

dr inż. ANDRZEJ DZIKOWSKI  
mgr inż. MAREK HEFCZYC  
mgr inż. JERZY KELLER  
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

## **Analiza porównawcza napędu ciągnienia górniczego kombajnu ścianowego w przypadku zastosowania silnika asynchronicznego klatkowego oraz bezszczotkowego silnika synchronicznego o magnesach trwałych**

### **Comparative analysis of the cutter loader hauling drive with an asynchronous squirrel-cage motor and with a synchronous brushless permanent-magnet motor**

*Artykuł prezentuje wyniki przeprowadzonej – z wykorzystaniem symulacji komputerowych – analizy porównawczej napędu ciągnienia górniczego kombajnu ścianowego wyposażonego w dwa typy silników napędowych: silnik asynchroniczny klatkowy oraz bezszczotkowy silnik synchroniczny o magnesach trwałych. Analiza komputerowa konwencjonalnego napędu ciągnienia kombajnu z silnikiem asynchronicznym klatkowym zasilanym poprzez przemiennik częstotliwości wyposażony w falownik skalarny, umożliwiający ciągłą regulację prędkości posuwu kombajnu, pozwoliła uzyskać szczegółowe parametry mechaniczne i elektryczne tego napędu. Następnie poddano symulacji komputerowej układ napędowy ciągnienia, zastępując silnik asynchroniczny klatkowy nowoczesnym, energooszczędnym silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. Uzyskane wyniki poddano analizie pod względem parametrów elektrycznych, mechanicznych oraz ekonomicznych. Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że zastosowanie silnika synchronicznego o magnesach trwałych do napędu ciągnienia górniczego kombajnu ścianowego poprawia parametry dynamiczne napędu, a także zmniejsza jego energochłonność, umożliwiając tym samym uzyskanie oszczędności ekonomicznych. Największe korzyści z zastosowania wysokosprawnego silnika o magnesach trwałych polegają na znacznym zmniejszeniu wydzielania się ciepła w silniku napędowym, przez co zminimalizowany może zostać układ chłodzenia. Uzyskane parametry dynamiczne, ekonomiczne i przede wszystkim termiczne napędu wyposażonego w silnik o magnesach trwałych zamiast wykorzystywanego powszechnie silnika asynchronicznego klatkowego przemawiają za stosowaniem tego typu silników w napędach ciągnienia górniczych kombajnów ścianowych.*

*The article features the results of a computer-simulation comparative analysis of the hauling drive of a cutter loader equipped with two types of motors – an asynchronous squirrel-cage motor and a synchronous brushless permanent-magnet motor. The computer analysis of the conventional hauling drive of a cutter loader with an asynchronous squirrel-cage motor, powered by a converter equipped with a scalar inverter enabling constant regulation of the cutter loader movement speed, allowed to achieve detailed mechanical and electrical parameters of this drive. Then, a computer simulation was carried out for a modern, energy-efficient synchronous permanent-magnet motor. The achieved results were analyzed with respect to electrical, mechanical and economical parameters. Based on the conducted analyses one can see that the use of the synchronous permanent-magnet motor for the cutter loader hauling drive improves dynamic parameters of the drive, lowers energy use and this way brings economical profits. The most significant profits resulting from the use of the high-efficiency permanent-magnet motor lie in lower heat emission in the driving motor which, in turn, allows to minimize the cooling system. The achieved dynamic and economical parameters and, most importantly, thermal parameters of the drive equipped with the permanent-magnet motor, instead of the commonly used asynchronous squirrel-cage motor, speak for the application of permanent-magnet motors in the hauling drives of cutter loaders.*

## 1. WPROWADZENIE

---

W polskich kopalniach podziemnych urabianie węgla kamiennego odbywa się przede wszystkim systemami ścianowymi za pomocą zmechanizowanych kompleksów ścianowych. W skład kompleksu ścianowego wchodzi maszyna urabiająca, którą może być kombajn ścianowy lub strug. Dynamika procesu urabiania ściany za pomocą kombajnu jest bardzo wysoka. W ostatnich latach nastąpił wzrost wydajności kompleksów ścianowych, znacząco wzrosła też moc silników zainstalowanych na kombajnie. Dotyczy to zarówno mocy silnika organu urabiającego, jak i mocy silnika posuwu kombajnu. Moce silników organów urabiających osiągają już 1000 kW, a kombajn jest wyposażony zwykle w dwa organy urabiające. Prędkości posuwu organów urabiających osiągają wartość 35 m/min, a siły uciągu przekraczają wartość 500 kN. Takie parametry techniczne kombajnu pozwalają uzyskać wydajność urabiania ściany węgla na poziomie 15 tys. Mg/dobę [1, 2].

Taka duża wydajność urabiania przez kombajn uzyskiwana jest na skutek zastosowania układów ciągnięcia zapewniających wysoką prędkość przemieszczania organów urabiających wzdłuż ściany węgla oraz stosowania dużych sił ciągnięcia. Układy ciągnięcia zapewniają bezstopniową regulację prędkości posuwu organów urabiających, która jest realizowana za pomocą napędów hydraulicznych bądź elektrycznych. Obecnie coraz częściej są stosowane napędy elektryczne, w których regulacja prędkości jest wykonywana za pomocą silników asynchronicznych klatkowych zasilanych z przemienników częstotliwości [1, 2, 3]. Mechanizm posuwu kombajnu zapewnia przeniesienie siły uciągu z koła napędowego ciągnika lub kół napędowych dwóch ciągników na elementy trasy jezdnej mocowane wzdłuż całej ściany do zastawek przenośnika zgrzeblowego. Kombajny ścianowe w polskim górnictwie węglowym są wyposażone w mechanizmy posuwu typu POLTRAK – z jednym kołem napędowym lub dwoma kołami napędowymi, typu EICOTRACK – z dwoma kołami napędowymi oraz typu DYNATRAC – z dwoma kołami napędowymi [1].

## 2. MODELOWANIE OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH W RZECZYWISTYCH UKŁADACH CIĄGIENIA KOMBAJNÓW ŚCIANOWYCH

---

Występujące w układach ciągnięcia kombajnów ścianowych obciążenia dynamiczne mają bardzo zło-

## 1. INTRODUCTION

---

The mining of hard coal in Polish underground mines is based on the longwall method with the use of longwall systems. A longwall system comprises a mining machine which can be a cutter loader or a plough. The dynamics of the mining process conducted with the use of a cutter loader is very high. Recently, due to the growing efficiency of longwall systems, the power of motors installed on cutter loaders has increased significantly. This refers both to the power of a cutting head motor and the power of a motor responsible for the cutter loader movement. The power values of cutting heads motors are as high as 1,000 kW, while a cutter loader is usually equipped with two cutting heads. The movement speed values of cutting heads reach 35 m/min while the hauling force values exceed 500 kN. Such technical parameters of a cutter loader allow to achieve high efficiency of longwall mining on the level of 15,000 Mg/24 h [1, 2].

Such high mining efficiency of a cutter loader is achieved due to the use of hauling systems which ensure high speed of cutting heads movement along the coal face and the use of high hauling forces. Hauling systems ensure infinitely variable adjustment of the movement speed of cutting heads. The adjustment is carried out by means of hydraulic or electrical drives. At present, electrical drives are used more and more frequently. Here, the adjustment is made by means of asynchronous squirrel-cage motors powered by converters [1, 2, 3]. The mechanism of the cutter loader movement ensures that the hauling force from the drive wheel of a haulage gear, or the drive wheels of two haulage gears, is carried over to the elements of the route which are installed along the whole coal face as far as the spill-plates of the chain-and-flight conveyor. Cutter loaders in the Polish mining sector are equipped with the following movement mechanisms: POLTRAK – with one drive wheel or two drive wheels, EICOTRACK – with two drive wheels, and DYNATRAC – with two drive wheels [1].

## 2. MODELLING DYNAMIC LOADS IN REAL HAULING SYSTEMS OF CUTTER LOADERS

---

Dynamic loads in the hauling systems of cutter loaders have very complex characteristics resulting

żony charakter, wynikający z prowadzonego procesu urabiania ściany węglowej. Na skutek kontaktu noży organów urabiających z calizną węglową na mechanizm ciągnięcia przenoszą się drgania szybkozmiennie o częstotliwości zależnej od prędkości urabiania. Dodatkowo w zależności od stosowanego mechanizmu ciągnięcia występuje modulacja momentu obciążenia wału silnika napędowego układu ciągnięcia, zależna od prędkości posuwu. W ramach niniejszego artykułu zamodelowano modulacje momentu występujące w bezciągnowym elektrycznym mechanizmie posuwu kombajnu ścianowego typu EICOTRACK 2BP. Ten typ mechanizmu posuwu charakteryzuje się przeniesieniem momentu silnika napędowego poprzez przekładnię mechaniczną na koło napędowe o zarysie ewolwentowym. Koło napędowe zazębia się z przekładkami sworzniowymi zamontowanymi do obudowy przenośnika zgrzeblowego, wywołując siłę pociągową przemieszczającą kombajn ścianowy wzdłuż urabianej ściany.

Ze względu na dostępność danych pomiarowych kombajnu ścianowego typu KSW-750E, zaczerpniętych z [1], zdecydowano przeprowadzić symulacje komputerowe dla warunków obciążenia występujących w czasie urabiania ściany węglowej o długości 250 m usytuowanej poziomo, czyli bez nachylenia podłużnego i poprzecznego. Symulacje zostały wykonane dla przypadku, w którym kombajn ścianowy, po osiągnięciu założonej prędkości posuwu, urabia czoło wyrobiska ścianowego organami urabiającymi ze stałą prędkością posuwu [11].

Symulacje komputerowe prowadzono z użyciem symulatora układów energoelektronicznych PSIM v.7.1 firmy PowerSim Inc. [4].

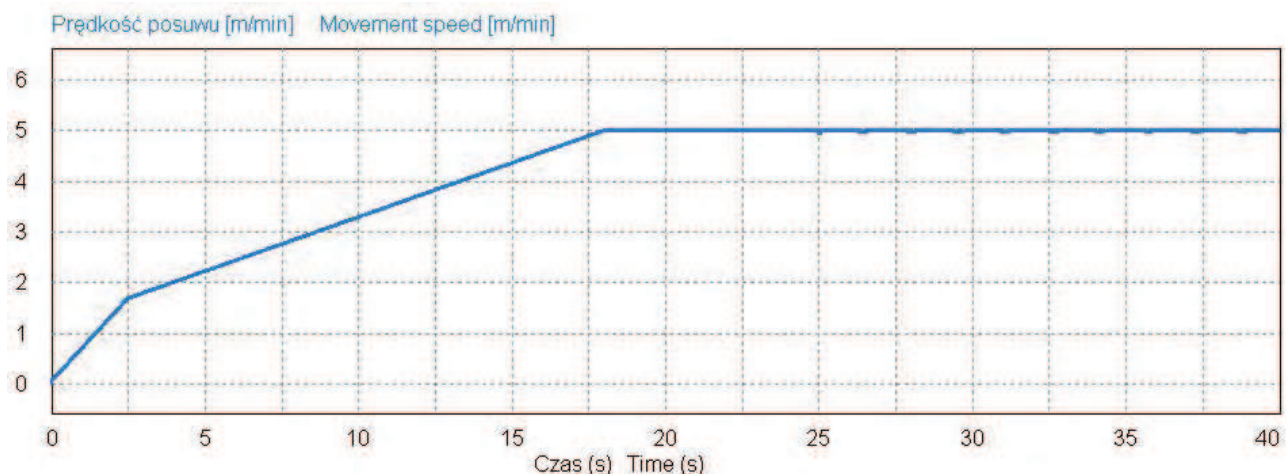
Na rys. 1. został przedstawiony zasymulowany przebieg prędkości posuwu kombajnu ścianowego w czasie rozpoczynania pracy kombajnu.

from the mining process of a coal face. Due to the contacts between the cutting head picks and the coal solid, the hauling mechanism receives quick-change vibrations with the frequency depending on the speed of cutting. Additionally, depending on the applied hauling mechanism, there is modulation of the load torque of the driving motor shaft in the hauling system. The modulation depends on the movement speed. Within this article, the authors modelled the torque modulations occurring in EICOTRACK 2BP chainless electrical mechanism of the cutter loader movement. In this type of a movement mechanism the torque of the driving motor is carried over, through a transmission gear, to the involute drive wheel. The drive wheel gears with peg bolts fixed to the casing of the chain-and-flight conveyor, causing a strong hauling force which moves the cutter loader along the coal face.

Due to the availability of measuring data of the KSW-750E cutter loader, taken from [1], the authors decided to carry out computer simulations for load conditions occurring during the mining process of a horizontal 250-metre coal face, i.e. without either gradient along strike or gradient along dip. The simulations were conducted for the case when a cutter loader, after achieving the assumed movement speed, cuts the face of the excavation with cutting heads with constant movement speed [11].

Computer simulations were conducted with the use of the PSIM v.7.1 power electronics simulator made by PowerSim Inc. [4].

Fig. 1 presents the simulated movement speed profile of the cutter loader at the moment it starts working.



Rys. 1. Profil prędkości posuwu kombajnu [11]

Fig. 1. Cutter loader movement speed profile [11]

Przebieg prędkości posuwu kombajnu przedstawiony na rys.1. jest zgodny z przebiegiem pomiarowym zamieszczonym w [1] i można wyróżnić w nim dwie fazy. W pierwszej, trwającej 18 sekund, następuje rozruch kombajnu ścianowego, prędkość posuwu narasta od zera do wartości zadanej, w tym przypadku równej 5 m/min. Wzrost prędkości posuwu kombajnu spowodowany jest narastaniem częstotliwości napięcia zasilania silników w napędzie ciągników, przy czym można wyróżnić w tej fazie dwie wartości przyśpieszenia: w przedziale czasowym 0 do 2,5 s prędkość posuwu narasta od 0 do wartości 1,7 m/min, natomiast w przedziale czasowym od 2,5 do 18 s prędkość posuwu narasta do wartości zadanej, w tym przypadku równej 5 m/min. W drugiej fazie, począwszy od 18. sekundy, kombajn ścianowy porusza się ze stałą zadaną prędkością posuwu i w 25. sekundzie następuje rozpoczęcie urabiania ściany przy stałej prędkości posuwu wynoszącej w tym przypadku 5 m/min.

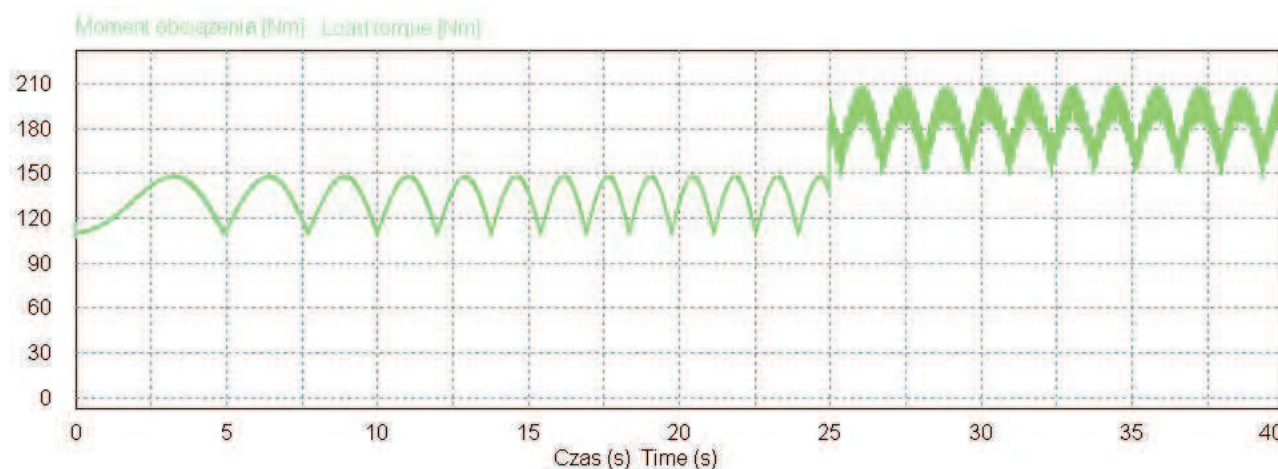
Na rys. 2. został przedstawiony zasymulowany przebieg dynamicznego obciążenia silnika w napędzie ciągnika kombajnu w czasie rozpoczynania pracy kombajnu z przebiegiem prędkości przedstawionym na rys. 1.

Przedstawiony na rys. 2. przebieg obciążenia dynamicznego w układzie ciągnięcia kombajnu ścianowego jest zgodny z przebiegiem pomiarowym zamieszczonym w [1] i cechuje się wyraźnym periodycznym charakterem wywołanym współdziałaniem zębów kół napędowych ze sworzniami zębarki. W charakterystyce momentu obciążenia widoczne są wyraźne drgania o okresie zazębienia zębów kół napędowych ze sworzniami zębarki. W fazie rozruchu kombajnu ścianowego okres zazębienia jest zmienny i w miarę zwiększania prędkości posuwu

The cutter loader movement speed profile presented in Fig. 1 complies with the measurement profile presented in [1] and it is possible to divide it into two phases. The first 18-second phase comprises the start-up of the cutter loader, when the movement speed increases from 0 to the assumed value, here equal to 5 m/min. The increase in the movement speed of the cutter loader results from the increasing frequency of power voltage of motors in the haulage gears drives. Still, it is possible to distinguish two values of acceleration in this phase: in the period from 0 to 2.5 seconds the movement speed increases from 0 to 1.7 m/min, while in the period from 2.5 to 18 seconds the movement speed increases up to the assumed value, here equal to 5 m/min. In the second phase, starting from the 18<sup>th</sup> second, the cutter loader moves with the constant set movement speed and in the 25<sup>th</sup> second it starts to cut the face with the constant movement speed of 5 m/min.

Fig. 2 presents the simulated profile of the dynamic load of a motor in the hauling drive of the cutter loader at the moment it starts working, along with the speed profile presented in Fig. 1.

The profile of the dynamic load in the cutter loader hauling system, presented in Fig. 2, is compliant with the measurement profile presented in [1] and has a periodical character resulting from the co-operation between the drive wheels and the pegs of the rack. The load torque characteristics show clear vibrations with the interval of meshing gear of drive wheels with the rack pegs. In the phase of the cutter loader start-up, the meshing gear interval is variable and gets shorter proportionally to the increasing movement speed of the cutter loader. In the set movement,



Rys. 2. Przebieg momentu obciążenia silnika napędu ciągnięcia kombajnu [11]

Fig. 2. Load torque of the motor in the cutter loader hauling drive [11]



kombajnu okres ten maleje. W ruchu ustalonym okres zazębiana zębów kół napędowych ze sworzniami zębataki jest stały i wynosi dla zadanej wartości prędkości posuwu 1,4 sekundy. Pomimo iż w fazie rozruchu prędkość posuwu kombajnu rośnie, obciążenie dynamiczne silników w napędzie jego ciągników jest co do wartości średniej w przybliżeniu stałe. Moment dynamiczny na wale silnika rozpatrywanego ciągnika oscyluje przy tym w granicach od 110 do 148 Nm, wartość średnia tego obciążenia kształtuje się na poziomie 133,6 Nm. Ponieważ w tym czasie, do 25. sekundy, nie była urabiana ściana, można więc przyjąć, że jest to ruch manewrowy kombajnu ścianowego.

W momencie rozpoczęcia urabiania ściany, od 25. sekundy, obciążenia dynamiczne wzrastają i mają postać drgań szybkozmiennych, których źródłem jest proces urabiania calizny węglowej organami urabiającymi. Wartość szczytowa obciążenia dynamicznego silnika ciągnika wynosi 208 Nm. Amplituda tego obciążenia, rozumiana jako zakres jego zmienności, wynosi 58 Nm. Wartość średnia tego obciążenia kształtuje się na poziomie 183,9 Nm i jest większa od występującej w ruchu manewrowym o 38%.

Na rys. 3. został przedstawiony przebieg mocy mechanicznej obciążającej silnik rozpatrywanego ciągnika kombajnu ścianowego w czasie rozpoczynania pracy kombajnu z przebiegiem prędkości przedstawionym na rys. 1. oraz obciążeniem dynamicznym przedstawionym na rys. 2.

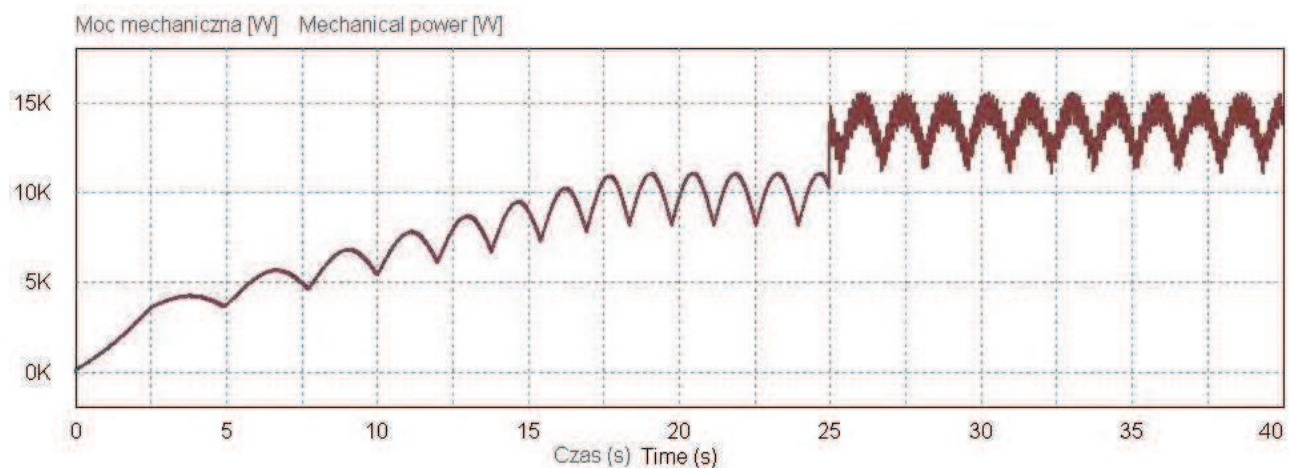
W przebiegu mocy mechanicznej obciążającej silnik w napędzie ciągnika, przedstawionej na rys. 3., występują także drgania o okresie zazębiana zębów koła napędowego ze sworzniami segmentów zębataki. W fazie rozruchu, gdy kombajn przyśpiesza do zadanej prędkości 5 m/min, moc mechaniczna silnika w napędzie ciągnika wzrasta. Po osiągnięciu ustalonej

the interval of gear meshing between the wheels and the rack pegs is constant and equals 1.4 s for the assumed movement speed. Though the movement speed of the cutter loader increases in the start-up phase, the dynamic load of motors in the haulage gear drive is more or less constant as far as the average value is concerned. The dynamic torque on the motor shaft of the tested haulage gear oscillates between 110 Nm and 148 Nm, while the average value of the load is 133.6 Nm. As at that time, up to the 25<sup>th</sup> second, the face has not been cut yet, it can be assumed that this is maneuver motion of the cutter loader.

When the cutting of the face begins, from the 25<sup>th</sup> second, the dynamic loads increase and have a form of quick-change vibrations which have their source in the process of the coal solid cutting with the use of cutting heads. The peak value of the dynamic load of the haulage gear motor is 208 Nm. The amplitude of this load, understood as the range of its variability, is 58 Nm. The average value of this load is 183.9 Nm and is 38% higher than the average value of the maneuver motion.

Fig. 3 presents the profile of the mechanical power loading the motor of the cutter loader haulage gear at the moment when the cutter loader starts working, along with the speed profile presented in Fig. 1 and dynamic load from Fig. 2.

In the profile of the mechanical power loading the motor in the haulage gear drive, featured in Fig. 3, there are also vibrations with the interval of meshing gear between the drive wheel and the rack pegs. In the start-up phase, when the cutter loader accelerates to 5 m/min, the mechanical power of the haulage gear motor increases. Once the assumed speed in the ma-



Rys. 3. Moc mechaniczna silnika napędu ciągnienia [11]

Fig. 3. Mechanical power of the hauling system motor [11]

prędkości w ruchu manewrowym moc mechaniczna rozpatrywanego ciągnika osiąga średnią wartość 10,05 kW. Wartość szczytowa mocy wynosi w tym przypadku 11,08 kW, amplituda zaś – 2,84 kW. W momencie rozpoczęcia urabiania ściany następuje wzrost mocy mechanicznej obciążającej silnik w napędzie rozpatrywanego ciągnika do wartości średniej, wynoszącej 13,76 kW. Wartość szczytowa mocy osiąga poziom 15,56 kW, zaś amplituda – 4,47 kW.

W większości stosowanych dzisiaj rozwiązań układów ciągnięcia kombajnów ścianowych przemienniki częstotliwości posiadają skalarne falowniki napięcia wystarczające do prawidłowej pracy asynchronicznych silników napędowych. W przypadku zastosowania silników synchronicznych o magnesach trwałych przemienniki częstotliwości muszą posiadać wektorowo sterowane falowniki napięcia. Falownik skalarny nie nadaje się do zasilania silników synchronicznych z magnesami trwałymi.

### **3. SYMULACJA UKŁADU NAPĘDOWEGO CIĄGNIKA KOMBAJNU ŚCIANOWEGO Z SILNIKIEM ASYNCHRONICZNYM KLATKOWYM**

Ze względu na dostęp do danych pomiarowych kombajnu typu KSW-750E, zamieszczonych w [1], poddano symulacji komputerowej układ ciągnięcia występujący w tym kombajnie. Kombajn KSW-750E o masie 42 Mg jest wyposażony w dwa organy urabiające napędzane silnikami o mocy 300 kW, przemieszczane wzdłuż ściany za pomocą dwóch ciągników elektrycznych napędzanych silnikami asynchronicznymi klatkowymi typu 2SG6 200S-4Af o mocy 60 kW każdy i prądzie znamionowym 44 A przy napięciu zasilania 1000 V i częstotliwości 50 Hz. Moment znamionowy tych silników wynosi 394 Nm, znamionowa prędkość obrotowa – 1455 obr./min. Znamionowy współczynnik mocy wynosi 0,87, a sprawność znamionowa – 0,91. Masa silnika wynosi 410 kg [5]. Silnik ciągnika porusza koło napędowe o zarysie ewolwentowym i liczbie zębów  $z = 12$ , współdziałające z zębatką sworzniową mechanizmu posuwu 2BP, w której nominalna podziałka sworzniowa wynosi 125 mm. Przemiennik częstotliwości zasilający silniki napędowe ciągników zapewnia płynną regulację prędkości posuwu kombajnu w zakresie od 0 do 10,5 m/min przy zachowaniu stałej wartości momentu napędowego silnika (wartość momentu znamionowego silnika). W tym zakresie prędkości nominalna siła posuwu wynosi 334,5 kN. Przy prędkości po-

neuver motion is achieved, the mechanical power of the haulage gear reaches the value of 10.05 kW. The peak value of the power is 11.08 kW in this case, while the amplitude – 2.84 kW. The moment the cutting on the face begins, the mechanical power loading the motor of the haulage gear increases to the average value of 13.76 kW. The peak value of the power reaches 15.56 kW, while the amplitude – 4.47 kW.

In the majority of today's hauling solutions for cutter loaders, the converters are equipped with scalar inverters which are enough to ensure proper operations of asynchronous motors. When synchronous permanent-magnet motors are used, the converters have to be equipped with vector inverters. Scalar inverters are not suitable to supply power to synchronous permanent-magnet motors.

### **3. SIMULATION OF A DRIVING SYSTEM OF A CUTTER LOADER HAULAGE GEAR WITH AN ASYNCHRONOUS MOTOR**

As the authors had access the measurement data of the KSW-750E cutter loader, presented in [1], the hauling system of this cutter loader was selected for computer simulation. KSW-750, a 42-tonne cutter loader is equipped with two cutting heads powered by 300 kW motors, moved along the coal face by means of two electrical haulage gears powered with 2SG6 200S-4Af asynchronous squirrel-cage motors with the power of 60 kW each and rated current of 44 A, at the power voltage of 1,000 V and frequency of 50 Hz. The rated torque of these motors is 394 Nm, while the rated rotational speed – 1,455 rotations/min. The rated power factor is 0.87, while the rated efficiency – 0.91. The motor weights 410 kg [5]. The motor of the haulage gear moves an involute drive wheel, with the number of cogs  $z = 12$ , which cooperates with the rack of the 2BP movement mechanism, where the rated pitch of teeth equals 125 mm. The converter, supplying power to the motors of haulage gears, ensures flexible regulation of the cutter loader movement speed in the range from 0 to 10.5 m/min at the constant value of the driving torque of the motor (value of the rated torque of the motor). In this speed range, the rated forward pressure is 334.5 kN. At the movement speed from 10.5 m/min to 21.5 m/min the inverter of the converter works at

suwu z zakresu od 10,5 do 21,5 m/min falownik przemiennika częstotliwości pracuje przy stałej mocy, umożliwiając uzyskanie malejącej siły posuwu od 334,5 do 167,25 kN [1].

Dla powyższych danych przeprowadzono symulację urabiania ściany węglowej o długości 250 m oraz przy prędkości urabiania 5 m/min (rys. 1), co przy długości ściany 250 m daje czas urabiania ściany równy 50 min. Na podstawie danych o przekładni mechanicznej i parametrów koła napędowego współdziałającego z zębatką, przedstawionych powyżej, dla prędkości urabiania 5 m/min prędkość obrotowa wału silnika napędowego ciągnika wynosi 713 obr./min. Silnik napędowy jest zatem zasilany z przemiennika z częstotliwością narastającą od 1 Hz do wartości 24,5 Hz w 18. sekundzie z uwzględnieniem poślizgu przy obciążeniu silnika momentem. Następnie przez 50 minut urabianie realizowane jest ze stałą prędkością.

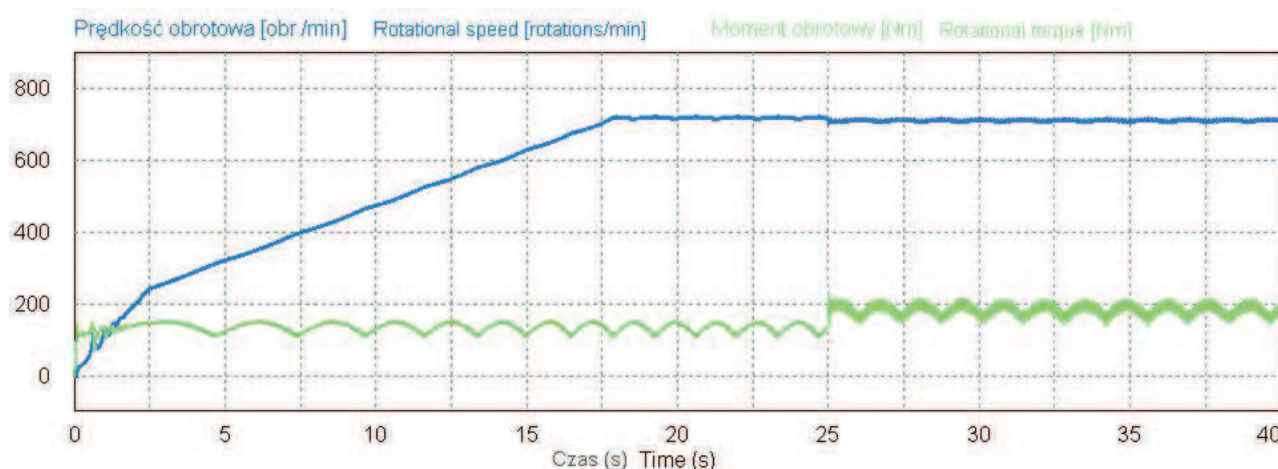
Na rys. 4. został przedstawiony przebieg prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik w czasie rozpoczynania pracy kombajnu. W przedstawionym tu przebiegu prędkości obrotowej wału silnika można wyróżnić następujące charakterystyczne wartości. W czasie 2,5 sekundy od włączenia prędkość obrotowa wału silnika osiąga wartość 242 obr./min. W 18. sekundzie prędkość obrotowa ustala się i w przedziale czasowym pomiędzy 18. a 25. sekundą średnia wartość prędkości obrotowej wału silnika wynosi 719 obr./min. Jest to jeszcze ruch manewrowy. Od 25. sekundy następuje rozpoczęcie urabiania ściany i w tym czasie na skutek zwiększonego momentu obciążenia zwiększa się poślizg silnika zasilanego ze stałą częstotliwością, a prędkość obrotowa spada. W przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą średnia wartość prędkości

constant power enabling to achieve the decreasing forward pressure from 334.5 kN to 167.25 kN [1].

The above data were used to make a simulation of a 250-metre coal face mining at the cutting speed of 5 m/min (Fig. 1). This gives the mining time equal to 50 min. Based on the data about the gear and the above presented parameters of the drive wheel cooperating with the rack, for the cutting speed of 5 m/min, the rotational speed of the shaft of the haulage gear motor is 713 rotations/min. Thus the driving motor is supplied from the converter with the frequency increasing from 1 Hz to 24.5 Hz in the 18<sup>th</sup> second while the slip of the motor load torque is taken into consideration. Then, for 50 minutes, the cutting is carried out at constant speed.

Fig. 4 features the profile of rotational speed and electromagnetic torque produced by the motor at the moment the cutter loader starts working.

The profile of the rotational speed, presented in Fig. 4, shows the following characteristic values. 2.5 seconds after the switch-on, the rotational speed of the motor shaft achieves 242 rotations/min. In the 18<sup>th</sup> second the rotational speed gets constant and in the period between the 18<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> second the average value of the rotational speed of the motor shaft is 719 rotations/min. This is still maneuver motion. In the 25<sup>th</sup> second the cutting of the face begins and at that time, due to the increased load torque, the slip of the motor, supplied with constant frequency, increases, while the rotational speed drops. Between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second the average value of the rotational speed of the shaft is 713 rota-



Rys. 4. Przebieg prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik [11]

Fig. 4. Rotational speed and electromagnetic torque produced by the motor [11]

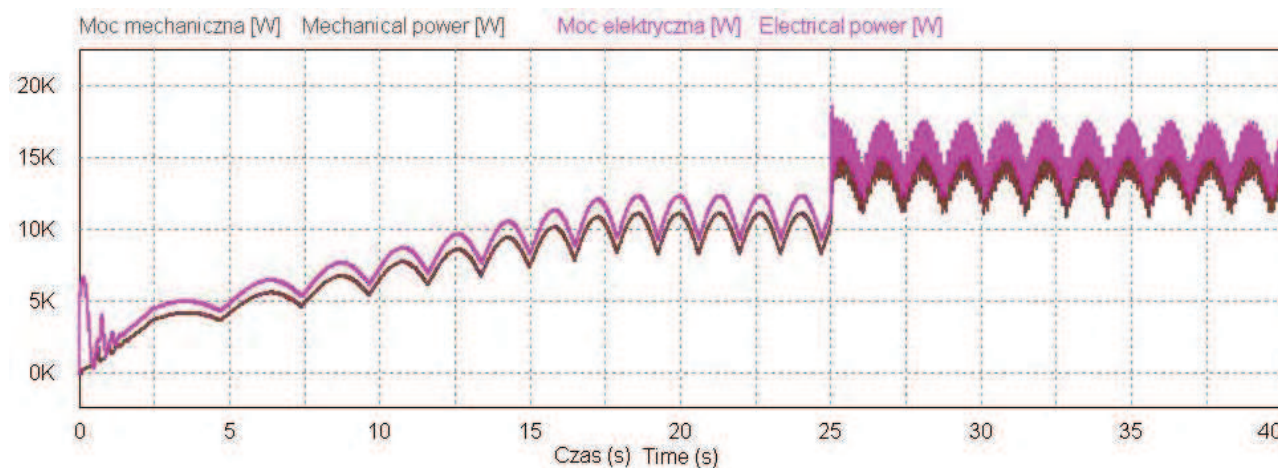


obrotowej wału silnika wynosi 713 obr./min. W przedstawionym na rys. 4. przebiegu momentu elektromagnetycznego można wyróżnić dwa charakterystyczne przedziały. Do 25. sekundy, czyli w ruchu manewrowym, średnia wartość momentu wynosi 134 Nm. Podczas urabiania ściany, czyli w przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą średnia wartość momentu wynosi 184 Nm.

Na rys. 5. został przedstawiony przebieg oddawanej mocy mechanicznej i pobieranej mocy elektrycznej przez silnik napędu posuwu w czasie rozpoczęcia pracy przez kombajn ścianowy. W przedstawionym tu przebiegu mocy można wyróżnić następujące charakterystyczne wartości. W przedziale czasowym pomiędzy 18. a 25. sekundą, czyli podczas ruchu manewrowego z ustaloną prędkością, średnia wartość mocy mechanicznej oddawanej przez silnik wynosi 10,09 kW, a mocy elektrycznej pobieranej – 11,24 kW. W przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą, czyli podczas urabiania ściany z ustaloną prędkością, średnia wartość mocy mechanicznej oddawanej przez silnik wynosi 13,75 kW, a mocy elektrycznej pobieranej – 15,25 kW.

tions/min. In the profile of the electromagnetic torque, presented in Fig. 4, it is possible to distinguish two characteristic phases. Up to the 25<sup>th</sup> second, i.e. during the maneuver motion, the average value of the torque is 134 Nm. During the cutting operations of the face, i.e. between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second, the average value of the torque is 184 Nm.

Fig. 5 presents the profile of the mechanical output power and electrical input power of the movement driving motor at the moment when the cutter loader starts working. The power profile, presented in Fig. 5, allows to distinguish the following characteristic values. Between the 18<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> second, i.e. during the maneuver motion with set speed, the average value of the mechanical output power of the motor is 10.09 kW, while the electrical input power – 11.24 kW. Between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second, i.e. when the coal face is cut with set speed, the average mechanical output power of the motor is 13.75 kW, while the electrical input power – 15.25 kW.



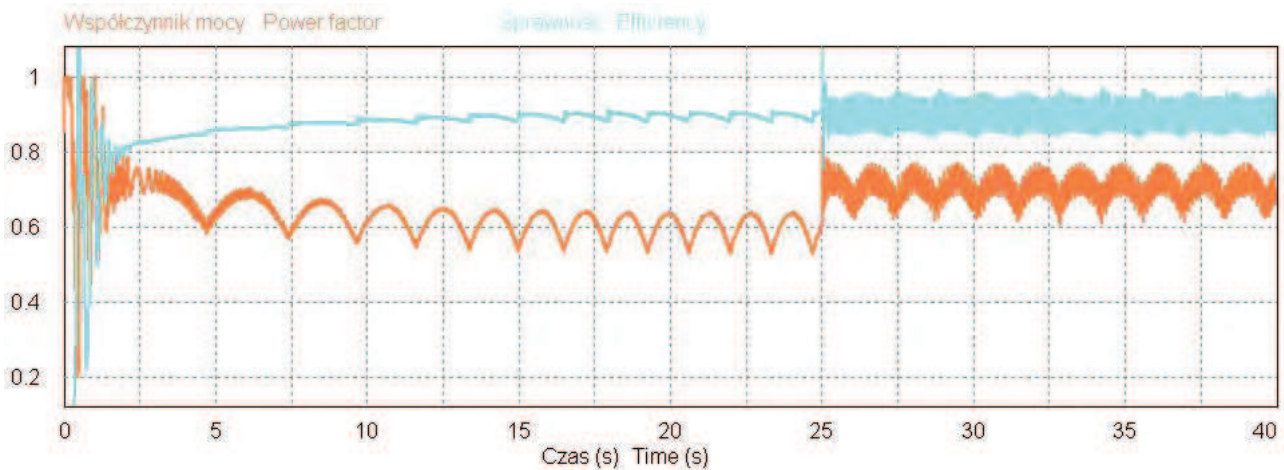
Rys. 5. Przebieg mocy mechanicznej oddawanej i mocy elektrycznej pobieranej przez silnik [11]

Fig. 5. Profile of the mechanical output power and electrical input power of the motor [11]

Na rys. 6. został przedstawiony przebieg współczynnika mocy i sprawności silnika napędu posuwu w tym czasie. W przedstawionym tu przebiegu współczynnika mocy można wyróżnić następujące charakterystyczne wartości. W przedziale czasowym pomiędzy 18. a 25. sekundą, czyli podczas ruchu manewrowego z ustaloną prędkością, średnia wartość współczynnika mocy wynosi 0,602, a średnia wartość sprawności wynosi 0,898. Pojawienie się w 25. sekundzie sprawności wyższej od 1 wynika z faktu, że w 25. sekundzie następuje nagły wzrost momentu ob-

Fig. 6 features the profile of the power factor and the efficiency of the movement driving motor during that time. In Fig. 6 it is possible to distinguish the following characteristic values. Between the 18<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> second, i.e. during the maneuver motion with set speed, the average value of the power factor is 0.602, while the average value of efficiency – 0.898. In the 25<sup>th</sup> second the efficiency is higher than 1 which results from the fact that in the 25<sup>th</sup> second there is a sudden increase of the load torque due to the contact of the cutting head with the coal face. As a result of that, the





Rys. 6. Przebieg współczynnika mocy i sprawności silnika [11]

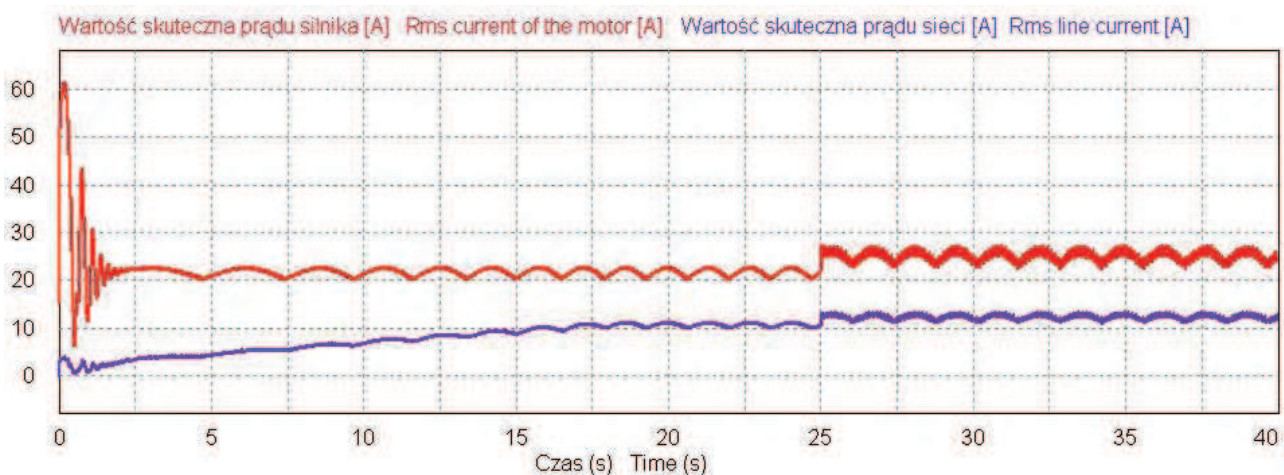
Fig. 6. Profile of power factor and motor efficiency [11]

ciężenia na skutek kontaktu organu urabiającego ze ścianą węglową, co powoduje szybkie zmniejszenie się prędkości obrotowej wirnika silnika napędowego i wykorzystanie energii kinetycznej, zgromadzonej w wirujących masach wirnika. Pozwala to dostarczyć w krótkim czasie więcej mocy mechanicznej, niż pobiera silnik z sieci. W przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą, czyli podczas urabiania ściany z ustaloną prędkością, średnia wartość współczynnika mocy wynosi 0,706, a średnia wartość sprawności – 0,902.

Na rys. 7. zostały przedstawione przebiegi wartości skutecznej prądu płynącego przez silnik napędu posuwu oraz prądu płynącego z sieci w tym czasie.

rotational speed of the rotor in the driving motor decreases quickly and the kinetic energy stored in the rotor is used. Thanks to that, more mechanical power is supplied than the motor takes from the grid. Between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second, i.e. when the coal face is cut with set speed, the average value of the power factor is 0.706, while the average value of efficiency – 0.902.

Fig. 7 presents the profiles of rms current flowing through the movement driving motor and rms line current at the same time.



Rys. 7. Przebiegi wartości skutecznej prądu płynącego przez silnik i prądu płynącego z sieci [11]

Fig. 7. Profiles of rms current flowing through the motor and rms line current [11]

W przedstawionym na rys. 7. przebiegu wartości skutecznej prądu płynącego przez silnik można wyróżnić następujące charakterystyczne wartości: w przedziale czasowym pomiędzy 18. a 25. sekundą, czyli podczas ruchu manewrowego z ustaloną prędkością, średnia wartość wartości skutecznej prądu płynącego przez silnik wynosi 21,8 A, natomiast średnia wartość skuteczna prądu płynącego z sieci do przemiennika częstotliwości zasilającego silnik wynosi 10,8 A; w przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą, czyli podczas urabiania ściany z ustaloną prędkością, średnia wartość skuteczna prądu płynącego przez silnik wynosi 25,2 A, natomiast średnia wartość skuteczna prądu płynącego z sieci do przemiennika częstotliwości zasilającego silnik wynosi 12,5 A.

#### **4. SYMULACJA UKŁADU NAPĘDOWEGO CIĄGNIKA KOMBAJNU Z SILNIKIEM SYNCHRONICZNYM O MAGNESACH TRWAŁYCH**

Zastosowanie silników synchronicznych o magnesach trwałych, charakteryzujących się większą przeciążalnością momentem obciążenia od silników asynchronicznych klatkowych, powinno polepszyć charakterystykę napędu ciągników kombajnów, w których to układach mamy do czynienia z dużą dynamiką występujących momentów obciążenia. Dodatkowo zastosowanie silników synchronicznych o magnesach trwałych, posiadających wyższą sprawność w stosunku do silników asynchronicznych klatkowych, powinno przynieść zmniejszenie wartości płynących prądów oraz zmniejszenie pobranej z sieci energii elektrycznej i związane z tym oszczędności ekonomiczne [6, 7, 10].

W celu potwierdzenia powyższych założeń przeprowadzono symulacje napędu ciągników wyposażonych w powyższe dwa typy silników. Do symulacji napędu zastosowano silnik typu LSRPM 200L1, bez klatki rozruchowej, o mocy znamionowej 65 kW, momencie znamionowym 207 Nm, prędkości znamionowej 3000 obr./min i sprawności znamionowej 96% oraz masie 153 kg [8]. Układ napędowy kombajnu ścianowego, w tym przełożenie przekładni, pozostały bez zmian.

Przeprowadzono symulację urabiania ściany węglowej o tej samej długości 250 m przy warunkach profilu prędkości przedstawionych na rys. 1., czyli przy prędkości urabiania 5 m/min, co przy długości ściany 250 m daje czas urabiania ściany równy 50 min. Na podstawie danych przedstawionych w punkcie 3. dla prędkości urabiania 5 m/min prędkość obrotowa wału silnika napędowego ciągnika wynosi

In Fig. 7 it is possible to distinguish the following characteristic values: between the 18<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> second, i.e. during the maneuver motion with set speed, the average value of rms current flowing through the motor is 21.8 A, while the average value of rms line current flowing to the converter, which supplies energy to the motor, is 10.8 A. Between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second, i.e. when the face is cut with set speed, the average value of rms current flowing through the motor is 25.2 A, while the average rms line current flowing to the converter is 12.5 A.

#### **4. SIMULATION OF A DRIVING SYSTEM OF A CUTTER LOADER HAULAGE GEAR WITH A SYNCHRONOUS PERMANENT-MAGNET MOTOR**

The use of synchronous permanent-magnet motors, which have higher load torque than asynchronous squirrel-cage motors, should improve the characteristics of cutter loader haulage gears drives. In these drives there is high dynamics of load torques. Additionally, the use of synchronous permanent-magnet motors, which have higher efficiency than asynchronous squirrel-cage motors, should decrease the values of flowing currents and lower the use of electrical energy – thus bring certain economical profits [6, 7, 10].

In order to confirm the above assumptions, there was a simulation made of haulage gears drives equipped with two above mentioned types of motors. To conduct the simulation, an LSRPM 200L1 motor was used: without a cage, with rated power of 65 kW, rated torque – 207 Nm, rated speed – 3,000 rotations/min, rated efficiency – 96%, and weight – 153 kg [8]. The driving system of the cutter loader, including the gear position, remained unchanged.

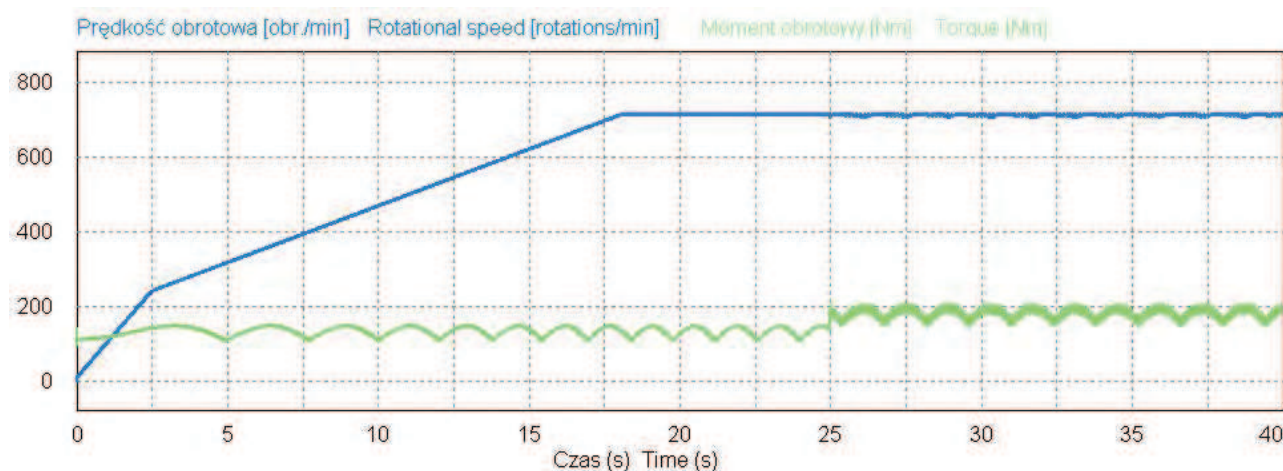
There was a simulation carried out for a coal face of the same length (250 m) at the speed profile conditions from Fig. 1, i.e. cutting speed of 5 m/min, which results in the cutting time of the face equal to 50 min. Based on the data presented in section 3, for the cutting speed of 5 m/min, the rotational speed of the motor shaft in the driving motor of the cutter loader is 713 rotations/min. Thus the motor is sup-

713 obr./min. Silnik napędowy jest zatem zasilany z przemiennika częstotliwości, w którym falownik wyjściowy steruje silnikiem, wykorzystując wektorowy algorytm sterowania z nadrzędną regulacją prędkości [9]. Prędkość obrotowa silnika narasta do 18. sekundy zgodnie z profilem prędkości posuwu kombajnu przedstawionym na rys. 1. Od 18. sekundy prędkość obrotowa silnika nie zmienia się i jest stała pomimo rozpoczęcia w 25. sekundzie urabiania ściany. Następnie przez 50 minut urabianie realizowane jest ze stałą prędkością.

Na rys. 8. został przedstawiony przebieg prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik w czasie rozpoczynania pracy kombajnu.

plied from the converter, in which the output inverter controls the motor with the use of the vector control algorithm with superior speed regulation [9]. The rotational speed of the motor increases up to the 18<sup>th</sup> second in compliance with the profile of the cutter loader movement speed presented in Fig. 1. From the 18<sup>th</sup> second the rotational speed of the motor does not change and remains constant, though the cutting of the coal face begins in the 25<sup>th</sup> second. Then, for 50 minutes, the cutting is carried out with constant speed.

Fig. 8 presents the profile of the rotational speed and electromagnetic torque produced by the motor at the moment the cutter loader starts working.



Rys. 8. Przebieg prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik [11]

Fig. 8. Profile of rotational speed and electromagnetic torque produced by the motor [11]

W przedstawionym na rys. 8. przebiegu prędkości obrotowej wału silnika można wyróżnić następujące charakterystyczne wartości: w czasie 2,5 sekundy od włączenia prędkość obrotowa wału silnika osiąga wartość 243 obr./min; w 18. sekundzie prędkość obrotowa ustala się i w przedziale czasowym pomiędzy 18. a 25. sekundą średnia wartość prędkości obrotowej wału silnika wynosi 713 obr./min. Jest to jeszcze ruch manewrowy. Od 25. sekundy następuje rozpoczęcie urabiania ściany i w tym czasie pomimo zwiększonego momentu obciążenia prędkość obrotowa wału silnika nie zmienia się, ponieważ wirnik silnika wiruje z prędkością synchroniczną do częstotliwości zasilania silnika. Zwiększa się tylko kąt opóźnienia wektora strumienia magnetycznego, wytwarzanego przez magnesy trwale umieszczone w wirniku, w stosunku do wektora pola elektromagnetycznego, wytwarzanego przez stojan. W przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą średnia wartość prędkości obrotowej wału silnika wynosi

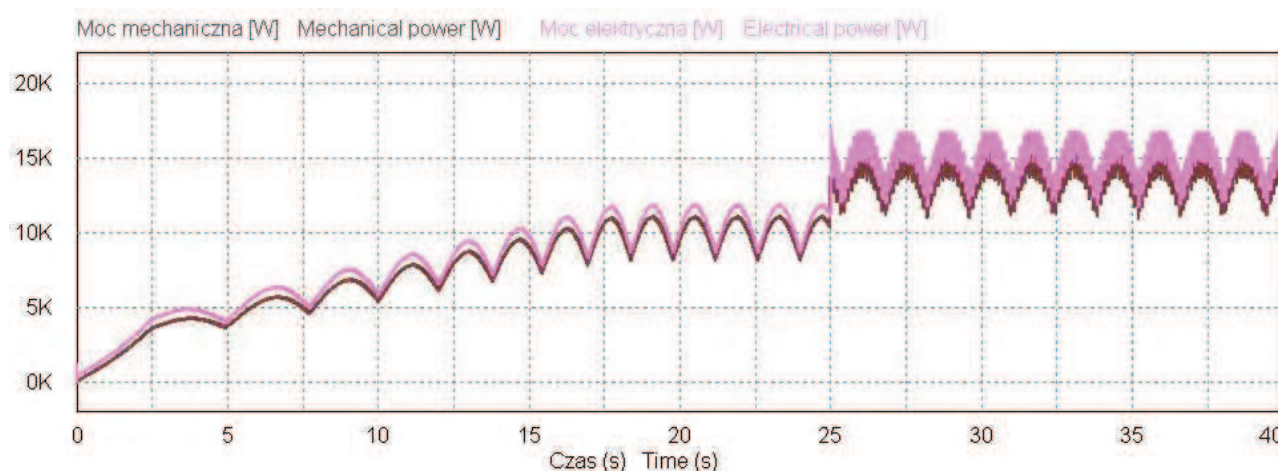
zatem

In Fig. 8 it is possible to distinguish the following characteristic values: 2.5 seconds after the switch-on the rotational speed of the motor shaft achieves 243 rotations/min, in the 18<sup>th</sup> second the rotational speed gets constant and in the period between the 18<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> second the average value of the rotational speed of the motor shaft is 713 rotations/min. This is still maneuver motion. From the 25<sup>th</sup> second the coal face starts to be cut and at that time, though the load torque is higher, the rotational speed of the motor shaft does not change because the rotor rotates with the speed which is synchronous with the frequency of the energy supplied to the motor. What is bigger is the delay angle of the vector of the magnetic flux produced by permanent magnets placed in the rotor, in relation to the vector of the electromagnetic field produced by the stator. Thus, between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second the average value of rotational speed of the motor shaft is also 713 rotations/min. In Fig. 8 it



is possible to distinguish two characteristic phases in również 713 obr./min. W przedstawionym na rys. 8. przebiegu momentu elektromagnetycznego można wyróżnić dwa charakterystyczne przedziały. Do 25. sekundy, czyli w ruchu manewrowym, średnia wartość momentu wynosi 134 Nm. Podczas urabiania ściany, czyli w przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą, średnia wartość momentu wynosi 184 Nm.

Na rys. 9. został przedstawiony przebieg oddawanej mocy mechanicznej i pobieranej mocy elektrycznej przez silnik napędu posuwu w czasie rozpoczynania pracy przez kombajn ściany.



Rys. 9. Przebieg mocy mechanicznej oddawanej i mocy elektrycznej pobieranej przez silnik [11]

Fig. 9. Profile of mechanical output power and electrical input power of the motor [11]

W przedstawionym na rys. 9. przebiegu mocy można wyróżnić następujące charakterystyczne wartości: w przedziale czasowym pomiędzy 18. a 25. sekundą, czyli podczas ruchu manewrowego z ustaloną prędkością, średnia wartość mocy mechanicznej oddawanej przez silnik wynosi 10,02 kW, a mocy elektrycznej pobieranej 10,7 kW; w przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą, czyli podczas urabiania ściany z ustaloną prędkością, średnia wartość mocy mechanicznej oddawanej przez silnik wynosi 13,72 kW, a mocy elektrycznej pobieranej – 14,87 kW.

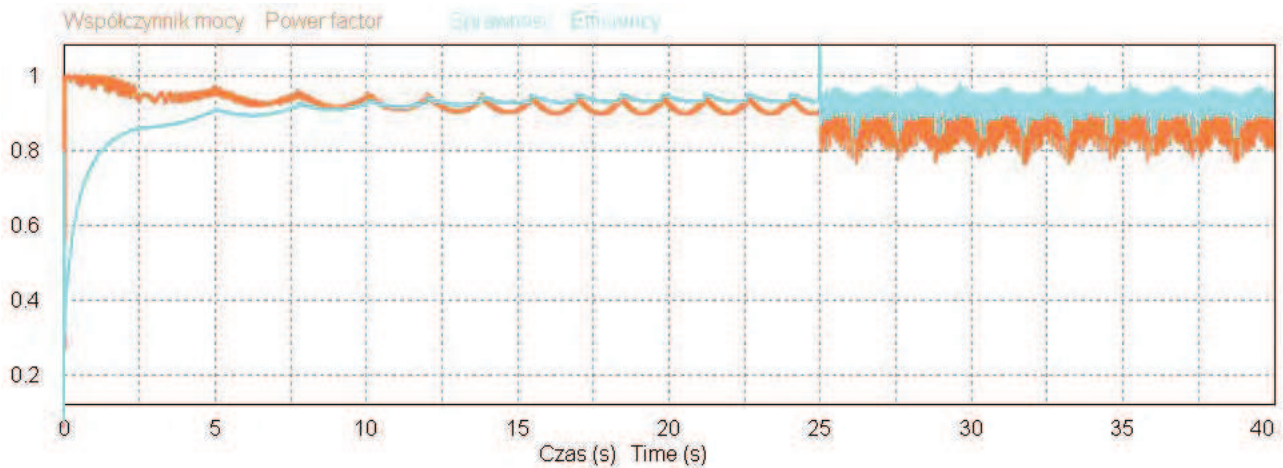
Na rys. 10. został przedstawiony przebieg współczynnika mocy i sprawności silnika napędu posuwu w tym czasie. W przedstawionym tu przebiegu współczynnika mocy można wyróżnić następujące charakterystyczne wartości: w przedziale czasowym pomiędzy 18. a 25. sekundą, czyli podczas ruchu manewrowego z ustaloną prędkością, średnia wartość współczynnika mocy wynosi 0,915, a średnia wartość sprawności wynosi 0,937. Pojawienie się w 25. sekundzie sprawności wyższej od 1 wynika z faktu, że w 25. sekundzie następuje nagły wzrost momentu

the profile of the electromagnetic torque. Up to the 25<sup>th</sup> second, i.e. during the maneuver motion, the average value of the torque is 134 Nm. During the cutting operations on the coal face, i.e. between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second, the average value of the torque is 184 Nm.

Fig. 9 features the profile of the mechanical output power and electrical input power of the movement driving motor at the moment when the cutter loader starts working.

In the power profile presented in Fig. 9 it is possible to distinguish the following characteristic values: between the 18<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> second, i.e. during the maneuver motion with set speed, the average value of mechanical output power of the motor is 10.02 kW, and the electrical input power – 10.7 kW; between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second, i.e. when the coal face is cut with set speed, the average value of mechanical output power of the motor is 13.72 kW, and the electrical input power – 14.87 kW.

Fig. 10. presents the profile of the power factor and efficiency of the movement driving motor at that time. In the profile presented in Fig. 10 it is possible to distinguish the following characteristic values: between the 18<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> second, i.e. during the maneuver motion with set speed, the average value of the power factor is 0.915, while the average value of efficiency – 0.937. In the 25<sup>th</sup> second the efficiency gets higher than 1 due to the fact that in the 25<sup>th</sup> second there is a sudden increase of the load torque resulting from the contact of the cutting organ with the



Rys. 10. Przebieg współczynnika mocy i sprawności silnika [11]

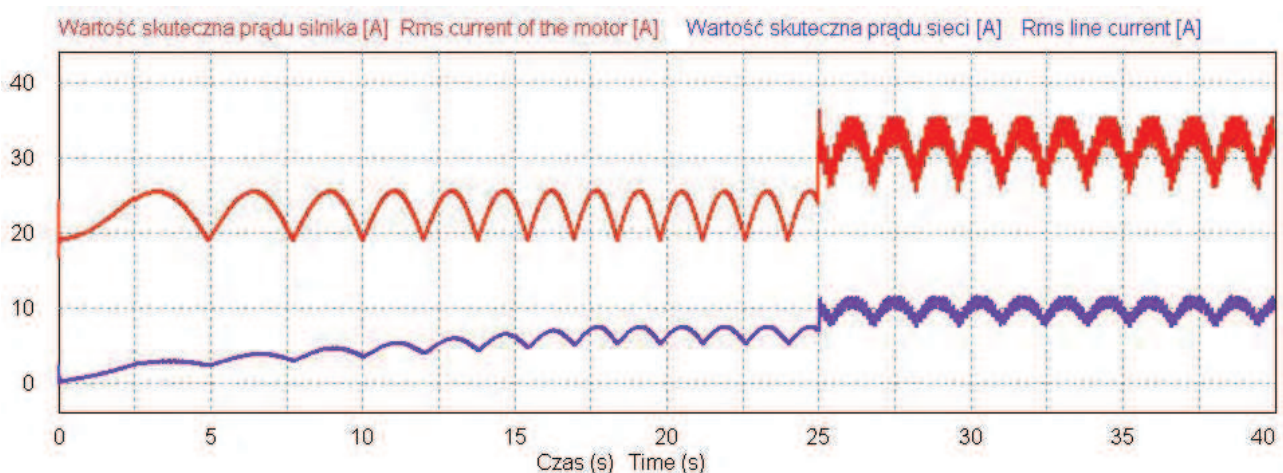
Fig. 10. Profile of power factor and efficiency of the motor [11]

obciążenia na skutek kontaktu organu urabiającego ze ścianą węglową, powodujący szybką zmianę kąta opóźnienia wektora strumienia magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwale umieszczone w wirniku w stosunku do wektora pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez stojan, co skutkuje dynamiczną zmianą prędkości obrotowej wirnika silnika napędowego i wykorzystanie energii kinetycznej zgromadzonej w wirujących masach wirnika. To z kolei pozwala dostarczyć w krótkim czasie więcej mocy mechanicznej, niż pobiera silnik z sieci. W przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą, czyli podczas urabiania ściany z ustaloną prędkością, średnia wartość współczynnika mocy wynosi 0,859, a średnia wartość sprawności wynosi 0,923.

Na rys. 11. został przedstawiony przebieg wartości skutecznej prądu płynącego przez silnik napędu posuwu oraz prądu płynącego z sieci w tym czasie.

coal face, which causes a quick change in the delay angle of the vector of the magnetic flux produced by permanent magnets placed in the rotor, in relation to the vector of the electromagnetic field produced by the stator. This results in dynamically changing rotational speed of the rotor and the use of kinetic energy stored in the rotor. This, in turn, allows to provide, in a short time, more mechanical power than the amount taken by the motor from the grid. Between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second, i.e. when the coal face is cut with constant speed, the average value of the power factor is 0.859, and the average value of efficiency – 0.923.

Fig. 11 presents the profile of rms current flowing through the movement driving motor and rms line current flowing at the same time.



Rys. 11. Przebiegi wartości skutecznej prądu płynącego przez silnik i prądu płynącego z sieci [11]

Fig. 11. Profile of rms current flowing through the motor and rms line current [11]

W przedstawionym na rys. 11. przebiegu wartości skutecznej prądu płynącego przez silnik można wyróżnić następujące charakterystyczne wartości: w przedziale czasowym pomiędzy 18. a 25. sekundą, czyli podczas ruchu manewrowego z ustaloną prędkością, średnia wartość skuteczna prądu płynącego przez silnik wynosi 23,3 A, natomiast średnia wartość skuteczna prądu płynącego z sieci do przemiennika częstotliwości zasilającego silnik wynosi 6,8 A. W przedziale czasowym pomiędzy 25. a 40. sekundą, czyli podczas urabiania ściany z ustaloną prędkością, średnia wartość skuteczna prądu płynącego przez silnik wynosi 31,8 A, natomiast średnia wartość skuteczna prądu płynącego z sieci do przemiennika częstotliwości zasilającego silnik wynosi 10 A.

In Fig. 11 it is possible to distinguish the following characteristic values: between the 18<sup>th</sup> and 25<sup>th</sup> second, i.e. during the maneuver motion with set speed, the average rms current flowing through the motor is 23.3 A, while the average value of rms line current flowing to the converter, which supplies energy to the motor, is 6.8 A. Between the 25<sup>th</sup> and 40<sup>th</sup> second, i.e. when the coal face is cut with set speed, the average rms current flowing through the motor is 31.8 A, while the average value of rms line current flowing to the frequency converter is 10 A.

**5. ANALIZA EKONOMICZNA NAPĘDÓW CIĄGNIKA KOMBAJNU Z SILNIKIEM KLATKOWYM ORAZ Z SILNIKIEM O MAGNESACH TRWAŁYCH**

**5. ECONOMICAL ANALYSIS OF DRIVES OF A CUTTER LOADER HAULAGE GEAR WITH A SQUIRREL-CAGE MOTOR AND WITH A PERMANENT-MAGNET MOTOR**

W celu przeprowadzenia analizy ekonomicznej napędu ciągnika kombajnu wyposażonego w silnik asynchroniczny klatkowy oraz w silnik synchroniczny o magnesach trwałych w tabeli 1. zostały przedstawione niektóre parametry, mające wpływ na efektywność ekonomiczną napędu, uzyskane na drodze symulacji komputerowej dla 3 różnych prędkości urabiania ściany węglowej.

In order to conduct an economical analysis of a cutter loader haulage gear drive equipped with an asynchronous squirrel-cage motor and with a synchronous permanent-magnet motor, some parameters were presented (table 1) which influence economical efficiency of the drive. The parameters were achieved by means of computer simulations for three different speed values of coal face cutting.

Tabela 1.

Wybrane parametry mające wpływ na ekonomikę porównywanych napędów [11]

Typ silnika napędowego Parametry pracy kombajnu	Silnik asynchroniczny klatkowy			Silnik synchroniczny o magnesach trwałych		
	Urabianie ściany o długości 250 m z prędkością			Urabianie ściany o długości 250 m z prędkością		
Parametry	5 m/min	10 m/min	20 m/min	5 m/min	10 m/min	20 m/min
Moc elektryczna pobierana z sieci	15,25 kW	30,35 kW	60,27 kW	14,87 kW	29,24 kW	57,97 kW
Współczynnik mocy	0,706	0,706	0,87	0,859	0,854	0,966
Sprawność	0,902	0,911	0,912	0,923	0,943	0,952
Wartość skuteczna prądu płynącego z sieci	12,5 A	24,8 A	40 A	10 A	19,8 A	34,5 A
Zużyta energia elektryczna na urabianie ściany	12,71 kWh	12,65 kWh	12,56 kWh	12,39 kWh	12,18 kWh	12,08 kWh
Moc cieplna wydzielana w silniku	1,5 kW	2,88 kW	<b>5,29 kW</b>	1,15 kW	1,72 kW	<b>2,96 kW</b>

Table 1.

Selected parameters influencing the economical efficiency of compared drives [11]

Type of driving motor	Asynchronous squirrel-cage motor			Synchronous permanent-magnet motor		
Cutter loader working parameters	Cutting a 250-m coal face with the speed of			Cutting a 250-m coal face with the speed of		
	5 m/min	10 m/min	20 m/min	5 m/min	10 m/min	20 m/min
Electric power from the grid	15.25 kW	30.35 kW	60.27 kW	14.87 kW	29.24 kW	57.97 kW
Power factor	0.706	0.706	0.87	0.859	0.854	0.966
Efficiency	0.902	0.911	0.912	0.923	0.943	0.952
Rms line current	12.5 A	24.8 A	40 A	10 A	19.8 A	34.5 A
Electrical energy used for cutting the face	12.71 kWh	12.65 kWh	12.56 kWh	12.39 kWh	12.18 kWh	12.08 kWh
Thermal power emitted in the motor	1.5 kW	2.88 kW	<b>5.29 kW</b>	1.15 kW	1.72 kW	<b>2.96 kW</b>



Na podstawie symulacji komputerowych napędu ciągnika kombajnu wykonanego w sposób klasyczny z silnikiem asynchronicznym klatkowym zasilanym poprzez przemiennik częstotliwości ze skalarnym falownikiem napięcia oraz wykorzystującym nowoczesny silnik synchroniczny o magnesach trwałych zasilany za pomocą przemiennika częstotliwości z wektorowym falownikiem napięcia należy stwierdzić, że zastosowanie nowoczesnego silnika o magnesach trwałych przynosi efekty ekonomiczne. Moc elektryczna pobierana z sieci zasilającej jest mniejsza średnio o 3,5%. Współczynnik mocy jest wyższy średnio o 17%. Sprawność układu napędowego jest wyższa średnio o 3,5%. Wartość skuteczna prądu płynącego z sieci zasilającej jest niższa średnio o 17%. Zużyta energia elektryczna podczas procesu urabiania ściany węglowej jest niższa średnio o 3,5%.

Dzięki zastosowaniu wysokosprawnego silnika najbardziej jednak spada wydzielana w silniku moc cieplna, którą trzeba odprowadzić za pomocą układu chłodzenia. Średnia wartość mocy cieplnej wydzielanej w silniku napędowym dla analizowanych prędkości posuwu jest niższa o 40%. Daje to bardzo duże korzyści ekonomiczne przede wszystkim w postaci zmniejszenia układu chłodzenia silnika, a tym samym możliwości zastosowania znacznie tańszych układów chłodzenia o mniejszych gabarytach. Powyższe wnioski obrazuje tabela 2., w której przedstawiono procentowe zyski wynikające z zastosowania w napędzie ciągnika kombajnu ścianowego wysokosprawnych, nowoczesnych silników z magnesami trwałymi zamiast obecnie stosowanych silników asynchronicznych klatkowych. Wyniki są prezentowane w tabeli w związku z prędkością urabiania ściany węglowej.

Based on the computer simulations of the cutter loader haulage gear drive with an asynchronous squirrel-cage motor, supplied by a converter with a scalar inverter, and the drive equipped with a modern synchronous permanent-magnet motor, supplied by a converter with a vector inverter, it is evident that the use of the latter brings significant economical profits. The volume of electrical power input from the grid is on average lower by 3.5%. The power factor is on average higher by 17%. The efficiency of the driving system is on average higher by 3.5%. The rms line current is on average lower by 17%. The electrical energy used during the coal face mining process is on average lower by 3.5%.

Thanks to the use of a high-efficiency motor, the most significant decrease can be observed in the thermal power emitted in the motor, which has to be carried away by a cooling system. The average value of the thermal power emitted in the driving motor, for the analyzed movement speed values, is lower by 40%. This gives very significant economical profits, particularly with respect to a cooling system which can be smaller and cheaper. The above conclusions are presented in table 2 which features percentage-based profits resulting from the application in the cutter loader drives of high-efficiency modern permanent-magnet motors in the place of currently used asynchronous squirrel-cage motors. The results are presented in the table against the coal face cutting speed.

Tabela 2.

**Korzyści ekonomiczne wynikające z zastosowania nowoczesnego i wysokosprawnego silnika napędowego [11]**

Parametry	Typ silnika napędowego		
	Silnik synchroniczny o magnesach trwałych Urabianie ściany węglowej o długości 250 m z prędkością		
	5 m/min	10 m/min	20 m/min
Zmniejszenie poboru energii elektrycznej z sieci zasilającej	2,5%	3,7%	3,8%
Zmniejszenie wartości skutecznej prądu płynącego z sieci zasilającej	20%	20,2%	13,8%
Zmniejszenie wydzielanej mocy cieplnej w silniku napędowym	23,3%	40,3%	44%

Table 2.

**Economical profits resulting from the use of a modern, high-efficiency driving motor [11]**

Parameters	Type of driving motor		
	Synchronous permanent-magnet motor Cutting a 250-m coal face with the speed of		
	5 m/min	10 m/min	20 m/min
Lower electrical energy use from the grid	2.5%	3.7%	3.8%
Lower rms current flowing from the grid	20%	20.2%	13.8%
Lower thermal power emitted in the driving motor	23.3%	40.3%	44%

## 6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje komputerowe i analizy ekonomiczne dowodzą, iż zastosowanie nowoczesnych silników synchronicznych o magnesach trwałych, zasilanych poprzez przemienniki częstotliwości wyposażone w wektorowe falowniki napięcia, w miejsce obecnie powszechnie stosowanych silników asynchronicznych klatkowych, zasilanych poprzez przemienniki częstotliwości wyposażone w skalarne falowniki napięcia, jest zasadne ekonomicznie oraz przynosi wyraźną poprawę parametrów dynamicznych układów napędowych ciągników kombajnów ścianowych.

Na podstawie parametrów przedstawionych w tabeli 2. można stwierdzić, że największe korzyści ekonomiczne z zastosowania nowoczesnego, wysokosprawnego silnika o magnesach trwałych przynosi znaczne zmniejszenie ilości ciepła wydzielanego podczas pracy kombajnu w silniku napędowym.

Dzięki zastosowaniu silnika napędowego nowego typu układ chłodzenia odprowadza o 44% mniej ciepła, przy maksymalnej prędkości urabiania, w stosunku do starego typu silników, w których z odprowadzaniem zawsze jest duży problem. Moc znamionowa układu chłodzenia może być zatem zmniejszona o prawie połowę, co prowadzi do znacznego zmniejszenia gabarytów układu chłodzenia i kosztów z tym związanych.

### Literatura

1. Sikora W., Dolipski M., Cheluszka P. i in.: *Obciążenia dynamiczne w układach ciągnięcia wysokowydajnych kombajnów ścianowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
2. *Katalogi producenta kombajnów ścianowych firmy KOPEX* [online], dostępny w Internecie: <http://www.kopex.com.pl/idm,921,kombajny-scianowe.html> (dostęp: 25. 10. 2012).
3. Dolipski M., Cheluszka P.: *Dynamika układu urabiania kombajnu chodnikowego*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
4. *Symulator układów energoelektronicznych PSIM v.7.1* [online], dostępny w Internecie: <http://www.powersimtech.com/download.html> (dostęp: 25.10.2012).
5. *Katalogi producenta silników elektrycznych do zastosowań górniczych firmy DAMEL S.A.* [online], dostępny w Internecie: <http://www.damel.com.pl/pages/index.php> (dostęp: 25. 10. 2012).
6. Rossa R.: *Przegląd silników elektrycznych z magnesami trwałymi*, Biuletyn Portalu Efektywności Energetycznej w Napędach Elektrycznych PEMP, 2010 nr 1/10, s. 2-8.
7. Król E.: *Porównanie efektywności energetycznej silników z magnesami trwałymi i silników indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2007 nr 78, s. 75-78.
8. Katalog firmy Leroy Somer – producenta silników z magnesami trwałymi: *LSRPM-PLSRPM Synchronous motors with permanent magnets – 0,75 to 400 kW – Technical catalogue*.

## 6. SUMMARY

The conducted computer simulations and economical analyses prove that the use of modern synchronous permanent-magnet motors, supplied by converters with vector inverters, in the place of commonly used asynchronous squirrel-cage motors, supplied by converters with scalar inverters, is economically justified and brings a significant improvement of dynamic parameters of cutter loader haulage gears drives.

Based on the parameters presented in table 2 it can be seen that the biggest economical profits related to the use of modern, high-efficiency permanent-magnet motors are achieved due to lower emission of heat in the driving motor.

Thanks to the use of this new-type motor at the maximum cutting speed, the cooling system has to carry away 44% less heat than in the case of old-type motors in which this process has always been problematic. Thus the rated power of the cooling system can be reduced almost by half which allows to have smaller and cheaper cooling equipment.

### References

1. Sikora W., Dolipski M., Cheluszka P. et al.: *Obciążenia dynamiczne w układach ciągnięcia wysokowydajnych kombajnów ścianowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
2. *Katalogi producenta kombajnów ścianowych firmy KOPEX* [online], available at: <http://www.kopex.com.pl/idm,921,kombajny-scianowe.html> (accessed on: 25. 10. 2012).
3. Dolipski M., Cheluszka P.: *Dynamika układu urabiania kombajnu chodnikowego*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
4. *Symulator układów energoelektronicznych PSIM v.7.1* [online], available at: <http://www.powersimtech.com/download.html> (accessed on: 25. 10. 2012).
5. *Katalogi producenta silników elektrycznych do zastosowań górniczych firmy DAMEL S.A.* [online], available at: <http://www.damel.com.pl/pages/index.php> (accessed on: 25.10. 012).
6. Rossa R.: *Przegląd silników elektrycznych z magnesami trwałymi*, Biuletyn Portalu Efektywności Energetycznej w Napędach Elektrycznych PEMP, 2010 No 1/10, pp. 2-8.
7. Król E.: *Porównanie efektywności energetycznej silników z magnesami trwałymi i silników indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2007 No 78, pp. 75-78.
8. Katalog firmy Leroy Somer – producenta silników z magnesami trwałymi: *LSRPM-PLSRPM Synchronous motors with permanent magnets – 0,75 to 400 kW – Technical catalogue*.

9. Rossa R., Król E.: *Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2009 nr 81, s. 125-129.
  10. Strony internetowe Branżowego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Maszyn Elektrycznych KOMEL: [http://www.komel.katowice.pl/pm\\_maszyny.html](http://www.komel.katowice.pl/pm_maszyny.html) (dostęp: 25.10.2012).
  11. Dokumentacja pracy badawczej pt. „Symulacja komputerowa układów napędowych kombajnu z silnikiem klatkowym oraz z magnesami trwałymi wraz z analizą”. Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice 2012, niepublikowane.
9. Rossa R., Król E.: *Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2009 No 81, pp. 125-129.
  10. Website of Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL: [http://www.komel.katowice.pl/pm\\_maszyny.html](http://www.komel.katowice.pl/pm_maszyny.html) (accessed on: 25.10.2012).
  11. Documentation of the research work „Symulacja komputerowa układów napędowych kombajnu z silnikiem klatkowym oraz z magnesami trwałymi wraz z analizą”. Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice 2012, not published.

*Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.*

*The article was reviewed by two independent reviewers.*

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИВОДА ПОДАЧИ ШАХТНОГО ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА В СЛУЧАЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КЛЕТОЧНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ И БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В данной работе представлены результаты выполненного с использованием компьютерного моделирования сравнительного анализа привода подачи шахтного очистного комбайна, оснащённого двумя типами приводных двигателей – клеточным асинхронным двигателем и бесколлекторным синхронным двигателем с постоянными магнитами. Компьютерный анализ традиционного привода подачи комбайна с клеточным асинхронным двигателем, питаемым через преобразователь частоты, оснащённый скалярным инвертором, предоставляющим возможность непрерывно регулировать скорость движения подачи комбайна, дал возможность определить подробные электрические и механические параметры данного привода. Затем компьютерному моделированию подвергнуто приводную систему подачи, заменяя клеточный асинхронный двигатель на современный, энергоэффективный синхронный двигатель с постоянными магнитами. Полученные результаты были проанализированы с точки зрения электрических, механических и экономических параметров. На основании проведённых анализов можно сделать вывод, что использование синхронного двигателя с постоянными магнитами для привода подачи шахтного очистного комбайна улучшает динамические характеристики привода, а также снижает потребление энергии, тем самым позволяя достигнуть экономического эффекта. Самые большие выгоды от использования высокоэффективного двигателя с постоянными магнитами состоят в значительном снижении тепловыделения в приводном двигателе, что может привести к уменьшению системы охлаждения. Полученные динамические, экономические и, прежде всего, тепловые характеристики привода, оснащённого двигателем с постоянными магнитами вместо обычно используемого клеточного асинхронного двигателя, убеждают в использовании двигателей данного типа в приводах подачи шахтных очистных комбайнов.

