

Modelowanie charakterystyk trakcyjnych napędów na przykładzie wybranej struktury układu napędowego maszyny roboczej

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z badaniami stanowiskowymi napędu spalinowego maszyny roboczej oraz wyniki badań modelowych i optymalizacyjnych układu z uwagi na wybrane kryteria. Zaprezentowano również zaprojektowane w ITG KOMAG stanowisko do badań napędów spalinowych.

Summary

The selected problems of testing the diesel drives of machinery equipment as well as the results of model and optimization tests of the system, considering the selected criteria, are presented in the paper. The facility for testing diesel drives, designed in KOMAG, is given as well.

1. Wstęp

Wysokie wymagania w odniesieniu do skuteczności środków transportu stawiają przed konstruktorem liczne wyzwania. Znając wymagania odbiorcy oraz wynikające z ogólnych cech konstrukcyjnych potencjalne możliwości urządzenia musi on zapewnić maksymalną skuteczność zaproponowanego rozwiązania. Do tradycyjnych wymogów, takich jak: siła uciągu, prędkość jazdy, dochodzą dziś kolejne: emisja hałasu i substancji szkodliwych, obecnych w spalinach silników. W przypadku pojazdów stosowanych w podziemnych wyrobiskach kopalń, muszą być uwzględnione zagrożenia związane z występowaniem atmosfery potencjalnie wybuchowej. Obecność tych kryteriów sprawia, że należy również uwzględnić ich wpływ na parametry pracy maszyny. Specyficzne środowisko pracy wymaga zastosowania specjalistycznego osprzętu umożliwiającego bezpieczną pracę silnika spalinowego w przestrzeniach potencjalnie wybuchowych. Zaproponowana metodyka opiera się o badania doświadczalne górniczego napędu spalinowego przeprowadzone w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG. Zgromadzone dane wykorzystano w przeprowadzonych analizach numerycznych. W artykule zaprezentowano stanowisko badawcze do badań górnich napędów spalinowych, przedstawiono również konstrukcję omawianego pojazdu oraz wybrane wyniki badań modelowych.

2. Dobór napędu maszyny roboczej

Podstawową funkcją układów napędowych pojazdów jest przeniesienie momentu obrotowego generowanego przez silnik do kół napędowych w sposób umożliwiający pokonanie przez pojazd oporów ruchu.

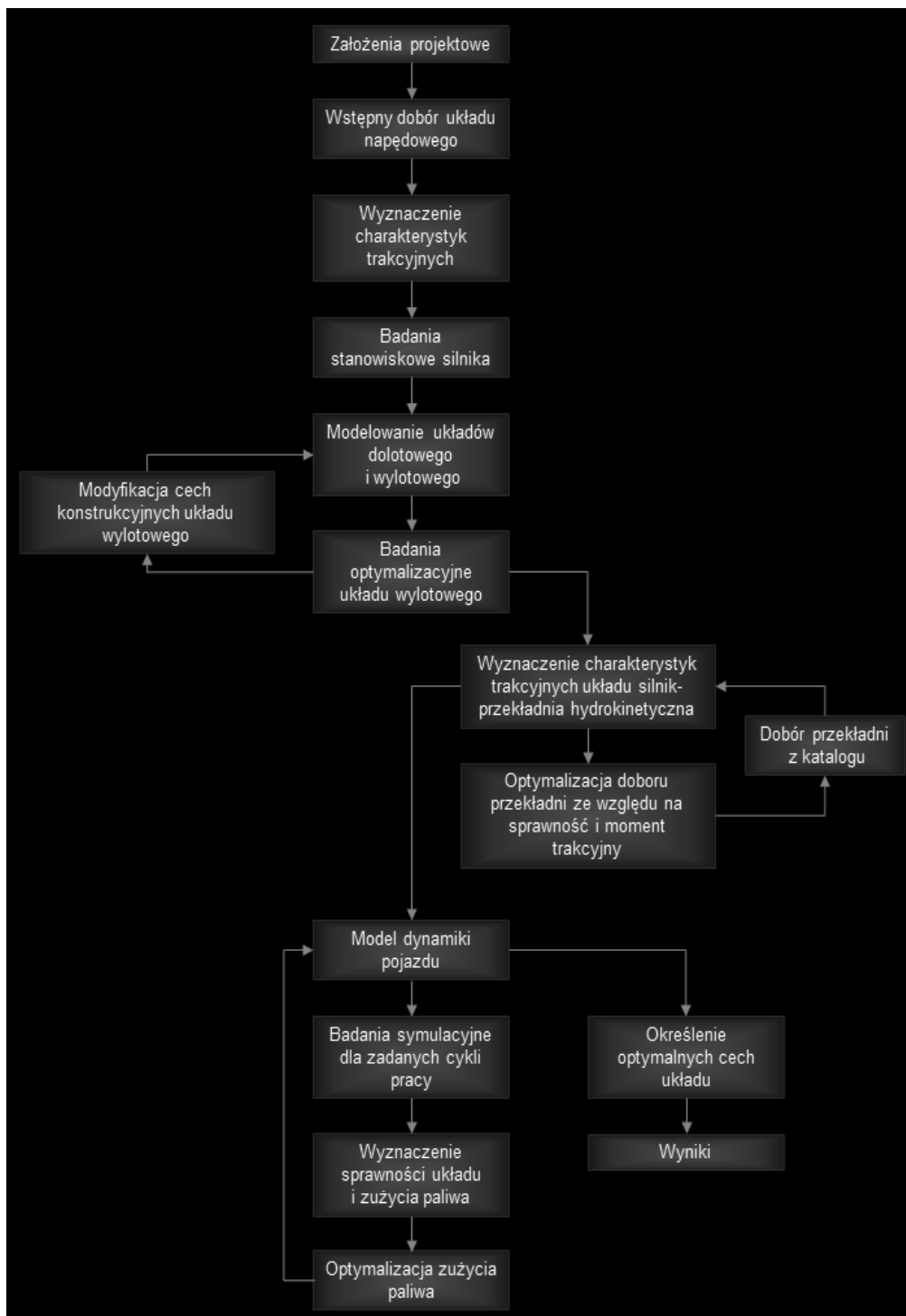
Wykonanie tego zadania jest związane z koniecznością spełnienia m.in. takich wymagań, jak:

- umożliwienie ruszania pojazdu z miejsca na nawierzchniach o zróżnicowanej przyczepności i kącie nachylenia,
- zapewnienie jazdy do tyłu oraz jazdy manewrowej z małymi prędkościami,
- zachowanie zwartej budowy i jak najmniejszych gabarytów,
- zapewnienie łatwego i bezpiecznego sterowania oraz dokonywania czynności obsługowych i naprawczych,
- osiąganie jak najwyższego wskaźnika sprawności mechanicznej oraz trwałości i niezawodności,
- spełnianie aktualnie obowiązujących norm w zakresie ochrony środowiska,
- zapewnienie bezpiecznej eksploatacji maszyny w jej środowisku pracy.

Układy napędowe można podzielić na cztery podstawowe grupy:

- układy mechaniczne,
- układy hydromechaniczne,
- układy hydrostatyczne,
- układy elektryczne.

Wymienione powyżej wymogi oraz indywidualne potrzeby użytkownika sprawiają, że dobór odpowiedniego rozwiązania staje się sprawą kluczową i decyduje o przyszłych efektach zastosowania maszyny. W związku z tym proces projektowania napędu powinien być wspomagany od samego początku jak największą ilością danych analitycznych, symulacyjnych czy doświadczalnych. W tym celu zaproponowano metodykę postępowania podczas procesu projektowania napędów (rys. 1).



Rys.1. Projektowanie i optymalizacja napędów [1]

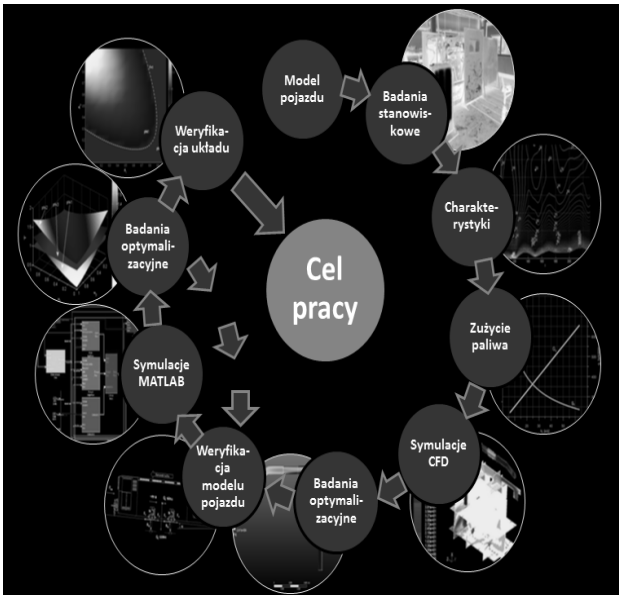
Przedstawiona metodyka obejmuje proces projektowania, począwszy od fazy założeń do projektu wstępnego układu opracowanego z uwzględnieniem wymaganych kryteriów i stanowi połączenie różnych metod inżynierskich.

Podczas realizacji prac przeprowadzono:

- badania stanowiskowe i symulacyjne górniczego napędu spalinowego,
- badania optymalizacyjne,

- opracowano model napędu pojazdu z wykorzystaniem zastępczych modeli matematycznych oraz danych zebranych w procesie badań,
- symulację pracy pojazdu dla różnych wariantów konfiguracyjnych układu napędowego,
- dobór najlepszych rozwiązań układu napędowego przy uwzględnieniu wybranych kryteriów.

Na rysunku 2 przedstawiono kolejność podejmowanych działań.

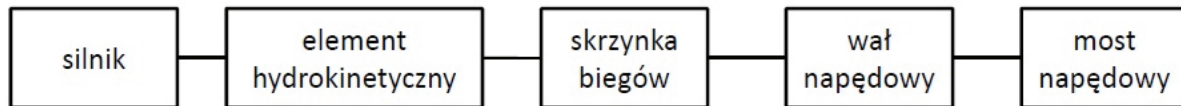


Rys.2. Działania podjęte w celu realizacji pracy [1]

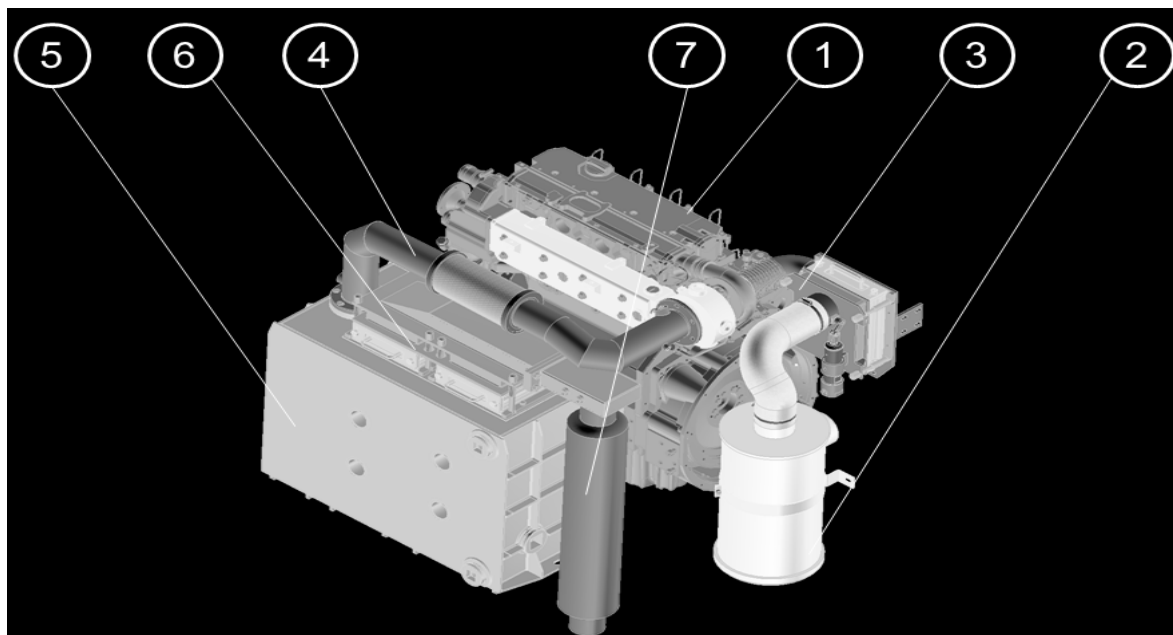
3. Realizacja prac badawczych

3.1. Obiekt badań

W przypadku pojazdów z silnikiem spalinowym, stosowanych w podziemiach górniczych, należy mówić o górniczym napędzie spalinowym. Typowy układ napędowy przedstawiono za pomocą schematu pokazanego na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat układu napędowego lokomotywy spalinowej [1]



Rys. 4. Górniczy napęd spalinowy [1]: 1 - silnik spalinowy, 2 - filtr powietrza, 3 - dolotowy przerywacz płomienia, 4 - przewód wylotu spalin, 6 - wylotowe przerywacze płomienia, 7 - iskrochron

Szczególnym elementem przedstawionego układu napędowego jest silnik. W przypadku lokomotywy jest to silnik wysokoprężny. Aby możliwa była jego bezpieczna eksploatacja w środowisku potencjalnie niebezpiecznym, konieczne jest zastosowanie układu dolotowo-wylotowego specjalnej konstrukcji. W przypadku nieprawidłowej pracy silnika, mogącej doprowadzić do powstania niebezpiecznych zjawisk związanych ze spalaniem mieszanki paliwowo-powietrznej, zabezpiecza on przed zapłonem palnych gazów w wyrobisku i powstaniu w wyniku tego wybuchu, np. pyłu węglowego. Na rysunku 4 przedstawiono typowy górniczy napęd spalinowy.

Znaczna komplikacja postaci konstrukcyjnej układu dolotowo-wylotowego silnika spalinowego powoduje, że utrudniona jest w nim cyrkulacja i przepływ powietrza oraz spalin. Z uwagi na brak wyników badań tego typu układów podjęto się zaprojektowania specjalnego stanowiska badawczego i przeprowadzenia badań mających na celu określenie wpływu zastosowanego osprzętu na pracę i parametry silnika.

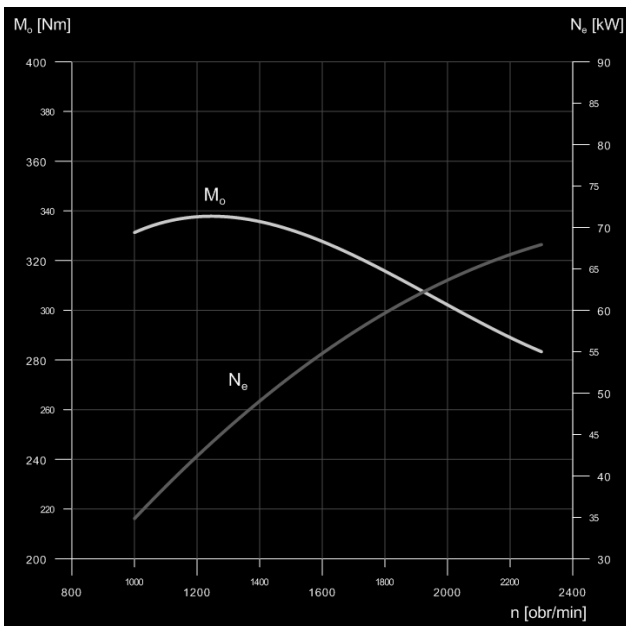
3.2. Badania stanowiskowe

Jednym z etapów realizacji pracy był projekt i budowa stanowiska, służącego do badań parametrów pracy silnika spalinowego, wyposażonego w ognioszczelny układ dolotowo-wylotowy, stosowany w górnictwie. Na rysunku 5 przedstawiono ogólny widok stanowiska do badań górniczych napędów spalinowych znajdującego się w ITG KOMAG.



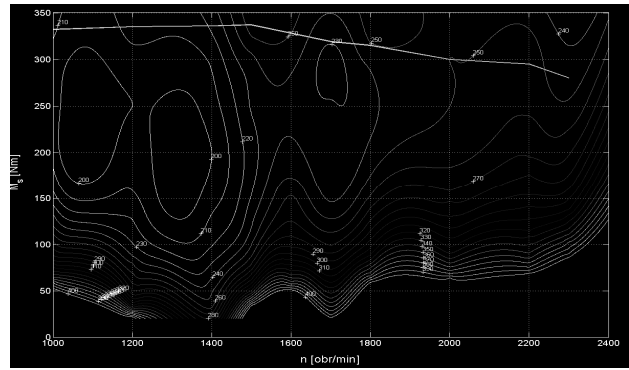
Rys. 5. Stanowisko do badań górniczych napędów spalinowych [1]

Na stanowisku umieszczono badany obiekt (silnik spalinowy z osprzętem), przekładnię redukcyjną oraz hamownię elektryczną. Badania silnika umożliwiły sporządzenie szczegółowych charakterystyk silnika, pokazanych na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Charakterystyka zewnętrzna silnika [1]

Charakterystyka pełnej mocy (zwana także charakterystyką zewnętrzną) stanowi wykreślne przedstawienie zależności mocy użytecznej i momentu obrotowego silnika od prędkości obrotowej przy założeniu, że dla silnika o zapłonie samoczynnym wybrana została skrajna nastawa urządzenia sterującego dawką paliwa. Charakterystyka ta ilustruje dwie istotne właściwości tłokowego silnika spalinowego, a mianowicie to, że krzywa momentu obrotowego osiąga swe maksimum przy pewnej średniej prędkości obrotowej, podczas gdy krzywa mocy użytecznej - w pobliżu największej dopuszczalnej prędkości obrotowej silnika.



Rys. 7. Charakterystyka uniwersalna silnika wyposażonego w ognioszczelny układ dolotowo-wylotowy [1]

Z kolei charakterystyka ogólna (zwana także uniwersalną) silnika spalinowego stanowi graficzne przedstawienie wybranych wskaźników operacyjnych silnika w całkowitym obszarze jego pracy, w zależności od prędkości obrotowej i obciążenia, dla zadanych nastaw regulacyjnych. Istotną zaletą charakterystyki ogólnej (uniwersalnej) silnika jest wskazanie obszarów jego pracy, w których uzyskuje się najmniejsze wartości jednostkowego zużycia paliwa, czyli największą wartość sprawności ogólnej.

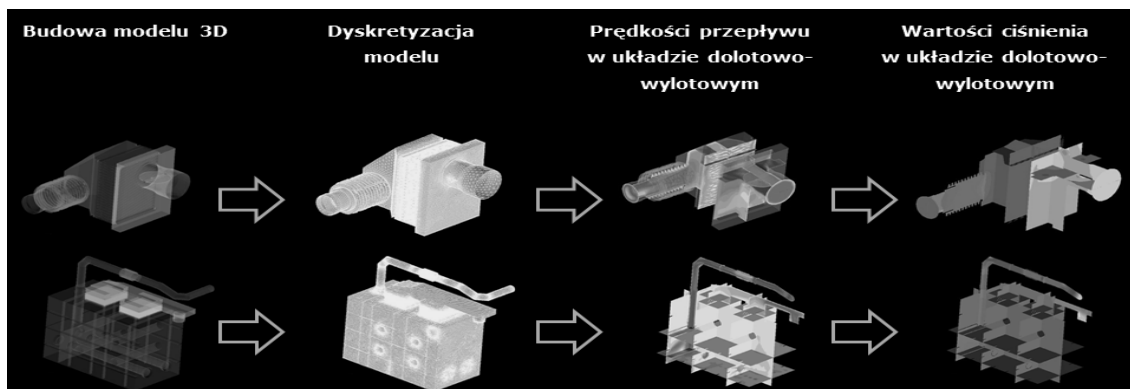
W trakcie badań rejestrowano również wartości ciśnienia w wybranych miejscach układu dolotowo-wylotowego oraz przeprowadzono analizę składu spalin. Dane zebrane podczas badań stanowiskowych pozwoliły zbudować model obliczeniowy układu, uwzględniający wpływ osprzętu silnika na parametry jego pracy.

3.3. Badania symulacyjne z użyciem metody CFD

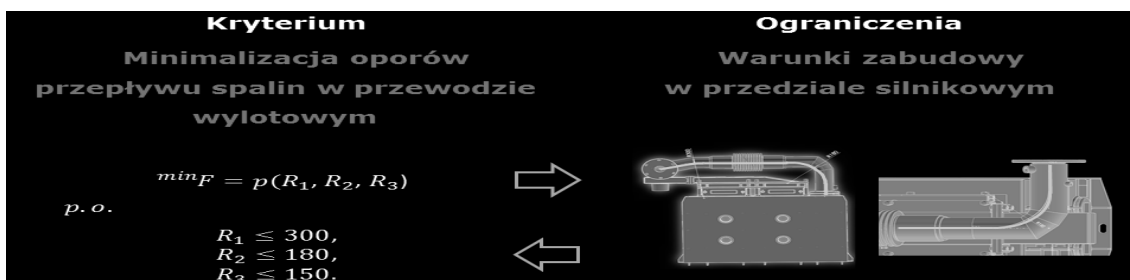
Aby określić warunki przepływu powietrza i spalin przeprowadzono badania symulacyjne modelu układu dolotowo-wylotowego. Przebieg badań pokazano na rysunku 8.

Po dokonaniu analizy dotyczącej udziałów poszczególnych elementów układu na całkowity spadek ciśnienia, podjęto próbę optymalizacji postaci konstrukcyjnej układu dolotowo-wylotowego [1, 2, 4]. W tym celu wybrano jeden z podzespołów układu wylotowego (przewód wylotowy spalin) i dla niego przeprowadzono proces optymalizacji ze względu na kryterium minimalizacji oporów przepływu spalin. Ograniczenia funkcji kryterialnej określono z warunków zabudowy układu w przestrzeni przedziału silnikowego pojazdu (rys. 9).

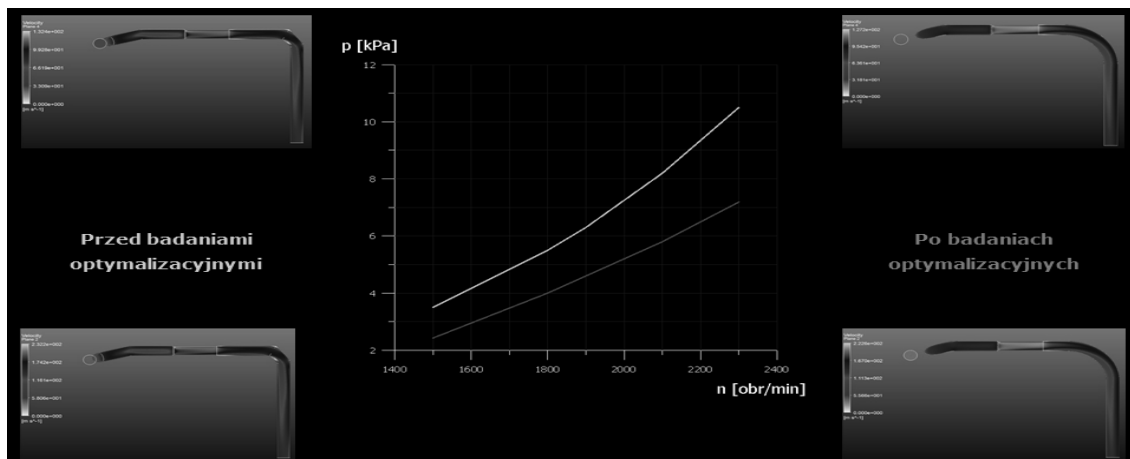
Z uwagi na fakt, że warunek graniczny był jednocześnie przypadkiem najlepszym (maksymalny promień gięcia przewodu wylotowego spalin), obliczenia sprawdzające przeprowadzono dla tego wariantu. Efektem zmian jego postaci konstrukcyjnej był wzrost prędkości przepływu spalin ze względu na zastosowane zaokrąglenia oraz większych wartości promieni gięcia przewodu (rys. 10).



Rys.8. Przebieg badań symulacyjnych CFD [1, 2, 3]



Rys.9. Badania optymalizacyjne układu wylotowego [1]



Rys. 10. Obliczenia sprawdzające dla warunku granicznego [1]

4. Program symulacyjny

4.1. Model obliczeniowy pojazdu

Model pojazdu sporządzono w oparciu o typowy stan obciążenia – rysunek 11.

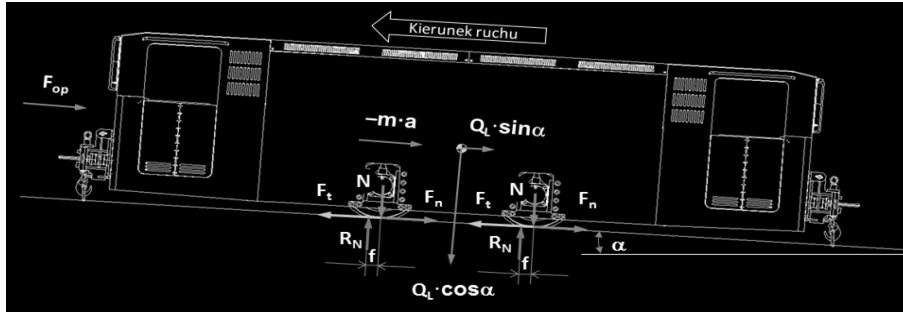
Model uwzględnił zarówno wielkości związane z postacią geometryczną pojazdu i trasy po której się poruszał, jak również wyniki badań doświadczalnych silnika spalinowego, wyposażonego w górniczy układ dolotowo-wylotowy.

Tworząc zespół napędowy, posłużono się charakterystyką zastępczą układu silnik-przekładnia hydrokinetyczna [8]. Parametry pracy silnika określono podczas badań stanowiskowych, natomiast bezwymiarowe charakterystyki przekładni hydrokinetycznej

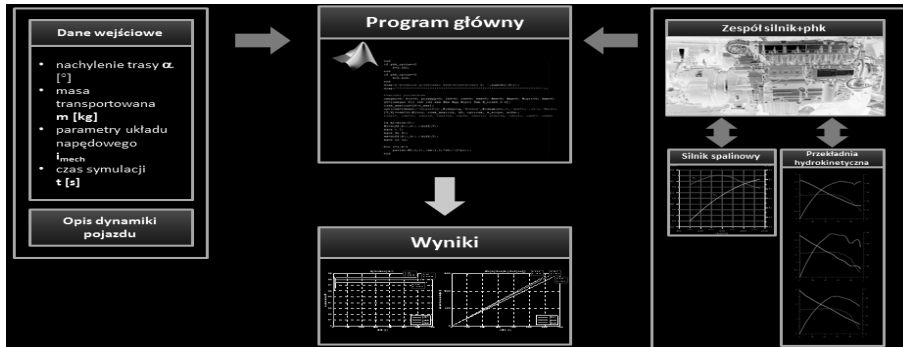
uzyskano od jej producenta. Pozostałą część układu napędowego (skrzynia biegów oraz przekładnie przy zestawach kołowych) zdefiniowano jako element zredukowany [5]. Po skompletowaniu wszystkich danych opracowano program symulacyjny w środowisku programu Matlab (rys. 12).

Program umożliwia:

- dobór charakterystyki momentu obrotowego silnika spalinowego,
- dobór charakterystyki przekładni hydrokinetycznej,
- dobór współczynnika poślizgu kół jezdnych,
- dobór masy lokomotywy oraz zestawu transportowanego,
- kształtowanie cech układu przeniesienia napędu (przełożenia, liczba biegów).



Rys.11. Siły działające na pojazd będący w ruchu [1]



Rys. 12. Schemat blokowy programu symulacyjnego [1]

4.2. Wyniki symulacji i badania optymalizacyjne układu napędowego

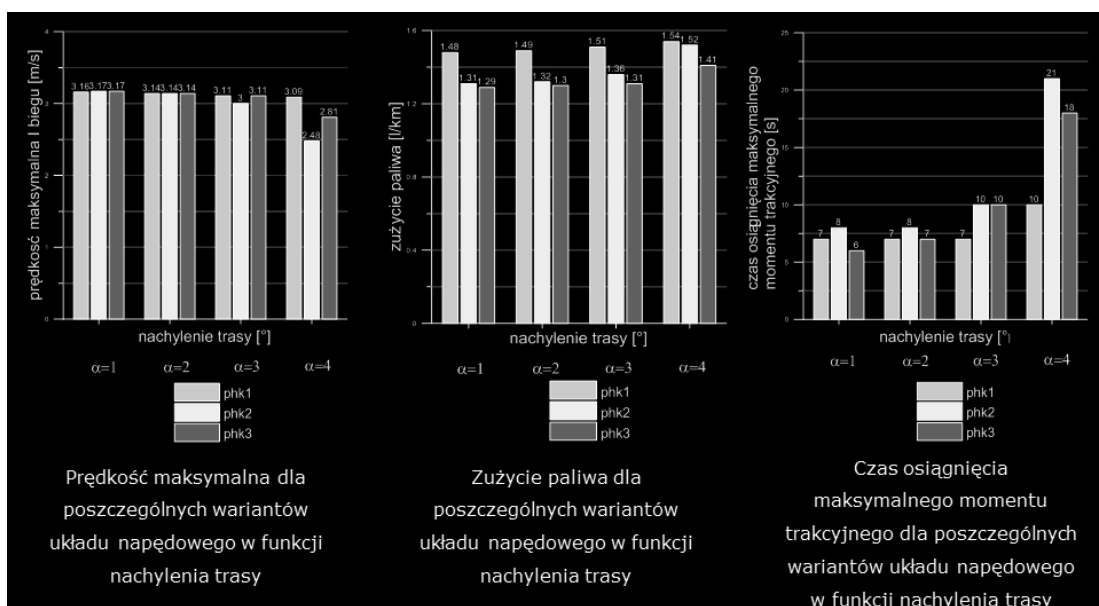
Na rysunku 13 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji dla różnych konfiguracji układu napędowego (różne typy przekładni hydrokinetycznej). Obliczenia przeprowadzono dla nachyleń trasy w zakresie od 0 do 4 stopni.

Na podstawie otrzymanych wyników dokonano analizy poszczególnych wariantów układu napędowego oraz wyznaczono kryteria jego oceny. Uwzględniając środowisko pracy maszyny oraz mając na uwadze

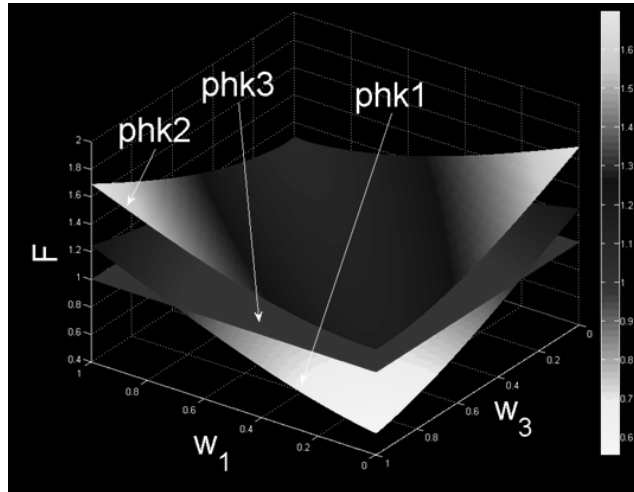
maksymalizację momentu trakcyjnego wybrano następujące kryteria:

- zużycie paliwa,
- czas osiągnięcia maksymalnego momentu trakcyjnego.

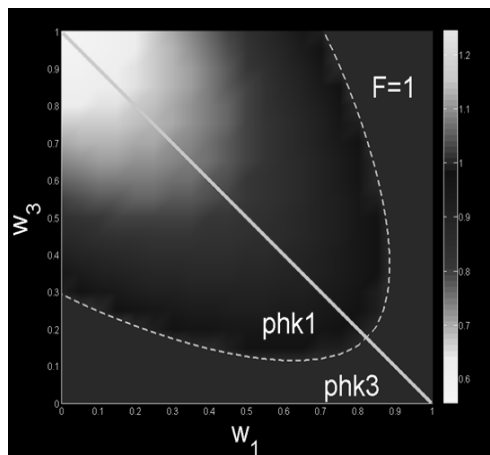
Dla tak sformułowanych wymagań przeprowadzono badania optymalizacyjne, w efekcie których otrzymano powierzchnie rozwiązań funkcji kryterialnej pokazane na rysunku 14. Etykiety phk1, phk2 i phk3 oznaczają poszczególne typy przekładni hydrokinetycznej, użyte



Rys. 13. Przykładowe wyniki symulacji jazdy [1]



Rys. 14. Powierzchnie rozwiązań wagowej funkcji kryterialnej [1]



Rys. 15. Zakres stosowalności dla poszczególnych wariantów konfiguracyjnych układu napędowego [1]

w symulacjach.

Do badań przyjęto wagową funkcję kryterialną w postaci:

$$F(G_e, v, t) = w_1 \cdot G_{t_{rozr}} + w_2 \cdot \Delta v_{max}^{I \text{ bieg}} + w_3 \cdot t_{Mt_max} \quad (1)$$

W ostatecznych obliczeniach pominięto pokazaną w równaniu (1) prędkość jazdy z uwagi na ograniczenie jej przez przepisy górnicze [6]. Ponadto, ze względu na niezadowalające z uwagi na wartość funkcji kryterialnej F wyniki uzyskane przez układ napędowy z przekładnią phk2 (por. wykres na rys. 14), w końcowych rozważaniach uwzględniono jedynie wariant z przekładnią phk1 i phk3.

Na podstawie rozwiązań funkcji celu otrzymano wykres będący zakresem stosowalności obu przekładni, przy uwzględnieniu wartości wag, przy wybranych kryteriach oceny. Wykres pokazano na rysunku 15.

5. Podsumowanie

Zagadnienia związane z modelowaniem pojazdów są szeroko opisywane w literaturze. Autorzy nie spotkali się jednak z pracami dotyczącymi modelowania

układów napędowych z uwzględnieniem specjalistycznego osprzętu zabezpieczającego pracę napędu w przestrzeniach potencjalnie wybuchowych, występujących m.in. w warunkach górniczych. Ze względu na obszerność zagadnienia w artykule zaprezentowano jedynie skrót poszczególnych etapów pracy. W efekcie zrealizowanej pracy opracowano:

- oryginalne stanowisko do badań górniczych napędów spalinowych,
- wyniki badań doświadczalnych silnika ze specjalistycznym osprzętem,
- program symulacyjny pozwalający kształtować cechy układu napędowego z uwagi na wymagane kryteria.

W ramach dalszych prac przewidywany jest rozwój programu symulacyjnego, zwłaszcza rozszerzenie bazy danych silników spalinowych oraz przekładni hydrokinetycznych, jak również uwzględnienie większej ilości oddziaływań na pojazd.

Literatura

1. Dobrzaniecki P.: Modelowanie charakterystyk trakcyjnych napędów na przykładzie pojazdów

-
- górnictwa węglowego, Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2012.
2. Gicala B., Dobrzaniecki P.: Modelowanie przepływów w układzie dolotowo-wylotowym górnictwa napędu spalinowego, ITG KOMAG, Gliwice 2011 (materiały nie publikowane).
 3. Harlow F.H., Nakayama P.I.: Transport of turbulence energy decay rate, University of California (1968), Rep. LA-3854.
 4. Jureczko M.: Metody optymalizacji – przykłady zadań z rozwiązaniami i komentarzami, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2009.
 5. Marchelek K.: Dynamika obrabiarek, WNT, Warszawa 1991.
 6. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 roku w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz. U. Nr 139, poz. 1169) wraz ze zmianą wprowadzoną rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 9 czerwca 2006 r. (Dz. U. Nr 124, poz. 863).
 7. Serdecki W. i inni: Badania silników spalinowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
 8. Szydelski Z.: Sprzęgła i przekładnie hydrokinetyczne. Teoria, konstrukcja i eksploatacja, WNT, Warszawa 1973.

Artykuł wpłynął do redakcji w marcu 2013 r.