

Janusz KRASUCKI

NAPĘD ELEKTRYCZNY I HYBRYDOWY W UKŁADZIE HYDRAULICZNYM POJAZDU SPECJALNEGO MONTRAKS^{*)}

STRESZCZENIE *W pracy przedstawiono koncepcję napędu elektrycznego i hybrydowego mechanizmów roboczych pojazdu specjalnego MONTRAKS, służącego do napraw i konserwacji tramwajowej sieci trakcyjnej. Pokazano wyniki badań eksploatacyjnych pojazdu, które wskazują na niską efektywność energetyczną napędu klasycznego z silnikiem spalinowym i możliwość zastosowania dodatkowego napędu elektrycznego zasilanego z baterii elektrochemicznej. W celu porównania różnych struktur napędu, zbudowano stanowisko badawcze wysięgnika hydraulicznego z napędem dwuzródłowym. Zamieszczono wyniki wstępnych badań, które wykazały zalety proponowanego rozwiązania.*

Słowa kluczowe: *napęd hybrydowy, napęd spalinowo-elektryczny, ekologiczne układy napędowe, pojazdy specjalne, maszyny robocze*

1. WSTĘP

Pojazd specjalny MONTRAKS, którego konstrukcja opracowana została w Przemysłowym Instytucie Maszyn Budowlanych, używany jest przez Miejskie Zakłady Komunikacyjne do napraw i obsługi tramwajowej sieci trakcyjnej.

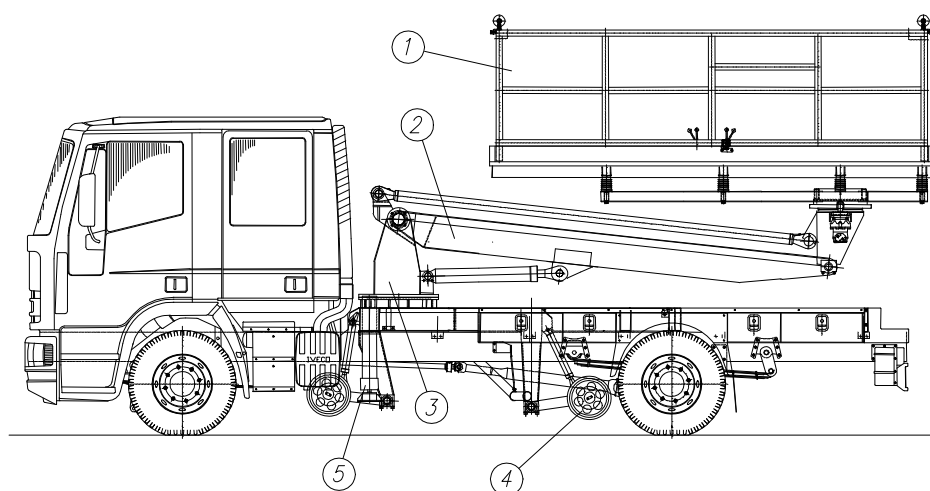
^{*)} Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 5 T07C 01925.

dr inż. Janusz KRASUCKI
e-mail: janusz.kr@wp.pl

Przemysłowy Instytut Maszyn Budowlanych

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 231, 2007

Obecna wersja tego pojazdu – przedstawiona na rys. 1, zbudowana na podwoziu samochodowym IVECO, wyposażona jest w osprzęt roboczy, którego głównym elementem jest pomost roboczy „1” osadzony na końcu wysięgnika „2”, podnoszonego przez układ dwóch siłowników hydraulicznych. Poziome położenie pomostu, przymocowanego niecentralnie względem głowic, zapewnia układ prostowodowy z dodatkowym siłownikiem hydraulicznym.



Rys. 1. Pojazd specjalny MONTRAKS 3PS

1-pomost roboczy, 2-wysięgnik, 3-kolumna obrotowa, 4-wózek do jazdy szynowej, 5-podpory boczne

Specyfika prac związanych z naprawą sieci trakcyjnej, prowadzonych przede wszystkim w porze nocnej, powoduje, że konieczny jest długotrwały nieraz postój pojazdu z pracującym silnikiem spalinowym, który napędza pompę zasilającą układ hydrauliczny. Jest to źródłem szczególnie uciążliwego wówczas hałasu. Jednocześnie zapotrzebowanie mocy ze strony układu roboczego jest niewielkie a silnik spalinowy pracuje wówczas w obszarze wybitnie małej sprawności i dużej toksyczności spalin.

Rozwiązaniem, które eliminuje wspomniane wady napędu spalinowego w odniesieniu do układu roboczego, jest wprowadzenie dodatkowego napędu elektrycznego zasilanego z baterii elektrochemicznej. Takie rozwiązanie daje jednocześnie dodatkową możliwość rekuperacji energii potencjalnej opuszczanego pomostu. Wymaga to jednak innego sterowania prędkością ruchów roboczych – rezygnacji z zaworów proporcjonalnych i sterowania dławieniowego na rzecz sterowania czysto objętościowego, tj. sterowania prędkością kątową zespołu pompa-silnik elektryczny. Jednakże zastosowanie napędu wyłącznie elektrycznego podczas jazdy drogowej, wymagałoby całkowicie nowej konstrukcji pojazdu.

Optymalnym rozwiązaniem jest napęd hybrydowy, spalinowo-elektryczny, gdzie sumowanie mocy zachodzi na drodze hydraulicznej i możliwa jest praca jednocześnie dwu źródeł mocy. Przy czym napęd elektryczny powinien być tak dobrany aby większość prac mogła być wykonana przy wykorzystaniu tylko tego napędu. Ograniczy to istotnie hałas wywołany pracą silnika spalinowego oraz emisji spalin co jest szczególnie istotne w środowisku miejskim. Na etapie prac badawczych związanych konstrukcją napędu elektrycznego lub hybrydowego należy przeprowadzić szereg analiz, z których najważniejsze to:

- przeprowadzenie bilansu energetycznego maszyny dla znanego lub założonego cyklu pracy,
- wybór odpowiedniej struktury napędowej stanowiącej kompromis między kosztem danego rozwiązania a jego efektywnością energetyczną,
- badania symulacyjne napędu pozwalające na dobór optymalnych parametrów napędu, z energetycznego i użytkowego punktu widzenia,
- badania laboratoryjne napędu.

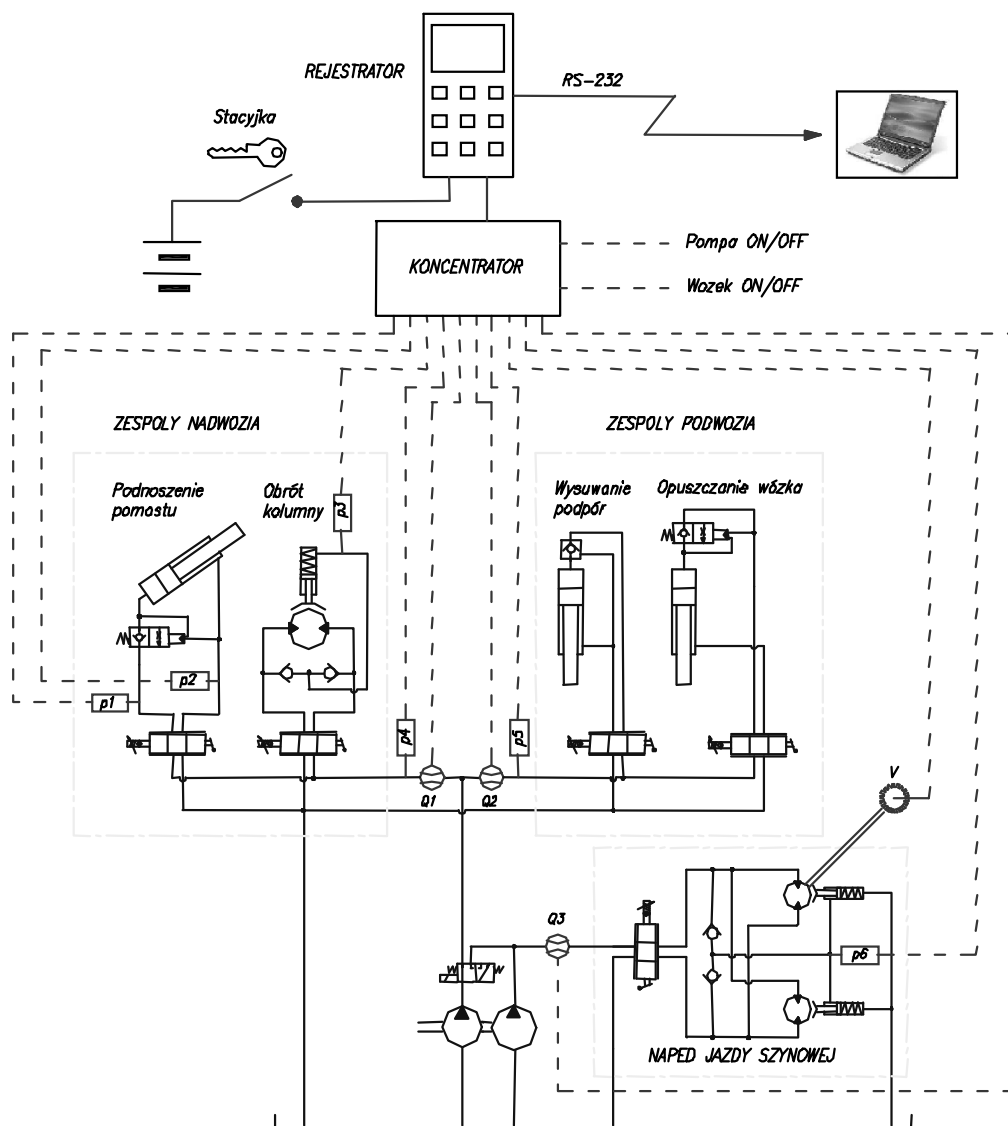
Ogólne podstawy projektowania napędów hybrydowych podano m.in. w [2]. W niniejszej pracy przedstawiono wybrane wyniki przeprowadzonych badań eksploatacyjnych pojazdu specjalnego MONTRAKS. oraz badań napędu hybrydowego na stanowisku laboratoryjnym.

2. BADANIA EKSPLOATACYJNE POJAZDU

W celu określenia bilansu mocy i wyznaczenia rzeczywistej charakterystyki obciążenia, przeprowadzone zostały badania napędów roboczych podczas normalnej eksploatacji pojazdu MONTRAKS. Wyznaczony w ten sposób, cykl pracy pojazdu odgrywa podstawową rolę przy analizie energetycznej i doborze parametrów napędu elektrycznego i hybrydowego.

Opracowano i wykonano specjalne urządzenie rejestrujące SAMON, pełniące rolę „czarnej skrzynki”, tzn. rejestrujące wybrane parametry pracy napędu w sposób automatyczny, bez ingerencji operatora/kierowcy pojazdu (pomijając stany awaryjne) takie jak: ciśnienia i natężenia przepływu w poszczególnych punktach obwodu hydraulicznego, prędkość jazdy, sygnały załączające i wyłączające rozdzielacze w poszczególnych obwodach hydraulicznych. Załączenie/wyłączenie urządzenia odbywa się automatycznie w momencie załączenia/wyłączenia pompy głównej. Pojemność wewnętrznej pamięci pozwala na nieprzerwaną rejestrację 72 godz. pracy napędu. Dane z rejestratora poprzez

interfejs RS-232 są przesyłane do zewnętrznego komputera, celem dalszej obróbki. Schemat układu pomiarowego pokazano na rys. 2.

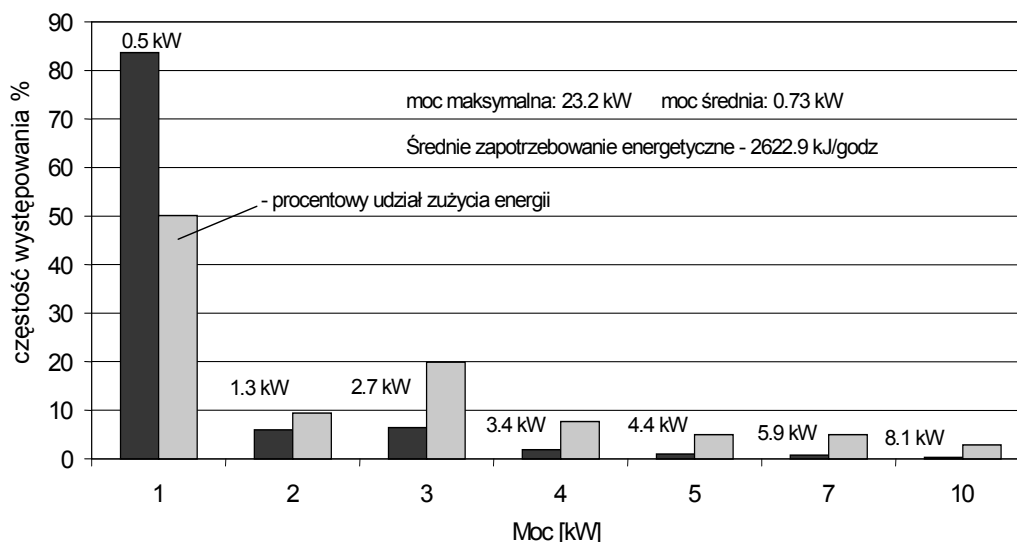


Rys. 2. Badania eksploatacyjne – schemat układu pomiarowego

Czas rejestracji wyniósł 67 jednostek roboczych (dzień lub noc), co odpowiada 185 godzinom efektywnej pracy napędu.

Na rysunku 3 przedstawiono histogramy mocy i zużycia energii przez mechanizmy robocze pojazdu w uśrednionym statystycznie cyklu pracy.

Z przeprowadzonych badań wynika, że ok. 84 % czasu pracy napędu stanowi praca pomp na biegu jałowym (z mocą poniżej 1 kW) realizowana



Rys. 3. Rozkład mocy i zużycia energii w warunkach eksploatacyjnych

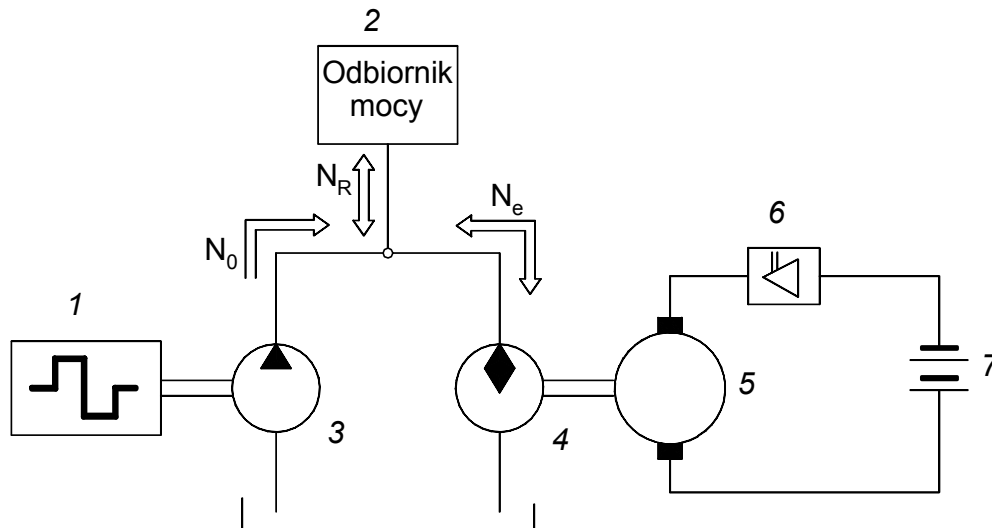
w celu utrzymania w gotowości układu hydraulicznego. Pozostały udział stanowią efektywne ruchy robocze, przy czym w przedziale mocy od 1 – 4 kW realizowane jest 14 % czasu uśrednionego cyklu pracy. Należy podkreślić, że wykorzystywany do napędu silnik wysokoprężny IVECO ma moc znamionową 130 kW. Co oznacza wykorzystanie jego mocy na poziomie 3 %! Na podstawie uzyskanych wyników przyjęto, że wymagana moc dodatkowego napędu elektrycznego, wystarczająca na pokrycie ok. 95 % przypadków obciążenia, wynosić powinna ok. 3 kW. W przypadkach, gdy zapotrzebowanie mocy przekracza tę wartość, wykorzystywany będzie napęd spalinowy.

3. STRUKTURA NAPĘDU HYBRYDOWEGO

Ideę proponowanego napędu hybrydowego ilustruje schemat na rys. 4.

Przekazywanie mocy do odbiornika 2 odbywać się może jednocześnie z dwóch źródeł: silnika spalinowego 1 pracującego z mocą „ N_0 ” i napędzającego pompę 3 oraz z silnika elektrycznego 5 zasilanego z baterii 7 i napędzającego pompę 4 mocą N_e . Sumowanie mocy realizowane jest na drodze hydraulicznej poprzez sumowanie natężeń przepływu obu pomp przy tym samym ciśnieniu. Jako elektryczne źródło mocy można zastosować silnik prądu stałego DC, lub silnik indukcyjny, – przy czym najbardziej efektywne rozwiązanie to maszyna z magnesami stałymi. Silnik elektryczny sterowany jest za

pomocą przekształtnika impulsowego 6 (choppera w przypadku napędu DC lub falownika dla napędu indukcyjnego), co pozwala na płynną regulację prędkości pompy (oraz natężenia przepływu) w całym zakresie, z możliwością pracy rewersyjnej.

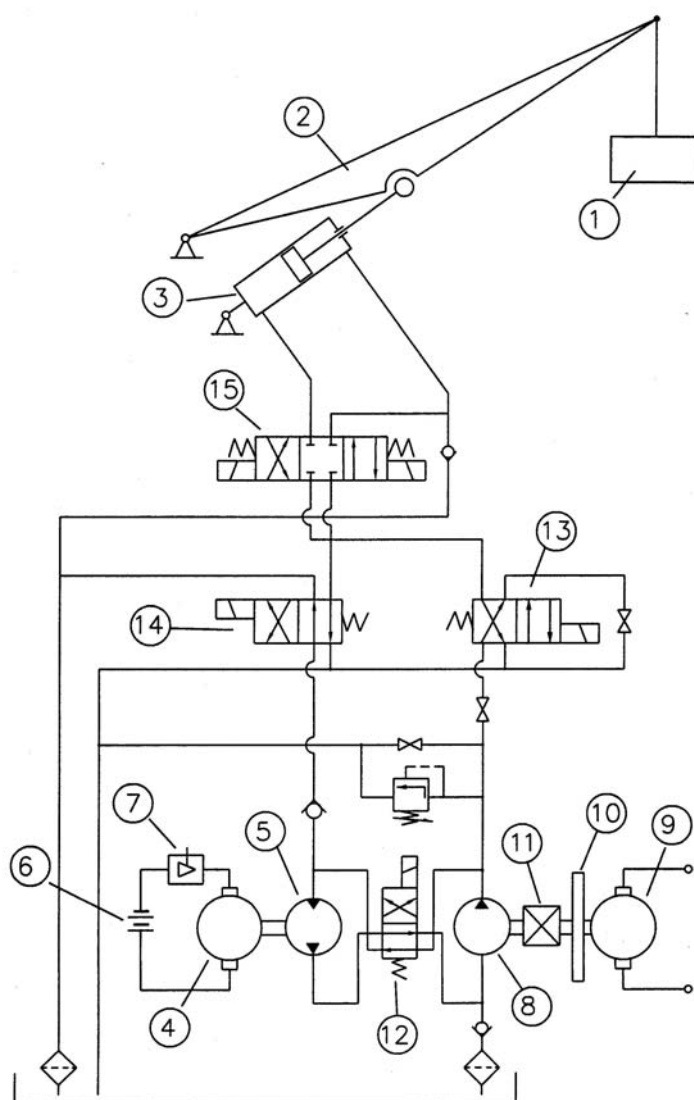


Rys. 4. Schemat napędu hybrydowego z odzyskiem energii

Możliwe są w tym przypadku dwie różne strategie pracy napędu:

- I. Głównym źródłem napędu pozostaje silnik spalinowy, pracujący w reżimie stałej mocy $N_0 = \text{const.}$
 - W przypadku, gdy obciążenie wzrasta i zachodzi $N_R > N_0$, do pracy włącza się silnik elektryczny i zachodzi sumowanie mocy z obu źródeł: $N_R = N_0 + N_e$.
 - W przypadku braku obciążenia $N_R = 0$, następuje doładowanie baterii poprzez silnik 5 pracujący generatorowo; moc z silnika spalinowego 1 przekazywana jest przez układ pomp 3 i 4 przy czym pompa 4 pracuje jako silnik hydrauliczny napędzający maszynę elektryczną 5. Bilans mocy: $N_0 = N_e$.
 - W przypadku hamowania odzyskowego (lub opuszczania ciężaru), ładowanie baterii poprzez silnik 5 pracujący generatorowo odbywa się z mocą $N_e = N_R + N_0$.
- II. Głównym źródłem napędu jest silnik elektryczny, pracujący ze zmienną mocą $N_e = \text{var}$. Silnik spalinowy jest wykorzystywany jedynie do doładowania baterii oraz w przypadku wzrostu zapotrzebowania na moc $N_R > N_e$.

Na podstawie wyników badań symulacyjnych [5], dobrano parametry elementów układu napędowego i opracowano wstępny projekt techniczny napędu. Na rysunku 5 pokazano rozwiązanie techniczne napędu hybrydowego, które jest przedmiotem badań na stanowisku laboratoryjnym w Przemysłowym Instytucie Maszyn Budowlanych.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego napędu hybrydowego

Obiektem badań jest układ wysięgnika „2” wychyłanego przy pomocy cylindra hydraulicznego „3” i obciążanego wiszącą masą „1”. Głównym źródłem mocy jest obcowzbudny silnik elektryczny „9” będący symulatorem silnika spalinowego, który poprzez przekładnię „11” napędza pompę hydrauliczną „8”. Na

wale silnika zamontowany jest bezwładnik „10”, który pełni rolę inercyjnego akumulatora energii. Drugim źródłem mocy jest maszyna elektryczna „4” zasilana z baterii akumulatorów elektrochemicznych „6” i sterowana impulsowo przy pomocy choppera „7”. Maszyna „4” może pracować w czterech ćwiartkach układu $\{M,n\}$ bądź jako silnik elektryczny i napędza pompę wielotłoczkową „5”, bądź jako generator. Drugie źródło mocy stanowi silnik elektryczny „4” który symuluje zachowanie silnika spalinowego i poprzez przekładnię obiegową „12” napędza pompę „11”. Dzięki rozdzielaczom „12”, „13” i „14” możliwa jest realizacja struktury jedno- lub dwuźródłowej oraz zmiana kierunku przepływu mocy pozwalająca na odzysk energii podczas opuszczania wysięgnika. Rekuperacja energii może zachodzić na baterię elektrochemiczną „6” lub na akumulator inercyjny „10”. Możliwe jest również bezpośrednie ładowanie baterii z silnika „9”. Sterowanie prędkością ruchów roboczych realizowane jest przez zmianę wartości oraz kierunku natężenia przepływu pompy „5”, dzięki odpowiedniemu wysterowaniu silnika elektrycznego DC „4” przy pomocy sterownika „7”. W szczególności możliwa jest praca generatorowa silnika elektrycznego „4” i ładowanie baterii „6”.

Wykonane stanowisko pozwala na podnoszenie ciężaru o masie do 450 kg z prędkością do 0.2 m/s. Jako elektryczne źródło mocy zastosowany został silnik DC z magnesami stałymi o mocy 3.5 kW, zasilany z baterii akumulatorów 3 x 12 V.

Podczas badań rejestrowane były ciśnienia w układzie hydraulicznym, prędkości obrotowe pomp hydraulicznych, przemieszczenie i prędkość tłoczyśka cylindra oraz wartości prądów i napięć silników elektrycznych i baterii.

4. WSTĘPNE WYNIKI BADAŃ STANOWISKOWYCH

W pierwszej fazie badaniom poddano układ w wersji jednoźródłowej wg schematu jak rys. 5, z wykorzystaniem tylko silnika „4” i zasilaniem z baterii „6”. Analizowano efektywność energetyczną napędu dla różnego obciążenia oraz różnych prędkości ruchów roboczych.

Średnią sprawność napędu, odpowiednio dla fazy podnoszenia η_{psr} i opuszczania η_{osr} zdefiniowano jako:

$$\eta_{psr} = \frac{\Delta E_p / T_p}{N_{DCsr}} = \frac{mg\Delta h}{\int_0^{T_o} N_{DC}(t) dt}; \quad \eta_{osr} = \frac{\int_0^{T_o} N_{DC}(t) dt}{mg\Delta h} \quad (1)$$

gdzie:

$N_{DC}(t)$ – moc chwilowa silnika elektrycznego mierzona na zaciskach,

T_p, T_o – czas fazy podnoszenia/opuszczania,

Δh – wysokość podnoszenia.

Sprawność podnoszenia nie była niższa niż 23 %, osiągając maks. Wartość ok. 40 %. Średnia moc silnika elektrycznego wynosiła od 170 W w przypadku podnoszenia masy 220 kg z prędkością 0.03 m/s, do 2100 W dla masy 432 kg i prędkości 0.18 m/s.

Średnia sprawność opuszczania ciężaru η_{osr} z uwzględnieniem odzysku energii, wynosiła od 32 % do 47 %.

Wyznaczone średnie sprawności napędu maleją wraz ze zmniejszaniem obciążenia oraz prędkości ruchów roboczych, co wynika z niskiej sprawności mechanicznej pomp wielotłoczkowych w zakresie niskich ciśnień.

Oceniono również efektywność przepływu energii w przypadku akumulatora inercyjnego jako źródła mocy. Średnią sprawność wyładowania akumulatora η_{aw} oraz sprawność akumulacji energii η_{aa} określono jako stosunek zmiany energii potencjalnej ciężaru do zmiany energii kinetycznej akumulatora mechanicznego i odwrotnie

Sprawność wyładowania wynosiła średnio 28 % i była wyższa niż sprawność akumulacji, która nie przekroczyła poziomu 16 %. Maksymalna moc wyładowania akumulatora wynosiła 690 W. Stwierdzono, że sprawność akumulacji energii zależy w tym przypadku od początkowego stopnia naładowania akumulatora i jest najwyższa, gdy w fazie opuszczania ciężaru początkowa energia kinetyczna akumulatora wynosi 0.

Badaniom poddano również możliwość jednoczesnej współpracy napędu elektrycznego oraz akumulatora inercyjnego w fazie podnoszenia. Stwierdzono, że z uwagi na szybkie rozładowanie akumulatora inercyjnego, możliwość taka istnieje jedynie w początkowej fazie ruchu, umożliwiając ograniczenie prądu silnika elektrycznego w chwili podrywania ciężaru i w efekcie wzrost sprawności ogólnej układu.

5. WNIOSKI

Wprowadzenie dodatkowego napędu elektrycznego w układzie roboczym pojazdu specjalnego MONTRAKS rozszerza możliwości jego pracy oraz w istotny sposób podnosi sprawność napędu, eliminując jednocześnie lub ograni-

czając wady napędu spalinowego. Sterowanie prędkością obrotową silnika elektrycznego pozwala na precyzyjną regulację wydajności napędzanej pompy i sterowanie ruchami roboczymi przy znacznie mniejszych stratach niż jak dotychczas, w przypadku sterowania dławieniowo-objętościowego za pomocą zaworu proporcjonalnego. Powoduje to zwiększenie sprawności napędu, widoczne zwłaszcza przy małych prędkościach.

Najbardziej istotną korzyścią energetyczną wprowadzenia napędu hybrydowego, jest odzysk energii potencjalnej w fazie opuszczania pomostu wskutek hamowania generatorowego silnikiem elektrycznym i akumulacji energii w baterii – podczas gdy w rozwiązaniu klasycznym konieczne jest jej dostarczenie do układu. Uproszczenie konstrukcji układu poprzez eliminację zaworu hamującego i rozdzielacza proporcjonalnego powoduje również obniżenie kosztów samego napędu, gdyż koszt sterownika silnika DC jest ok. dwukrotnie niższy niż koszt hydrauliki proporcjonalnej.

Komplikuje się jednakże sposób sterowania napędem, gdyż wymagany jest w tym przypadku nadrzędny układ sterowania koordynujący działanie sterownika silnika elektrycznego oraz sterowania silnikiem spalinowym i układem rozdzielaczy hydraulicznych.

LITERATURA

- 1 Stryczek S., Napęd hydrostatyczny. WNT, Warszawa 1997,
- 2 Szumanowski A., Fundamentals of Hybrid Vehicle Drives, Monograph Book ITE, Warszawa-Radom 2000.
- 3 Rostkowski A., Krasucki J., Możliwości zastosowania napędu hybrydowego w pojeździe specjalnym MONTRAKS. IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, „Pojazd a Środowisko”, Radom 2003.
- 4 Krasucki J., Rostkowski A., Napęd hybrydowy pojazdu specjalnego do konserwacji i napraw sieci trakcyjnej. XVII Konferencja Naukowa „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, Zakopane 2004.
- 5 Krasucki J., Rostkowski A., Koncepcja zastosowania napędu elektrycznego układach hydrauliki siłowej na przykładzie mechanizmów roboczych pojazdu MONTRAKS, Przegląd Mechaniczny, 9'05.

Rękopis dostarczono, dnia 27.02.2007 r.

Opiniował: doc. dr hab. inż. Krzysztof Zymmer

HYBRID AND ELECTRIC DRIVE
FOR HYDRAULIC SYSTEM
OF SPECIAL VEHICLE MONTRAKS

Janusz KRASUCKI

ABSTRACT *The paper outlines the concept of electric and hybrid drive for hydraulic equipment of special vehicle MONTRAKS for maintenance of tram and trolley-bus overhead wire system. A research and development works concerning those vehicles are conducted in Construction Equipment Research Institute and around on the drive system development taking into account the ecological aspects, such as a emission level of engine, noise, drive efficiency etc. The results of that is a new solution of hybrid drive system with electric motor battery supplied and the recovery capability of lifted weight potential energy. The preliminary results of laboratory researches point at the greater efficiency a such drive*