

# Zwiększenie kompatybilności elektromagnetycznej oraz efektywności energetycznej napędów o cyklicznym charakterze obciążenia sieci zasilającej

Andrzej Rusek

## 1. Wstęp

Praca wielu napędów elektrycznych polega na cyklicznym ruchu (przyspieszanie, hamowanie, nawrót) oraz na okresowych zmianach obciążenia. Napędy takie są trudnymi odbiornikami dla sieci zasilającej z powodu pulsacji mocy czynnej i biernej, jak również w przypadku regulowanych napędów, które są zwykle nieliniowymi obciążeniami, ze względu na wyższe harmoniczne pobieranych prądów. Efektywność energetyczną kompensacji wahań czynnej i biernej mocy odbiorców energii elektrycznej wykazano w szeregu badań [1, 2]. W celu poprawy kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) nieliniowych odbiorników, odpowiednio do aktualnych norm [3, 4], oferuje się dużą liczbę aktywnych filtrów zasilania (SAF) i aktywnych prostowników (AR) [5–7]. W przypadku regulowanych napędów elektrycznych z obwodem DC procesom cyklicznym, które obejmują okresy hamowania napędu, towarzyszy także problem odbioru energii kinetycznej. Są dwa warianty jej transmisji: 1) do oporników balastowych, które są połączone przez tzw. czoper regulujący do obwodu DC; 2) do sieci zasilającej na przykład przez AR z dwukierunkowym przepływem energii. Każda z tych opcji ma swoje wady: dla 1 – utrata energii hamowania; dla 2 – dodatkowe straty energii w sieci poprzez zwiększenie wahań mocy czynnej.

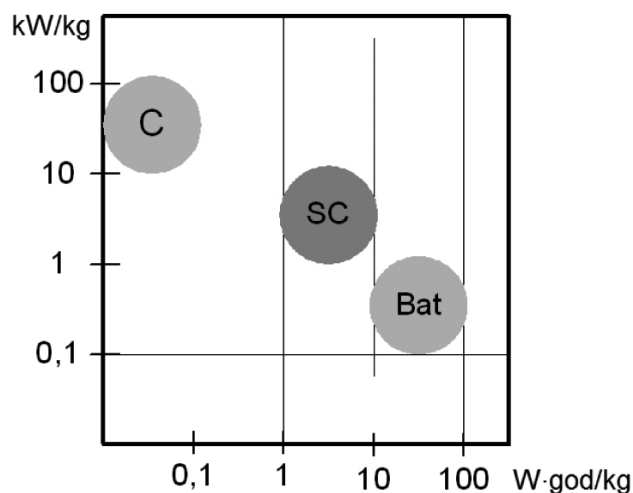
Przedstawione problemy EMC i efektywności energetycznej napędów elektrycznych o pulsującym charakterze pracy są szczególnie zastrzeżone w przypadku niskiej mocy sieci lokalnej.

Ostatnie badania w dziedzinie elektroenergetyki [8, 9] wykazały, że problemy związane z EMC i efektywnością energetyczną mogą być rozwiązane poprzez zastosowanie urządzeń do magazynowania energii elektrycznej. W ostatnim czasie wiele uwagi poświęca się superkondensatorom (SC), które charakteryzują się ultrawysoką pojemnością, szybkimi i wydajnymi cyklami ładowania-rozładowania, wysokim wskaźnikiem gęstości mocy. Porównanie SC z tradycyjnym kondensatorem oraz z baterią elektrochemiczną (rys. 1) pokazuje, że gęstość energii SC jest 100 razy większa niż w przypadku tradycyjnych kondensatorów, a gęstość mocy – 10 razy wyższa niż w baterii. Czas ładowania-rozładowania SC wynosi od sekundy do kilku godzin, liczba cykli ładowania-rozładowania – do 1 miliona [10].

Korzystanie z SC w napędach elektrycznych z cyklicznym charakterem obciążenia pozwala rozwiązać szereg zadań elektroenergetyki: skompensować wahań mocy czynnej, w tym mocy hamowania, a tym samym uprościć zadanie rozwiązania problemu EMC (stosowanie filtrów pasywnych) oraz popra-

## INCREASE OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND POWER EFFICIENCY OF ELECTRIC DRIVES WITH PULSATING CHARACTER OF LOAD ON THE FEEDING GRID

**Abstract:** By the computer simulation on the concrete examples of electric drives with pulsating character of load on the feeding grid the problems of their electromagnetic compatibility and power efficiency are analyzed. There are considered two systems with different correlations of electric drives and feeding grid powers. To solve these complex energy problems there is offered to use for accumulation of energy the power batteries of ultracapacitors in the DC link and developed a system of automatic control of charging and discharging processes. Compared to traditional solutions, the application of the developed system showed significantly better performance of electromagnetic compatibility and energy efficiency of electric drives with pulsating character of power consumption. It is shown that specially promising is the using of the ultracapacitors battery in braking modes of electric drives, which are powered by electricity grids of commensurate power.



Rys. 1. Gęstość mocy i energii urządzeń elektrycznych gromadzących energię

wię efektywność energetyczną układu sieć elektryczna – napęd elektryczny; umożliwić pracę napędów elektrycznych z żądaną dynamiką i porównywalną mocą przy zasilaniu z sieci lokalnych.

Celem niniejszego badania jest określenie przebiegu pracy za pomocą modeli komputerowych oraz otrzymanie charakterystyk energetycznych napędu elektrycznego o cyklicznym charakterze obciążenia przy stosowaniu SC i zasilaniu z lokalnych sieci elektrycznych.

## 2. Opis podstawowego układu napędowego oraz jego modelu komputerowego

Zostanie zbadany układ regulowanego napędu elektrycznego (rys. 2) o dwóch konfiguracjach: a) tradycyjny napęd z przesyłem elektrycznej energii hamowania do opornika balastowego  $R$  przez tranzystorowy czoper  $VT$  w obwodzie DC; b) napęd z przekształtnikiem DC-DC i baterią SC. Metodą badania jest symulacja komputerowa w programie MATLAB/Simulink.

Jeżeli moc elektryczna  $P_z(t)$  pobierana przez napęd (rys. 3) ma charakter cykliczny z okresem powtarzania  $T$ , to średnia wartość mocy w tym okresie jest równa

$$P_{z,ser} = \frac{1}{T} \int_0^T P_z(t) dt.$$

Rozwiązując równanie  $P_z(t) = P_{z,ser}$ , znajduje się wartości czasu  $t_1$  i  $t_2$ , które ograniczają okres, gdy moc pobierana przekracza średnią wartość, i dla których można obliczyć ilość energii cyrkulującą w napędzie elektrycznym, określoną przez zmienne składnik mocy

$$\Delta W_c = \int_{t_1}^{t_2} P_z(t) dt. \quad (1)$$

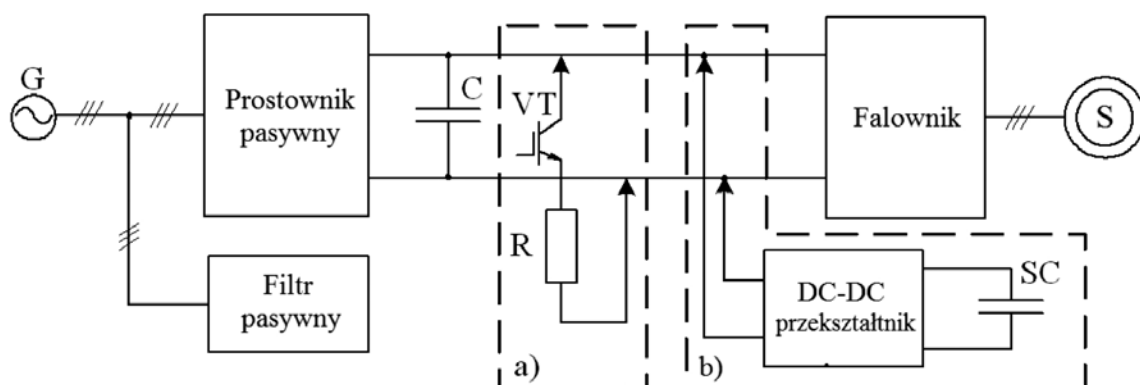
Aby ocenić stopień wahań mocy pobieranej przez napęd, wprowadza się parametr  $\lambda = P_{z,m}/P_{z,max}$ , którego wartość może wynosić od 0 do 1. W celu uproszczenia symulacji zakłada się sinusoidalny charakter poboru mocy zasilania przez napęd, z czego wynika

$$\begin{aligned} P_z(t) &= P_{z,max} \left[ 1 - \lambda \left( 1 - \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right) \right] = \\ &= P_{z,cep} \left[ 1 + \frac{\lambda}{1 - \lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

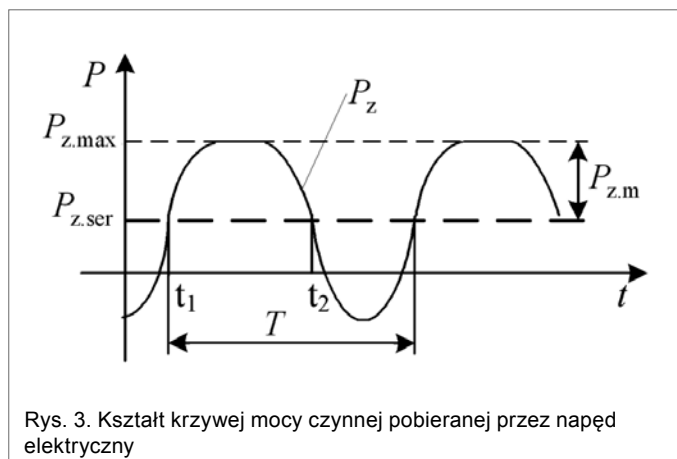
Równanie (2) jest zrealizowane w modelu komputerowym jako idealne źródło mocy, pobieranej lub przenoszonej do obwodu DC z rzeczywistą wartością napięcia.

Aby ocenić wpływ stopnia wahań mocy  $\lambda$  na wskaźniki energetyczne układu sieć elektryczna – napęd, przeprowadzono serię eksperymentów komputerowych dla dwóch wariantów układu, które różnią się stałą kwotą zużycia mocy i typem pasywnego filtra na wejściu układu napędowego:

1. napęd z zadaniem poziomem  $P_{z,max} = 10$  kW zasilany z lokalnej trójfazowej sieci niskiego napięcia ( $U_s = 380$  V), której moc jest zdefiniowana przez indeks



Rys. 2. Układ napędu elektrycznego ze środkami poprawy jego wskaźników elektroenergetycznych



Rys. 3. Kształt krzywej mocy czynnej pobieranej przez napęd elektryczny

$$k_{s1} = \frac{P_{zw}}{P_{z,max}} = 8$$

gdzie:  $P_{zw}$  – moc zwarcia sieci;

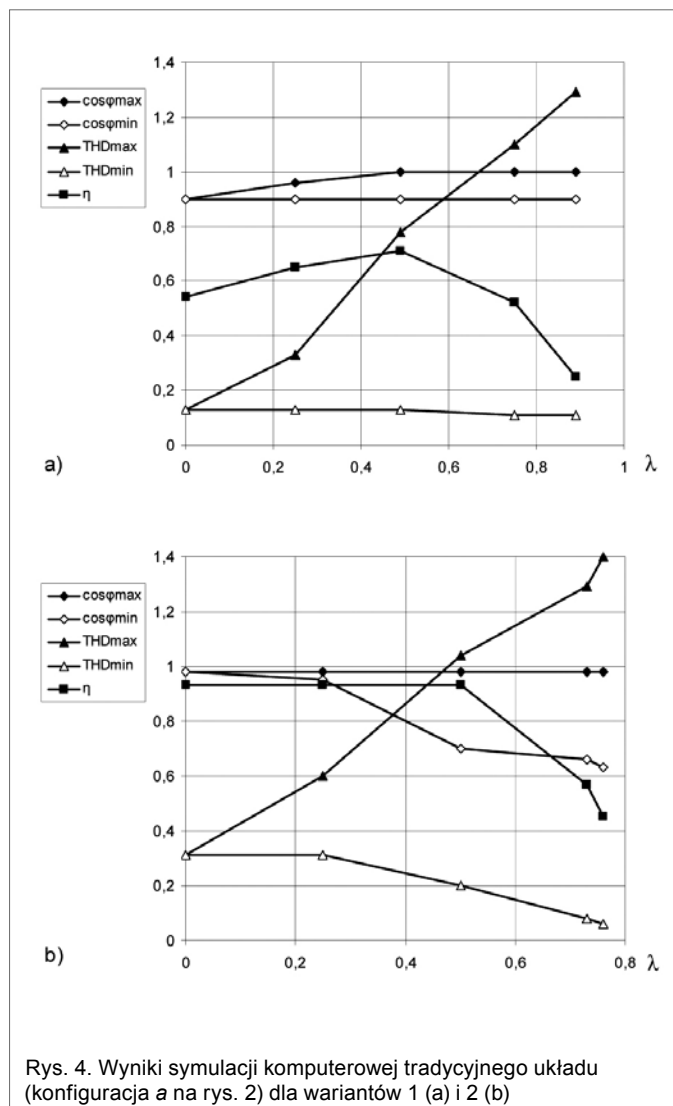
rezystancja wewnętrzna fazy sieci jest równa  $r = U_s^2/P_{zw}$  [1, 2]; indukcyjność filtra na wejściu zasilania napędu w celu zmniejszenia harmonicznego prądu THD<sub>1</sub> wynosi 10 mH;

- napęd z zadaniem poziomem  $P_{z,ser} = 2$  kW zasilany z takiej samej sieci, ale  $k_{s2} = P_{zw}/P_{z,ser} = 30$ ; na wejściu diodowego prostownika dołączono filtr LC (20 mH, 4 uF), który zmniejsza THD<sub>1</sub> i całkowicie kompensuje moc bierną przy stałym poziomie poboru mocy czynnej  $P_{z,ser}$ .

Moc zwarcia sieci dla pierwszego układu wynosi 80 kW, a dla drugiego – 60 kW, ale obciążenie elektryczne w pierwszym przypadku jest znacznie większe niż w drugim oraz charakter zmiany obciążenia ze wzrostem  $\lambda$  w tych przypadkach jest inny.

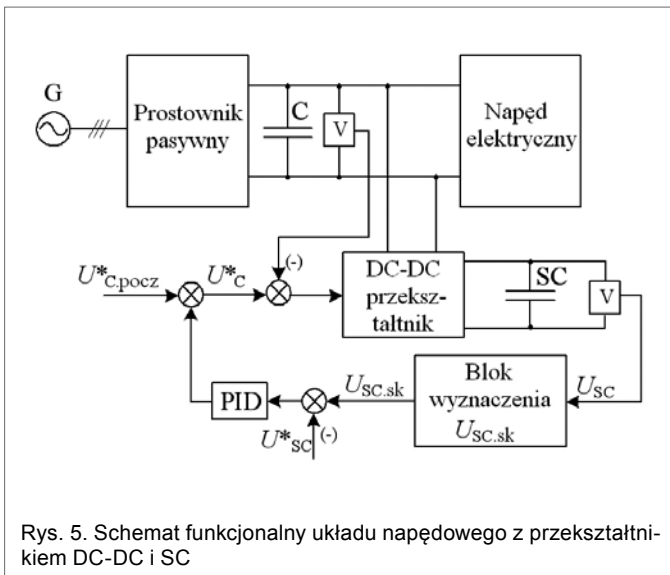
### 3. Wyniki badań symulacyjnych podstawowego układu napędowego

Na rysunku 4 są pokazane wyniki badań symulacyjno-komputerowych tradycyjnego układu (konfiguracja a na rys. 2), jako zależności następujących wskaźników energetycznych zasilania od stopnia wahania mocy  $\lambda$ : maksymalnego i minimalnego



Rys. 4. Wyniki symulacji komputerowej tradycyjnego układu (konfiguracja a na rys. 2) dla wariantów 1 (a) i 2 (b)

w okresie powtarzania  $T$ , współczynnika mocy  $\cos\phi$  pomiędzy pierwszymi harmonicznymi napięcia i prądu sieci, maksymalnego i minimalnego THD<sub>1</sub>, całkowitej za okres  $T$  sprawności układu sieć elektryczna – napęd według mocy czynnej  $\eta$ .



Analiza otrzymanych wyników pozwala sformułować kilka wniosków:

- z powodu pulsującego poboru mocy nie jest możliwe zapewnienie odpowiednich wskaźników EMC przy stosowaniu pasywnych filtrów na wejściu układu napędowego;
- oddawanie energii hamowania ( $\lambda > 0,5$ ) do opornika balastowego prowadzi do znacznego zmniejszenia sprawności układu;
- przy zasilaniu z sieci małej mocy (rys. 4 a), zwiększenie poziomu wahań mocy ( $\lambda < 0,5$ ) podwyższa nieco sprawność układu, a w przypadku sieci dużej mocy sprawność układu zmniejsza się (rys. 4 b);
- ze wzrostem  $\lambda$  napięcie obwodu DC znacznie się obniża; w przypadku wariantu 2, przy  $\lambda > 0,775$ , napięcie to spada do zera przy wartości  $P_{z,max} = P_{z,ser} / (1 - \lambda) = 8,89 \text{ kW}$ , co jest granicą maksymalnego poboru mocy dla układu z nastawianymi parametrami.

Tak więc tradycyjna konfiguracja (rys. 2 a) układu napędowego w przypadku pulsującego charakteru poboru mocy cechuje się szeregiem problemów.

#### 4. Opis modelu komputerowego układu napędowego z SC

Obiecującą alternatywą jest konfiguracja *b* na rys. 2. Dla jej prawidłowej pracy niezbędne jest zastosowanie dwukierunkowego przekształtnika DC-DC, baterii SC o potrzebnej pojemności oraz odpowiedniego układu sterującego napięciem  $U_c$  w obwodzie DC (rys. 5).

Aby przyspieszyć pracę modelu DC-DC, przekształtnik jest zamodelowany jako idealny regulowany przekształtnik mocy ze sprawnością pracy  $\eta_p$  zadaną na poziomie 0,9.

Potrzebną pojemność baterii SC określa się z bilansu cyrkulującej energii (1):

$$C_{SC} = \frac{\Delta W_c}{\eta_p (U_{SC,max}^2 - U_{SC,min}^2)},$$

gdzie  $U_{SC,max}$ ,  $U_{SC,min}$  – odpowiednio maksymalne i minimalne napięcie na SC.

Układ automatycznego sterowania napięciem powinien zapewnić w stanie ustalonym taką stałą wartość napięcia  $U_c$  na kondensatorze C w obwodzie DC napędu, żeby podczas wahań mocy pobieranej przez napęd napięcie na SC miało stałe wartości skrajne  $U_{SC,min}$  i  $U_{SC,max}$ . Oznacza to, że cyrkulująca energia  $\Delta W_c$  jest w pełni zapewniona przez SC, a z sieci zasilającej pobierana jest tylko moc stała, o wartości sumy  $P_{z,ser}$  i strat mocy w przekształtniku DC-DC. Zadane napięcie  $U_c^*$  jest zdefiniowane jako suma początkowego napięcia zadanego  $U_{c,pocz}^*$  i napięcia na wyjściu regulatora PID wartości skutecznej napięcia baterii SC.

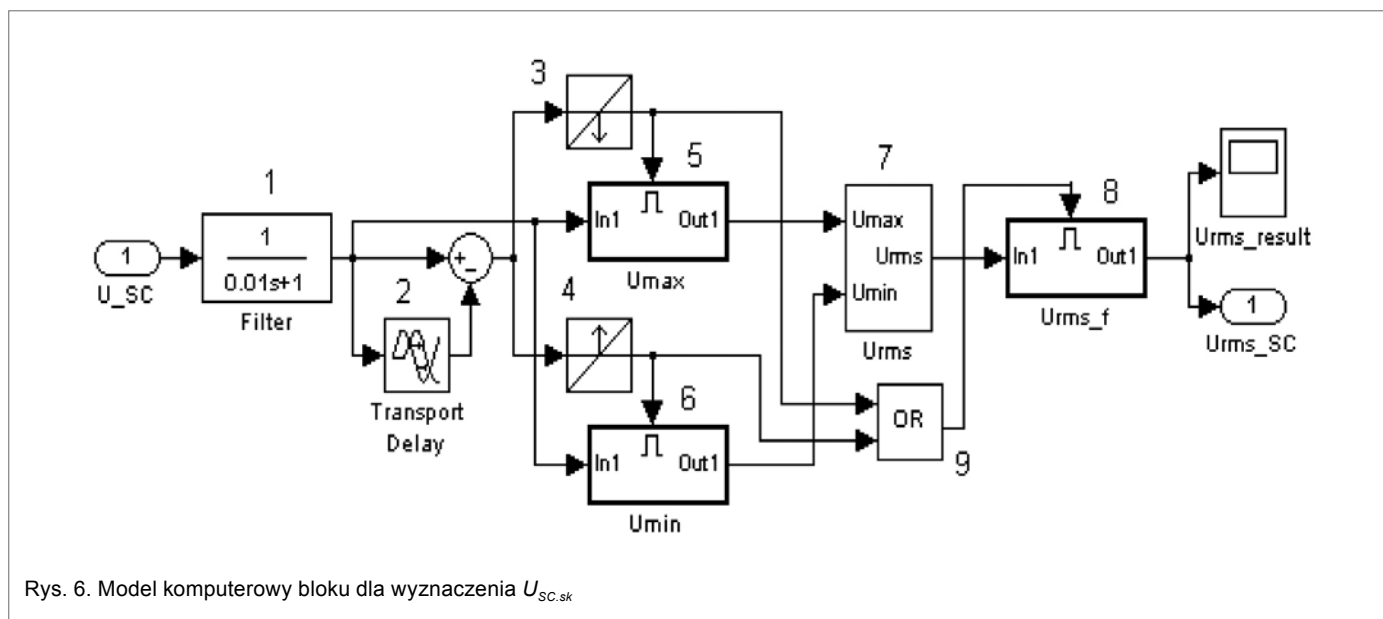
$$U_{SC,sk} = \sqrt{0,5(U_{SC,max}^2 + U_{SC,min}^2)}$$

To napięcie oblicza się w bloku, którego model komputerowy przedstawiono na rys. 6. Z pomocą bloków 2–4 znajduje się chwile czasu, w których napięcie SC osiąga swoje maksymalne i minimalne wartości, przechowywane w blokach 5 i 6. Blok 7 określa wartość skuteczną napięcia, którą zapisuje się w bloku 8 i która jest dyskretnie odnowiona na jego wyjściu po każdym osiągnięciu wartości  $U_{SC,min}$  lub  $U_{SC,max}$ .

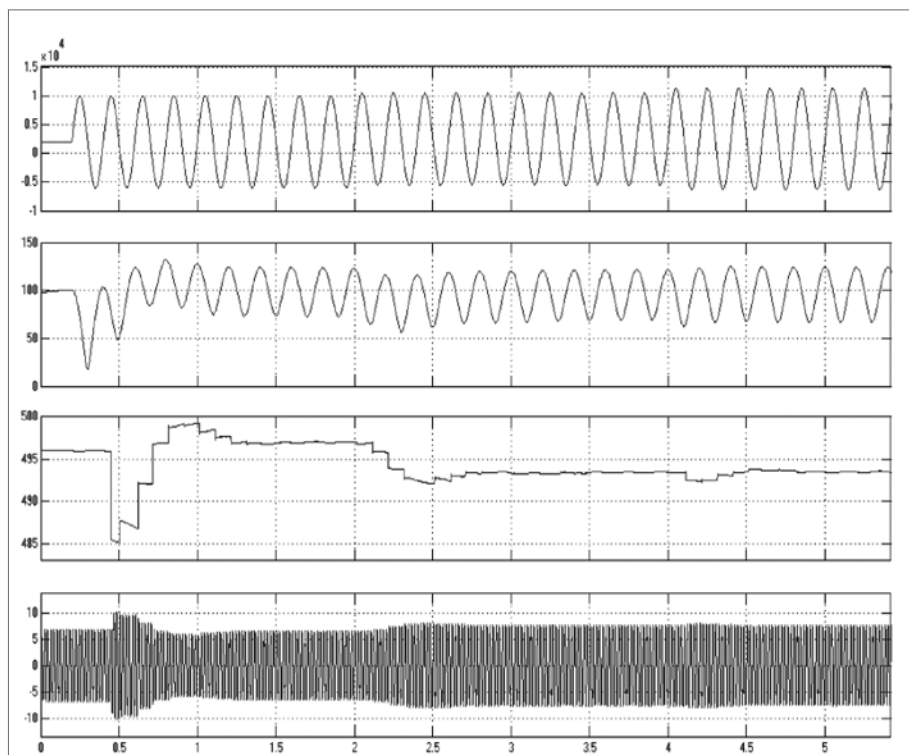
#### 5. Wyniki badań symulacyjnych układu napędowego z SC

Na rys. 7 są przedstawione przebiegi czasowe, ilustrujące pracę układu automatycznego sterowania napięciem w obwodzie DC napędu. Aby zmniejszyć czas symulacji, wybrano mały

reklama



Rys. 6. Model komputerowy bloku dla wyznaczenia  $U_{SC.sk}$



Rys. 7. Przebiegi czasowe pracy układu napędowego:

- moc czynną pobieraną przez napęd, W;
- napięcie superkondensatora, V;
- napięcie w obwodzie DC napędu, V;
- prąd fazy sieci zasilania, A

(rys. 2 a), ale otrzymane dla zaproponowanej konfiguracji układu (rys. 2 b) przedstawiono na rys. 8. Ich analiza wykazała, że w nowym układzie osiągnięto bardzo wysokie wskaźniki EMC oraz efektywności energetycznej. Symulacja pracy układu napędowego pokazała, że instalacje zasilania napędów elektrycznych z pośrednimi urządzeniami magazynowania energii elektrycznej można projektować w orientacji nie na maksymalną, a na średnią moc pobieraną. Przy tym niezależnie od stopnia wahań mocy czynnej  $\lambda$  można otrzymać stabilne i wysokie wskaźniki energetyczne pracy układu sieć elektryczna – napęd.

### Wnioski

1. Korzystanie z pośredniego urządzenia gromadzenia energii elektrycznej w postaci baterii superkondensatorów umożliwia kompleksowe zapewnienie EMC oraz poprawę efektywności energetycznej napędu z cyklicznym charakterem obciążenia.
2. Szczególnie perspektywiczne jest zastosowanie magazynowania energii elektrycznej podczas hamowania napędów, które zasilają się z sieci elektroenergetycznej o porównywalnej mocy.
3. Szybki rozwój technologii produkcji superkondensatorów i redukcja ich ceny jest podstawą ekonomicznej celowości ich stosowania w napędach elektrycznych w perspektywie średnioterminowej. Sprzyja to, oprócz efektywności energetycznej, również rozwiązywaniu zadania odzyskania

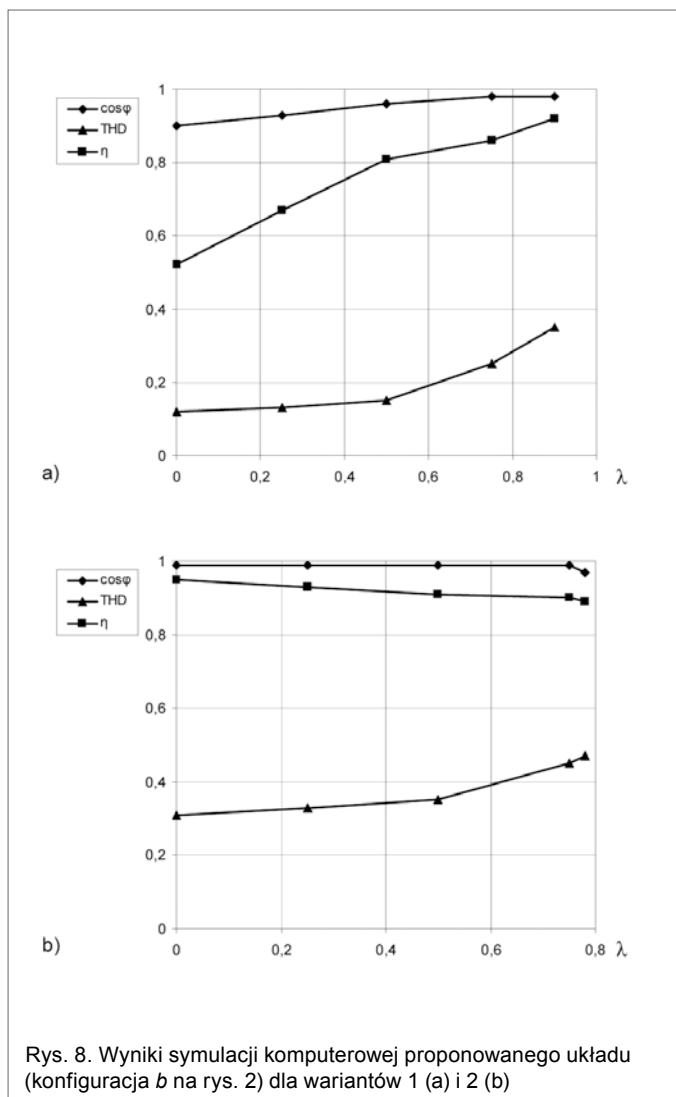
okres pulsacji mocy ( $T=0,2$  s). W chwili 0,2 s zaczyna się pulsacja mocy czynnej napędu elektrycznego ze stopniem wahań  $\lambda = 0,8$  przy  $P_{z,max} = 10$  kW.

W czasie 2 s ma miejsce zaburzenie w postaci wzrostu  $P_{z,ser}$  do 25%, a w 4 s – w postaci zwiększonej amplitudy wahań

mocy do 20%. Wykresy pokazują efektywność i dobrą dynamikę układu sterującego.

Wyniki dwóch serii eksperymentów komputerowych z parametrami początkowymi analogicznymi do tradycyjnej konfiguracji układu napędowego





Rys. 8. Wyniki symulacji komputerowej proponowanego układu (konfiguracja b na rys. 2) dla wariantów 1 (a) i 2 (b)

energii hamowania oraz zapewnienia EMC w prosty sposób – filtrami pasywnymi.

## Literatura

- [1] DOMNIN I.F., ŻEMIEROW G.G., ILINA O.A., TUGAJ D.B.: *Kompensacja pulsacji chwilowej mocy czynnej w obwodach z obciążeniem rezystywnym*. Techniczna elektrodinamika. Tem. wypuska „Problemy nowoczesnej elektrotechniki”, 6/2006, s. 36–41 (w języku rosyjskim).
- [2] ŻEMIEROW G.G., DOMNIN I.F., ILINA O.A., TUGAJ D.B.: *Efektywność energetyczna korekcji fazy prądu oraz kompensacji pulsacji mocy czynnej i biernej w trójfazowej sieci zasilającej*. Techniczna elektrodinamika, 1/2007, s. 52–57 (w języku rosyjskim).
- [3] *Limits for Harmonics Current Emissions (Equipment Input Current up to and Including 16 A Per Phase)*, IEC 61000-3-2 International Standard, 2000.
- [4] *Limits for Harmonics Current Emissions (Equipment Input Rated Current Greater than 16 A Per Phase)*, IEC 61000-3-4 International Standard, 2005.
- [5] AGUNOW A.W.: *Poprawienie kompatybilności elektromagnetycznej w odrębnych układach elektroenergetycznych ograniczonej mocy za metodą aktywnej filtracji napięcia*. Elektrotechnika, 6/2003, s. 52–56 (w języku rosyjskim).
- [6] ROUTIMO M., SALO M., TUSSA H.: *Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters*. IEEE Trans. on Power Electron, vol. 22, 2/2007, s. 636–642.
- [7] REDRIGUEZ J., DIXON J., ESPINOZA J., PONTT J., LEZANA P.: *PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art*. IEEE Trans. on Industrial Electron, vol. 52, 1/2005, s. 5–22.
- [8] IWANOW A.M., IWANOW S.A.: *Kombinowane urządzenia energetyczne z superkondensatorami – osnowa efektywnego wykorzystania paliwoenergetycznych zasobów XXI wieku*. Elektrotechnika, 12/2003, s. 2–6 (w języku rosyjskim).
- [9] NOWAK M.: *Nowe rodzaje baterii elektrochemicznych i superkondensatory – perspektywy zastosowania w energetyce*. X Międzynar. Konf. „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”, 2007, s. 18.1–18.12.
- [10] GAO L., DOUGAL R.A., LIU SH.: *Power Enhancement of an Actively Controlled Battery/ Ultracapacitor Hybrid*. IEEE Trans. on Power Electron, vol. 20, no. 1/2005, s. 236–243.

Andrzej Rusek – dr hab. inż., profesor nadzwyczajny w Zakładzie Maszyn i Napędów Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki Przemysłowej, Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej, e-mail: rusek@el.pcz.czyst.pl

artykuł recenzowany

reklama