

Tomasz CZAPLA
Olaf DUDEK

PROJEKTOWANIE HYBRYDOWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO DO ŚREDNIEJ BEZZAŁOGOWEJ PLATFORMY LĄDOWEJ

Streszczenie. Projekt został zrealizowany jako studium poprzedzające wdrożenie innowacyjnego, hybrydowego, spalinowo - elektrycznego układu napędowego bezzałogowej platformy lądowej o masie 800 kg. Na podstawie modelu dynamicznego hybrydowego układu napędowego do bezzałogowej platformy lądowej sprecyzowano docelowe parametry napędu i dokonano doboru jego elementów składowych. Został opracowany tryb pracy pojazdu, na podstawie którego ponownie dobrano elementy przy założeniu uzyskania minimum masy. W zakresie pracy opracowano koncepcyjną postać konstrukcyjną pojazdu BPL.

Słowa kluczowe: napęd hybrydowy, układ napędowy, pojazd kołowy, dynamika napędu.

1. WSTĘP

Bezzałogowe platformy lądowe znajdują obecnie zastosowanie w służbach policyjnych oraz w wojsku, gdzie używane są do działań rozpoznawczych, dozorujących oraz inżynierskich. W zastosowaniach cywilnych pojazdy bezzałogowe są wykorzystywane jako pomoc w kłękach żywiołowych lub w prowadzeniu badań na terenach niedostępnych lub skażonych.

Funkcjonowanie omawianych platform zależy głównie od źródeł zasilania, które mają za zadanie podtrzymać działanie zainstalowanej aparatury oraz sprzętu oraz umożliwić ich alokację do wybranego punktu. Zasięg i czas działania pojazdu jest ściśle uzależniony od sprawności układu napędowego. Konieczne zatem jest projektowanie układów napędowych zdolnych spełniać wszystkie wymagania stawiane pojazdom.

Układ napędowy zawiera źródło mocy oraz paliwo, konieczne do wytworzenia energii mechanicznej wprawiającej pojazd w ruch. Obecnie stosuje się wiele różnych rodzajów napędów, a ich dobór jest zależny od zastosowania pojazdu oraz zakładanego trybu pracy. W czasie opracowywania układu napędowego niezbędne jest sformułowanie modelu dynamicznego uwzględniającego rodzaj pojazdu oraz warunki jego pracy i ruchu. Analiza dynamiczna ma między innymi na celu wyznaczenie mocy silników, potrzebnej do pokonania przeszkód przy maksymalnych obciążeniach i oporach ruchu oraz optymalizację układu napędowego. Moc potrzebna do napędzania pojazdu definiuje rodzaj i wielkość elementów składowych, które z kolei wpływają na gabaryty i kształt pojazdu.

Metodyka postępowania przy doborze układu napędowego zakłada dobór elementów w sposób odwrotny, niż ogólny kierunek przekazywania energii w układzie napędowym. Energia układu, zmagazynowana w zbiorniku paliwa w postaci chemicznej, zamieniana jest w silniku spalinowym na mechaniczną, a następnie na elektryczną w generatorze prądu. Ta z kolei magazynowana jest w akumulatorach, skąd przepływa do silników elektrycznych zamieniających ją na mechaniczną. Projektowanie rozpoczyna się od sprecyzowania sił działających na pojazd i jego układ napędowy. W łańcuchu kinematycznym kolejno uwzględnia się elementy: koła, przekładnię redukcyjną, aż do silnika elektrycznego i akumulatorów. Ostatnim etapem jest dobór generatora prądu i silnika spalinowego wraz ze zbiornikiem paliwa.

2. SFORMUŁOWANIE WYMAGAŃ PROJEKTOWYCH

Na podstawie analizy potrzeb wynikających z konieczności wprowadzenia na wyposażenie wojska platform logistycznych oraz inżynierskich sformułowano wstępne wymagania stawiane platformie. Wymagania i założenia dla projektowanej średniej bezzałogowej platformy lądowej dotyczące doboru układu napędowego są następujące:

- masa całkowita pojazdu - 800 kg,
- prędkość jazdy - 20 km/h,
- chwilowa prędkość jazdy - 30 km/h,
- jazda z prędkością 5 km/h przez 8 h,
- możliwość jazdy w trybie cichym w każdym terenie,
- pokonywanie zwojeń – od 1,2 m do 1,5 m,
- promień skrętu – 4 m, możliwość skrętu w miejscu,
- pokonywanie gruzowisk, wysokich krawężników, schodów, terenów podmokłych i pustynnych.

3. OPRACOWANIE PROJEKTU KONCEPCYJNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

3.1. Proponowane rozwiązania układu napędowego

Jednostka napędowa powinna spełniać wyszczególnione wyżej założenia i dodatkowo cechować się odpowiednimi parametrami wśród dostępnych rozwiązań. Do wyznaczenia optymalnego układu napędowego, który zostanie zastosowany w bezzałogowej platformie lądowej, posłużono się analizą wielokryterialną, oceniającą każdy wariant możliwego w użyciu napędu [4].

Dokonano wyboru układów napędowych, które są powszechnie stosowane w podobnych konstrukcjach i spełniają większość postawionych wymagań. Układy napędowe zostały rozdzielone na główne kategorie, różniące się między sobą sposobem przemiany energii chemicznej lub elektrycznej na energię mechaniczną. Należą do nich układy: spalinowy, elektryczny, hydrostatyczny, hybrydowy równoległy, hybrydowy szeregowy, hybrydowy mieszany oraz ogniwa wodorowe [2].

3.2. Kryteria doboru układu napędowego

Podczas wyboru odpowiedniego napędu analizowano kryteria dotyczące podstawowych wymagań i cech pojazdów specjalnych, takie jak: stosunek masy układu napędowego do masy pojazdu, rodzaj i zużycie paliwa, łatwość sterowania pojazdem, sprawność układu napędowego, optymalne wykorzystanie charakterystyk silników, gabaryty względem do generowanej mocy, emisja hałasu (w tym tzw. tryb cichy), praca w środowiskach skażonych lub o niskiej i wysokiej temperaturze.

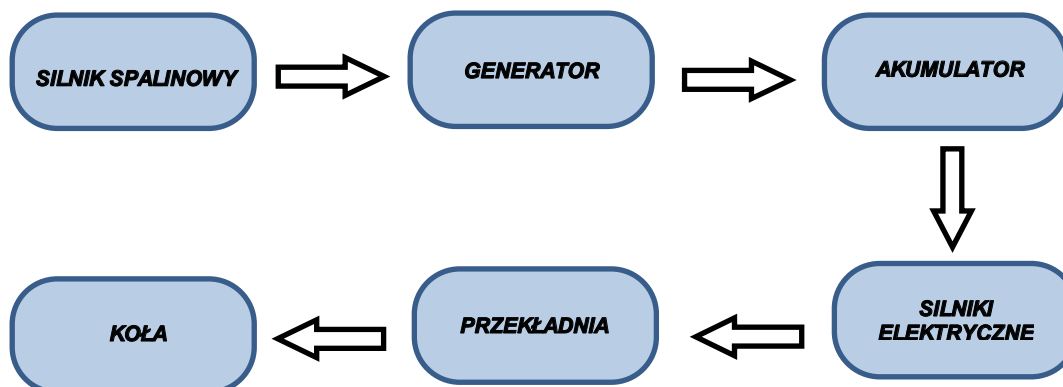
3.3. Wyniki analizy wielokryterialnej

W doborze układu napędowego posłużono się analizą wielokryterialną pozwalającą na dokonanie optymalnego wyboru spośród alternatywnych rozwiązań konstrukcyjnych. Wyniki przeprowadzonej analizy wielokryterialnej zostały przedstawione w tablicy 1.

Tablica.1. Wyniki analizy wielokryterialnej w zakresie doboru napędu

| | waga | mechaniczny | | elektryczny | | hydrostatyczny | | hybryda szeregową | | hybryda równoległa | | hybryda mieszana | | ogniwa paliwowe | | napęd idealny | |
|-----|------|-------------|---------|-------------|---------|----------------|---------|-------------------|---------|--------------------|---------|------------------|---------|-----------------|---------|---------------|---------|
| | | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn |
| k1 | 18 | 5 | 90 | 4 | 72 | 4 | 72 | 3 | 54 | 3 | 54 | 3 | 54 | 5 | 90 | 5 | 90 |
| k2 | 22 | 1 | 22 | 4 | 88 | 2 | 44 | 4 | 88 | 2 | 44 | 3 | 66 | 5 | 110 | 5 | 110 |
| k3 | 2 | 3 | 6 | 5 | 10 | 4 | 8 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 |
| k4 | 9 | 4 | 36 | 4 | 36 | 4 | 36 | 4 | 36 | 4 | 36 | 4 | 36 | 4 | 36 | 5 | 45 |
| k5 | 14 | 1 | 14 | 5 | 70 | 4 | 56 | 4 | 56 | 4 | 56 | 4 | 56 | 2 | 28 | 5 | 70 |
| k6 | 14 | 1 | 14 | 4 | 56 | 4 | 56 | 5 | 70 | 5 | 70 | 5 | 70 | 4 | 56 | 5 | 70 |
| k7 | 2 | 3 | 6 | 5 | 10 | 3 | 6 | 4 | 8 | 4 | 8 | 4 | 8 | 1 | 2 | 5 | 10 |
| k8 | 22 | 3 | 66 | 1 | 22 | 3 | 66 | 5 | 110 | 5 | 110 | 5 | 110 | 2 | 44 | 5 | 110 |
| k9 | 2 | 4 | 8 | 3 | 6 | 3 | 6 | 4 | 8 | 4 | 8 | 4 | 8 | 3 | 6 | 5 | 10 |
| k10 | 6 | 4 | 24 | 3 | 18 | 4 | 24 | 3 | 18 | 3 | 18 | 2 | 12 | 3 | 18 | 5 | 30 |
| k11 | 9 | 2 | 18 | 4 | 36 | 3 | 27 | 5 | 45 | 4 | 36 | 5 | 45 | 3 | 27 | 5 | 45 |
| k12 | 14 | 1 | 14 | 5 | 70 | 1 | 14 | 5 | 70 | 1 | 14 | 3 | 42 | 5 | 70 | 5 | 70 |
| k13 | 22 | 5 | 110 | 4 | 88 | 4 | 88 | 3 | 66 | 3 | 66 | 3 | 66 | 2 | 44 | 5 | 110 |
| k14 | 11 | 5 | 55 | 3 | 33 | 5 | 55 | 4 | 44 | 4 | 44 | 4 | 44 | 3 | 33 | 5 | 55 |
| | | suma | 483 | suma | 615 | suma | 558 | suma | 683 | suma | 574 | suma | 627 | suma | 574 | suma | 835 |
| | | % | 57,8 | % | 73,7 | % | 66,8 | % | 81,8 | % | 68,7 | % | 75,1 | % | 68,7 | % | 100,0 |

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, szeregowy napęd hybrydowy okazał się rozwiązaniem optymalnym spośród rozważanych wariantów napędów. Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy napędu prezentujący podstawowe elementy układu wraz z zaznaczonym kierunkiem przepływu mocy.



Rys. 1. Schemat blokowy przedstawiający szeregowy napęd hybrydowy

3.4. Podsumowanie doboru układu napędowego

Napęd hybrydowy spełnia podstawowe wymagania ekologiczne, realizowane poprzez zmniejszenie spalania paliwa organicznego, nie tracąc przy tym właściwości trakcyjnych. Zmniejszenie zużycia paliwa jest korzystne z uwagi na zwiększenie zasięgu pojazdu lub zminimalizowanie gabarytów elementów napędu – zbiornika paliwa lub silnika [4], [5], [6], [7].

Kolejną zaletą szeregowego układu hybrydowego jest możliwość włączenia i rozpoczęcia jazdy platformy jedynie za pomocą silników elektrycznych, co znacznie redukuje czas przygotowania i uruchomienia platformy. Szeregowy układ hybrydowy składa się z połączonych szeregowo elementów, takich jak: silnik, generator, akumulatory, silniki elektryczne. Modułowość pojazdu zapewnia ich szybkie i łatwe zdemontowanie [4], [5], [6], [7].

Podstawową zaletą tego układu jest poruszanie się w trybie cichym, czyli przy użyciu jedynie silników elektrycznych. Ze względu na ryzyko wystąpienia zwarcia w instalacji elektrycznej, wymagane jest wykonanie szczelnego korpusu zapewniającego hermetyczność podczas głębokiego brodzenia i pozostawania w wodzie. Znaczny czas brodzenia wymaga dostarczenia powietrza, które jest konieczne dla działania silnika spalinowego, doładowującego akumulatory [4], [5], [6], [7].

4. OPRACOWANIE PROJEKTU KONCEPCYJNEGO UKŁADU JEZDNEGO

4.1. Proponowane układy jezdne

Kolejnym etapem projektu jest dobór układu jezdnego, czyli podzespołu, który jest odpowiedzialny za mobilność pojazdu oraz parametry trakcyjne. W głównej mierze odpowiedni dobór zawieszenia oraz układu jezdnego pozwala na pokonywanie różnorodnych terenów i osiąganie wymaganych prędkości. Układ ten powinien spełniać określone na wstępie założenia. W bezzałogowej platformie lądowej konieczne jest dobranie układu jezdnego tak, aby spełniał założone kryteria oraz miał najlepsze możliwości i własności z dostępnych układów [1].

Obecnie istnieje wiele różnych układów jezdnych stosowanych w pojazdach. Ze względu na koszty i skomplikowane konstrukcje, wybrane zostały układy najbardziej powszechne i stosowane w podobnych pojazdach: gąsienicowy, kołowy 4x4, kołowy 6x6, półgąsienicowy, mieszany, kroczący, śrubowy. Każdy rodzaj układu ma inne własności oraz możliwości. Zalety oraz wady układów zostały poddane analizie wielokryterialnej.

4.2. Kryteria doboru układu jezdnego

Podczas wyboru odpowiedniego pędnika analizowano kryteria dotyczące podstawowych wymagań i cech pojazdów specjalnych, takie jak: zdolność pokonywania przeszkód oraz wzniesień, prędkość jazdy, pokonywanie terenów błotnistych, piaskowych, ośnieżonych, odporność na uszkodzenia, awaryjność, koszty produkcji, gabaryty w stosunku do masy pojazdu, zwrotność i dynamika zmiany kierunku poruszania.

4.3. Wyniki analizy wielokryterialnej

Podczas doboru odpowiedniego napędu analizowano kryteria dotyczące podstawowych wymagań i cech pojazdów specjalnych. Wyniki zostały przedstawione w Tabelicy 2.

Tabela.2. Wyniki analizy wielokryterialnej w zakresie doboru układu jezdnego

| | waga | gąsienicowy | | 4x4 | | 6x6 | | półgąsienicowy | | mieszany | | kroczący | | śrubowy | | idealny | |
|-----|------|-------------|---------|-------|---------|-------|---------|----------------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn | ocena | iloczyn |
| k1 | 22 | 4 | 88 | 2 | 44 | 3 | 66 | 3 | 66 | 4 | 88 | 4 | 88 | 3 | 66 | 5 | 110 |
| k2 | 17 | 4 | 68 | 5 | 85 | 5 | 85 | 3 | 51 | 4 | 68 | 1 | 17 | 3 | 51 | 5 | 85 |
| k3 | 22 | 4 | 88 | 2 | 44 | 3 | 66 | 3 | 66 | 4 | 88 | 2 | 44 | 5 | 110 | 5 | 110 |
| k4 | 13 | 3 | 39 | 4 | 52 | 5 | 65 | 2 | 26 | 3 | 39 | 2 | 26 | 4 | 52 | 5 | 65 |
| k5 | 13 | 3 | 39 | 4 | 52 | 4 | 52 | 3 | 39 | 3 | 39 | 3 | 39 | 4 | 52 | 5 | 65 |
| k6 | 5 | 3 | 15 | 5 | 25 | 5 | 25 | 3 | 15 | 3 | 15 | 2 | 10 | 5 | 25 | 5 | 25 |
| k7 | 4 | 3 | 12 | 5 | 20 | 4 | 16 | 2 | 8 | 2 | 8 | 2 | 8 | 5 | 20 | 5 | 20 |
| k8 | 2 | 5 | 10 | 4 | 8 | 4 | 8 | 4 | 8 | 2 | 4 | 2 | 4 | 4 | 8 | 5 | 10 |
| k9 | 1 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 |
| k10 | 17 | 5 | 85 | 4 | 68 | 4 | 68 | 5 | 85 | 4 | 68 | 1 | 17 | 3 | 51 | 5 | 85 |
| k11 | 22 | 4 | 88 | 5 | 110 | 5 | 110 | 4 | 88 | 5 | 110 | 5 | 110 | 1 | 22 | 5 | 110 |
| k12 | 10 | 5 | 50 | 4 | 40 | 4 | 40 | 2 | 20 | 5 | 50 | 5 | 50 | 5 | 50 | 5 | 50 |
| | | suma | 585 | suma | 553 | suma | 606 | suma | 475 | suma | 579 | suma | 416 | suma | 510 | suma | 740 |
| | | % | 79,1 | % | 74,7 | % | 81,9 | % | 64,2 | % | 78,2 | % | 56,2 | % | 68,9 | % | 100,0 |

4.4. Podsumowanie doboru układu jezdnygo

Kołowy układ jezdny 6x6 okazał się rozwiązaniem optymalnym wśród analizowanych wariantów układów. Spełnia on wszystkie założenia i wymagania dotyczące bezzałogowych platform lądowych. Rozważane (tab. 2) układy jezdne dobrze realizują tylko pewne konkretne założenia, natomiast napęd 6x6 spełnia wszystkie zadane wymagania w stopniu dobrym [2], [6].



Rys. 2. Pojazd Hoot ATV 6x6 z 3 osiami nieskrętnymi

Realizacja skrętu w układzie 6x6 może się odbywać na dwa różne sposoby: poprzez skręt kół dwóch lub trzech osi przy realizacji geometrii Ackermana lub różnicę prędkości kół obu stron pojazdu [2], [6].

Zaletami układu są prostota konstrukcji oraz odporność na uszkodzenia, ponieważ pojazd jest w stanie kontynuować jazdę przy utracie jednego z kół. Niska awaryjność oraz zdolność do pokonywania wszelkich przeszkód gwarantuje wyższość na innymi rozwiązaniami [2], [6].

5. OBLICZENIA

5.1. Parametry dynamiczne

Danymi wejściowymi do analizy dynamicznej są siły oraz parametry dynamiczne pojazdu. Siły dzielą się na siły oporu, czyli przeciwdziałające ruchowi pojazdu, oraz siły napędowe, które wprawiają pojazd w ruch [2], [3].

Podstawowym zagadnieniem dotyczącym dynamiki pojazdów jest porównanie wartości sił oporu oraz sił napędowych. W celu rozpoczęcia ruchu pojazdu, siła napędowa musi być większa od sumy sił oporu, w przeciwnym wypadku pojazd nie będzie w stanie ruszyć bądź wprawiony w ruch zacznie zwalniać. Model matematyczny sformułowano na podstawie poniższych zależności [2], [3]:

$$F_n = F_t + F_p + F_w + F_b + F_s \quad [N] \quad (1)$$

F_t - opór toczenia;

F_s - opór skrętu;

F_p - opór powietrza;

F_b - opór sił bezwładności;

F_w - opór wzniesienia.

Analogicznie, w przypadku skrętu pojazdu, opory ruchu przekształca się na momenty sił względem środka obrotu pojazdu. Suma momentów sił oporów ruchu jest równa momentowi siły napędowej M_n względem osi obrotu pojazdu, co przedstawia zależność:

$$M_n = M_t + M_p + M_w + M_b + M_g, \quad [Nm] \quad (2)$$

gdzie:

M_t – moment oporów toczenia względem osi obrotu pojazdu;

M_p – moment oporów powietrza względem osi obrotu pojazdu;

M_w – moment oporów wzniesienia względem osi obrotu pojazdu;

M_b – moment oporów sił bezwładności względem osi obrotu pojazdu;

M_g – moment oporów skrętu względem osi obrotu pojazdu.

Siły oporu oraz napędowe są zmienne w zależności od wielu czynników, takich jak opory skrętu, tarcie, pokonywanie wzniesień, różnego rodzaju podłoża, opory powietrza, prędkość pojazdu, charakterystyka silnika, przełożenie przekładni, czy sprawność podzespołów układu [2], [3].

5.3. Obliczenia analityczne

Obliczenia prowadzono dla czterech odmiennych sytuacji, a mianowicie: gdy pojazd przyspiesza podczas jazdy na wprost, przy pokonywaniu wzniesień oraz podczas skrętu zerowego i skrętu z unieruchomionymi kołami strony zabieganej. Obliczenia analityczne zostały wprowadzone do programu Matlab w postaci skryptu, zawierającego opisane dane i wzory. Każdej zmiennej przypisano konkretną wartość i na ich podstawie zbudowano, według założeń, model analityczny. Skrypt na tej podstawie danego modelu analitycznego podaje konkretną szukaną wartość.

5.4. Obliczenia numeryczne

W środowisku Matlab Simulink został wykonany w pełni parametryczny model układu napędowego bezzałogowej platformy lądowej, dotyczący zarówno jazdy na wprost, jak i wykonania manewru skrętu. Dynamiczne środowisko Simulink umożliwia przeprowadzenie symulacji numerycznych układu napędowego.

5.5. Podsumowanie

Wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych dla czterech sytuacji zostały porównane odpowiednio w tablicach 3, 4, 5 i 6. Każda z tablic została podzielona na dwa segmenty, gdzie w pierwszym przedstawione są siły oporu działające na pojazd, a w drugim podstawowe parametry dynamiczne wyznaczone dla poszczególnych elementów układu napędowego. Przyjęty układ napędowy składa się z umieszczonego w kole silnika elektrycznego oraz przekładni planetarnej.

Tablica 3. Wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych dla przypadku pierwszego (przyspieszenie pojazdu podczas jazdy na wprost)

| | WYNIKI OBLICZEŃ ANALITYCZNYCH | | WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH | | |
|--------------------------|-------------------------------|--------|------------------------------|--------|-------------------|
| | asfalt | piasek | asfalt | piasek | |
| Podłoże | | | | | |
| Opór toczenia | 110 | 1767 | 110 | 1766 | N |
| Opór bezwładności | 2240 | 2240 | 2280 | 2272 | N |
| Opór powietrza | 40 | 40 | 41 | 31 | N |
| Opór skrętu | 0 | 0 | 0 | 0 | N |
| Opór wzniesienia | 0 | 0 | 0 | 0 | N |
| Suma sił oporu | 2390 | 4047 | 2431 | 4069 | N |
| Moment na kole | 120 | 202 | 126 | 214 | Nm |
| Obr./min koła | 265 | 265 | 282 | 278 | min ⁻¹ |
| Moc na kole | 3,3 | 5,6 | 3,3 | 5,5 | kW |
| Przełożenie | 35 | 35 | 35 | 35 | |
| Moment na silniku | 4 | 6 | 4 | 6 | Nm |
| Obr./min silnika | 9252 | 9252 | 9880 | 9740 | min ⁻¹ |
| Moc silnika | 3,5 | 5,9 | 3,5 | 5,8 | kW |

Tablica 4. Wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych dla przypadku drugiego (przyspieszenie pojazdu podczas jazdy na wprost na wzniesieniu)

| | WYNIKI OBLICZEŃ ANALITYCZNYCH | | WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH | | |
|--------------------------|-------------------------------|--------|------------------------------|--------|-------------------|
| | asfalt | piasek | asfalt | piasek | |
| Podłoże | | | | | |
| Opór toczenia | 99 | 1596 | 110 | 1766 | N |
| Opór bezwładności | 800 | 800 | 840 | 920 | N |
| Opór powietrza | 39 | 39 | 38 | 41 | N |
| Opór skrętu | 0 | 0 | 0 | 0 | N |
| Opór wzniesienia | 3924 | 3924 | 3925 | 3925 | N |
| Suma sił oporu | 4862 | 6359 | 4913 | 6652 | N |
| Moment na kole | 243 | 318 | 255 | 336 | Nm |
| Obr./min koła | 264 | 264 | 257 | 257 | min ⁻¹ |
| Moc na kole | 6,7 | 8,8 | 6 | 8 | kW |
| Przełożenie | 35 | 35 | 35 | 35 | |
| Moment na silniku | 7 | 10 | 7 | 10 | Nm |
| Obr./min silnika | 9251 | 9251 | 8980 | 8980 | min ⁻¹ |
| Moc silnika | 7 | 9,3 | 6,4 | 8,4 | kW |

Tablica 5. Wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych dla przypadku trzeciego (podczas skrętu zerowego)

| | WYNIKI OBLICZEŃ ANALITYCZNYCH | | WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH | | |
|--------------------------|-------------------------------|--------|------------------------------|--------|-------------------|
| | asfalt | piasek | asfalt | piasek | |
| Podłoże | | | | | |
| Opór toczenia | 55 | 883 | 110 | 883 | N |
| Opór bezwładności | 217 | 217 | 307 | 296 | N |
| Opór powietrza | 0 | 0 | 0 | 0 | N |
| Opór skrętu | 3140 | 1295 | 3150 | 1295 | N |
| Opór wzniesienia | 0 | 0 | 0 | 0 | N |
| Suma sił oporu | 3412 | 2395 | 3567 | 2474 | N |
| Moment na kole | 314 | 239 | 339 | 238 | Nm |
| Obr./min koła | 29 | 29 | 24 | 27 | min ⁻¹ |
| Moc na kole | 1 | 0,7 | 0,9 | 0,8 | kW |
| Przełożenie | 35 | 35 | 35 | 35 | |
| Moment na silniku | 10 | 7 | 10 | 7 | Nm |
| Obr./min silnika | 1000 | 1000 | 840 | 950 | min ⁻¹ |
| Moc silnika | 1,1 | 0,8 | 1 | 0,8 | kW |

Tablica 6. Wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych dla przypadku czwartego (podczas skrętu z unieruchomionymi kołami strony zabieganej)

| | WYNIKI OBLICZEŃ ANALITYCZNYCH | | WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH | | |
|--------------------------|-------------------------------|--------|------------------------------|--------|-------------------|
| | asfalt | piasek | asfalt | piasek | |
| Podłoże | | | | | |
| Opór toczenia | 99 | 1596 | 99 | 1596 | N |
| Opór bezwładności | 337 | 336 | 536 | 400 | N |
| Opór powietrza | 0 | 0 | 0 | 0 | N |
| Opór skrętu | 3139 | 1295 | 3139 | 1295 | N |
| Opór wzniesienia | 1962 | 1962 | 1680 | 1680 | N |
| Suma sił oporu | 5537 | 5189 | 5454 | 4971 | N |
| Moment na kole | 548 | 439 | 548 | 439 | Nm |
| Obr./min koła | 57 | 57 | 49 | 57 | min ⁻¹ |
| Moc na kole | 3,3 | 2,6 | 2,9 | 2,3 | kW |
| Przełożenie | 35 | 35 | 35 | 35 | |
| Moment na silniku | 17 | 13 | 17 | 13 | Nm |
| Obr./min silnika | 2000 | 2000 | 1700 | 1700 | min ⁻¹ |
| Moc silnika | 3,5 | 2,8 | 2,9 | 2,5 | kW |

6. DOBÓR ELEMENTÓW UKŁADU NAPĘDOWEGO

6.1. Określenie energochłonności pojazdu

W przypadku napędów hybrydowych, właściwy dobór komponentów układu napędowego jest w dużym stopniu zależny od trybu pracy pojazdu. Tryb pracy uwzględnia warunki i parametry poruszania się pojazdu oraz ukształtowanie terenu. Zaletą napędów hybrydowych jest możliwość zmagazynowania energii, która zostaje wykorzystana w losowych i nielicznych sytuacjach. Wykorzystując tę zaletę silnik główny – spalinowy – pracuje w optymalnym zakresie.

Docelowy zasięg pojazdu w trybie cichym powinien wynosić około 10 km podczas jazdy na drodze asfaltowej oraz 5 km na podłożu trawiastym. Występujące podczas jazdy siły reakcji pochodzą od oporu toczenia i oporu powietrza pojazdu. Opór powietrza jest ściśle związany z prędkością; dla założonej prędkości stałej 20 km/h opór ten wynosi 470 N. Opór toczenia jest niezależny od parametrów ruchu pojazdu i wynosi dla drogi asfaltowej 110 N oraz dla podłoża trawiastego (trawa wysoka) 630 N. Suma sił oporów wynosi więc odpowiednio: 580 N i 1100 N, natomiast z symulacji numerycznych uzyskujemy odpowiednio: 554 N i 1074 N. Na podstawie przytoczonych wartości możemy określić pracę wykonaną przez pojazd (w J), korzystając z zależności:

$$W = \frac{(F_t + F_p) * S}{\eta_g + \eta} \quad (3)$$

gdzie:

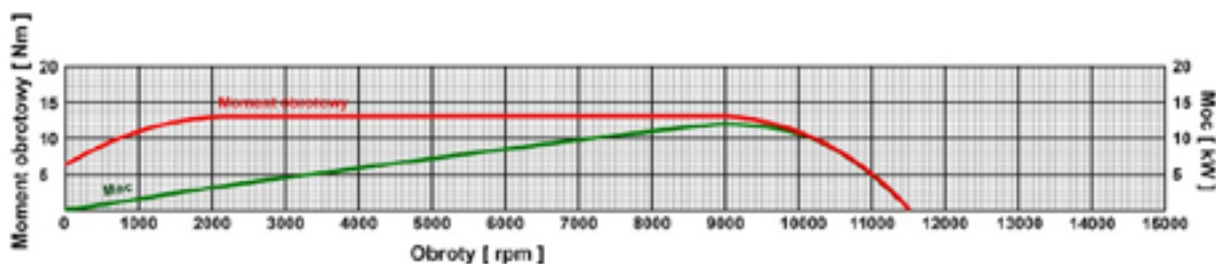
- F_t – siła oporu toczenia [N];
- F_p – siła oporu powietrza [N];
- S – całkowita przebyta droga [m];
- η_g – sprawność układu jezdnego;
- η – sprawność układu przeniesienia napędu.

6.2. Dobór silników

Dla potrzeb analizy koncepcyjnej, wstępnie dobrano silniki trakcyjne: bezszczotkowe silniki prądu stałego o mocy chwilowej 12 kW dla napięcia 72V. Tego typu rozwiązania stosowane są między innymi w samochodach, motocyklach, łodziach i motolotniach. Parametry silników przedstawiono w tablicy 7:

Tablica 7. Parametry dobranych silników elektrycznych

| | |
|--|--------------------------|
| Napięcie | 72 V |
| Maksymalna moc chwilowa | 12 kW |
| Maksymalna moc pracy ciągłej | 6 kW |
| Maksymalny pobór prądu | 180 A |
| Pobór prądu podczas pracy ciągłej | 90 A |
| Prędkość obrotowa podczas pracy ciągłej | 9000 min ⁻¹ |
| Maksymalny moment chwilowy | 13 Nm |
| Moment podczas pracy ciągłej | 6 Nm |
| Masa | 2,6 kg |
| Wymiary (długość x szerokość x wysokość) | 170 mm x 100 mm x 100 mm |



Rys. 3. Charakterystyka dobraneo silnika elektrycznego przy zasilaniu napięciem 72V

6.3. Dobór akumulatorów

Z zasady zachowania energii wynika, że wartość pracy wykonanej przez pojazd powinna być równa wartości pracy, zabezpieczonej przez akumulatory. W oparciu o tę zasadę możliwe jest wyznaczenie pojemności akumulatorów C (w Ah) z zależności:

$$C = \frac{W}{U \cdot 3600} \quad (4)$$

gdzie:

- C – pojemność akumulatorów w Ah
- W – praca wykonana przez pojazd w J
- U – napięcie prądowe akumulatorów w V.

Praca wykonana przez pojazd na drodze asfaltowej wynosi 6,4 MJ. Obliczona na jej podstawie łączna pojemność akumulatorów powinna być równa 37,2 Ah. Praca wykonana podczas jazdy po trawie wynosi 12,2 MJ, a odpowiadająca jej pojemność akumulatorów wynosi 70,5 Ah.

Dobrano zestaw trzech baterii litowo-fosforowo żelazowych LiFePO₄ 72V/20Ah o parametrach zawartych w tabelicy 8.

Tablica 8. Parametry baterii

| | |
|--|--------------------------|
| Pojemność akumulatora | 20 Ah |
| Napięcie | 72 V |
| Waga | 17 kg |
| Wymiary (długość x szerokość x wysokość) | 560 mm x 150 mm x 160 mm |

6.4. Dobór przekładni, generatorów i silników spalinowych

Przełożenie przekładni zostało dobrane na podstawie prędkości maksymalnych pojazdu (30 km/h) oraz prędkości maksymalnych dla standardowych silników elektrycznych (około 9000 Obr./min przy napięciu 72V) dla podobnych zastosowań. Redukcja zadawanych prędkości obrotowych pozwoliła na uzyskanie dużego momentu obrotowego na wale wyjściowym przekładni. Przyjęte przełożenie przekładni wynosi $i=35$ i zostało uwzględnione w przeprowadzonych analizach. W koncepcji projektu założono działanie równoległe dwóch generatorów prądu o różnych mocach, gdzie każdy zasilany jest osobnym silnikiem spalinowym. Takie rozwiązanie pozwala na dostosowanie dostarczania mocy w zależności od zapotrzebowania pojazdu. Obydwa generatory mogą pracować w trybach osobnych lub wspólnym. Pierwszym, „mniejszym” generatorem, jest maszyna elektryczna o mocy stałej 5 kW i mocy chwilowej 8,5 kW, natomiast drugi generator charakteryzuje się mocą stałą

10 kW i mocy chwilowej 20 kW. Obie maszyny posiadają możliwość pracy w trybie silnikowym jak i generatorowym. W tablicy 9 przedstawiono parametry generatora o mocy nominalnej 5 kW, natomiast w tablicy 10 parametry generatora o mocy 10 kW.

Tablica 9. Parametry generatora o mocy nominalnej 5 kW

| | |
|---|--------------------------|
| Napięcie | 72 V |
| Maksymalna moc chwilowa | 8,5 kW |
| Maksymalna moc pracy ciągłej | 5 kW |
| Pobór prądu podczas pracy ciągłej | 158 A |
| Maksymalna prędkość obrotowa pracy chwilowej | 6000 min ⁻¹ |
| Prędkość obrotowa podczas pracy ciągłej | 3200 min ⁻¹ |
| Maksymalny moment chwilowy | 27,7 Nm |
| Moment podczas pracy ciągłej | 14 Nm |
| Waga generatora i falownika | 14,5 kg |
| Wymiary (długość x szerokość x wysokość) | 206 mm x 206 mm x 126 mm |

Tablica 10. Parametry generatora o mocy nominalnej 10 kW

| | |
|---|--------------------------|
| Napięcie | 72 V |
| Maksymalna moc chwilowa | 20 kW |
| Maksymalna moc pracy ciągłej | 10 kW |
| Pobór prądu podczas pracy ciągłej | 194 A |
| Maksymalna prędkość obrotowa pracy chwilowej | 6000 min ⁻¹ |
| Prędkość obrotowa podczas pracy ciągłej | 2000 min ⁻¹ |
| Maksymalny moment chwilowy | 35 Nm |
| Moment podczas pracy ciągłej | 12 Nm |
| Waga generatora i falownika | 20,2 kg |
| Wymiary (długość x szerokość x wysokość) | 206 mm x 206 mm x 170 mm |

Do generatorów dobrano odpowiednio dwa silniki spalinowe Diesla, jednocylindrowy silnik o mocy 7,5 kW oraz dwucylindrowy silnik o mocy 17 kW. W tablicy 11 przedstawiono parametry silnika o mocy 7,5 kW, a w tablicy 12 silnika o mocy 17 kW.

Tablica 11. Parametry silnika spalinowego o mocy 7,5 kW

| | |
|---|--------------------------|
| Rodzaj paliwa | ON - DIESEL |
| Pojemność silnika | 460 cm ³ |
| Maksymalna moc przy obrotach | 3600 min ⁻¹ |
| Moc | 7,5 kW |
| Maksymalny moment obrotowy | 24,9 Nm |
| Waga | 48 kg |
| Wymiary (długość x szerokość x wysokość) | 392 mm x 480 mm x 335 mm |

Tablica 12. Parametry silnika spalinowego o mocy 17 kW

| Rodzaj paliwa | ON - DIESEL |
|--|--------------------------|
| Pojemność silnika | 1000 cm ³ |
| Maksymalna moc przy obrotach | 3000 min ⁻¹ |
| Moc | 17 kW |
| Maksymalny moment obrotowy | 50 Nm |
| Waga | 100 kg |
| Wymiary (długość x szerokość x wysokość) | 582 mm x 587 mm x 461 mm |

7. PODSUMOWANIE

Wyznaczone obciążenia dynamiczne działające na układ napędowy pojazdu pozwalają na sformułowanie koncepcji napędu hybrydowego z uwzględnieniem parametrów wymaganych dla projektowanej platformy oraz optymalizację układu napędowego celem określenia wymaganych parametrów jego elementów składowych. Jako narzędzie wyboru optymalnego rozwiązania układu napędowego oraz jezdnego wykorzystano wyniki analiz wielokryterialnych, w których ujęto zarówno rozwiązania powszechnie znane, stosowane w układach jezdnych i napędowych, jak również rozwiązania perspektywiczne (ogniwo paliwowe w przypadku napędu) oraz mało rozpowszechnione (napęd śrubowy i kroczący). Wyniki analizy kryterialnej doprowadziły do wyboru struktury powszechnie stosowanego rozwiązania w postaci napędu hybrydowego szeregowego raz układu 6 x 6 jako pędnika.

Dla wybranego rozwiązania układu napędowego i jezdnego przeprowadzono analizę dynamiczną oraz wstępny dobór elementów składowych. Założono skręt w ruchu pojazdu realizowany poprzez zróżnicowanie prędkości kół jezdnych po obu stronach pojazdu. Obliczenia przeprowadzone dla wybranych przypadków obciążenia potwierdzają prawidłowość doboru elementów składowych napędu projektowanej średniej bezzałogowej platformy.

8. LITERATURA

- [1] Burdziński Z.: Teoria ruchu pojazdu gąsienicowego, WKŁ, Warszawa 1972.
- [2] Wong J. Y.: Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons, New York 2001.
- [3] Mitschke M.: Dynamika samochodu. WKiŁ, Warszawa 1977.
- [4] Zajler W.: Zastosowanie napędu hybrydowego w pojazdach wojskowych. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, (21) nr 1, 2005, ISSN: 0860-8369, s. 27–42, Biuletyn Naukowo-Techniczny OBRUM sp. z o.o., Gliwice, wrzesień 2005.
- [5] Mężyk A., Czapla T., Klein W. : Hybrid drive application for high-speed tracked vehicle. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 16, No. 1, 2009.
- [6] Mężyk A., Skowron K.: Rozwój układów przeniesienia napędów w pojazdach gąsienicowych. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, (31) nr 3, 2012, ISSN: 0860-8369, s. 19–26, Biuletyn Naukowo-Techniczny OBRUM sp. z o.o., Gliwice, grudzień 2012.
- [7] Klein W., Mężyk A., Czapla T.: Hybrydowy układ napędowy pojazdu gąsienicowego. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe, (29) nr 1, 2012, ISSN: 0860-8369, s. 61–68, Biuletyn Naukowo-Techniczny OBRUM sp. z o.o., Gliwice, marzec 2012.

DESIGNING A HYBRID DRIVE SYSTEM FOR A MEDIUM-SIZED UNMANNED LAND PLATFORM

Abstract. The project was realized as a study preceding the implementation of an innovative hybrid combustion/ electric drive system for an unmanned land platform with a weight of 800 kg. Based on a dynamic model of a hybrid drive system for an unmanned land platform, the target parameters of the drive were specified and its components were sized and selected. A vehicle operating mode was developed and components were reselected with a view to attain the lowest possible weight. A conceptual structural form of an unmanned land vehicle platform was developed.

Keywords: hybrid drive, drive system, wheeled vehicle, drive dynamics.

W artykule zostały wykorzystane wyniki prac zrealizowanych w ramach projektu finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju – umowa nr DOBR-BIO4/083/13431/2013 „Bezzałogowa platforma średnia (klasa 800 kg)”.