rozmiar i konstrukcja zaworów, nieprawidłowe ustawienia zaworów generują istotne spadki ciśnienia i zwiększają straty energii.
- Nierównomierne obciążenie silnika i krótkookresowa zmienność prędkości obrotowej wraz z krótkotrwałymi zmianami oporów instalacji stanowią grupę problemów o charakterze dynamicznym, oddziałujących w sposób negatywny na efektywność pracy pompowni.

Straty operacyjne w pompowniach powiązane są bezpośrednio z czynnikami cechującymi proces eksploatacji obiektu. Zaliczyć do nich można:

- Nieefektywne sterowanie - rozumiane jako brak lub niewłaściwe ustawienie prędkości obrotowej pomp w aspekcie położenia punktu maksymalnej sprawności (ang. BEP). W szerszym aspekcie dotyczy to również wyboru pompy w układach równoległych pod względem czasowo wymaganych parametrów pracy pompowni, czyli dążenia do jak najszerzego wykorzystania najbardziej sprawnych pomp.
- Procesy starzeniowe - zużycie wirnika, niesprawne łożyska, zużyte uszczelki lub nieodpowiednie smarowanie prowadzą do zwiększenia strat energii. Dotyczy to również

wycieków w systemie rurociągów, uszczelnieniach i połączeniach.

- Straty na zaworze tłocznym - często zawory są ustawione na częściowe otwarcie w celu regulacji przepływu, generując straty wynikające z konwersji energii, w postaci turbulencji, tarcia i przepływu przez zwężony przekrój.
- Nieoptymalne ustawienie przepływu recyrkulacji również może prowadzić do większych strat energetycznych. Jeśli przepływ jest zbyt duży w stosunku do rzeczywistych potrzeb systemu, może dochodzić do nieefektywnego zużycia energii.
- Nieoptymalne zarządzanie cyklami pracy - nieoptymalne reguły uruchamiania, zatrzymywania i sterowania pompami mogą powodować straty związane z niepotrzebnymi rozruchami i postojami pomp, krótkimi okresami pracy, uderzeniami hydraulicznymi prowadząc zarówno do strat energii jak i różnic w planowanych reśursach obiektów co stanowi problem istotny z perspektywy utrzymania ruchu i gospodarki remontowej.
- Błędy obsługowe - brak regularnych czyszczeń, eliminacji podsadzeń w rurociągach, użyte niskiej jakości części i komponenty mogą prowadzić do większych strat. Niedostatecznie wyosiuwane wały, łożyska uszkodzone podczas montażu, wady materiałowe lub obróbkowe w wirnikach, nieprawidłowo działające systemy chłodzenia bądź smarowanie mogą obniżyć wydajność pracy pomp i prowadzić w efekcie do większego zużycia energii.

Straty operacyjne, wynikające z czynników eksploatacyjnych mogą być częściowo ograniczone przez metody doskonalenia obsługi i zarządzania majątkiem produkcyjnym takie jak: TPM (ang. *Total Productive Maintenance*), RCM (ang. *Reliability Centered Maintenance*) z zastosowaniem FMEA (ang. *Failure Mode Effect Analysis*) oraz podejścia „Asset Care” and LCC (ang. *Life Cycle Costing*).

W dalszej części artykułu specjalną uwagę poświęcimy szczególnie istotnemu składnikowi kosztów cyklu życia (LCC) zestawów pompowych – kosztowi zużytej energii elektrycznej.

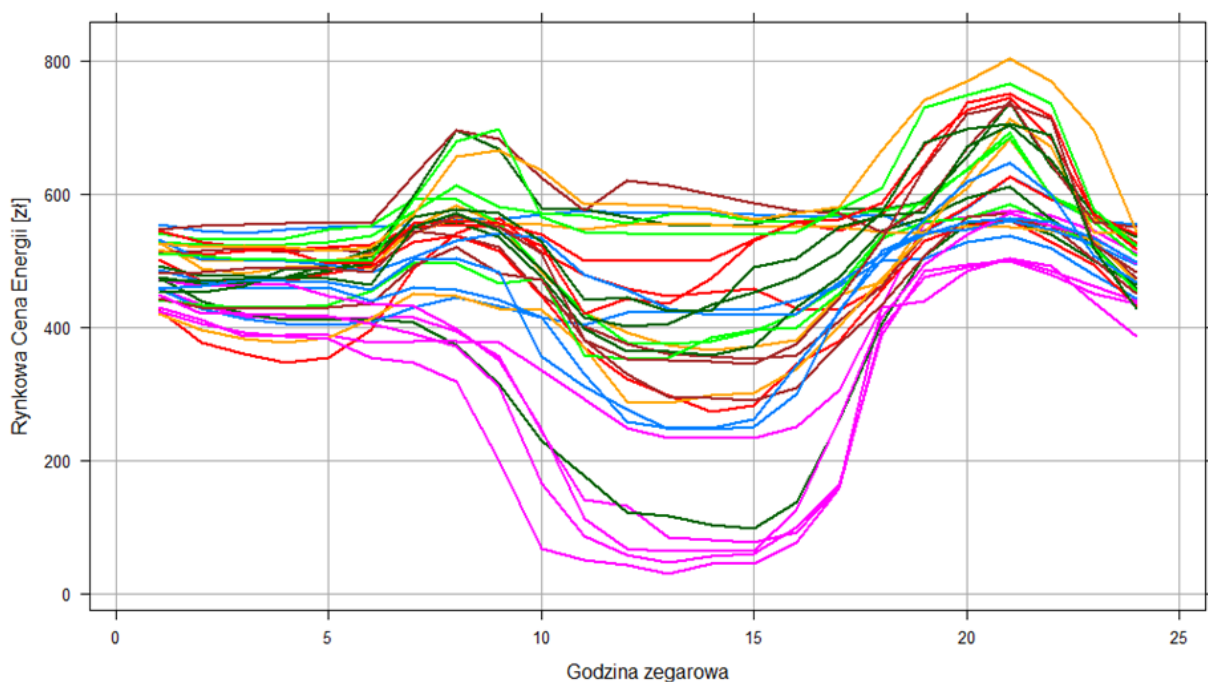
## Optymalizacja kosztów energii

Należy podkreślić, że optymalizacja pompowni to nie tylko minimalizacja zużycia energii, ale również jednostkowych kosztów jej zakupu. Pompownie wyposażone są często w zbiorniki retencyjne a ich praca polega nie na zasilaniu obiektów technologicznych w sposób bezpośredni i ciągły co na wypompowaniu nadmiaru zgromadzonej wody lub szlamu.

odnosi się do charakterystycznego kształtu krzywej zapotrzebowania na energię w ciągu dnia (nazwa pochodzi od podobieństwa jej kształtu do sylwetki kaczki). Jest ona często obserwowana w sytuacji, gdy szeroko stosuje się energię słoneczną w instalacjach fotowoltaicznych oraz w miesiącach wiosennych i letnich, gdy ich jednostkowa sprawność jest najwyższa.

Pompownie mogą z powodzeniem wykorzystać zmienne ceny energii z użyciem inercji wynikającej z zastosowania zbiornika retencyjnego, aby efektywnie „poruszać się” po krzywej. Zbiornik retencyjny może być wtedy interpretowany jako swoisty magazyn energii,

**Cena rynkowa energii elektrycznej na RDN w okresie 2023-04-29 do 2023-05-29**



Wykres 1 Dobowe ceny energii (opracowanie na podstawie danych z PSE)

Tym samym mogą one być sterowane w taki sposób, aby zmaksymalizować wykorzystanie energii w okresie, gdy jest ona tania oraz ograniczyć pracę w okresie wzrostu zapotrzebowania na moc w krajowym systemie energetycznym.

Tzw. **krzywa kaczki** (ang "duck curve") to termin używany w kontekście energii elektrycznej, który

który umożliwia nie tyle jej zmagazynowanie co przesunięcie planowanego poboru na okres późniejszy.

Na poniższym wykresie zilustrowano potencjał w zakresie celowego opóźnienia pompowania. Należy zauważyć, że różnica pomiędzy okresem wysokiej i niskiej ceny energii

o poranku i przed południem w skrajnym przypadkach wynosić może tylko 2 godziny.

Opróżnienie zbiornika retencyjnego między godziną 11.00 a 16.00 może być nawet 8-krotnie tańsze niż w pozostałych godzinach a spodziewać można się, że wraz z wzrostem ilości energii solarnej produkowanej w systemie elektroenergetycznym różnica ta będzie się powiększać.

### Case study - Optymalizacja pracy jednej z przepompowni KGHM

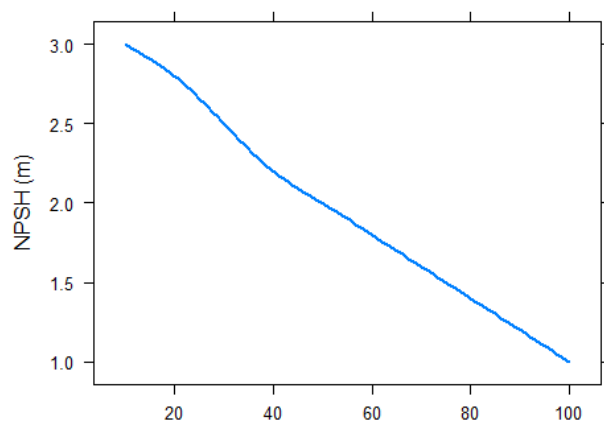
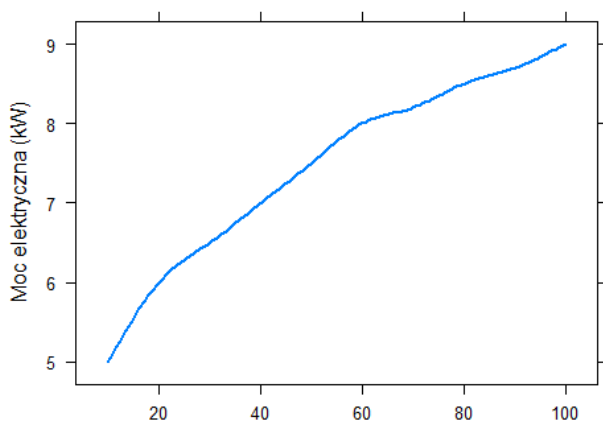
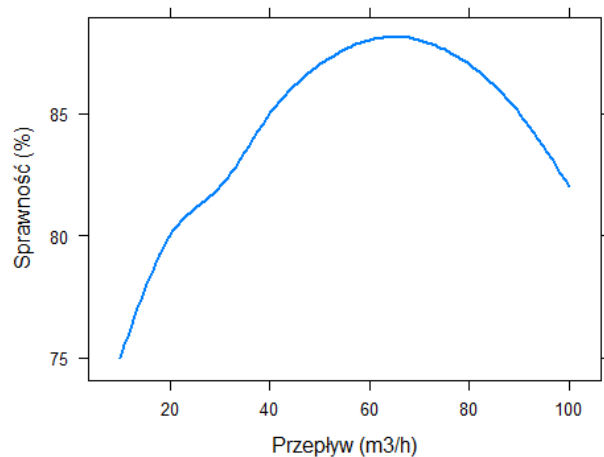
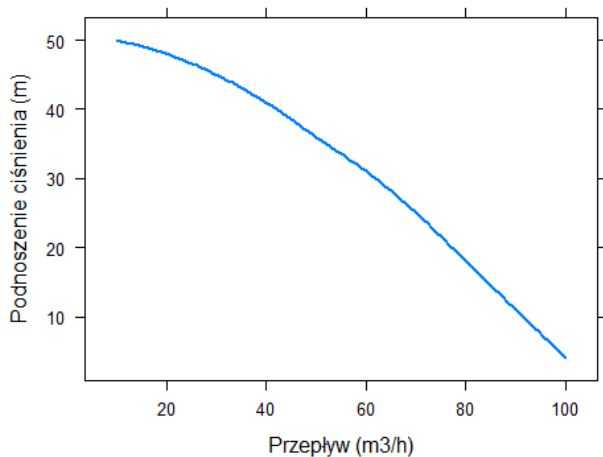
Eksperci z KGHM Centrum Analityki w ramach prac przygotowawczych, do realizacji projektu w jednym z oddziałów KGHM, wykonali szereg analiz i eksperymentów w celu zbudowania charakterystyk pomp i budowy prototypu optymalizatora, oraz jego przetestowania. Stworzono nowe

charakterystyki poboru prądu przez pompy. Wykonano optymalizacje i symulacje testowe.

W prezentowanym przypadku, wyzwaniem do rozwiązania, było niedostateczne opomiarowanie i nieoptymalny sposób regulacji wydajności pompowni powodujące duże straty - regulacja poprzez dławienie przepływu.

Innowacyjne metody stosowane przez ekspertów z zespołu KGHM Centrum Analityki, pozwoliły mimo braków w zakresie opomiarowania na oszacowanie charakterystyk z wykorzystaniem pomiarów bezpośrednich oraz korekty błędów pomiarowych z uwzględnieniem korelacji z parametrami obserwowanymi w kolektorze zbiorczym.

Metody uczenia maszynowego a w szczególności regresji mogą zatem znaleźć zastosowanie już na



Wykres 2 Przykładowe empiryczne charakterystyki pompy odśrodkowej.

etapie przygotowania danych wejściowych do modelu fizycznego obiektu!

Dzięki temu zabiegowi możliwe było wyznaczenie empirycznych charakterystyk sprawności agregatów pompowych – z uwagi na dokładność produkcyjną i wieloletni proces eksploatacji istotnie różniących się od przebiegów referencyjnych deklarowanych przez producenta. Należy podkreślić wagę połączenia wiedzy inżynierskiej z analityczną i optymalizacyjną, która pozwala na przeprowadzenie projektów optymalizacyjnych również w warunkach ograniczonej dokładności i ilości danych pomiarowych.

Wyszczególnienie	Zużycie energii [MWh]
P1	2 230
P2	1 695
P3	2 964
P4	2 695
P5	1 077
<b>łącznie na koniec roku</b>	<b>10 663</b>

Tabela 1 Obieg Centralny pompy diagonalne typu 60/50D22 o numerach technologicznych 1 do 5

Z takim kompletem danych przystąpiono do stworzenia algorytmu optymalizacyjnego, wykorzystującego rzeczywiste charakterystyki sprawnościowe agregatów pompowych dla optymalizacji ich pracy. Sama minimalizacja zużycia energii nie była jedynym rozpatrywanym kryterium. Dlatego optymalizator uwzględnił liczne ograniczenia, przykładowo konieczność minimalizacji liczby zmian otwarcia przepustnic, by nie przeciążyć ich napędów ani nadmiernie ich nie wyeksploatować. Innym zagadnieniem jest niezbyt częste przełączanie pracujących agregatów, czy ich równa eksploatacja w ciągu roku, co może zostać wyrażone w algorytmie ograniczeniami minimalnego czasu pracy po uruchomieniu i postoju po wyłączeniu, oraz minimalnych czasów pracy w ciągu miesiąca, kwartału czy roku.

Dobór ograniczeń procesu optymalizacji jest bardzo istotnym elementem wpływającym na możliwe do osiągnięcia efekty. Różne, choć niby podobne urządzenia, często wykazują znacznie różny stopień zużycia. Tak było i w tym przypadku. Oznacza to, że wybór bardziej sprawnych agregatów do pracy, może się wiązać ze znacznymi oszczędnościami. Z drugiej strony, nie można pracować tylko pompami bardziej sprawnymi, ponieważ zestawy pompy w pompowni nie będą zużywały się w równym stopniu – mówimy wtedy o tzw. równoważeniu resursu obiektów technicznych.

Decyzja o ograniczeniach dotyczących czasu pracy powinna być więc efektem dyskusji pomiędzy elektrykami, mechanikami i utrzymaniem ruchu i wyważyć korzyści ekonomiczne z przeszkodami po stronie eksploatacyjnej. W omawianym projekcie efekty możliwe do uzyskania z powodu zwiększenia czasu pracy pomp bardziej sprawnych wyraża tabela nr 2 na sąsiedniej stronie.

Widoczne w tabeli wyliczenia dokładnie wskazują nam poziom oszczędności jakie uzyskamy zwiększając sam czas prac bardziej wydajnych pomp. I tak, już przy 5% zwiększeniu czasu pracy pomp P2, P4 i P5 otrzymamy oszczędność zużycia energii na poziomie 247 MWh rocznie, co w przeliczeniu na złotówki daje oszczędność rzędu **264 000 PLN** rocznie. Warto rozważyć jest zwiększenie czasu pracy 3 sprawniejszych pomp o 20% w celu uzyskania oszczędności zużycia energii na poziomie aż **379 000 PLN** rocznie!

Z zaprezentowanych wyliczeń dodatkowo zobaczyć można, że optymalizacja procesu pracy pomp tylko o 1,03% (równy czas pracy pomp vs zwiększony o 20% czas pracy sprawniejszych pomp) przekłada się na oszczędność ponad **120 000 PLN** kosztów zużycia energii w skali roku! To potwierdza naszą maksymę, którą powtarzamy przy każdej okazji, że **poprawa danego procesu produkcyjnego nawet o 1% potrafi przełożyć się na wielotysięczne oszczędności dla firmy.**



Sprawniejsza pompa		Równy czas pracy pomp [h]	Zwiększony czas pracy sprawniejszych pomp			
			5%	10%	15%	20%
X	P2	5256	5519	5782	6044	6307
X	P4	5256	5519	5782	6044	6307
x	P5	5256	5519	5782	6044	6307
	P1	5256	4862	4468	4073	3679
	P3	5256	4862	4468	4073	3679
		26280	26280	26280	26280	26280
	Oszczędność zużycia energii [%] / rok	2,00%	2,11%	2,42%	2,72%	3,03%
	Oszczędność zużycia energii [MWh] / rok	234	247	284	319	355
	Oszczędność zużycia energii [tys. PLN] / rok	250	264	304	341	379

Tabela 2 Optymalizacja pracy pomp diagonalnych typu 60/50D22 o numerach technologicznych 1 do 5

W dzisiejszych czasach optymalizacja energetyczna pomp jest ważniejsza niż kiedykolwiek.

Pompy stanowią obecnie około 10% zużycia energii w skali globalnej. Obliczenia wykazują, że jeśli wszyscy użytkownicy zastosowaliby pompy o wysokiej sprawności, udałooby się zaoszczędzić 4% ze światowego zużycia energii.

85% całkowitych kosztów eksploatacji danej pompy jest związanych z jej zużyciem energii. Optymalizacja energetyczna pomp pozwala zaoszczędzić energię, zwiększyć niezawodność i ograniczyć do minimum czas przestoju.

Dlatego warto poświęcić chwilę i sprawdzić jakie oszczędności kryją pompy w Twojej firmie.

**KGHM Centrum Analityki** z powodzeniem realizuje wdrożenia dedykowanych rozwiązań z zakresu wsparcia decyzyjnego, zarówno pod kątem prowadzenia diagnostyki, jak i optymalizacji energetycznej.

KGHM Centrum Analityki jest swoistym miernikiem energii elektrycznej dla wszystkich oddziałów KGHM Polska Miedź S.A. Naszą misją jest optymalizacja procesów produkcyjnych poprzez analitykę danych w czasie rzeczywistym.

Oszczędność energii w procesach produkcyjnych przekłada się na oszczędności wydatków na energię elektryczną w wysokości nawet kilkuset tysięcy złotych rocznie!

W swojej pracy korzystamy z nowoczesnych rozwiązań technologicznych, które pozwalają nam na zautomatyzowanie działań, jak: wirtualna oraz rozszerzona rzeczywistość, uczenie maszynowe, sztuczna inteligencja, konserwacja predykcyjna, cyfrowe bliźniaki.