

## COMPUTER AIDED TEST STAND OF HYBRID ELECTROMECHANICAL DRIVE OF THE HYDRAULIC EXCAVATOR OPERATING IN SIX-PHASE CYCLE

**Janusz Bonarowski**

Warsaw University of Technology  
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, Poland  
tel.:+48 22 8499738, fax:+48 22 8499995  
e-mail:imrc@simr.pw.edu.pl

**Przemysław Majewski**

Warsaw University of Technology  
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, Poland  
tel.:+48 22 8499738, fax:+48 22 8499995  
e-mail:imrc@simr.pw.edu.pl

**Jerzy Ocioszyński**

Warsaw University of Technology  
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, Poland  
tel.:+48 22 8499738, fax:+48 22 8499995  
e-mail:imrc@simr.pw.edu.pl

### **Abstract**

*In paper there is presented a method of the selection of hybrid elements electromechanical driving system of the hydraulic excavator and the laboratory-stand of hybrid drive of the excavator in working cycle phases. The article deals methods of the selection of hybrid electromechanical driving system of the hydraulic excavator, the selection of the engine, the set of electrochemical batteries and the electric driving engine.*

*In paper there were put the kinematical schema of hybrid electromechanical system of the hydraulic excavator, the schema of flow of power streams of the by source, theoretical four-phase working cycle of the excavator, process transient theoretical values of the power at battery clips at assumption of the combustion engine selection supplying the constant the value of the power equal 11.0 kW, characteristics of the power and torque at the function of the rotational speed of the S320 engine, the scheme stand of the research hybrid drive of the excavator in phases of working cycle.*

*For verifying presumptions there has been built the laboratory, computerized hybrid electromechanical driving system for the hydraulic working excavator in six phases working cycles. At the assumption of the duration of analysed phases of equal to the zero, the laboratory- system can also simulate the four-phase working cycle. The computer programme and the measuring- card make possible the storage and registrations select essential parameters for the energy- analysis of excavator phases working cycle.*

**Keywords:** working machines, hydraulic excavators, hybrid propulsion sets, combustion engines, energy recuperation, computer simulation

## KOMPUTEROWO WSPOMAGANE STANOWISKO BADAWCZE HYBRYDOWEGO ELEKTROMECHANICZNEGO NAPEĐU KOPARKI HYDRAULICZNEJ PRACUJĄCEJ W SZEŚCIOFAZOWYM CYKLU

### **Streszczenie**

*W artykule przedstawiono metodę doboru elementów hybrydowego elektromechanicznego układu napędowego koparki hydraulicznej oraz laboratoryjne stanowisko napędu hybrydowego koparki w fazach cyklu pracy. Artykuł dotyczy metody doboru hybrydowego elektromechanicznego układu napędowego koparki*

hydraulicznej, doboru silnika spalinowego, baterii akumulatorów elektrochemicznych oraz elektrycznego silnika napędowego.

W artykule zamieszczono schemat kinematyczny hybrydowego elektromechanicznego układu koparki hydraulicznej, schemat przepływu strumieni mocy źródła wtórnego, teoretyczny czterofazowy cykl pracy koparki, przebieg chwilowych teoretycznych wartości mocy na zaciskach akumulatora przy założeniu doboru silnika spalinowego dostarczającego stałą wartość mocy równą 11.0 kW, charakterystyki mocy i momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej silnika S320, schemat blokowy stanowiska badawczego napędu hybrydowego koparki w fazach cyklu pracy.

Dla zweryfikowania założeń zbudowano laboratoryjny, skomputeryzowany hybrydowy elektromechaniczny układ napędowy dla koparki hydraulicznej pracującej w sześciofazowym cyklu pracy. Przy założeniu czasu trwania analizowanych faz równego zera, układ laboratoryjny może również symulować czterofazowy cykl pracy. Program komputerowy i karta pomiarowa umożliwiają akwizycję i rejestrację wybranych parametrów niezbędnych do analizy energetycznej faz cyklu pracy koparki.

**Słowa kluczowe:** maszyny robocze, koparki hydrauliczne, hybrydowe zespoły napędowe, silniki spalinowe, rekuperację energii, symulacja komputerowa

## 1. Wstęp

Z analizy cyklu teoretycznego pracy koparki hydraulicznej wynika, że mimo zastosowania hydraulicznego układu napędowego wskaźnik jej wykorzystania w cyklu jest mały. W celu zwiększenia walorów eksploatacyjnych maszyny, a także zmniejszenia jednostkowego zużycia paliwa należy w większym stopniu wykorzystać moc silnika napędowego w cyklu pracy. Zakładając pracę silnika napędowego ze stałą prędkością obrotową i stałym obciążeniem zewnętrznym można nadmiar uzyskiwanej energii w stosunku do chwilowego zapotrzebowania akumulować, a następnie w przypadku większego jej zapotrzebowania ponownie wykorzystać. Uwzględniając rekuperację energii zapewni się większą moc dyspozycyjną źródła napędu umożliwiając między innymi przyspieszenie przebiegu operacji (skrócenie czasu cyklu pracy) bądź zmniejszenie mocy silnika napędowego. Tego typu zalety posiada hybrydowy układ napędowy koparek.

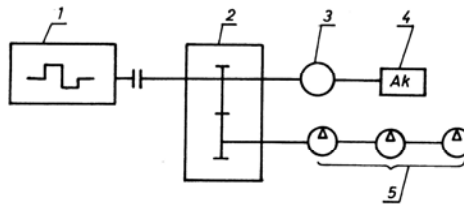
## 2. Metoda doboru hybrydowego elektromechanicznego układu napędowego koparki hydraulicznej

Przykładowym obiektem analizy jest koparka hydrauliczna typu 111 o pojemności łyżki 0.1 m<sup>3</sup>. Doboru elementów hybrydowego układu dokonano na podstawie parametrów cyklu teoretycznego pracy koparki przedstawiającego przebieg mocy silnika spalinowego w funkcji czasu dla sześciu faz cyklu pracy przy skrawaniu łyżką i określonego czasem trwania cyklu  $T_1=19.39$  s oraz zapotrzebowaną mocą średnią cyklu 8.23 kW. Silnik spalinowy takiego układu napędowego powinien zapewnić dostarczenie w czasie cyklu, mocy o stałej wartości równej mocy średniej 8.23 kW, z uwzględnieniem odpowiednich współczynników sprawności.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat kinematyczny hybrydowego elektromechanicznego układu napędowego, natomiast na rysunku 2 schemat przepływu strumieni mocy źródła wtórnego (akumulatora elektrochemicznego). W strumieniach przyjęto następujące współczynniki sprawności:

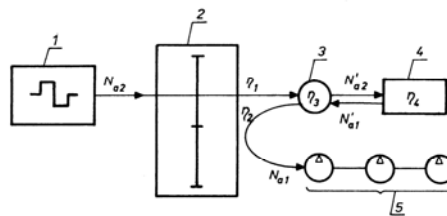
- $\eta_1 = 0.99$  - sprawność przepływu energii od silnika spalinowego do maszyny elektrycznej,
- $\eta_2 = 0.98$  - sprawność przepływu energii od maszyny elektrycznej do pomp hydraulicznych,
- $\eta_3 = 0.90$  - sprawność maszyny elektrycznej,
- $\eta_4 = 0.5 - 0.7$  - sprawność akumulatora elektrochemicznego w zależności od warunków pracy i stanu jego naładowania.

Powyższe współczynniki sprawności są wartościami uśrednionymi dla cyklu teoretycznego koparki hydraulicznej.



Rys. 1. Schemat kinematyczny hybrydowego elektromechanicznego układu koparki hydraulicznej o pojemności łyżki  $0.1 \text{ m}^3$  (1 – silnik spalinowy, 2 – przekładnia mechaniczna, 3 – maszyna elektryczna, 4 – akumulator elektrochemiczny, 5 – pompy hydrauliczne)

Fig. 1. Kinematics schema of hybrid electromechanical system of the hydraulic excavator of the  $0.1 \text{ m}^3$  spoon capacity of the (1 - combustion engine, 2 - mechanical gear, 3 - electric machine, 4 - electrochemical battery, 5 - hydraulic pumps)



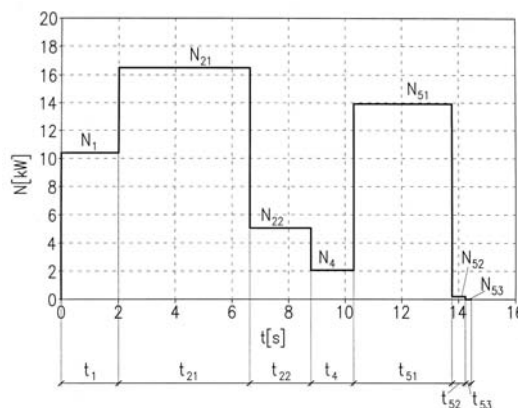
Rys. 2. Schemat przepływu strumieni mocy źródła wtórnego ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$  - współczynniki sprawności w poszczególnych strumieniach mocy)

Fig. 2. Schema of flow of streams of the power by ( $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$  - coefficients of the efficiency in each streams of the power) source

Przykładowy napęd hybrydowy elektromechaniczny, zaprojektowano dla koparki hydraulicznej o pojemności łyżki  $0.1 \text{ m}^3$ , która realizuje cykl pracy czterofazowy.

W czterofazowym cyklu przy skrawaniu łyżką, pozostawiono średnie moce i czasy fazy 1 i 4, natomiast fazy 2 i 3 oraz fazy 5 i 6 odpowiednio połączając skracając czas całego cyklu i zwiększając jednocześnie średnią wartość mocy. Taki czterofazowy cykl pracy może powstać w wyniku realizacji przez operatora maszyny, konkretnego eksploatacyjnego cyklu, a odpowiednie zmniejszenie czasu pracy tych faz a zwiększenie poboru mocy powstało zgodnie z możliwościami eksploatacyjnymi i konstrukcyjnymi koparki.

Na rysunku 3, przedstawiono czterofazowy teoretyczny cykl pracy koparki:



Rys. 3. Teoretyczny czterofazowy cykl pracy koparki  
Fig. 3. The theoretical four-phase working cycle of the excavator

Teoretyczne wartości mocy średniej i czasu tego cyklu są następujące:

- faza I,  $N_I = 10.4 \text{ kW}$ ,  $t_1 = 2.00 \text{ s}$ ,  
 faza II,  $N_{21} = 16.17 \text{ kW}$ ,  $t_{21} = 4.62 \text{ s}$ ,  $N_{22} = 5.07 \text{ kW}$ ,  $t_{22} = 1.57 \text{ s}$ ,  
 faza III,  $N_4 = 2.06 \text{ kW}$ ,  $t_4 = 1.51 \text{ s}$ ,  
 faza IV,  $N_{51} = 13.93 \text{ kW}$ ,  $t_{51} = 3.47 \text{ s}$ ,  $N_{52} = 0.23 \text{ kW}$ ,  $t_{52} = 0.47 \text{ s}$ .

Faza I czterofazowego cyklu pracy pozostaje niezmienną.

Pierwsza część fazy II jest obciążona przez czas 4.62 s mocą średnią 14.5 kW niezbędną do pokonania obrotu do wyładunku w ruchu przyspieszonym, powiększoną o część mocy przeznaczoną do podnoszenia urobku. Jest to moc równa 2 kW dostarczana do układu w czasie 4.62 s. Następnie w czasie równym 2.16 s i z mocą 5.1 kW urobek jest podnoszony. Po zakończeniu pierwszej części fazy II, następuje etap obrotu do wyładunku w ruchu opóźnionym. Czas tego obrotu nie jest wliczany do całego cyklu pracy.

Faza III cyklu czterofazowego pozostaje bez zmian.

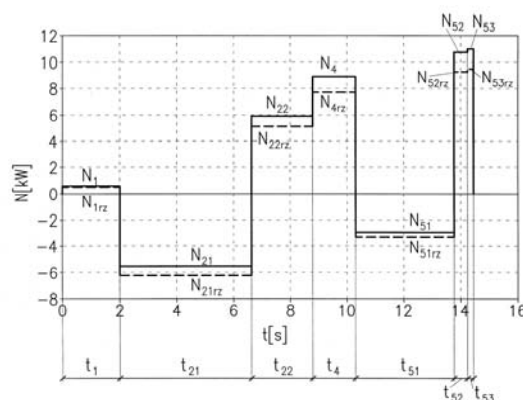
Pierwsza część fazy IV jest obciążona przez 3.47 s mocą średnią równą 13.9 kW niezbędną do powrotu wysięgnika koparki na urobisko w ruchu przyspieszonym obrotu. Następnie przez 0.47 s mocą 0.23 kW wysięgnik jest napędzany przy powrocie na urobisko w ruchu ustalonym obrotu. Natomiast w ruchu opóźnionym obrotu, w fazie powrotu na urobisko zwiększa się czas cyklu o 0.21 s.

Opuszczanie wysięgnika rozpoczyna się łącznie z obrotem powrotnym na urobisko, przy czym moc w trakcie opuszczania osprzętu jest pozyskiwana w czasie cyklu obrotu powrotnego wysięgnika.

Zapotrzebowanie mocy jest równe:

$$N_{sr} = \frac{N_1 t_1 + N_{21} t_{21} + N_{22} t_{22} + N_4 t_4 + N_{51} t_{51} + N_{52} t_{52}}{t + t_1 + t_{21} + t_{22} + t_4 + t_{51} + t_{52}} = 11.0 \text{ kW}. \quad (1)$$

Na rysunku 4 pokazano przebieg teoretycznych wartości mocy na zaciskach akumulatora przy założeniu doboru silnika spalinowego, dostarczającego stałą wartość mocy równą 11.0 kW.



Rys. 4. Przebieg chwilowych teoretycznych wartości mocy na zaciskach akumulatora przy założeniu doboru silnika spalinowego dostarczającego stałą wartość mocy równą 11.0 kW

Fig. 4. Run of transient theoretical values of the power at battery clips at assumption of the selection of the combustion engine supplying the constant the value of the power equal 11.0 kW

- $N_1 = 0.6 \text{ kW}$ ,  $t_1 = 2.09 \text{ s}$ ,  
 $N_{21} = -5.51 \text{ kW}$ ,  $t_{21} = 4.62 \text{ s}$ ,  
 $N_{22} = 5.92 \text{ kW}$ ,  $t_{22} = 2.16 \text{ s}$ ,

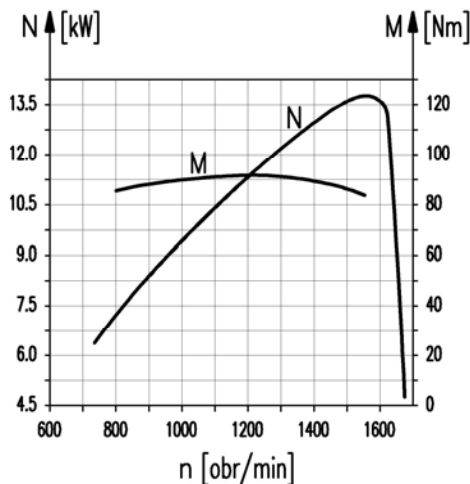
$N_4 = 8.93 \text{ kW}$ ,  $t_4 = 1.51 \text{ s}$ ,  
 $N_{51} = -2.93 \text{ kW}$ ,  $t_{51} = 3.47 \text{ s}$ ,  
 $N_{52} = 10.76 \text{ kW}$ ,  $t_{52} = 0.47 \text{ s}$ .  
 $N_{53} = 11.0 \text{ kW}$ ,  $t_{53} = 0.21 \text{ s}$ .

### 3. Dobór silnika spalinowego

Uwzględniając średnie wartości współczynników sprawności  $\eta_1$  i  $\eta_2$  można określić wartość mocy silnika spalinowego na wale silnika jako:

$$N_{a2} = \frac{N_{a1}}{\eta_1 \eta_2} = 11.34 \text{ kW}. \quad (2)$$

Wstępnie dobrano silnik ZS typu S320. Charakterystyki mocy i momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej silnika pokazano na rysunku 5:



Rys. 5. Charakterystyki mocy i momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej silnika S320  
 Fig. 5. Characterizations of the power and torque versus of the rotational speed of the S320 engine

Zakładając, że silnik ten będzie pracował z prędkością obrotową 1200 obr/min (która odpowiada między innymi prędkości obrotowej znamionowej maszyn elektrycznych prądu stałego), charakteryzuje się on małym zużyciem paliwa ( $2.4 \text{ dcm}^3/\text{h}$ ). Zgodnie z charakterystyką (rys. 5) moc przy tej prędkości obrotowej silnika jest równa 11.34 kW i odpowiada mocy określonej wstępnie. Ponadto przy prędkości obrotowej silnika równej 1200 obr/min występuje maksymalny moment obrotowy.

Energia wydatkowana z akumulatora niezbędna do realizacji cyklu jest określona jako:

$$W_{\text{wyl. ak.}} = N_{21} t_{21} + N_{51} t_{51} = 35.65 \text{ kW},$$

a średnia moc wyładowania akumulatora cyklu:

$$N_{\text{wyl. ak.}} = \frac{W_{\text{wyl. ak.}}}{T} = 2.45 \text{ kW}. \quad (3)$$

Uwzględniając współczynniki sprawności można określić średnią rzeczywistą moc wyładowania i ładowania akumulatora elektrochemicznego jako:

$$N'_{\text{wyl. ak.}} = \frac{N_{\text{wyl. ak.}}}{\eta_2 \eta_3} = 2.77 \text{ kW}, \quad (4)$$

$$N_{\text{ład. ak.}} = \frac{N_{\text{wyl. ak.}}}{\eta_1 \eta_3 \eta_4} = 3.93 \text{ kW.} \quad (5)$$

Na rysunku 4 pokazano przebiegi mocy źródła wtórno przy założeniu, że silnik spalinowy w czasie trwania cyklu dostarcza moc o stałej wartości równej 11.0 kW – linią ciągłą są zaznaczone przebiegi teoretyczne (sprawność przepływu energii jest równa 1; linią przerywaną – wartości mocy ładowania i wyładowania akumulatora z uwzględnieniem sprawności torów przepływu energii. Analizując wartości przedstawione na wykresie z rysunku 4 można określić średnią moc ładowania akumulatora przy założeniu, że stan energetyczny akumulatora na początku powtarzalnego cyklu pracy koparki jest równy stanowi energetycznemu po jego zakończeniu.

Wydatkowana z akumulatora elektrochemicznego energia w czasie trwania cyklu jest równa:

$$W_{\text{wyl. ak. rz.}} = N_{21\text{rz}} t_{21} + N_{51\text{rz}} t_{51} = 40.36 \text{ kW.} \quad (6)$$

Akumulator powinien być ładowany w cyklu w czasie 6.45 s. W tym czasie silnik spalinowy powinien uzupełnić energię wydatkowaną z akumulatora w trakcie trwania cyklu. Średnia moc ładowania odniesiona do wału silnika spalinowego jest równa:

$$N_{\text{ład1}} = \frac{W_{\text{wyl. ak. rz.}}}{t_1 + t_{22} + t_4 + t_{52} + t_{53}} \frac{1}{\eta_1 \eta_3 \eta_4} = 10.03 \text{ kW dla } \eta_4 = 0.7, \quad (7)$$

$$N_{\text{ład2}} = \frac{N_{\text{wyl. ak. rz.}}}{t_1 + t_{22} + t_4 + t_{52} + t_{53}} \frac{1}{\eta_1 \eta_3 \eta_4} = 14.0 \text{ kW dla } \eta_4 = 0.5. \quad (8)$$

Przyjmując moc silnika spalinowego równą 11.0 kW, sprawność akumulatora elektrochemicznego będzie równa  $\eta_4 = 0.63$ . Jak wynika z przyjętego czterofazowego cyklu pracy koparki, czas ładowania i wyładowania akumulatora jest krótki, zatem sprawność akumulatora jest mała.

#### 4. Dobór baterii akumulatorów elektrochemicznych

Podstawą doboru baterii akumulatorów elektrochemicznych do hybrydowego elektromechanicznego układu napędowego koparki są następujące dane: – maksymalny pobór mocy z akumulatora elektrochemicznego równy 6.24 kW (rys. 4); czas poboru maksymalnej mocy z akumulatora elektrochemicznego w cyklu równy 4.62 s (rys. 4); moc ładowania akumulatora elektrochemicznego równa 11.0 kW ( $\eta_4 = 0.63$ ); czas ładowania akumulatora elektrochemicznego w cyklu równy 6.45 s.

Dobierając baterię akumulatorów trakcyjnych wykorzystano katalog firmy DETA-Polska, która produkuje ogniwa i baterie trakcyjne i wybrano baterię zbudowaną z ogniwo ołowiowych trakcyjnych suchoładowanych z dodatnimi płytami pancernymi. Zgodnie z informacją producenta baterie te przeznaczone są do zasilania silników samojezdnych pojazdów i maszyn roboczych.

W analizowanym cyklu mechanizmów roboczych koparki hydraulicznej mocy maksymalnej 6.24 kW pobieranej z akumulatora w czasie 4.62 s odpowiada pobór prądu 29 A co odpowiada zmianie pojemności akumulatora około 0.036 Ah.

Natomiast mocy ładowania 11 kW w czasie 6.45 s odpowiada pobór prądu około 50 A co odpowiada pojemności akumulatora 0.089 Ah. Wartości pojemności elektrycznej akumulatora są niewspółmiernie małe w stosunku do pojemności oferowanych w katalogu.

Akumulator elektrochemiczny, stanowiący wtórne źródło energii w hybrydowych elektromechanicznych układach napędowych maszyn roboczych to nowe, specyficzne źródło energii elektrycznej wymagające specjalnych konstrukcji o różnych wartościach pojemności elektrycznej. Dlatego zasygnalizowano jedynie specyfikę dotyczącą filozofii technicznego doboru tego wtórnego źródła energii, które w rzeczywistym układzie pracy, na początku każdego cyklu powinno mieć podobną wartość pojemności elektrycznej.

## 5. Dobór elektrycznego silnika napędowego

Warunki pracy elektrycznego silnika napędowego koparki są podstawą jego doboru do hybrydowego elektromechanicznego układu napędowego. Silnik elektryczny współpracuje z silnikiem spalinowym i baterią akumulatorów elektrochemicznych napędzając pompy hydrauliczne, które z kolei uruchamiają mechanizmy robocze koparki. Maszyna elektryczna współpracując z baterią akumulatorów w okresie ich ładowania charakteryzuje się pracą prądnicową, a w okresach poboru mocy, pracą silnikową. Moc znamionowa silnika jest określona na podstawie mocy szczytowej 16.17 kW (rys. 3), którą w trakcie trwania cyklu pobiera zespół pomp hydraulicznych.

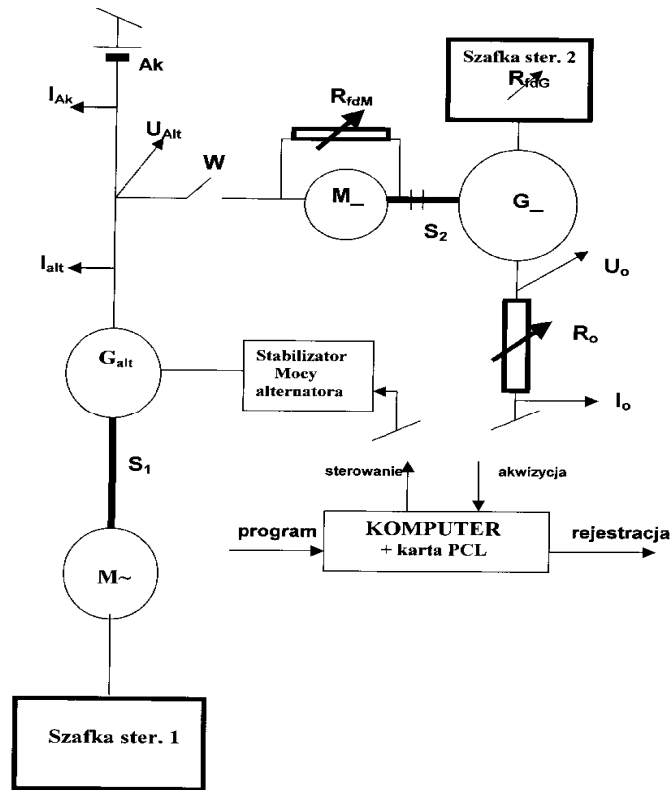
Przy współczynniku przeciążalności tego typu silnika elektrycznego prądu stałego w granicach 1.5 do 2 jego moc znamionowa powinna mieć wartość od 8.0 do 10.8 kW. Wg katalogów, silnik taki, pracujący z prędkością obrotową znamionową 1200 obr/min (takiej samej jak prędkość obrotowa silnika spalinowego) ma mocy znamionową 9.0 kW, przy napięciu 230 V i prądzie 47.2 A.

W procesie doboru elektrycznego silnika napędowego w elektrycznym układzie napędowym koparki hydraulicznej, jego moc można określić przyjmując do obliczeń sześciofazowy cykl pracy maszyny. Różnica w wartościach średniej mocy koparki, przy uwzględnieniu sześć i czterofazowego cyklu pracy nie ma praktycznego znaczenia, ze względu na przeciążalność silnika elektrycznego. Zgodnie z jego charakterystyką mechaniczną, przeciążalność ta jest zmienna, w granicach od 1.75 do 3. Wzrost wartości mocy średniej w czterofazowym cyklu pracy jest więc uwzględniana w zakresie dopuszczalnego zwiększenia średniej mocy.

Inaczej można postępować w przypadku obliczeń mocy elementów hybrydowego elektromechanicznego układu napędowego, w tym mocy silnika spalinowego. Szczególnie, w przypadku projektowania tego typu układu w koparkach hydraulicznych, w których pojemność łyżki jest w granicach 0.1 m<sup>3</sup>.

W układzie napędowym hybrydowym elektromechanicznym, silnik spalinowy stanowiący pierwotne źródło energii ma dwa zadania. Pierwsze, to przekazywanie stałej wartości mocy w cyklu do napędu urządzeń hydraulicznych koparki, drugie to jednoczesne doładowywanie akumulatora elektrochemicznego. Skuteczność drugiego zadania jest wymuszona warunkiem stanowiącym o prawidłowym działaniu układu, sprowadzającym się do reguły, która stwierdza, że pojemność elektryczna akumulatora na początku każdego kolejnego cyklu pracy ma mieć porównywalną (podobną) wartość. Bez niezbędnych analiz można stwierdzić, że praktycznie nadają się do tego silniki spalinowe, które mają moc większą od 10 kW. Analiza pracy koparki w sześciofazowym cyklu pracy wykazała, że moc silnika spalinowego (pierwotnego źródła energii układu) nie osiągnie wartości 10 kW. Ponieważ moc silnika spalinowego nie może być zwiększona (silnik nie jest tak przeciążalny, układ mógłby mieć techniczne trudności z realizacją czterofazowego cyklu pracy. Do doboru elementów

stanowiska laboratoryjnego, hybrydowego elektromechanicznego układu napędowego, wykorzystano sześciofazowy cykl pracy koparki.



Rys. 6. Schemat blokowy stanowiska badawczego napędu hybrydowego koparki w fazach cyklu pracy  
 Fig. 6. The block scheme of the research stand of hybrid drive of the excavator in working cycle phases

## 6. Komputerowo wspomagane stanowisko badawcze hybrydowego elektromechanicznego napędu koparki hydraulicznej pracującej w sześciofazowym cyklu

W celu zweryfikowania rozpatrywanych założeń zbudowano laboratoryjny, skomputeryzowany hybrydowy elektromechaniczny układ napędowy dla koparki hydraulicznej pracującej w sześciofazowym cyklu pracy. Przy założeniu czasu trwania wybranych (analizowanych faz) równego zero, układ laboratoryjny może również symulować czterofazowy cykl pracy.

W komputerze, zainstalowano autonomiczny program wymuszający realizację wybranego cyklu pracy koparki (istnieje możliwość doboru czasu trwania poszczególnych faz pracy oraz odpowiadających im obciążeń).

Źródłem pierwotnym zasilającym silnik wykonawczy (samowzbudny silnik prądu stałego, zasilany napięciem 12 V – M-) jest typowy alternator samochodowy (G<sub>alt</sub>) napędzany do zadanej prędkości obrotowej (program komputerowy) trójfazowym silnikiem indukcyjnym M~, który jest zasilany z sieci trójfazowej przez sterownik silników asynchronicznych LENZE 9323E.

Źródłem wtórnym, jest akumulator elektrochemiczny Ak o napięciu znamionowym 12 V. Regulowanym (komputerowo, zgodnie z przyjętym cyklem silnikiem). Jej – sterowany zgodnie z fazami cyklu pracy – prąd wzbudzenia symuluje zmienność obciążenia mocą w poszczególnych fazach cyklu.



Elementem dopasującym źródło pierwotne i wtórne do wartości chwilowych obciążeń (moc pobierana przez silnik prądu stałego może być większa, mniejsza lub równa wydajności alternatora) i zapewniającym spełnienie warunku: że stan energetyczny akumulatora na początku powtarzalnego cyklu pracy koparki jest równy stanowi energetycznemu po jego zakończeniu, jest Stabilizator Mocy alternatora, o nastawialnym poziomie stabilizacji. Schemat blokowy stanowiska badawczego napędu hybrydowego koparki w fazach cyklu pracy przedstawia rysunek 6.

Program komputerowy i karta pomiarowa PCL standardowo umożliwiają akwizycję i rejestrację wybranych parametrów niezbędnych do analizy energetycznej faz cyklu pracy koparki.

## 7. Uwagi końcowe

Projektując hybrydowy elektromechaniczny napęd koparki hydraulicznej, wzięto pod uwagę podstawowy warunek pracy tego układu, taki aby średnia moc ładowania akumulatora elektrochemicznego zapewniała, że jego stan energetyczny na początku powtarzalnego cyklu pracy koparki będzie równy stanowi energetycznemu po jego zakończeniu. Warunek ten jest trudny do praktycznego spełnienia, gdyż należy się liczyć z tym, że w trakcie pracy koparki sprawność akumulatora jest zmienna w granicach od 0,5 do 0,7.

W laboratoryjnym układzie napędowym istnieje możliwość akumulacji energii pierwotnego źródła, gdy moc źródła jest większa od aktualnej mocy oporów ruchu (obciążenie silnika prądu stałego). Ta dodatkowa energia, niezależnie od wykorzystania do usprawnienia pracy urządzeń ekologicznych, może być przeznaczona do ładowania akumulatora, zwiększając czas pracy koparki.

Ta naturalna właściwość związana z odzyskaniem i akumulacją energii jest ściśle związana ze zmianą kwalifikacji energetycznej obiektu zaliczając go do energooszczędnych o określonych korzyściach ekologicznych.

W artykule przedstawiono schemat blokowy komputerowo wspomaganego stanowiska badawczego hybrydowego elektromechanicznego napędu koparki, umożliwiającego realizację analizowanego uprzednio teoretycznie opracowanego cyklu pracy.

## Literatura

- [1] Ocioszyński, J., Makowski, J., *Studium pracy koparki jednonaczyniowej o złożonym (hybrydowym) źródle napędu*. Praca własna, Instytut MRC PW, Warszawa 1987.
- [2] Ocioszyński, J., *Energetyka energooszczędnych układów napędowych maszyn roboczych*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1994.
- [3] Ocioszyński, J., *Elektroenergetyka systemów i urządzeń źródeł energii pojazdów samochodowych i maszyn roboczych*, Warszawa 2005 (w druku).
- [4] Majewski, P.: Projekt badawczy KBN, 5 TO7C 018 25. (w realizacji, zak. 2006)
- [5] Bonarowski, J., Majewski, P., Ocioszyński, J., *Aplikacja doboru źródeł energii hybrydowego elektromechanicznego napędu koparki hydraulicznej*. X Międzynarodowa Konferencja Naukowa – Badania symulacyjne w technice samochodowej, Kazimierz Dolny – 30.05-1.06 2005 r., Polska Akademia Nauk, Kraków, 2005.

Artykuł powstał w wyniku projektu badawczego KBN 5 TO7C 018 25.

