

Tadeusz GLINKA  
Eugeniusz KAŁUŻA

## ASPEKTY TECHNICZNO-EKONOMICZNE MODERNIZACJI UKŁADU NAPĘDOWEGO MASZYNY WYCIĄGOWEJ

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę wybranych zagadnień związanych z wprowadzeniem przekształtników tyrystorowych w miejsce dotychczas eksploatowanych przetwornic elektromaszynowych zasilających silniki wyciągowe.

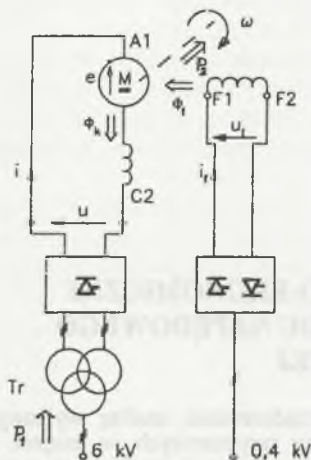
## SOME TECHNICAL AND ECONOMICAL ASPECTS OF MODERNIZATION OF WINDER MOTOR DRIVE SYSTEM

**Summary.** The paper gives an analysis of chosen problems arising when the hitherto existing electromachine systems supplying the winder motors are exchanged for the power electronic (thyristor) converters.

### WSTĘP

Maszyny wyciągowe w większości przypadków są napędzane silnikami prądu stałego. W układzie klasycznym silniki były zasilane z przetwornic elektromaszynowych prądu stałego. Względy ekonomiczne (sprawność energetyczna układu, konserwacja komutatora i koszty szczotek) oraz ekologiczne (hałas) spowodowały, że przetwornice elektromaszynowe są zastępowane przekształtnikami statycznymi. W polskim przemyśle wydobywczym jako zasadę przyjęto układ oszczędnościowy złożony z:

- jednokierunkowego przekształtnika zasilającego obwód twornika silnika wyciągowego ,
  - dwukierunkowego przekształtnika zasilającego uzwojenie wzbudzenia silnika wyciągowego
- rys.1.



Rys.1. Schemat układu zasilania silnika wyciągowego  
Fig.1. Supply system scheme of winder motor

Rewersja prędkości obrotowej silnika odbywa się poprzez rewर्सję napięcia wzbudzenia, także realizację pracy hamulcowej silnika uzyskuje się poprzez rewर्सję napięcia wzbudzenia. Aby przyspieszyć rewर्सję prądu wzbudzenia stosuje się ponadto forsowanie napięcia wzbudzenia. Układ ten, w stosunku do przetwornicy elektromaszynowej, generuje zarówno składowe stałe jak i składowe zmienne napięcia i prądu twornika  $U$ ,  $i$ , oraz napięcia i prądu wzbudzenia  $U_f$ ,  $i_f$ , a ponadto w czasie pracy układu dokonuje się rewर्सja składowej stałej napięcia i prądu wzbudzenia. Inne są zatem warunki zasilania silnika wyciągowego w stosunku do zasilania z przetwornicy elektromaszynowej.

W literaturze dobrze jest rozpoznane i omówione zagadnienie komutacji prądu pulsującego w silnikach obcowzbudnych, zasilanych z przetwornic energoelektronicznych [2]. W ogólnym przypadku komutację prądu pulsującego

$$i(t) = I_0 + \sum_{w=1}^{\infty} I_{mw} \sin \omega_w t \quad (1)$$

rozpatruje się jako zjawisko złożone, obejmujące:

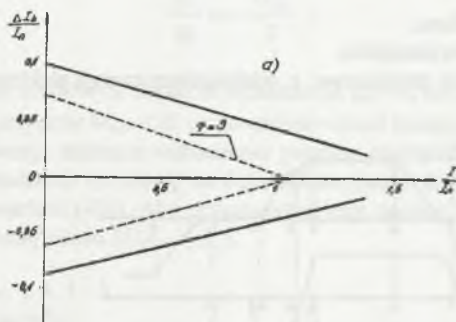
- komutację składowej stałej prądu  $I_0$ ,
- komutację składowej zmiennej  $\sum_{w=1}^{\infty} I_{mw} \sin \omega_w t$ .

Przy zasilaniu silnika wyciągowego z przetwornicy elektromaszynowej występuje zagadnienie komutacji tylko składowej stałej prądu  $I_0$  i na takie warunki zasilania silniki starszego typu były budowane.

Przy zasilaniu silnika z przetwornicy energoelektronicznej i to zarówno jednokierunkowej, jak i dwukierunkowej w obwodzie twornika występują składowe zmienne prądu twornika

$\sum_{w=1}^{\infty} I_{mw} \sin \omega_w t$  o tej samej wartości, albowiem wartość składowych zmiennych prądu  $\sum_{w=1}^{\infty} I_{mw} \sin \omega_w t$  nie zależy od typu przetwornicy, lecz od parametrów obwodu przepływu prądu, w szczególności od jego indukcyjności.

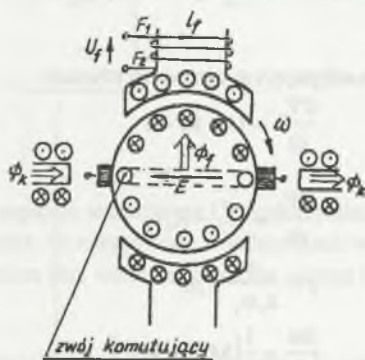
Wpływ składowych zmiennych prądu na komutację w przetwornicach jedno- i dwukierunkowych jest taki sam i uwidacznia się w zawężeniu obszarów komutacji beziskrowych silników prądu stałego - rys. 2. Z punktu widzenia komutacji prądu pulsującego przetwornice energoelektroniczne jednokierunkowe i dwukierunkowe w obwodzie twornika są sobie równoważne.



Rys. 2. Obszary komutacji beziskrowej  $\Delta I_b = f(I)$  silnika prądu stałego przy prądzie stałym (linia ciągła) i prądzie pulsującym (linia przerywana)

Fig. 2. The sparkless commutation zones  $\Delta I_b = f(I)$  of d.c. motor supplied with constant current (continuous line) and pulsating current (dashed line)

Dotychczas w literaturze nie rozpatrywano problemów komutacyjnych silnika przy rewersji prądu wzbudzenia. Przeprowadzenie takiej oceny jest celem tego artykułu.



Rys. 3. Przekrój maszyny prądu stałego z wyodrębnieniem zwoju komutującego  
Fig. 3. The coupling of the commutating turn of winding with excitation current

Na rys. 3 pokazano schematycznie przekrój poprzeczny maszyny prądu stałego o liczbie biegunów  $2p=2$ . Na schemacie tym pokazano wszystkie uzwojenia maszyny, a z uzwojenia twornika wyodrębniono zwoj komutujący. Takie przedstawienie uzwojeń umożliwia analizę sprzężenia zwoju komutującego z pozostałymi uzwojeniami maszyny przy dowolnych warunkach jej pracy.

## MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO

Przykładowy modelowy cykl pracy analizowanego układu napędowego przedstawiono na rys.4. Cykl ten podzielono na 5 przedziałów czasowych:

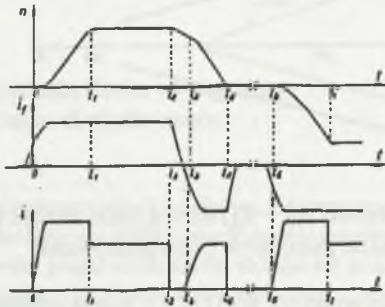
$t_1$  - rozruch

$(t_2 - t_1)$  - jazda ustalona,

$(t_3 - t_2)$  - hamowanie naturalne,

$(t_4 - t_3)$  - hamowanie prądnicowe z oddawaniem energii elektrycznej do sieci,

$(t_5 - t_4)$  - postój.



Rys.4. Modelowy przebieg prędkości obrotowej  $n$ , prądu wzbudzenia  $i_f$  oraz prądu twornika  $i$  i silnika wyciągowego w czasie jednego cyklu pracy

Fig.4. The model courses of rotational speed  $n$ , excitation current  $i_f$  and armature current  $i$  of winder motor during one duty cycle

Pracę silnika można opisać następującym zestawem równań:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_s}{dt} &= U - R_i i - e \\ \frac{d\Psi_f}{dt} &= U_f - R_f i_f \\ e &= \frac{c}{z_f \sigma_f} \Psi_f \omega \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} [M_{em} - M_{ob}] \\ M_{em} &= \frac{c}{z_f \sigma_f} \Psi_f i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

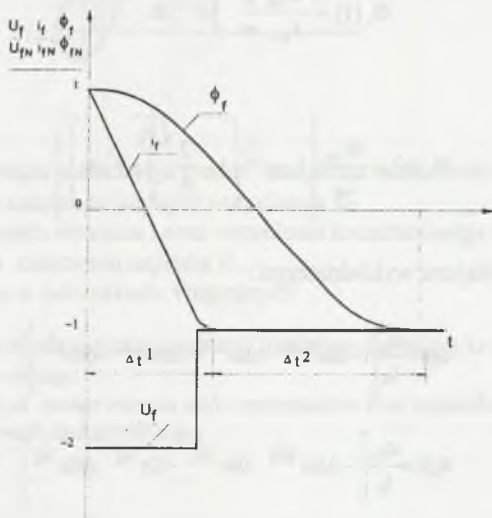
gdzie:

- $R, R_f$  - rezystancje obwodu twornika i wzbudzenia,
- $\Psi_a, \Psi_f$  - liniozwoje twornika i wzbudzenia,
- $z_f$  - liczba zwojów 1-go bieguna uzwojenia wzbudzenia,
- $\sigma_f$  - współczynnik rozproszenia uzwojenia,
- $M_{ob}$  - moment obciążenia,
- $J$  - moment bezwładności sprowadzony na wał silnika.

W pierwszych dwóch przedziałach czasowych jest realizowana praca silnikowa. W trzecim przedziale czasowym ( $i=0$ , a zatem  $M_{em}=0$ ) jest więc realizowane hamowanie naturalne

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{M_{ob}}{J} \quad (3)$$

W czwartym przedziale czasowym napięcie wzbudzenia  $U_f < 0$ , co daje także  $\Phi_f < 0$ , a zatem i moment elektromagnetyczny  $M_{em} < 0$ , co powoduje wzrost momentu hamującego. W czasie  $t = t_2$  dokonuje się rewersja napięcia wzbudzenia poprzez przełączenie napięcia z  $U_{fN}$  na  $(-2 U_{fN})$  - rys. 4. Prąd wzbudzenia  $i_f$  z uwagi na dużą indukcyjność uzwojenia zmienia się inercyjnie z wartości  $I_{fN}$  na wartość  $(-I_{fN})$ . Aby przyspieszyć jego zmianę, forsuje się napięcie wzbudzenia do wartości równej około  $2U_{fN}$  - rys. 5.



Rys. 5. Przebiegi czasowe napięcia wzbudzenia  $U_f$ , prądu wzbudzenia  $i_f$ , strumienia wzbudzenia  $\Phi_f$  narysowane w jednostkach względnych

Fig. 5. The course of excitation flux while the excitation current is being reversed

Po czasie  $\Delta t_1$  prąd  $i_f$  uzyskuje wartość znamionową  $(-I_{fN})$ . Wówczas napięcie wzbudzenia zmniejsza się do wartości  $(-U_{fN})$ . Strumień wzbudzenia  $\Phi_f$ , z uwagi na działanie prądów wirujących w litych elementach obwodu magnetycznego, zmienia się także inercyjnie w stosunku do zmian prądu wzbudzenia  $i_f$  i dopiero po czasie  $\Delta t_2$  osiąga wartość znamionową  $\Phi_{fN}$ . W

równaniach (2) można uwzględnić inercyjne zmiany strumienia wzbudzenia  $\Phi_f = \frac{\Psi_f}{Z_f \sigma}$  w stosunku do zmian prądu wzbudzenia  $i_f$ , a także inercyjne zmiany strumienia biegunów pomocniczych  $\Phi_k$  w stosunku do zmian prądu twornika. Strumień komutacyjny  $\Phi_k$  jest częścią strumienia zawartego w liniozwojach twornika  $\Psi_a$ . Silniki wyciągowe w większości przypadków posiadają lite jarzmo stojana oraz zwarte, poprzez nity i śruby, blachy biegunów głównych i biegunów pomocniczych. Prądy wirowe indukowane w tych elementach są przyczyną inercyjnych zmian strumienia wzbudzenia  $\Phi_f$  i strumienia komutacyjnego  $\Phi_k$  w stosunku do zmiany prądów  $i_f$ ,  $i$ . Inercje te można opisać równaniami, które w formie operatorowej mają postać [1]:

$$\Phi_f = \frac{I_f}{\sqrt{1+pT_f}} \left( \frac{\Phi_{fN}}{I_{fN}} \right), \quad (4)$$

$$\Phi_k \approx \frac{I}{1+\sqrt{p}T_k} \left( \frac{\Phi_{kN}}{I_N} \right). \quad (5)$$

Transformaty czasowe równań (4) i (5)

$$\Phi_f(t) = \frac{\Phi_{fN}}{I_{fN}} \frac{2}{\pi} \int_0^{\sqrt{t/T_f}} e^{-x^2} dx, \quad (4a)$$

$$\Phi_k(t) = \frac{\Phi_{kN}}{I_N} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{T_k}} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^{\sqrt{t/T_k}} e^{-x^2} dx \right) \right] \quad (5a)$$

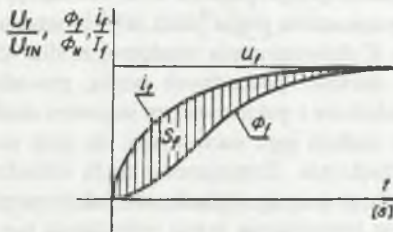
można aproksymować funkcjami wykładniczymi :

$$\Phi_f(t) = \frac{\Phi_{fN}}{I_{fN}} \left[ 1 - 0,18e^{-\frac{t}{0,05T_f}} - 0,18e^{-\frac{t}{0,7T_f}} - 0,22e^{-\frac{t}{0,4T_f}} - 0,35e^{-\frac{t}{0,05T_f}} \right], \quad (4b)$$

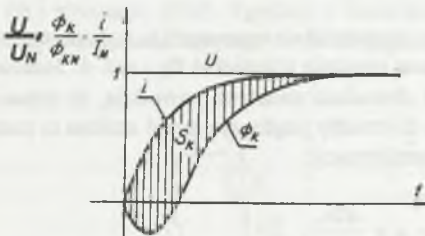
$$\Phi_k(t) = \frac{\Phi_{kN}}{I_N} \left[ 1 - 0,32e^{-\frac{t}{0,05T_k}} - 0,4e^{-\frac{t}{1,25T_k}} - 0,2e^{-\frac{t}{17T_k}} - 0,08e^{-\frac{t}{300T_k}} \right]. \quad (5b)$$

Funkcje (4b) i (5b) są bazą do wyznaczenia parametrów  $T_f$  i  $T_k$ .

a)



b)



Rys. 6. a) Przebiegi prądu wzbudzenia  $i_f$  oraz strumienia wzbudzenia  $\Phi_f$  przy skokowym załączeniu napięcia wzbudzenia  $U_f$   
 b) Przebiegi prądu twornika  $i$  oraz strumienia komutacyjnego  $\Phi_k$  przy skokowym załączeniu napięcia  $U$ .

Przebiegi narysowane w jednostkach względnych

Fig.6 a). The courses of excitation current and flux when the motor is supplied with unitary voltage

b) The courses of motor current and commutation flux when the motor is supplied with unitary voltage

Na rys. 6 pokazano przebiegi czasowe prądów  $i_f$ ,  $i$  oraz strumieni  $\Phi_f$ ,  $\Phi_k$  przy skokowym załączeniu napięcia stałego  $U_f$  na uzwojenie wzbudzenia F1F2 i napięcia stałego  $U$  na uzwojenie obwodu twornika A1C2 (przy nieruchomym wirniku). Z zaznaczonych powierzchni  $S_f$  i  $S_k$  oblicza się:

$$T_f = \frac{S_f}{0,5016} \quad (4c)$$

$$T_k = \frac{S_k}{29,916} \quad (5c)$$

Zarówno z równania (4) oraz z rys. 6 widać, że zmiany strumienia biegunów pomocniczych  $\Phi_k$  są opóźnione w stosunku do zmian prądu twornika. Jeśli komutacja prądu twornika w stanie ustalonym jest liniowa, to przy narastaniu prądu ( $di/dt > 0$ ) komutacja staje się opóźniona, a przy ( $di/dt < 0$ ) przyspieszona. Z doświadczenia wiadomo, że dla silników z litym obwodem magnetycznym graniczne wartości pochodnych prądu, powodujące iskrzenie szczotek, wynoszą około  $10 I_N/s$ , a dla silników z pakietowanym stojanem około  $50 I_N/s$ . Aby zachować ciągłość prądu twornika przy małych jego wartościach, np. przy rozruchu, a także przy hamowaniu, zmniejsza się prąd wzbudzenia. Zmniejszenie prądu wzbudzenia nie powoduje jednak równoczesnego zmniejszenia strumienia wzbudzenia, jak to wynika z równania (4b) oraz z rys.5. W stanie nieustalonym zmniejszenie prądu wzbudzenia nie zabezpiecza w sposób dostateczny silnika przed przerywanym prądem twornika.

## WPLYW REWERSJI PRĄDU WZBUDZENIA NA KOMUTACJĘ PRĄDU TWORNIKA

Szybka rewersja prądu wzbudzenia  $i_f$  w przedziale czasowym  $t_4-t_3$  poprzez forsowanie napięcia  $U_f$  w sposób znaczący przyspiesza rewersję strumienia  $\Phi_f$  - rys. 4. Jednak prądy wirowe indukowane w elementach litych i obwodach zwartych powodują, że zmiana strumienia zachodzi znacznie wolniej w stosunku do zmiany prądu, nie mniej zmiana ta zachodzi i indukuje w zwoju komutującym napięcie transformacji:

$$e_t = z_z \frac{d\Phi_f}{dt}, \quad (6)$$

przy czym  $z_z$  - oznacza liczbę zwojów w jednym zezwoju uzwojenia twornika. W silnikach wyciągowych zwykle  $z_z = 1$ . Wartość maksymalna napięcia transformacji może być określona, w przybliżeniu, z wyrażenia :

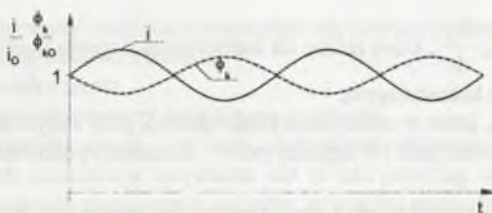
$$E_{t \max} \leq \frac{U_{f(+)} + |U_{f(-)}|}{2p \cdot z_f}, \quad (7)$$

gdzie:

- $U_{f(+)} ; U_{f(-)}$  - napięcie wzbudzenia przed rewersją i po rewersji,
- $p$  - liczba par biegunów,
- $z_f$  - liczba zwojów cewki jednego bieguna.

Wartości tych napięć zwykle wynoszą:  $U_{f(+)} = 220V$ ;  $U_{f(-)} = 440V$ , co oznacza dwukrotne forsowanie wzbudzenia. Na przykład w silniku wyciągowym typu P4100/24 liczba par biegunów  $p = 12$ , a liczba zwojów  $z_f = 110$ , a zatem napięcie transformacji wynosi  $E_{t \max} \leq 0,25V$ .

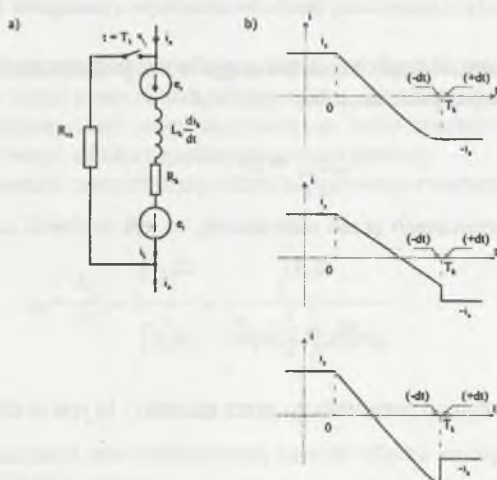




Rys. 7. Przebieg strumienia komutacyjnego przy prądzie pulsującym

Fig. 7. Course of commutation flux when the armature current is pulsating

Komutację prądu twornika dodatkowo utrudniają składowe zmienne prądu twornika (rys.7) [2], a także w czasie narastania prądu twornika i w czasie jego zmniejszania się ( w stanach nieustalonych) inercyjne zmiany strumienia biegunów pomocniczych  $\Phi_k$  w stosunku do zmian prądu  $i$  (rys. 6b i równanie (5b)). Zgodnie z teorią komutacji o iskrzeniu szczotek decyduje stan energetyczny zwoju komutującego w chwili jego rozwierania przez szczotkę.



Rys. 8. a) Schemat zwoju komutującego w chwili rozwierania go przez szczotkę

b) Przebiegi prądu komutowanego  $i_k$  przy komutacji optymalnej, opóźnionej i przyspieszonej

Fig. 8. a) The equivalent scheme of commutating turns of winding

b) The courses of commutation current: optimal, late and early

Na rys. 8a przedstawiono schemat zastępczy zezwoju komutującego o indukcyjności  $L_k$  i rezystancji  $R_k$ . Zwój jest zwarty przez szczotkę o rezystancji  $R_{sz}$ . W zwoju komutującym indukują się napięcia:

- rotacji  $e_r$  indukowane przez indukcję magnetyczną pod biegunami pomocniczymi (strumień  $\Phi_k$ ),

- napięcie samoindukcji  $L_k \frac{di_k}{dt}$ , które zależy od indukcijności zwoju komutującego  $L_k$  i pochodnej prądu w zwoju komutującym,
- napięcie transformacji  $e_t$ , które w maszynach prądu stałego, przy stałym strumieniu wzbudzenia  $\Phi_f = \text{const}$ , jest równe zero i w ogólnej teorii komutacji podawanej w literaturze nie jest uwzględniane.

W silnikach wyciągowych zasilanych z przekształtników jednokierunkowych, jak to widać z rys. 5, warunek  $\Phi_f = \text{const}$  nie jest spełniony i napięcie transformacji  $e_t$  wpływa na warunki komutacyjne prądu twornika. Przebieg prądu w czasie komutacji determinuje sumaryczne napięcie indukowane w zwoju zwartym przez szczotki

$$e_k = e_r - L_k \frac{di_k}{dt} - e_t \quad (8)$$

Jeśli średnia wartość napięcia  $e_k$  w czasie komutacji  $T_k$

$$E_k = \frac{1}{T_k} \int_0^{T_k} e_k dt \quad (9)$$

jest różna od zera, to wartość prądu komutowanego w zwoju kończącym komutację  $t = T_k$ , a więc w zwoju rozwierzanym przez szczotkę - rys. 7c,d

$$i_{k(t=T_k)} \neq \frac{I}{2a} \quad (10)$$

Energia zwoju komutowanego przed rozwarciem, to jest w chwili czasowej  $t = (T_k - dt)$ , wynosi:

$$W_k = \frac{1}{2} L_k i_k^2 \quad (11)$$

Energia tego samego zwoju po rozwarciu go przez szczotki, to jest w chwili czasowej  $t = (T_k + dt)$ , wynosi:

$$W_a = \frac{1}{2} L_k \left(\frac{I}{2a}\right)^2 \quad (12)$$

Różnica energii

$$\Delta W = |W_a - W_k| \quad (13)$$

jest zamieniana na energię cieplną i wydziela się w postaci ciepła w styku ślizgowym między szczotką a komutatorem. Mała wartość skoku energii  $\Delta W$  nie wzbudza jeszcze iskrzenia szczotek i jest pochłaniana przez rezystancję styku ślizgowego  $R_{sz}$ . Gdy energia  $\Delta W$  przekroczy pewną wartość graniczną, to wzbudzi już iskrzenie, które jest tym intensywniejsze, im większa jest wartość energii [2]. Wydzielaniu się energii  $\Delta W$  w stylu ślizgowym towarzyszą dodatkowe zjawiska:

- elektrokorozyja, która uniemożliwia wytworzenie błyszczącej politory komutatora; powierzchnia komutatora staje się matowa i ciemna,
- wzrost współczynnika tarcia,
- wzrost o kilka stopni temperatury komutatora i szczotek.

Zjawiska te występują nawet przy braku widocznego iskrzenia i przyspieszają zużycie komutatora i szczotek. Komutacja optymalna jest to taki przebieg czasowy prądu  $i_k$ , przy którym w czasie rozwierania zwoju przez szczotkę, to jest dla czasu  $t = T_k$ , uzyskuje się:

$$W_k = W_a \quad (14)$$

Warunek ten wymaga, aby pochodna prądu

$$\left. \frac{di_k}{dt} \right|_{t=T_k} = 0 \quad (15)$$

Jest to tak zwana komutacja styczna - rys. 7b.

### Efekty ekonomiczne związane z wyeliminowaniem przetwornic elektromaszynowych

Przetwornice elektromaszynowe zasilające silniki wyciągowe wirują ze stałą prędkością obrotową zarówno w czasie pracy silnika wyciągowego, jak i w czasie postoju. Z wirowaniem przetwornicy są związane straty mocy zużywane na tarcie mechaniczne i wentylację oraz straty mocy biegu jałowego silnika napędzającego przetwornicę.

Zdefiniujemy sprawność energetyczną układu napędowego maszyny wyciągowej:

$$\eta_E = \frac{W_2}{W_1} = \frac{\int_0^T P_2 dt}{\int_0^T P_1 dt + \int_0^T P_2 dt + \int_0^T \Sigma \Delta P dt} \quad (16)$$

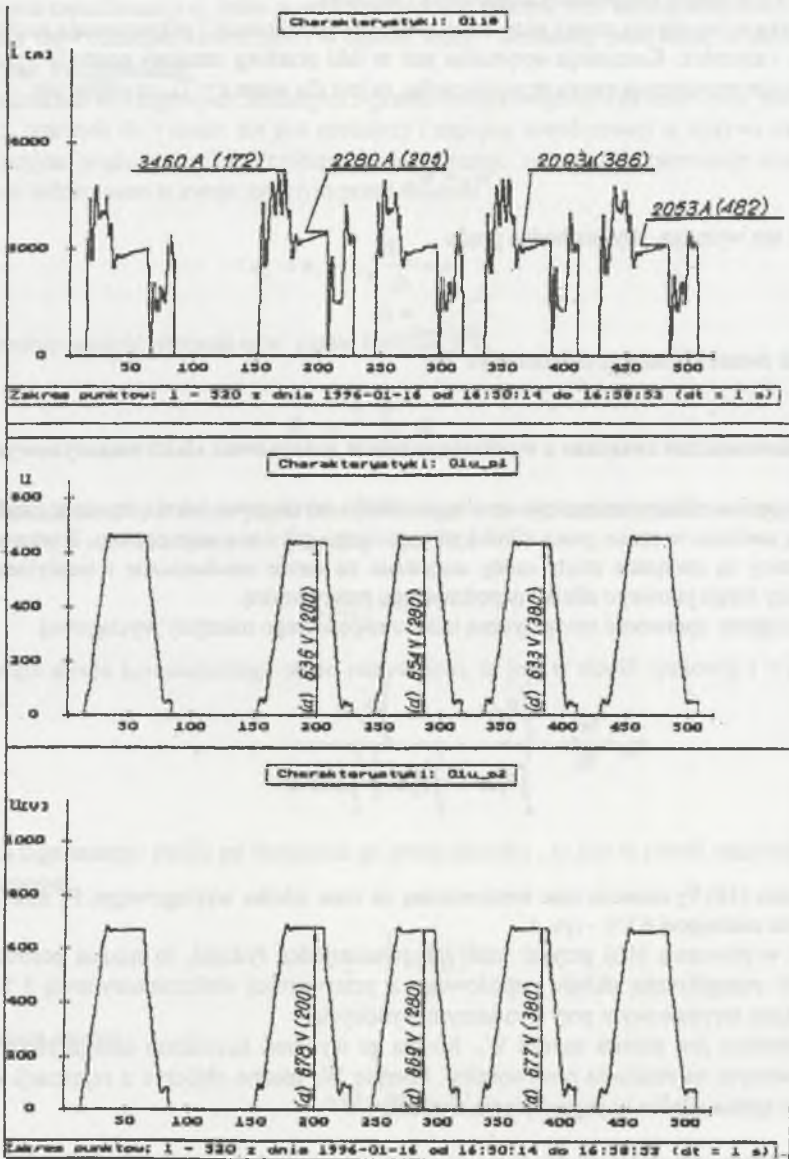
W równaniu (16)  $P_2$  oznacza moc mechaniczną na wale silnika wyciągowego,  $P_1$  moc pobieraną z sieci zasilającej 6 kV - rys. 1.

Jeśli w równaniu (16) przyjąć czas całkowania jeden tydzień, to można porównywać sprawność energetyczną układu napędowego z przetwornicą elektromaszynową i z przekształtnikiem tyrystorowym przy tym samym wydobywaniu.

Najprostszy jest pomiar energii  $W_1$ . Można go wykonać licznikiem energii elektrycznej zainstalowanym na zasilaniu przetwornicy. Energię  $W_2$  można obliczyć z rejestracji ciągłej prądu obciążenia silnika  $I$  i jego napięcia zasilania  $U$ .

$$W_2 = \int_0^T I(U - RI) dt \quad (17)$$

Z zarejestrowanych w pamięci komputera przebiegów prądu  $I$  oraz napięcia  $U$  (rys. 9) można obliczyć energię użytą przez silnik.



Rys. 9. Przebiegi prądu obciążenia (03i) oraz napięć silników wyciągowych nr 1 (03u-m1) i nr 2 (03u-m2)

Fig.9. The courses of load current ( $i_{03}$ ) and voltages of winder motors No1 (03u-m1) and No2 (03u-m2)

Dla podjęcia decyzji o modernizacji układu napędowego maszyny wyciągowej bardziej miarodajne od sprawności są straty energii w przetwornicy elektromaszynowej w stosunku do strat w przekształtniku tyrystorowym. Szczegółowa analiza tych strat energii została wykonana dla układu napędowego maszyny wyciągowej złożonego z:

- dwóch silników wyciągowych prądu stałego o parametrach: 1600 kW, 685 V, 2650 A, 67 obr./min,
- dwóch przetwornic elektromaszynowych prądu stałego o parametrach: 1800 kW, 700 V, 500 obr./min,
- dwóch silników synchronicznych napędzających ww. przetwornice o parametrach: 2000 kW, 6 kV, 500 obr./min.

Pomiary mocy i energii pobieranej przez silniki napędzające przetwornice umożliwiły określenie strat mocy biegu jałowego, a więc mocy, która nie będzie pobierana przez przekształtnik tyrystorowy.

$$\Delta P_0 \approx 110 \text{ kW.}$$

Przyjmując, że przetwornice pracują 5000 godzin w roku, obliczono energię strat

$$\Delta W_0 = 550 \cdot 10^3 \text{ kWh.}$$

Licząc koszt 1 kWh równy 0,15 zł, otrzymuje się koszt bezużytecznie traczonej energii elektrycznej równy 83 tys. zł rocznie.

Dodatkowym efektem ekonomicznym jest obniżenie kosztów eksploatacyjnych związanych z kosztem wymiany szczotek. Szczotki na przetwornicach wymienia się średnio co 9-12 miesięcy. Ponieważ przetwornice są maszynami wysokoobrotowymi, wymagają zatem lepszych (droższych) gatunków szczotek. Cena kompletu szczotek na dwie przetwornice w skali roku wynosi około 20 tys. zł. Tak więc sumaryczne oszczędności eksploatacyjne maszyny wyciągowej mogą się równać około 100 tys. zł.

## WNIOSKI

Modernizację maszyn wyciągowych można realizować poprzez:

- zastosowanie przetwornicy elektromaszynowej i układów energoelektronicznych w obwodzie wzbudzenia prądnicy i obwodzie wzbudzenia silnika, sterowanych układami mikroprocesorowymi,
- zastosowanie przekształtnika energoelektronicznego jednokierunkowego w obwodzie twornika silnika wyciągowego i dwukierunkowego w obwodzie wzbudzenia sterowanych układami mikroprocesorowymi,
- zastosowanie przekształtnika energoelektronicznego dwukierunkowego w obwodzie twornika silnika wyciągowego i jednokierunkowego w obwodzie wzbudzenia sterowanych układami mikroprocesorowymi.

O wyborze wariantu modernizacji decydują koszty, które będą niewątpliwie najniższe w pierwszym przypadku, jeśli oczywiście nie wlicza się kosztu przetwornicy. Najdroższym układem jest układ trzeci z przekształtnikiem dwukierunkowym w obwodzie twornika, nie mniej jednak jego koszt nie powinien przekraczać 120 % kosztów układu drugiego, gdyż transformatory, kable prądowe, układ filtracji wyższych harmonicznych i kompensacji mocy biernej w obydwóch układach są takie same, a układ wzbudzenia silnika jest jednokierunkowy, a więc tańszy. Ze względu na warunki komutacyjne silnika wyciągowego układ drugi jest

układem najgorszym, co wykazano. Decydując się na wprowadzenie układu drugiego należy tak programować jazdę, aby hamowanie odbywało się wyłącznie pod wpływem sił tarcia i sił grawitacyjnych, to znaczy, aby nie dokonywać rewersji prądu wzbudzenia w czasie ruchu silnika wyciągowego.

## LITERATURA

- 1.Glinka T.: Analiza równania permeancji szeregowego obwodu magnetycznego ze szczeliną powietrzną przy uwzględnieniu prądów wirowych indukowanych w rdzeniu. Archiwum Elektrotechniki tom XXIII z.4 1979, s.825-836.
- 2.Glinka T.: Własności komutacyjne maszyn prądu stałego przy pulsującym bądź szybkozmieniającym się prądzie twornika.Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. Elektryka z.44,1974, s.5 - 112.

Recenzent: Dr hab. inż. Piotr Wach , Prof. Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lipca 1997 r.

## Abstract

The subject of the analysis is the modernization of winder motor drive system. The modernization takes place when the electromachine systems supplying the winder motors are exchanged for power electronics devices. If the modernization is simultaneous with shaft reconstruction and change of winder motor operation parameters, the possibility of predicted motor power deficiency. The operation of winder motor is analyzed in the paper under different work conditions: when the armature circuit is supplied by unidirectional converter and the excitation circuit is supplied by bidirectional converter (i.e. low cost solution ) (Fig.1). It has been shown that in case of the reversal of the excitation current the commutation conditions worsen. Energy  $\Delta W$  (12) is produced in the accelerated wear of the brushes and the commutator.

The analysis of motor's duty cycles is also included, as well as the evaluation of motor's servability and the economical questions connected with reducing the power consumption.